



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO INGENIERÍA MECÁNICA



**DESARROLLO DE UN COMPUESTO HÍBRIDO DE MATRIZ EPÓXICA
CON FIBRA DE CAÑAMO Y PARTÍCULAS DE ALMEJA Y CHOLGA**

POR

Horacio Javier Veloso Martinez

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para optar al título profesional de Ingeniero Civil Mecánico

Profesor Guía:
Dra. Meylí Valin Fernández
Alexis Salas Salgado Co Patrocinante

Febrero 2024
Concepción (Chile)

© 2024 Horacio Javier Veloso Martinez

© 2024 Horacio Javier Veloso Martinez. Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento

Agradecimientos

En primer lugar, agradezco a la Universidad de Concepción por darme los conocimientos y habilidades para formarme como profesional.

A mis profesores y el departamento de ingeniería mecánica por todas sus enseñanzas.

Agradecer también a la Doctora Meylí Valin Fernández, quien ha sido mi profesora guía, por su orientación, consejos, conocimientos, su apoyo y confianza.

También a Sebastián, Raymundo y don Jose, quienes me guiaron y enseñaron sobre los métodos de elaboración y cómo trabajar en el laboratorio de materiales compuestos.

Agradezco a mis amigos y compañeros por hacer de la universidad una experiencia más amena y darme valor en tiempos difíciles.

Finalmente, a mi familia, que sin ellos nada de esto podría ser posible.

Esta memoria está dedicada a todas las personas, familia, amigos, profesores, quienes creyeron en mí y me ayudaron en su proceso y elaboración

Resumen

Los materiales compuestos son ampliamente utilizados debido a su versatilidad, tanto de sus matrices como de sus materiales de refuerzo. Dentro de estos últimos, uno que busca ser una alternativa más limpia son las conchas marinas, las cuales poseen excelentes propiedades mecánicas y son desechadas en grandes cantidades en la industria de los moluscos. Otro tipo de material de refuerzo, son las fibras naturales, las que se encuentran en abundancia dentro de la naturaleza y a menor costo que otras alternativas sintéticas. A raíz de esto, en este estudio, se tiene como objetivo determinar las propiedades mecánicas de un material compuesto de matriz polimérica, reforzado con fibras naturales y partículas de conchas marinas.

Se diseñan cuatro tipos de materiales, el primer material se compone solo de resina epóxica, el segundo se compone de una mezcla de resina epóxica y partículas de conchas marinas, el tercero se compone de resina epóxica y fibra de cáñamo en forma de tejido y el cuarto se compone de la misma forma que el anterior, con la inclusión de partículas de concha marina. Se usaron conchas de cholga y almeja en tamaños de 25 a 125 micrómetros en cantidades de 1%, 3% y 5% en base al peso de la resina. La fibra de cáñamo fue usada en forma de tejido con orientaciones perpendiculares entre sí para formar un mallado cuadrado.

La caracterización mecánica se hizo siguiendo las normas ASTM D638 y ASTM D3039 para los ensayos de tracción y la norma ASTM D790 para los ensayos de flexión. A partir de estos ensayos se obtuvo el esfuerzo máximo, porcentaje de elongación y módulo elástico. En los ensayos de tracción el mejor esfuerzo de ruptura fue obtenido por las probetas de resina-fibra-cholga 1% con un valor de 53 MPa. Este valor fue seguido muy de cerca por el resto de las probetas resina-fibra concha independiente del porcentaje de concha agregado. En los ensayos de flexión el mejor esfuerzo de ruptura fue el de las probetas resina-fibra con un valor de 82 MPa. En general el tipo de concha no mostró gran influencia en los resultados en ambos tipos de ensayos.

Palabras clave: Resina, fibra natural, material compuesto, concha marina.

Abstract

Composite materials are widely used due to their versatility, both in their matrices and their reinforcing materials. Within the latter, one that seeks to be a cleaner alternative is seashells, which have excellent mechanical properties and are discarded in large quantities in the mollusk industry. Another type of reinforcing material is natural fibers, which are found in abundance in nature and at a lower cost than other synthetic alternatives. As a result of this, in this study, the objective is to determine the mechanical properties of a polymeric matrix composite material, reinforced with natural fibers and seashell particles.

Four types of materials are designed, the first material is composed of only epoxy resin, the second is composed of a mixture of epoxy resin and seashell particles, the third is composed of epoxy resin and hemp fiber in the form of fabric, and the fourth is composed in the same way as the previous one, with the inclusion of seashell particles. Cholga and clam shells in sizes from 25 to 125 micrometers were used in amounts of 1%, 3% and 5% based on the weight of the resin. The hemp fiber was used in the form of a fabric with orientations perpendicular to each other to form a square mesh.

The mechanical characterization was done following the ASTM D638 and ASTM D3039 standards for tensile tests and the ASTM D790 standard for bending tests. From these tests, the maximum stress, percentage of elongation and elastic modulus were obtained. In the tensile tests, the best breaking stress was obtained by the 1% resin-fiber-cholga specimens with a value of 53 MPa. This value was followed very closely by the rest of the resin-shell fiber specimens, regardless of the percentage of shell added. In the bending tests, the best breaking stress was that of the resin-fiber specimens with a value of 82 MPa. In general, the type of shell did not show great influence on the results in both types of tests.

Keywords: Resin, natural fiber, composite material, seashell.

Tabla de Contenidos

Tabla de Contenidos.....	iii
Lista de Tablas	v
Lista de Figuras	vi
Glosario	viii
1 CAPÍTULO 1: Introducción.....	1
1.1 Planteamiento del problema	1
1.2 Objetivos generales y específicos.....	2
1.3 Hipótesis	2
1.4 Metodología de trabajo.....	2
1.5 Carta Gantt.....	3
CAPÍTULO 2: Marco Teórico	4
2.1 Tipos de ensayos.....	4
2.2 Moluscos de chile	9
2.3 Características estructurales de las conchas	11
2.4 Fibras naturales.....	12
2.5 Composición de las fibras naturales	14
2.6 Materiales compuestos	14
CAPÍTULO 3: Estado del Arte	15
3.1 Investigación y literatura relevante.....	15
3.2 Tratamiento de las conchas marinas	18
4 CAPÍTULO 4: Metodología.....	19
4.1 Selección de materiales	19
4.2 Selección de matriz.....	19
4.3 Selección de conchas marinas	20
4.4 Selección de fibra natural	22
4.5 Diseño de las probetas	22
4.6 Porcentajes particulado de concha en probetas de tracción y flexión	25
4.7 Infusión al vacío	29
4.8 Infusión al vacío mixta	30
4.9 Corte de placas.....	31
4.10 Fabricación de las probetas de tracción.....	32

4.11 Fabricación probetas de flexión.....	36
4.12 Ensayo de tracción según norma ASTM D3039	39
4.13 Ensayo de flexión según norma ASTM D790.....	41
CAPITULO 5: Resultados	42
5.1 Resultados prueba de precipitado	42
5.2 Resultados ensayos de tracción	42
5.3 Resultados ensayo de flexión	47
CAPITULO 6: Conclusiones	53
Trabajos Futuros	54
Referencias	55
Anexo A: Datos ensayos	58

Lista de Tablas

Tabla 3.1: Matrices utilizadas en la literatura	15
Tabla 3.2: Materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con material particulado en la literatura	16
Tabla 3.3: Resumen de materiales compuestos con matriz polimérica reforzados con fibra natural en la literatura.....	17
Tabla 3.4: Tratamiento de las conchas marinas	18
Tabla 4.1: Dimensiones espécimen tipo IV	23
Tabla 4.2: Requerimientos obligatorios de un espécimen norma ASTM D3039	24
Tabla 4.3: Dimensiones recomendadas por norma ASTM D3039	24
Tabla 4.4: Proporciones mezclas prueba de precipitado	26
Tabla 4.5: Composición probetas resina más particulado de concha.....	33
Tabla 4.6: Composición de las placas para ensayo de tracción	36
Tabla 4.7: Composición de placas para ensayo de flexión	38
Tabla 5.1: Parámetros de análisis en probetas de tracción.....	45
Tabla 5.2: Parámetros de análisis en probetas de tracción.....	45
Tabla 5.3: Parámetros de análisis en probetas de flexión	50
Tabla 5.4: Parámetros de análisis en probetas de flexión	50

Lista de Figuras

Figura 2.1: Esquema máquina de ensayo tracción	4
Figura 2.2: Curva esfuerzo-deformación	5
Figura 2.3: Esquema y DCL de una barra en flexión	6
Figura 2.4: Análisis de una barra en flexión	7
Figura 2.5: Inercia de un perfil rectangular	8
Figura 2.6: Almeja.....	10
Figura 2.7: Cholga.....	10
Figura 2.8: Diagrama de la concha y manto de una ostra perlera, mostrando una sección transversal de la concha de Pteria sterna	11
Figura 2.9: Cáñamo	12
Figura 2.10: Yute.....	13
Figura 4.1: Resina epóxica y su respectivo endurecedor	19
Figura 4.2: Carcasas de moluscos dispuestas en horno: a) Almejas b) Cholgas.....	20
Figura 4.3: Conchas durante el primer proceso de molienda: a) Almeja b) Cholgas	20
Figura 4.4: Proceso de molienda y tamizado: a) Tamizador a 125 μm b) Tamizaje a 125 μm para almeja (c) Tamizaje a 25 μm para cholga (d) Tamizaje a 25 μm para almeja	21
Figura 4.5: Particulado de Almeja recolectado a 25 μm	22
Figura 4.6: Arpillera de cáñamo.....	22
Figura 4.7: Espécimen tipo IV según norma ASTM D638.....	23
Figura 4.8: Dimensiones probeta de tracción.....	24
Figura 4.9: Dimensiones de probeta de flexión.....	25
Figura 4.10: Mezclas prueba precipitado: a) 0.5% almeja b) 0,75 % almeja c) 1% de almeja.....	26
Figura 4.11: Mezclas prueba precipitado: a) 1,5% almeja b) 3% almeja c) 5% de almeja.....	27
Figura 4.12: Mezclas prueba precipitado a) 0.5% almeja b) 0,75 % almeja c) 1% de almeja.....	28
Figura 4.13: Mezclas prueba precipitado: a) 1,5% almeja b) 3% almeja c) 5% almeja y d) 7% almeja	28
Figura 4.14: Sierra de mesa PROXXON	31
Figura 4.15: Probeta de resina para ensayo de tracción	32
Figura 4.16: Probetas con porcentaje de almeja: 1, 3 y 5 por ciento (izquierda a derecha).....	33
Figura 4.17: Probetas con porcentaje de cholga: 3 y 5 por ciento (izquierda a derecha).....	33
Figura 4.18: a) Placa RF al vacío previo al bañado en resina b) Placa bañada en resina	34
Figura 4.19: Probetas RF tracción.....	34
Figura 4.20: Probetas RFC de tracción: Numeración verde-porcentaje almeja y numeración azul-porcentaje cholga.....	35
Figura 4.21: Probeta de resina para ensayo de flexión.....	36
Figura 4.22: Probetas resina más particulado de concha: Almeja 1,3 y 5% (izquierda a derecha) ...	37
Figura 4.23: Probetas resina más particulado de concha. Cholga 1,3 y 5% (izquierda a derecha)....	37

Figura 4.24: Probeta RF para ensayo de flexión	38
Figura 4.25: Probetas RFC flexión: 1, 3 y 5 por ciento contenido particulado.....	39
Figura 4.26: Probetas RFA flexión: 1, 3 y 5 por ciento contenido particulado (izquierda a derecha)39	
Figura 4.27: Probeta de tracción terminado el ensayo	40
Figura 5.1: Graficas ensayos de tracción: a) R b) RA 1% c) RC 1% d) RA 3% e) RC 3% f) RA 5% g) RC 5%	43
Figura 5.2: Graficas ensayos de tracción: a) RF b) RFA 1% c) RFC 1% d) RFA 3% e) RFC 3% f) RFA 5% g) RFC 5%.....	44
Figura 5.3: Gráficas ensayo de tracción en relación a variación de resultados.....	46
Figura 5.4: Graficas ensayos de flexión. a) R b) RA 1% c) RC 1% d) RA 3% e) RC 3% f) RA 5% g) RC 5%	48
Figura 5.5: Graficas ensayos de flexión. a) RF b) RFA 1% c) RFC 1% d) RFA 3% e) RFC 3% f) RFA 5% g) RFC 5%	49
Figura 5.6: Gráficas ensayo de flexión en relación a variación de resultados	51

Glosario

ASTM	:	American Society for Testing and Materials
DE	:	Desviación estándar
PMC	:	Material compuesto de matriz polimérica
R	:	Resina
RA	:	Resina concha almeja
RC	:	Resina concha cholga
RF	:	Resina fibra
RFA	:	Resina fibra concha almeja
RFC	:	Resina fibra concha cholga

Símbolos

A_0	:	Área de sección transversal [mm^2]
B	:	Ancho [mm]
C	:	Distancia máxima desde el eje neutro [mm]
D	:	Espesor de probeta
E	:	Módulo de elasticidad [MPa]
F	:	Fuerza [N]
H	:	Altura [mm]
I	:	Momento de inercia [mm^4]
L	:	Largo total [mm]
l	:	Distancia [mm]
l_0	:	Distancia original [mm]
M	:	Momento flector [Nm]
P	:	Carga puntual [N]
R	:	Reacción en los apoyos [N]
R	:	Distancia entre soportes [mm]
T	:	Razón de movimiento del cabezal [mm/ min]
V	:	Fuerza cortante [N]
Z	:	Razón de tensión de fibra exterior [mm/mm/min]

Letras griegas

e	:	Deformación [mm/mm]
σ	:	Esfuerzo [MPa]

CAPÍTULO 1: Introducción

1.1 Planteamiento del problema

Los materiales compuestos cuya definición radica en ser materiales formados por dos o más componentes, han revolucionado diversas industrias al ofrecer propiedades mecánicas superiores y un peso reducido en comparación con los materiales tradicionales. Son una de las invenciones más significantes en la ciencia de materiales y estos son usados en mueblería, en paneles, en cercados, en la industria automovilística y marina, entre otros [1]. Sin embargo, su producción y disposición plantean desafíos ambientales y económicos significativos, de los cuales destaca la dependencia de recursos no renovables y procesos de fabricación intensivos en energía, lo que contribuye a la huella de carbono global y en definitiva al deterioro del medio ambiente. En este contexto, surge la idea innovadora de incorporar elementos que por separado se han utilizado en la fabricación de este tipo de materiales, aportando considerables mejoras en las propiedades mecánicas, como lo son las conchas marinas y fibras naturales. Chile, un país rico en recursos marinos, se encuentra en la situación de que una gran cantidad de moluscos terminan en vertederos sin ser aprovechados. Navarro [2] menciona como en la industria de moluscos chilena se llega a perder más del 87% de los residuos sólidos, creando enormes cantidades de material desechado. Estos moluscos podrían ofrecer una solución sostenible al convertirse en un componente valioso en la fabricación de materiales compuestos.

Las conchas marinas se componen de aproximadamente un 95% de carbonato de calcio y 5% de matriz orgánica de volumen. Se organizan en tres capas, una de periostraco, una prismática y una de nacar [2]. Dicha composición hace que presenten y puedan proporcionar excelentes propiedades mecánicas como resistencia a la tracción y flexión.

Por otra parte, las fibras naturales cuyo término es un distintivo para fibras derivadas de plantas, animales y minerales [3], fortalecerían la estructura y mejorarían la durabilidad del material resultante. También son económicas y biodegradables lo que hace que estén sustituyendo a las fibras sintéticas en varias aplicaciones [4].

Además de los beneficios técnicos y económicos, esta iniciativa contribuiría a abordar el problema de la gestión de residuos en Chile. La utilización de moluscos que de otro modo se desearían en vertederos reduciría la contaminación ambiental y promovería prácticas más sostenibles. Ahora bien, actualmente existen estudios que investigan el uso de partículas de concha marina como agregado en un material compuesto como es el caso del trabajo de Navarro [1] y también estudios que hablan de fibras naturales como refuerzo de materiales como Murugan y Kumar [5]. No obstante, no hay un estudio en profundidad sobre el uso de ambos en conjunto. Por eso, este trabajo tiene como finalidad determinar las propiedades mecánicas de un compuesto que los contenga a ambos, en específico, fibras de cáñamo y partículas de almeja y cholga, e identificar cuanto aporta cada uno a las propiedades mecánicas del material compuesto.

1.2 Objetivos generales y específicos

Objetivo general:

Desarrollar y caracterizar mecánicamente un compuesto híbrido de matriz epóxica con fibra de cáñamo y partículas de almeja y cholga.

Objetivos específicos:

- Identificar los métodos y técnicas de fabricación de materiales híbridos.
- Fabricar el compuesto híbrido con las orientaciones y proporciones definidas.
- Determinar las propiedades mecánicas a tracción y flexión del compuesto híbrido.

1.3 Hipótesis

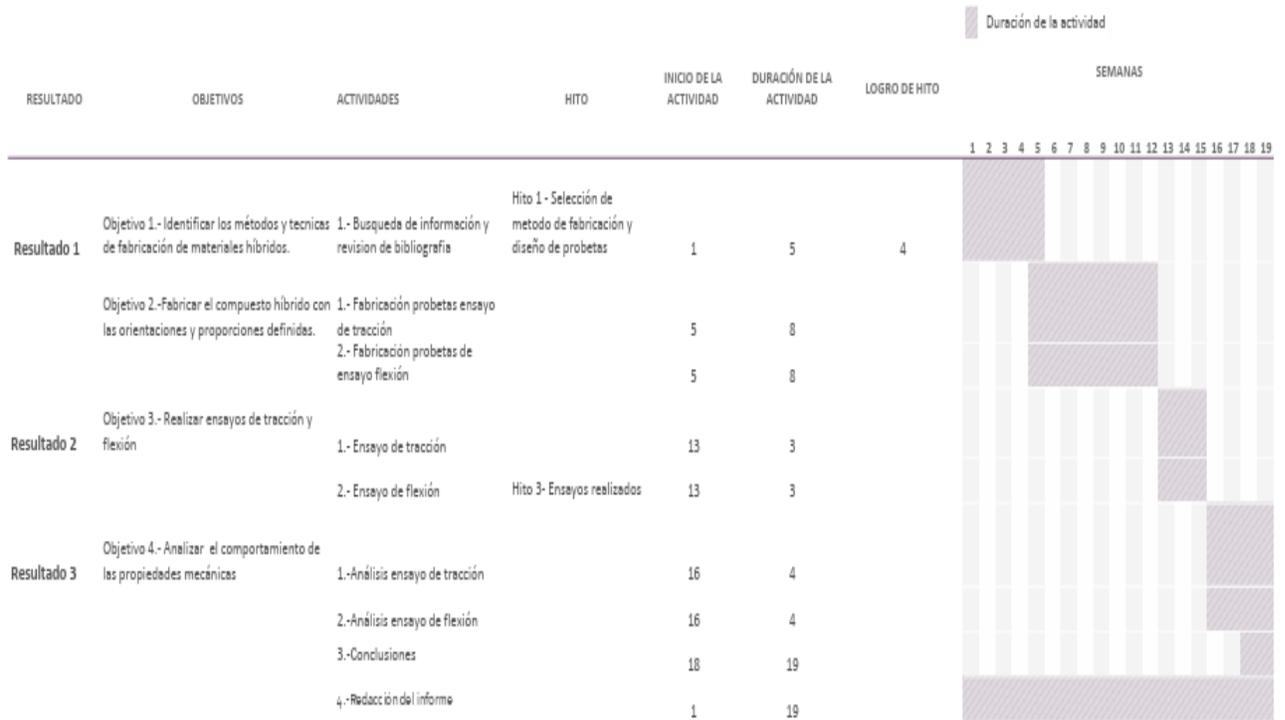
La integración de fibras naturales junto con partículas de almeja y cholga como material de refuerzo en una matriz polimérica mejora las propiedades mecánicas en comparación al material base.

1.4 Metodología de trabajo

Este estudio pretende determinar las propiedades mecánicas de un material compuesto de matriz polimérica reforzada con fibras naturales, en específico fibras de cáñamo y partículas de moluscos que corresponden a almejas y cholgas. Inicialmente, basándose en el estudio de Navarro [2] en el cual se estudian las propiedades mecánicas de un material compuesto de matriz polimérica reforzada con partículas de conchas marinas, se determina el cómo preparar los moluscos para su aplicación. Luego, a partir de los mismos estudios, se estipulan las proporciones del particulado de moluscos y se definen también las de fibra natural. Luego, se diseñarán las probetas para los ensayos de tracción y flexión, usando las normas ASTM D638 y D3039 para el primer caso, ASTM D790 para el segundo, de donde se obtendrán las propiedades del material compuesto híbrido. Finalmente se analizan los resultados y se establecen conclusiones acerca del estudio.

1.5 Carta Gantt

CARTA GANTT - DESARROLLO DE UN COMPUESTO HÍBRIDO DE MATRIZ EPÓXICA CON FIBRA DE CÁÑAMO Y PARTICULAS DE ALMEJA Y CHOLGA



CAPÍTULO 2: Marco Teórico

Este capítulo tiene como finalidad presentar descripciones generales acerca de los materiales que se utilizan y ensayos que se realizarán para el logro de los objetivos de esta investigación.

2.1 Tipos de ensayos

Para poder seleccionar un material para ciertas condiciones de servicio requerida es fundamental conocer las características más importantes y las propiedades mecánicas, lo que se obtiene mediante pruebas o ensayos, estos se utilizan para medir la forma en que un material resiste una fuerza aplicada.

2.1.1 Ensayo de tracción

El ensayo de tracción es uno de los tipos de ensayos más comunes utilizado para determinar distintas propiedades mecánicas tales como el límite de fluencia, límite de elasticidad, deformación, entre otros, de un material en específico. Dicho ensayo se rige según la norma correspondiente al material utilizado y consisten en aplicar un esfuerzo axial a una probeta normada hasta la ruptura. Generalmente son realizados en máquinas de forma similar a la mostrada en la siguiente Figura 2.1.

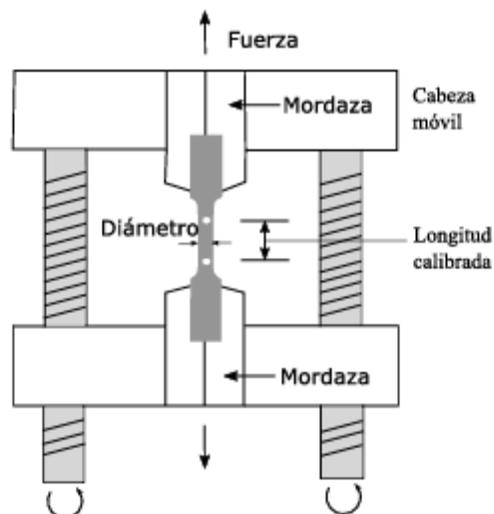


Figura 2.1: Esquema máquina de ensayo tracción [6]

En general, estos ensayos suelen resultar en una curva semejante a la mostrada en la siguiente Figura 2.2, la cual posee una primera zona con forma lineal que indica un comportamiento elástico lineal del material hasta que llega a la fluencia, seguido de una segunda zona la cual presenta una forma curva y que indica un comportamiento plástico hasta que se alcanza el punto de ruptura.

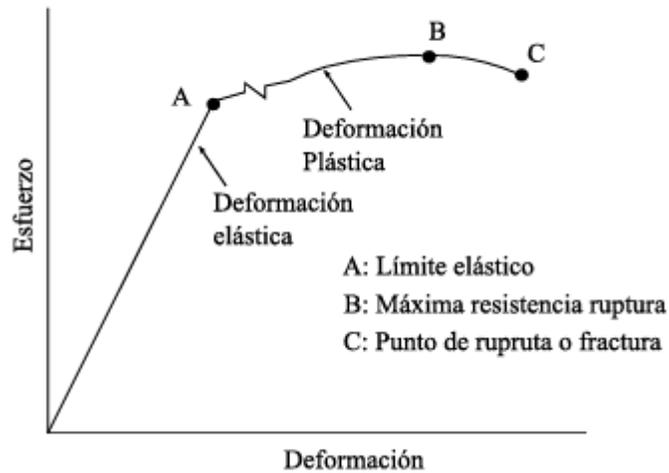


Figura 2.2: Curva esfuerzo-deformación [6]

El esfuerzo se calcula por medio de la siguiente fórmula:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (1)$$

Donde

F: Fuerza aplicada

A_0 : Área de sección transversal de la probeta antes del ensayo

La deformación se calcula mediante:

$$e = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2)$$

Donde

Δl : Variación de la longitud después de aplicarse F

l_0 : Distancia original entre marcas calibradas

El módulo de elasticidad viene dado por:

$$E = \frac{\sigma}{e} \quad (3)$$

2.1.2 Ensayo de flexión

Al igual que el ensayo de tracción, este ensayo es uno de los más habituales y también tiene como objetivo determinar propiedades mecánicas de los materiales. Algunas de estas propiedades corresponden a los esfuerzos y deformaciones por flexión, resistencia y módulo de flexión, entre otros.

Existen diferentes tipos de ensayo de flexión como los de dos, tres y cuatro puntos. Para esta investigación en particular se empleará el de tres puntos, el cual consiste en un dispositivo con dos apoyos paralelos donde va apoyada la probeta y una punta que es la que aplica la carga sobre la probeta en el punto central entre los dos apoyos. En la siguiente Figura 2.3 se logra apreciar un esquema general que representa este tipo de ensayo.

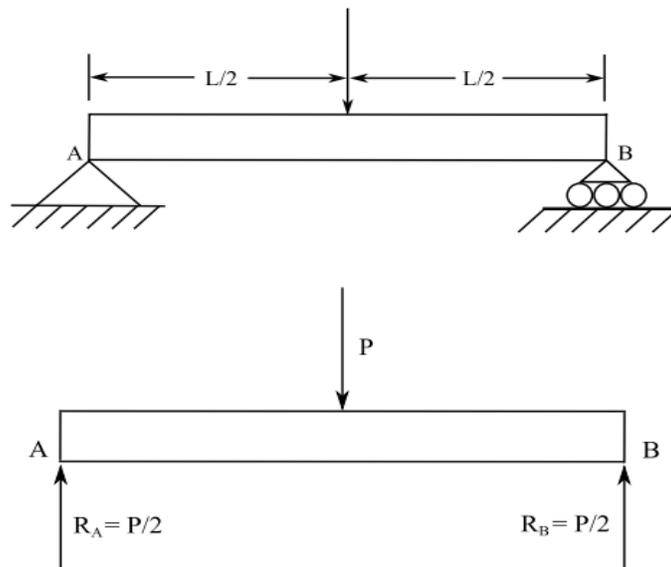


Figura 2.3: Esquema y DCL de una barra en flexión [6]

Donde

L: Largo de la barra

F: Fuerza aplicada

R: Reacción en los apoyos

A partir de este ensayo se logra determinar el esfuerzo de flexión en la barra cuyo procedimiento se muestra a continuación.

La sumatoria de fuerzas en el eje y nos entrega:

$$\begin{aligned}\sum F_y &= 0 \\ 2R &= F \\ R &= \frac{F}{2}\end{aligned}\tag{4}$$

Haciendo sumatoria de momento en el punto O mostrado en la figura, se tiene que:

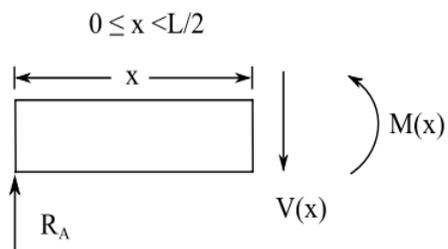


Figura 2.4: Análisis de una barra en flexión [6]

$$\begin{aligned}\sum M_O &= 0 \\ M(x) - R \cdot x &= 0 \\ M(x) &= R \cdot x\end{aligned}\tag{5}$$

En $x = L/2$

$$\begin{aligned}M &= \frac{L}{2} \cdot R \\ M &= \frac{FL}{4}\end{aligned}\tag{6}$$

El esfuerzo máximo para una viga viene dado por:

$$\sigma_f = \frac{Mc}{I} \quad (7)$$

Donde

M: Momento flector máximo de la viga

c: Distancia desde el eje neutro hasta la superficie

I: Inercia de la viga con respecto a x

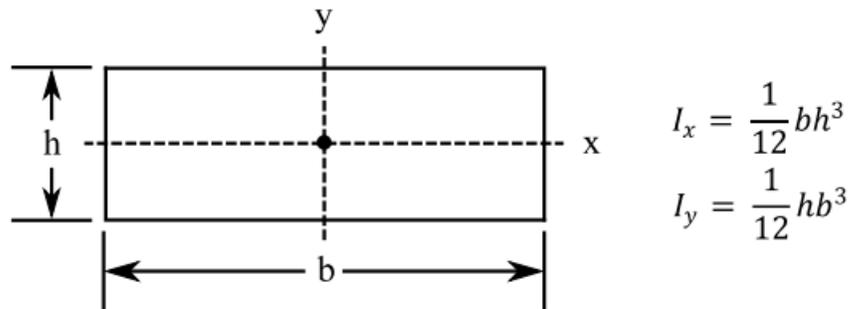


Figura 2.5: Inercia de un perfil rectangular [6]

$$\sigma_f = \frac{Mc}{\frac{1}{12}bh^3} \quad (8)$$

Con $c = h/2$

$$\sigma_f = \frac{6M}{bh^2}$$

$$\sigma_f = \frac{6M}{bh^2} \cdot \frac{FL}{4}$$

Luego, el esfuerzo máximo viene dado por:

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (9)$$

La deflexión se calcula como:

$$D = \frac{r^2 \varepsilon}{6d} \quad (10)$$

Donde

D: Deflexión en el centro de una barra [mm]

ε : Deformación unitaria en flexión

r: Distancia entre soportes [mm]

d: Espesor de la barra [mm]

Finalmente, el módulo de elasticidad en flexión está definido como:

$$E_f = \frac{r^3 m}{4bd} \quad (11)$$

Donde

E_f : Módulo de elasticidad en flexión [MPa]

r: Distancia entre soportes [mm]

b: Ancho de la barra [mm]

d: Espesor de la barra [mm]

m: Pendiente de la tangente de la parte recta inicial de la curva carga-deflexión

2.2 Moluscos de Chile

Son organismos animales acuáticos o terrestres, de cuerpo blando, generalmente dentro de una o dos conchas que los protege y poseen un pie muscular que les permite movilidad y locomoción [7]. Tienen tres características principales que los distinguen: la presencia de una estructura conocida como manto, un órgano llamado rádula (a excepción de los bivalvos) o sistema de dientes pequeños y la estructura de su sistema nervioso.

2.2.1 Almeja (*Venus Antiqua*)

Corresponde a un molusco bivalvo el cual habita en toda la costa chilena sobre los fondos arenosos desde la zona intermareal hasta las profundidades cercanas a los 40 metros. Posee un tamaño promedio de 6 centímetros y se utiliza principalmente en conservas, cocidos y congelados [8].



Figura 2.6: Almeja (Fuente: [7])

2.2.2 Cholga (*Aulacomya atra*)

Es una especie bentónica la cual generalmente vive en aguas poco profundas cercanas a distintos sustratos duros como piedras, arcilla dura, rocas y arena. Puede alcanzar tamaños de 12 centímetros de longitud y se utiliza principalmente en conservas y congelados [9].



Figura 2.7: Cholga (Fuente: [10])

2.3 Características estructurales de las conchas

Las conchas marinas están sujetas a la biomineralización la que consiste en el proceso fisiológico dinámico mediante el cual un organismo elabora una estructura mineralizada. Esta estructura entrega diferentes funciones como son: soporte de tejido, protección UV, refugios contra depredadores, almacenamiento de minerales, etc. El compuesto más común en estas estructuras es el carbonato de calcio llegando a valores de entre un 95-99% [11].

Independiente de su origen taxonómico, las conchas marinas están hechas de una superposición de capas calcificadas (entre dos a cinco) y una capa orgánica. Desde el exterior de la concha hacia su interior, se encuentra en primer lugar, una fina capa denominada periostraco. Luego de esta, existe una capa mineralizada la que se constituye de cristales alargados desarrollados de manera perpendicular a la superficie de la concha compuesta de aragonita prismática. Por último, se halla la capa de nácar aragonito [12]. De acuerdo con la literatura se tiene que estas capas poseen diferentes propiedades mecánicas entre sí, por ejemplo, la capa de nácar presenta una alta resistencia a la fractura, pero es más rígida que la capa exterior por lo que tiende a agrietarse más rápido [13].

El periostraco el cual corresponde a la capa más externa de la concha, es delgada, no calcificada y que tiene en su mayor parte materiales orgánicos. Esta cumple distintas funciones que son necesarias para la supervivencia del molusco, entre ellas, funciona como una capa impermeable que protege la concha de ácidos en el medio ambiente [14].

La capa prismática se caracteriza por su microestructura poligonal columnar, que se compone por calcita columnar y un alto contenido de matriz orgánica que dota a estos biominerales de una gran flexibilidad y dureza [15].

El nácar se compone en un 95% de mineral de carbonato de calcio (CaCO_3) en forma de aragonita, lo que le entrega dureza y rigidez. El mineral tiene la forma de tabletas poligonales microscópicas de 5 a 15 micrómetros en diámetro con espesor de 0,5 a 1 micrómetro [16].

Las pruebas realizadas por Currey y Taylor en unas 20 especies diferentes de conchas marinas revelaron un módulo elástico que varía de 40 a 70 GPa, y una resistencia a la tracción en el rango de 20-120-MPa [17].

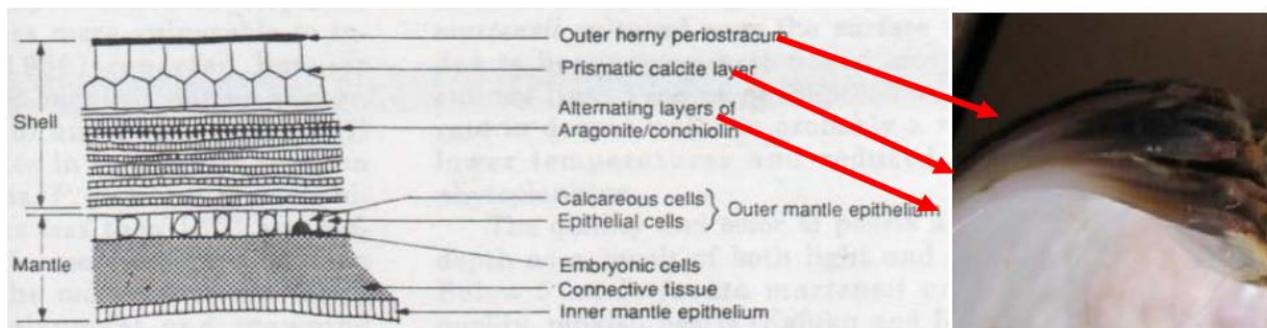


Figura 2.8: Diagrama de la concha y manto de una ostra perlera, mostrando una sección transversal de la concha de *Pteria sterna* (Fuente: [18])

2.4 Fibras naturales

Las fibras naturales tienen un uso importante dentro del rubro de la artesanía y muchas de ellas tienen también usos del tipo industrial, textil, aglomerados, materiales compuestos y en la fabricación de papel [19]. Se agrupan en tres tipos: fibras procedentes de semillas, procedentes de tallo y procedentes de hojas.

2.4.1 Cáñamo (*Cannabis sativa*)

Corresponde a una especie herbácea de la familia cannabaceae. Presentan hojas opuestas, palmeadas, compuestas, imparipinnadas con un número variable de folíolos. El tallo, lignificado, posee sección rectangular, va rodeándose conforme engrosa y puede alcanzar varios metros de altura en condiciones favorables. Su fibra tiene distintos usos donde se incluye la manufactura de cuerdas, textiles, vestimenta y la obtención de pasta de papel [20].



Figura 2.9: Cáñamo (Fuente:[20])

2.4.2 Yute (*Corchorus capsularis*)

Planta herbácea fibrosa, de la familia de las malváceas, cultivada en regiones tropicales por sus fibras las cuales se pueden usar en cuerdas, tapices, tejidos de alfombras, entre otras. Puede alcanzar una altura entre los 2 y 4 metros de altura, con un tronco rígido y fibroso de 2 centímetros de diámetro. Requiere clima cálido y húmedo. Sus hojas pecioladas, con limbo triangular de 10 a 15 centímetros de largo por 5 centímetros de ancho [21].



Figura 2.10: Yute (Fuente:[21])

2.4.3 Sisal (*Agave sisalina*)

Corresponde a un agave originario de Yucatán (México), posee un tallo corto que suele estar oculto por su roseta de hojas carnosas, rectas, largas (2 metros aproximadamente) y de color verde oscuro, las que son convexas en el envés y cóncavas en el haz, presentando una espina oscura en la punta. Su tallo frontal central puede alcanzar los 6 metros de alto. Es cultivada en regiones semiáridas y se utiliza principalmente para extraer fibra de sisal y como decoración en jardines [22].



Figura 2.11: Sisal (Fuente:[22])

2.5 Composición de las fibras naturales

La composición química varía dependiendo del tipo de fibra, pero en general las fibras contienen, celulosa, hemicelulosa, lignina y pectina. Las propiedades de estos componentes afectan las propiedades generales de la fibra. La hemicelulosa es responsable de la biodegradación, absorción de humedad y degradación térmica de la fibra. La lignina es térmicamente estable, pero es responsable de la degradación ultravioleta. El porcentaje suele variar dependiendo de la fibra, pero suelen componerse de un 60-80% de celulosa 5-20% de lignina y hasta un 20% de humedad [23].

2.6 Materiales compuestos

Una definición de material compuesto puede ser la siguiente: “Un material compuesto es un sistema de materiales constituido por una mezcla o combinación de dos o más micro o macro-constituyentes que difieren en forma y composición química y que son esencialmente insoluble entre sí” [11]. La importancia de un material compuesto radica en que dos o más materiales distintos se combinen para formar un material cuyas propiedades sean superiores o más importantes que sus compuestos por separado.

La composición del material compuesto esta dado por una fase discontinua (refuerzo), encargada de las propiedades mecánicas características del material y por una fase continua o llamada matriz que engloba y protege al material de refuerzo y entrega un material compacto. De acuerdo al tipo de refuerzo se clasifican como: granulares, materiales compuestos de fibra corta y materiales compuestos de fibra larga. A su vez las fases continuas o matrices suelen ser polimérica, cerámicas o metálicas [24].

A continuación, se describe en mayor profundidad el tipo de material compuesto a utilizar el cual es una matriz compuesta polimérica reforzada con material particulado y fibras naturales.

Los PMC son utilizados ampliamente como materiales estructurales en aplicaciones con temperaturas de servicio menor a 300°C. Algunas características ventajosas en relación con otros tipos de matrices son su relativo bajo costo, más resistentes a la corrosión y ataques químicos. Además, debido a sus propiedades como aislantes, se utilizan en artefactos eléctricos y electrónicos.

La matriz polimérica puede ser de varios tipos, entre las que destacan:

Matrices termoplásticas: comportamiento de una manera plástica y dúctil, se pueden fundir y moldear, reciclables.

Matrices termoestables: poseen buena resistencia, rigidez y dureza. Desventajas en ductilidad e impacto.

CAPÍTULO 3: Estado del Arte

En este capítulo se presenta la literatura y los datos relacionados a los tipos de matriz existentes, el uso de conchas marinas como material particulado de un compuesto y también, por último, el uso de fibras naturales como materia de refuerzo en materiales compuestos.

3.1 Investigación y literatura relevante

Dentro de la literatura e investigaciones consultadas, se presentan una serie de variables de importancia que modifican completamente los resultados esperados y que tienen un carácter necesario, el tenerlas presentes al momento de fabricar un compuesto, las que corresponden a:

- El material que tiene función de matriz
- El tipo de material que se agrega (espécimen concho marina)
- Los porcentajes de materiales y los tamaños de granulado que se agregan

Para este trabajo se utiliza una matriz polimérica debido a su facilidad de manejo, en la que se pueden moldear una gran variedad de formas y con diferentes tamaños, además de proporcionar excelentes propiedades mecánicas como resistencia, rigidez y resistencia a la corrosión. También, son las más comunes debido a su bajo costo y principios de fabricación simple. Algunos polímeros utilizados en trabajos consultados en la literatura son presentados en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Matrices utilizadas en la literatura

Referencia	Material	Densidad
Cangiotti [25]	Polipropileno	0,900 g/cm ³
Karthick et al [27]	Poly (Methyl Methacrylate) PMMA	1,18 g/cm ³
Fombuena et al [28]	Resina EPOXY	1,152 g/cm ³

Ahora bien, en relación a los materiales utilizados como refuerzo, para este trabajo se tienen dos, los que corresponden a material particulado de concha marina y la fibra natural. Para el primero, es importante saber el porcentaje en que este se agrega y el tamaño de dichas partículas. En la siguiente Tabla 3.2 se logra apreciar un resumen de diferentes trabajos en los que se estudia materiales compuestos de matriz polimérica y con particulado de concha como material de refuerzo.

Tabla 3.2: Materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con material particulado en la literatura

Referencias	Descripción	Porcentaje material de refuerzo	Tamaño de partículas	Observaciones
Maiti S. y Mahapatro P. [26]	Material compuesto polipropileno isotáctico reforzado con carbonato de calcio	5,10,15,20,23 y 30	150, 212 y 300 μm	La resistencia a la tracción se reduce al aumentar el relleno.
Karthick et al. [27]	Matriz polimetilmetacrilato con conchas marinas	2,4,6,8,12,16 y 20	Sin información	Valores de microdureza máximos al 12%.
Thais Fernandes [29]	Compuesto HDPE con residuos de cascara de molusco calcinado y modificado con silano	20	<74 nm	Mejoras en las propiedades térmicas y mecánicas.
Han et al. [30]	Efectos de los agentes de acoplamiento de titanato sobre las propiedades reológicas y mecánicas de las poliolefinas cargadas	0,1,2,3,4 y 5	0,20 μm	A medida que el contenido de carga se incrementa, la carga máxima que puede soportar la probeta justo antes de la ruptura disminuye.
Yosvani Guerra Silva [31]	Matriz poliéster reforzado con fibras de henequén cubano y partículas de zeolita cubana	3,5,7 y 10	73.3 μm	Resistencia a la tracción obtiene sus mayores valores al 10%.
Krishna et al [1]	Matriz resina epoxy Refuerzo conchas molusco y fibra de vidrio	35,40,45 (concha marina)	1700 μm	Dureza y tenacidad son mayores al 35%.
Fernández et al. [32]	Matriz resina poliéster Fibra de henequén y agregado de bentonita	3,5 y 7 (bentonita)	Sin información	El módulo de elasticidad aumenta 45,22% con inclusión bentonita.

Para el caso de las fibras naturales, los puntos importantes se centran en su porcentaje y la orientación que debe tener. En la siguiente Tabla 3.3 se tiene un resumen de diferentes estudios los cuales utilizan algún tipo de fibra natural como refuerzo de material compuesto.

Tabla 3.3: Resumen de materiales compuestos con matriz polimérica reforzados con fibra natural en la literatura

Referencia	Descripción	Porcentaje de volumen fibra natural	Orientación	Observaciones sobre mejores resultados
Abutu et al. [33]	Matriz de resina epoxy reforzado con fibra de hoja de piña, de coco y cascara de nuez de areta.	2 a 10	Perpendicular 45° entre fibras Aleatorio	Fibra de coco presentó los mejores resultados para el ensayo tracción con orientación 45° con 14,5 MPa.
Murugan y Kumar [5]	Matriz de resina epoxy con refuerzo de tiras de fibra de banana	Tiras de 4,6,8 cm 20 30 40	Sin información	Máxima resistencia a la tracción y flexión para tiras de 6 cm- 30%.
Leguísamo [34]	Matriz de resina epoxy con refuerzo de fibra de coco	25 (Tracción) 40 (Tracción) 40 (Flexión) 30 (Flexión)	90-0° 90-0-90° 90-0-90° 90-0° *Capas	Tracción: 40% y 90-0-90 con 97,06 MPa promedio. Flexión: 40% 90-0-90° con 108,94 MPa promedio.
Gupta [35]	Matriz de resina epoxy con refuerzo de fibra de banana, yute, kenaf y cáñamo (cada fibra por separado)	30	0° 90° ±25° ±67.5° ±45°	Tracción: 0° con 98,31 MPa para la fibra de banana. Flexión: para una orientación 90° con 201,61 MPa.
Kumaresan [36]	Matriz de resina epoxy LY556 con refuerzo de fibra de sisal	250 gramos	0-90° 90° ±45°	Máxima Resistencia a la tracción y flexión para 90°

3.2 Tratamiento de las conchas marinas

Para la producción de las partículas de concha se debe seguir algún tratamiento o proceso que permita obtener un material ideal con el menor número de impurezas posibles. En la siguiente Tabla 3.4 se presentan distintos procesos para tratar las conchas marinas.

Tabla 3.4: Tratamiento de las conchas marinas

Referencias	Procedimiento
Deepak et al [37]	El polvo de concha artesanal fue obtenido de un vendedor local en Chennai y fue finamente molido hasta un tamaño de 50-150 micrones usando molienda con bolas.
Chris-Okafor [38]	Las conchas de caracoles fueron obtenidas de un mercado local de Onitsha del sur, Nigeria. Las conchas fueron lavadas con agua limpia para remover contaminantes y secadas al sol durante tres días. Luego, fueron aplastadas, molidas y tamizadas hasta que se obtuvo un tamaño de partículas de 83 micrones.
Abutu et al [33]	Las conchas fueron lavadas con jabón y detergente, limpiadas usando una pieza de tela y fueron secadas en un horno a una temperatura de 150° Celsius. Luego, con el uso de un mortero y un pilón fueron aplastadas. Finalmente, fueron molidas y tamizadas hasta un tamaño de 125 micrómetros.
Karthick et al. [27]	Las conchas inicialmente fueron aplastadas en partes más pequeñas mediante el uso de un martillo. Luego, estas fueron transferidas a un molino de bolas donde fueron molidas hasta alcanzar el tamaño de unos pocos nanómetros. El polvo obtenido fue secado durante tres horas para remover rastros de humedad.

CAPÍTULO 4: Metodología

A continuación, se muestran los diferentes procesos para caracterizar un material compuesto reforzado con partículas de conchas marinas chilenas y fibra natural. En este capítulo se describe la selección del material a utilizar, el diseño de las muestras a ensayar, la fabricación de las probetas y finalmente la realización de los ensayos.

4.1 Selección de materiales

La selección de los materiales se realiza en base a los objetivos del proyecto, a los estudios y análisis realizados en investigaciones anteriores, a la disponibilidad del mercado y al alcance del trabajo. Principalmente consiste en seleccionar la resina que sirve de matriz polimérica y los materiales de refuerzo, ya sea el tipo de concha de molusco chileno y la fibra natural.

4.2 Selección de matriz

Tras varios análisis, revisiones bibliográficas y posibilidades existentes, se decide optar por una matriz polimérica termoestable debido a su gran utilidad y principalmente por sus propiedades mecánicas, como por el ejemplo la resistencia. Dado a esto, se decide utilizar una resina epóxica la cual se encuentra disponible en el laboratorio de materiales compuestos de la Universidad, como también comercialmente dentro de la ciudad.



Figura 4.1: Resina epóxica y su respectivo endurecedor

4.3 Selección de conchas marinas

Dentro de la gran cantidad de moluscos presentes en Chile, se decide utilizar la concha de dos especies. Esta selección se realiza considerando la duración del proyecto, la cantidad de producción del molusco actualmente, la disponibilidad y la importancia que representan estos moluscos en la industria conservera, congelados, etc. De esta manera se selecciona como material de refuerzo Almeja (*Venus antiqua*) y Cholga (*Aulacomya ater*). Las conchas fueron recopiladas de la vega monumental de la ciudad de Concepción. Como solo se necesita la carcasa de los moluscos, estas son separadas de su cuerpo blando, para posteriormente ser raspadas y lavadas con agua a fin de que no queden restos. Una vez obtenidas las carcasas limpias, se disponen en un horno como en la Figura 4.2 a una temperatura de 100°C durante una hora para quitar cualquier rastro de humedad presente en ellas.



Figura 4.2: Carcasas de moluscos dispuestas en horno: a) Almejas b) Cholgas

Luego, se da paso a moler las conchas. Primero se envuelven en manteles y con un martillo se machacan. De esta manera se obtienen las conchas mostradas en la siguiente Figura 4.3.



Figura 4.3: Conchas durante el primer proceso de molienda: a) Almeja b) Cholgas

Como interesa que el tamaño del particulado de concha marina se encuentre a 25 micras, se realiza un segundo proceso de molienda en el cual se hace uso de una máquina procesadora de alimentos y tamizadores de mesh 120 y mesh 500 respectivamente, para lograr el objetivo.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.4: Proceso de molienda y tamizado: a) Tamizador a 125 µm b) Tamizaje a 125 µm para almeja (c) Tamizaje a 25 µm para cholga (d) Tamizaje a 25 µm para almeja



Figura 4.5: Particulado de Almeja recolectado a 25 μ m

4.4 Selección de fibra natural

Como ya sabemos, existen distintos tipos de fibras, pero los criterios para escoger son la disponibilidad comercial y una forma ideal de uso (algún tipo de mallado). La que cumple con lo anterior corresponde a la arpillera de cáñamo, la que se muestra en la Figura 4.6.



Figura 4.6: Arpillera de cáñamo

4.5 Diseño de las probetas

Seleccionados los materiales que componen el material compuesto, se da paso al diseño de las probetas según la norma y ensayo correspondiente. Es importante recalcar que este estudio contempla 4 tipos de materiales, resina (R), resina más concha almeja-cholga (RA o RC), resina-fibra (RF), resina-fibra-concha (RFA o RFC).

4.5.1 Probetas para ensayo de tracción

Las probetas de resina (R) y resina-particulado (RA o RC) están diseñadas bajo la norma ASTM D638, en el caso de plásticos no rígidos se hace uso una probeta tipo IV como la que se muestra en la Figura 4.7.

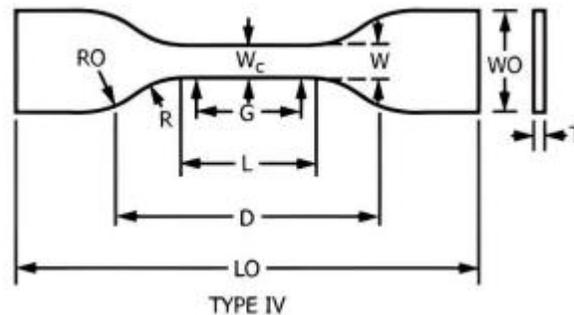


Figura 4.7: Espécimen tipo IV según norma ASTM D638

La cual posee las siguientes dimensiones mostradas en la Tabla 4.1 para una probeta de 3.2 mm de espesor.

Tabla 4.1: Dimensiones espécimen tipo IV

Distancia	Medida [mm]
W	6
L	33
WO	19
LO	115
G	25
D	65
R	14

Las probetas RF y RFA-RFC se encuentran bajo la norma ASTM D3039, pues por recomendación de la norma ASTM D638, esta es más adecuada para medir las propiedades mecánicas de materiales compuestos con una matriz de resina reforzada con fibras continuas o discontinuas. En la siguiente Tabla 4.2 se encuentran los requerimientos que se deben cumplir en las probetas a ensayar y en la Tabla 4.3 se ven las medidas que recomienda la norma.

Tabla 4.2: Requerimientos obligatorios de un espécimen norma ASTM D3039

Parámetro	Requerimiento
Largo mínimo	Agarre+2 veces el ancho+ distancia del extensómetro
Forma	Sección rectangular constante
Espesor del espécimen	Según se requiera
Ancho del espécimen	Según se requiera

Tabla 4.3: Dimensiones recomendadas por norma ASTM D3039

Orientación de la fibra	Ancho [mm]	Largo total [mm]	Espesor [mm]
Balanceada y simétrica	25	250	2,5
Aleatoria y discontinua	25	250	2,5
0° unidireccional	15	250	1
90° unidireccional	25	175	2

Dado que en investigaciones anteriores se menciona una reacción inesperada por parte del particulado de concha sobre la resina que dificulta el uso del primer método de fabricación, se decide utilizar la siguiente geometría, la cual corresponde a una probeta de 125 mm de largo, 25 mm de ancho y 2,5 mm de espesor. La geometría se logra apreciar en la siguiente Figura 4.8.

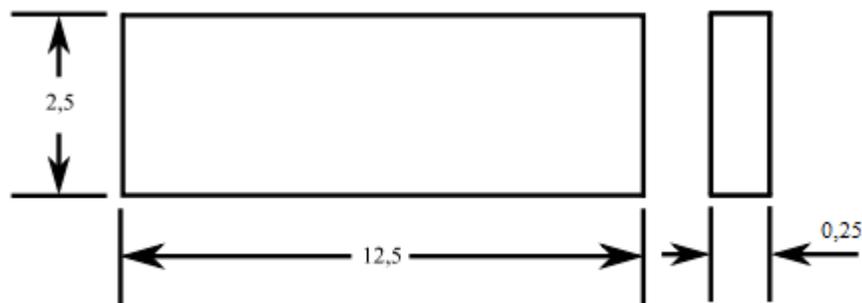


Figura 4.8: Dimensiones probeta de tracción

4.5.2 Probetas para ensayo de flexión

La totalidad de los materiales previamente mencionados caen bajo la norma ASTM D790, el que se conoce comúnmente como en ensayo de flexión en tres puntos. Dicho ensayo contempla materiales plásticos rígidos y semirrígidos, además de materiales compuestos reforzados de fibra larga.

La norma especifica que el ancho de los especímenes no debe exceder un cuarto de la distancia entre soportes para especímenes con un espesor mayor a 3,2 mm. Especímenes de 3,2 mm o menor espesor deberá tener un ancho igual a 12,7 mm. El espécimen debe ser lo suficientemente largo para permitir que sobresalga en cada extremo al menos el 10% de la distancia entre soportes, pero en ningún caso deberá ser menor a 6,4 mm en cada extremo [39]. Tomando todo lo anterior en consideración, se diseñó una probeta que tenga 127 mm de largo, 12,7 mm de ancho y 3 mm de espesor como la que se muestra en la Figura 4.9.

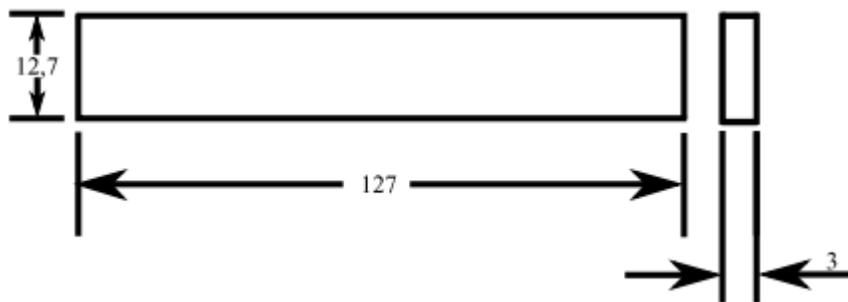


Figura 4.9: Dimensiones de probeta de flexión.

4.6 Porcentajes particulado de concha en probetas de tracción y flexión

Para la elaboración de las distintas probetas, ya sea para los ensayos de tracción y flexión se realizó en primer lugar, una prueba de precipitado en la cual se trabaja con los materiales que conforman la matriz del material compuesto, es decir, el polímero que para en este caso es la resina, junto con las partículas de concha marina. Esta prueba consiste en realizar mezclas de dichos materiales sin endurecedor y con distintas proporciones de concha marina, luego de esto, se hacen pasar por la máquina desgasificadora para eliminar las burbujas presentes al interior de las mezclas. Esto último se realiza de forma cronometrada, es decir, se toma la hora desde que salen de la máquina, para luego pasado 24 horas, realizar una supervisión para cada mezcla y determinar cuáles generan un precipitado, el que, si es significativo, restará la mezcla con su respectiva proporción para la posterior fabricación de probetas.

Las proporciones de las mezclas analizadas en la prueba de precipitado se muestran en la siguiente Tabla 4.4.

Tabla 4.4: Proporciones mezclas prueba de precipitado

Mezclas	
Resina [%]	Partículas de concha [%]
99,5	0,5
99,25	0,75
99	1
98,5	1,5
97	3
95	5
93	7

En las siguientes figuras 4.10 y 4.11 se observan las mezclas una vez preparadas y realizado su paso por la máquina desgasificadora.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.10: Mezclas prueba precipitado: a) 0.5% almeja b) 0,75 % almeja c) 1% de almeja

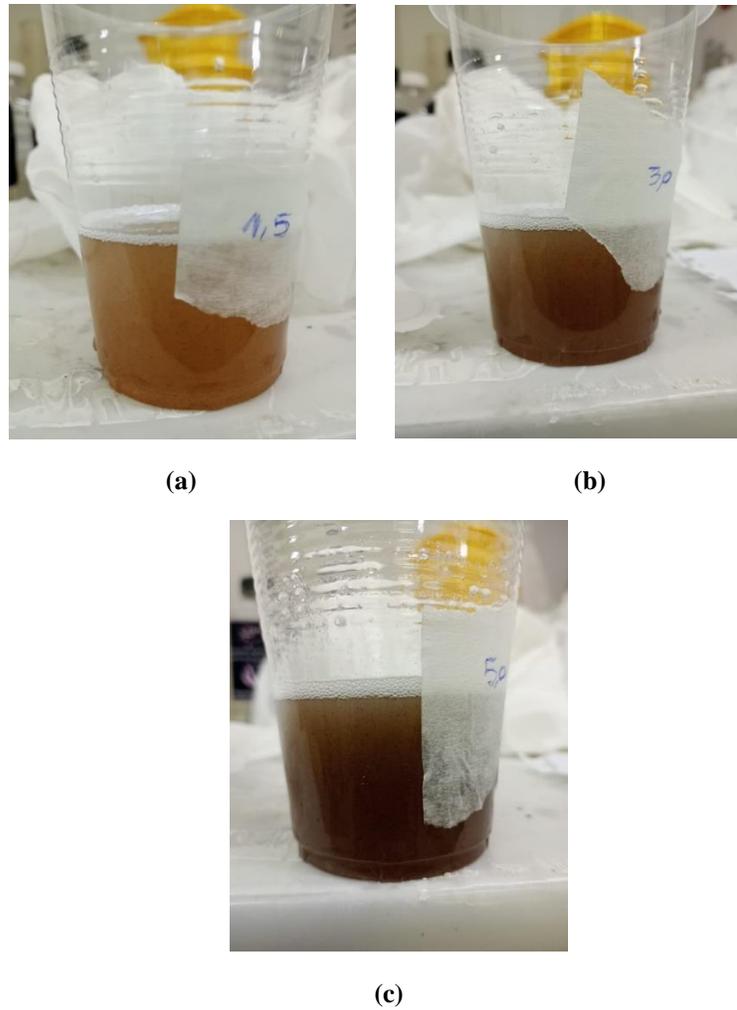
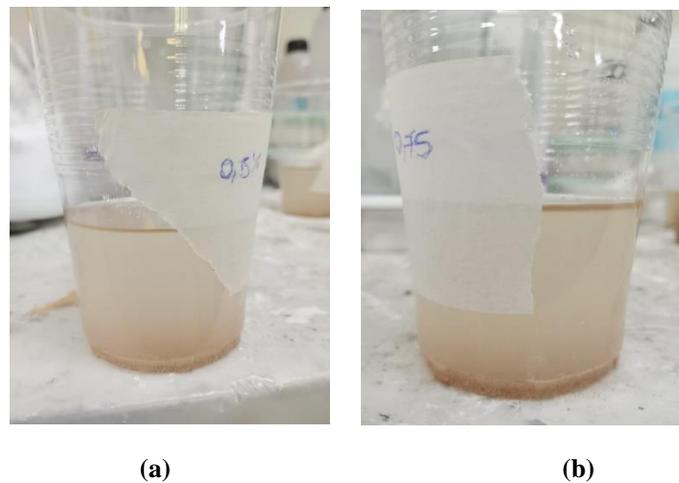


Figura 4.11: Mezclas prueba precipitado: a) 1,5% almeja b) 3% almeja c) 5% de almeja

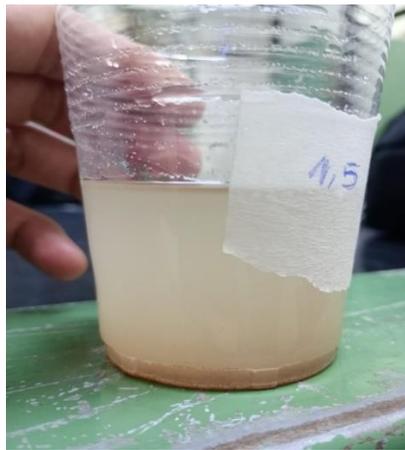
En las siguientes figuras 4.12 y 4.13 se muestran las mezclas analizadas una vez transcurridas 24 horas.



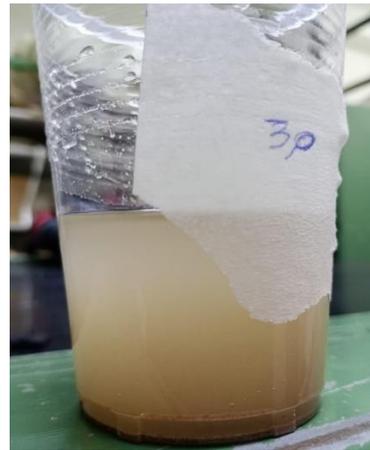


(c)

Figura 4.12: Mezclas prueba precipitado a) 0.5% almeja b) 0,75 % almeja c) 1% de almeja



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.13: Mezclas prueba precipitado: a) 1,5% almeja b) 3% almeja c) 5% almeja y d) 7% almeja

4.7 Infusión al vacío

Mediante esta técnica se elaborarán las probetas RF. El procedimiento por el que se debe regir para obtener una correcta infusión al vacío es el siguiente:

- Cortar fibra de refuerzo y la cantidad de capas a utilizar
- Cortar 2 trozos de “mosquitero” que sean del mismo ancho de la fibra de refuerzo y 2 cm extra de largo. Debe tenerse la precaución de que el “mosquitero” sea cortado en la misma dirección que el “filamento” negro que este posee y que, además, el lado más largo de la fibra coincida con la dirección de este “filamento”. Esta tela cumple el rol de guiar la resina a lo largo del proceso.
- Cortar 2 trozos de peel ply que sean 3 cm extra de largo por lado del “mosquitero” anteriormente cortado. Esta tela facilita la separación entre la placa elaborada y el mosquitero.
- Abrir la carcasa portafiltro y quitar la manguera con residuos de resina conectada de un procedimiento anterior.
- Inspeccionar que el recipiente de resina dentro del portafiltro aún tenga el espacio suficiente para la realización de un nuevo proceso de fabricación, de no ser así reemplazar por uno nuevo.
- Cortar e introducir una nueva manguera (1 metro aproximadamente) en el portafiltro hasta que se encuentre al interior del recipiente de resina, con el debido cuidado de que este último, no se encuentre a una altura donde la manguera se vea sumergida en la resina que vendrá del proceso. Lo anterior funciona como manguera extractora de resina.
- Cortar un nuevo trozo de manguera (0.5 metro aproximadamente). La cual servirá como manguera por la cual entra la resina al molde inducido al vacío.
- Limpiar estación de trabajo con diluyente acrílico y espátula de tal manera que quede libre de restos o desechos de un proceso anterior.
- Con la ayuda de masking tape trazar un perímetro con el tamaño de las fibras de refuerzo cortadas.
- Cubrir con cera desmoldante el perímetro anteriormente trazado. Esto con la finalidad de un desmolde más fácil al terminar el proceso. Dejar secar unos minutos y luego retirar el masking tape.
- Fijar uno de los trozos de “mosquitero” sobre la zona marcada, lo que puede ser ayudado con un trozo de cinta selladora.
- Situar un trozo de peel ply sobre el “mosquitero”.
- Situar las capas de fibra de refuerzo.
- Situar el trozo de peel ply restante.
- Situar el trozo de “mosquitero” restante.
- Emplear la cinta selladora para marcar un perímetro alrededor del material puesto sobre la estación de trabajo.
- Enrollar la cinta selladora alrededor de las mangueras anteriormente cortadas y posicionarlas en la estación de trabajo.
- Cortar un film plástico que sea aproximadamente 4 cm más largo por lado al perímetro denotado por la cinta selladora.
- Retirar el plástico de la cinta selladora para luego comenzar a pegar el film plástico un lado a la vez.

- Presionar las uniones entre el cinta selladora y film plástico con el debido cuidado de no romper este último. Poner atención en las esquinas, la parte de las mangueras y cualquier otro lugar en el que pudiera existir rastro de fuga del vacío.
- Revisar que las válvulas de paso se encuentren cerradas y luego encender la bomba que creará el vacío hasta que se llegue a una presión de -25 bar.
- Empleando un caimán boca de pato bloquear la manguera por la cual ingresara la resina.
- Abrir válvula de paso para escuchar posibles fugas entre el film plástico y la cinta selladora.
- Presionar con el debido cuidado los lugares donde existan las eventuales fugas para terminar de sellar el sistema. Una vez que se dejen de escuchar, se cierra la válvula de paso y emplear otro caimán para sellar la manguera de extracción.
- Preparar resina.
- Situar la resina preparada en la desgasificadora y dejarla por 5 minutos para poder eliminar las burbujas que se encuentren dentro de ella.
- Situar la manguera de ingreso dentro del recipiente donde se encuentra la resina, con el cuidado de que la manguera no salga a superficie una vez sumergida.
- Liberar el caimán boca de pato colocado en la manguera de ingreso para dar inicio al paso de resina.
- Liberar el caimán de la manguera extractora.
- Abrir válvula de paso.
- Esperar a que toda la placa se bañe en resina.
- Al momento en que ya no salgan burbujas por la manguera extractora y quede poco contenido de resina se sellan ambas mangueras con los caimanes boca de pato.
- Dar reposo a la placa formada durante 24 horas.
- Desmoldar.

4.8 Infusión al vacío mixta

Este procedimiento es el que se implementara para la fabricación de probetas RFA y RFC, es análogo al mencionado en el punto anterior, pero se diferencia en la forma en cómo se impregna la fibra con resina. Como la mayoría del procedimiento fue explicado en el punto anterior, a continuación, solo se explicará el proceso de impregnación de resina en la fibra.

- De la misma manera que el proceso anterior, en la base se disponen las capas de mosquitero y peel ply respectivamente.
- Con una brocha pasar una capa de resina al peel ply.
- Situar una capa de fibra.
- Haciendo uso de un rodillo, aplanar la capa de fibra para que esta quede libre de pliegues y asegurar que la capa quede bien compactada al peel ply.
- Pasar una capa de resina con la brocha asegurándose que toda la fibra quede empapada.
- Situar una capa de fibra.
- Emplear el rodillo.
- Pasar una capa de resina.
- Repetir lo anterior hasta que todas las capas de fibras empleadas se encuentren empapadas en resina.

- Situar capa de peel ply y mosquitero.
- Situar film plástico.
- Continuar con el proceso de extracción de resina según se menciona en la sección anterior.

4.9 Corte de placas

Del proceso de infusión se obtiene una placa del material en bruto, la cual debe ser cortada para la obtención de probetas. Los cortes son realizados con la sierra de mesa Proxxon mostrada en la Figura 4.14 disponible en el laboratorio de materiales compuestos de la Universidad.



Figura 4.14: Sierra de mesa PROXXON

A causa de la dureza de las placas RF y RFC debe seguirse un procedimiento para lograr cortes que se asimilen tanto como sea posible al de las normas. Dicho procedimiento es el siguiente:

- Trazar sobre las placas las dimensiones de las probetas teniendo en cuenta que existirá pérdida de material entre las probetas debido al corte de la sierra.
- Situar la sierra en un lugar abierto (aire libre) con buena ventilación de tal manera que no se vea encerrado con el material particulado.
- Emplear elementos de protección ocular para prevenir el caso de un posible rompimiento de la sierra o salto del material que se esté cortando.
- Hacer uso de mascarilla para evitar inhalación del material particulado originado por el corte.
- Disponer la altura de la sierra al mínimo posible.
- Situarse a una distancia prudente de tal manera que no se esté muy cerca de la sierra y tampoco muy alejado como para no poder manipular de buena forma la placa.
- Primero se deberá cortar el exceso de material, por lo que se debe dar prioridad a esos cortes.
- Encender la sierra de mesa.
- Realizar los cortes con una velocidad constante de movimiento de la placa siguiendo las líneas anteriormente trazadas intentando de mantener una línea recta uniforme. (Importante: el primer corte será quien “guiara” los siguientes cortes, por lo que, si este se desvía de las líneas trazadas, los siguientes cortes corren peligro de desviarse también).

- Repasar el corte 2 veces.
- Incrementar la altura de la sierra ligeramente.
- Repasar el corte 2 veces.
- Este proceso deberá ser repetido la cantidad de veces necesaria hasta que la sierra sea capaz de cortar a través de la placa completamente.
- Para el resto de la placa debe seguirse el mismo procedimiento hasta que se obtengan las probetas necesarias.

4.10 Fabricación de las probetas de tracción

4.10.1 Probetas de resina

Las probetas de resina están hechas 100% de epóxica con lo que para fabricarlas solo se requiere de un vaso donde preparar, un palo de helado para revolver, una balanza para pesar la resina y una desgasificadora (máquina que a través del ultrasonido elimina las burbujas al interior de la resina). Además, el laboratorio de materiales compuestos de la Universidad cuenta con moldes tipo IV para su empleo.

Primero se preparan en un vaso 50 ml de resina con 25 ml de endurecedor, ya que se utiliza una relación 2 a 1. Luego, se revuelve entre 4 a 5 minutos para obtener una mezcla homogénea y se sitúa en la desgasificadora durante 5 minutos para eliminar la mayoría de las burbujas en la resina. Posteriormente se procede a verter la resina en los moldes y se deja endurecer por 24 horas. Por último, las probetas se les hace acaba superficial con lija para aplanar curvaturas. Las probetas se pueden observar en la Figura 4.15.



Figura 4.15: Probeta de resina para ensayo de tracción

4.10.2 Probetas RA y RC

Se fabrican de la misma manera que las probetas anteriores, salvo que, para éstas, el particulado de concha corresponde al 1, 3 y 5 % en peso de la probeta. Para lo anterior pesamos la cantidad respectiva de particulado y se realiza la mezcla durante a lo menos 3 minutos con un palo de helado antes de proceder a dejarla en la máquina desgasificadora.



Figura 4.16: Probetas con porcentaje de almeja: 1, 3 y 5 por ciento (izquierda a derecha)



Figura 4.17: Probetas con porcentaje de cholga: 3 y 5 por ciento (izquierda a derecha)

Tabla 4.5: Composición probetas resina más particulado de concha

Porcentaje de concha	Resina [g]	Endurecedor [g]	Concha [g]
1%	60	30	0,9
3%	60	30	2,8
5%	60	30	4,7

4.10.3 Probetas RF

Las probetas RF se componen de una mezcla de resina epóxica y capas de arpillera de cáñamo, las que son fabricadas a través del proceso de infusión al vacío y cortadas según como se explicó anteriormente. Los materiales que se requieren para crear una de estas placas son 180 gramos de resina epóxica, 90 gramos de endurecedor, 4 capas de 29x15 cm de arpillera de sisal y todos los materiales que incluyen el método de infusión al vacío. En la Figura 4.18 se logra apreciar cómo se ve la fabricación de una placa por medio del método de infusión al vacío, y en la Figura 4.19 se ve una probeta RF obtenida y cortada de la placa.

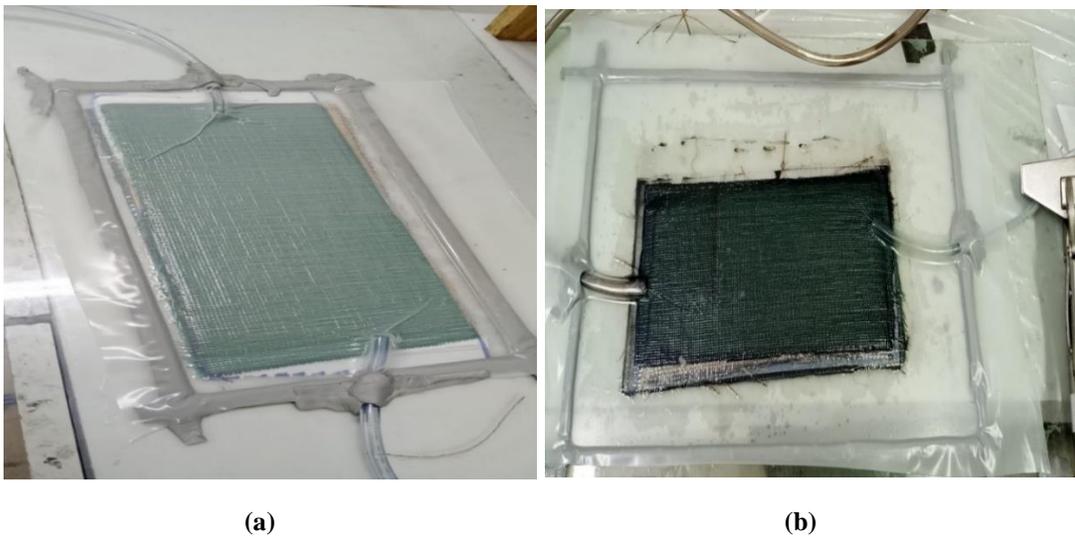


Figura 4.18: a) Placa RF al vacío previo al bañado en resina b) Placa bañada en resina



Figura 4.19: Probetas RF tracción

4.10.4 Probetas RFA y RFC

En la elaboración de este tipo de probetas se empleó el método de infusión al vacío mixto, pues dado al análisis de investigaciones anteriores, el agregar particulado de concha a la mezcla de resina presenta distintos problemas como:

- Efecto catalizador no esperado sobre la resina, haciendo que esta se endureciera más rápido de lo normal, en recipientes de dimensiones semejantes a un vaso plástico estándar. Una alternativa para reducir este efecto, es emplear un envase más amplio de tal manera que la altura de la resina sea mínima, pero esto hace difícil implementar el método de infusión al vacío, pues la manguera necesita estar sumergida en la resina en todo momento durante el proceso.
- Las partículas de conchas son filtradas por las capas de fibras y, ya que la infusión al vacío mueve la resina desde un extremo a otro, se logra una muy mala distribución, al grado que esto es visible con el cambio de color en la placa.
- Pérdida de resina mediante la infusión al vacío lo que implica una menor cantidad de concha en las placas, y por consiguiente en las probetas.

El método de infusión al vacío mixto soluciona o aminora en gran cantidad los problemas mencionados, pues, disminuye la pérdida total de resina en el proceso, es posible usar un recipiente más amplio para la resina, el efecto de filtrado se reduce, ya que la resina no necesita desplazarse completamente a través de las capas de fibra y otorga una mejor distribución de las partículas de concha.

Ahora bien, al tener definido el método, se procede a la fabricación de las placas, las que se componen de resina, varias capas de fibra de cáñamo (mismas dimensiones que las RF) y cierta cantidad de cholga o almeja, la que corresponde a un porcentaje de masa de una probeta RF.



Figura 4.20: Probetas RFC de tracción: Numeración verde-porcentaje almeja y numeración azul- porcentaje cholga

Tabla 4.6: Composición de las placas para ensayo de tracción

Porcentaje de concha	Resina [g]	Endurecedor [g]	Concha [g]	Capas de fibra
1%	120	60	1,8	4
3%	120	60	5,6	4
5%	120	60	9,5	4

4.11 Fabricación probetas de flexión

La forma de elaboración para estas probetas es análoga al de las probetas de tracción, por lo que solo se mencionara brevemente la elaboración de estas.

4.11.1 Probetas de resina

Estos especímenes fueron hechos con el apoyo de un molde disponible en el laboratorio de materiales compuestos de la Universidad. Se utilizaron 50 gramos de resina y 25 gramos de endurecedor para elaborar 5 probetas, además se utiliza lija para mejorar acabado superficial. Las probetas se pueden observar en la siguiente Figura 4.21.



Figura 4.21: Probeta de resina para ensayo de flexión

4.11.2 Probetas de resina más particulado de concha

Se sigue el mismo procedimiento que para las probetas de resina más particulado en tracción, con iguales consideraciones y porcentajes en su composición.



Figura 4.22: Probetas resina más particulado de concha: Almeja 1,3 y 5% (izquierda a derecha)



Figura 4.23: Probetas resina más particulado de concha. Cholga 1,3 y 5% (izquierda a derecha)

4.11.3 Probetas RF

Se hacen de igual forma que las probetas RF de tracción, con la diferencia que para éstas se ocupan 6 capas de arpillera de sisal de 12x15 cm. En la Figura 4.24 se logra apreciar las probetas de flexión ya cortadas.



Figura 4.24: Probeta RF para ensayo de flexión

4.11.4 Probetas RFA y RFC

Estas probetas fueron hechas por medio del método de infusión al vacío mixta y con una composición que se muestra en la siguiente Tabla 4.7.

Tabla 4.7: Composición de placas para ensayo de flexión

Porcentaje de concha	Resina [g]	Endurecedor [g]	Concha [g]	Capas de fibra
1 %	120	60	1,8	6
3%	120	60	5,6	6
5%	120	60	9,5	6

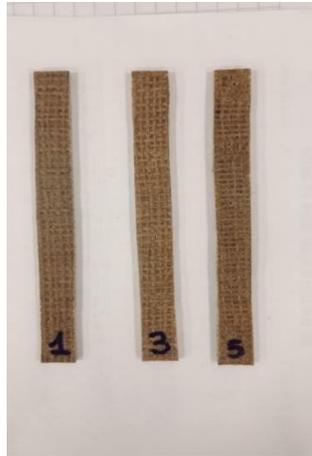


Figura 4.25: Probetas RFC flexión: 1, 3 y 5 por ciento contenido particulado



Figura 4.26: Probetas RFA flexión: 1, 3 y 5 por ciento contenido particulado (izquierda a derecha)

4.12 Ensayo de tracción según norma ASTM D3039

La norma establece que se deben ensayar cinco especímenes por cada condición a no ser que resultados válidos puedan ser obtenidos con una menor cantidad de probetas. Los ensayos son realizados en una máquina de ensayos universales Zwick Roell en el laboratorio de impresiones 3D de la Universidad de Concepción. Para lograr el éxito en los ensayos se debe seguir cierta metodología, la cual se describe a continuación:

- Se debe medir ancho y espesor de las probetas, idealmente con un pie de metro.
- Ingresar valores en el software del equipo.
- Posicionar la probeta en la mordaza inferior del equipo.
- Desplazar la mordaza superior hasta que se encuentre a una distancia tal que la probeta quede equitativamente distribuida entre ambas mordazas. Debe tenerse el cuidado de que la probeta

quede lo más recta o “derecha” posible, ya que si esta se encuentra desviada podría incurrir en una falla prematura.

- Confirmar la posición como “posición inicial” en el programa.
- Posicionar el extensómetro con una distancia que se encuentre dentro del rango de los 10 a 50 mm.
- Medir la distancia del extensómetro e ingresar el valor al programa.
- Seleccionar la velocidad del ensayo e ingresar al programa. La norma recomienda 2 mm/min de no tenerse un valor.
- Aplicar carga 0 en el programa y seleccionar a comenzar ensayo.
- Cerrar el extensómetro
- Esperar a que el ensayo finalice
- Abrir el extensómetro.
- Retirar la probeta ensayada.
- Seleccionar la posición inicial del ensayo.
- Ingresar una nueva probeta.
- Repetir el proceso con la siguiente probeta.

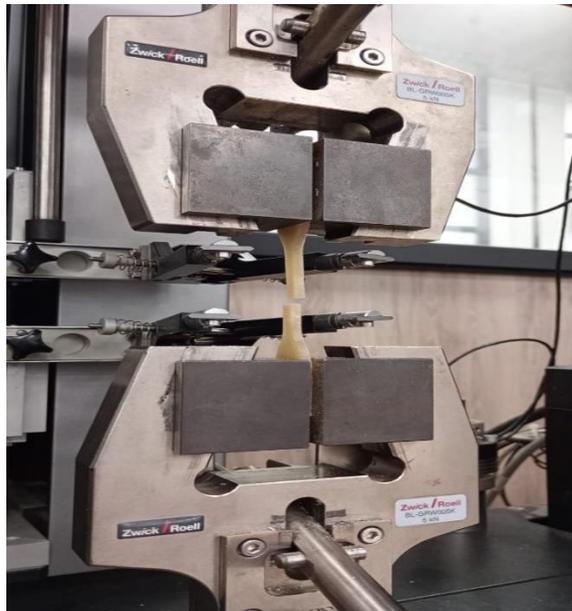


Figura 4.27: Probeta de tracción terminado el ensayo

4.13 Ensayo de flexión según norma ASTM D790

Al igual que para los ensayos de tracción se utilizó la máquina de ensayos universal ubicada en el laboratorio de impresiones 3D de la Universidad. En este caso también debe seguirse un procedimiento para lograr ensayos exitosos, pero antes de eso, se deben definir ciertas características del ensayo

La prueba de flexión se realiza siguiendo el procedimiento indicado en la norma ASTM D638, todas las muestras son ensayadas el mismo día y en el laboratorio de prototipos del departamento de Ingeniería Mecánica bajo las mismas condiciones de temperatura y presión. A continuación, se muestran los pasos a seguir:

Primero se mide y registra el ancho y el espesor para cada probeta mediante un pie de metro.

Se determina el tramo de apoyo considerando que el espécimen debe ser lo suficientemente largo para permitir voladizo en cada extremo de al menos el 10 %. Considerando que el largo de la probeta es de 75 mm el tramo entre apoyos será de 60 mm (7,5 de cada apoyo).

Calcular la tasa de movimiento de la cruceta.

$$R = \frac{ZL^2}{6d} \quad (12)$$

R: tasa de movimiento de la cruceta, mm/min

L: tramo de apoyo, mm

d: profundidad de la barra, mm

Z: Índice de tensión de la fibra externa, mm/mm/min Z debe ser igual a 0,01

De la Ecuación (12), se tiene que R corresponde a 1,5 mm/min

Luego se procede a ajustar el soporte a la medida antes calculada para colocar la probeta de forma alineada, y se localiza la punta de carga unida a la cruceta móvil a una distancia de referencia hacia la probeta. Se ingresan los datos en el programa asociado a la máquina universal Zwick/Roell Z005 y se procede a trasladar la punta de carga hasta casi tocar la probeta y se verifica que no esté aplicando carga alguna. Se procede a iniciar la prueba aplicando la carga a la muestra con el valor especificado de la velocidad. La deflexión se obtiene a partir del movimiento en vertical de la punta de la carga hasta que se produce la rotura de la probeta. Finalmente se termina la prueba, se retira la punta de carga con la cruceta móvil y se saca la muestra.

CAPITULO 5: Resultados

En este capítulo se presentan los resultados referentes a la prueba de precipitado realizada y los ensayos de tracción y flexión que se aplican para la caracterización mecánica de los materiales compuestos en estudio.

5.1 Resultados prueba de precipitado

Mediante la observación de las fotografías mostradas en la sección 4.8 del capítulo anterior, se determina que, para las mezclas con diferentes proporciones de particulado de concha y resina, no existe un precipitado mayor, solo un cumulo menor de partículas suspendidas en la parte superior de la mezcla. Lo anterior se ve evidenciado aún más, en las mezclas con menor proporción de particulado de concha, es decir, las que corresponden a 0,5% y 0,75%, por lo que se opta a trabajar con los porcentajes de 1%, 3% y 5% en la fabricación de probetas para los ensayos de tracción y flexión.

Los porcentajes que se ocupan son 1%, 3% y 5%, dado a las pruebas de precipitación realizadas y el querer ahondar estudios e investigaciones anteriores.

5.2 Resultados ensayos de tracción

Los datos del ensayo se entregan en función de la fuerza aplicada por la máquina (la cual se transforma a esfuerzo nominal mediante la Ecuación (1)), y su deformación (que es expresada por el software de manera porcentual). Con estos datos es posible obtener el esfuerzo máximo, elongación, el módulo de elasticidad, etc. Necesarios para caracterizar el material estudiado.

En las Figura 5.1 y 5.2 se puede ver las curvas esfuerzo vs deformación de los ensayos de tracción de las distintas especies de probetas analizadas.

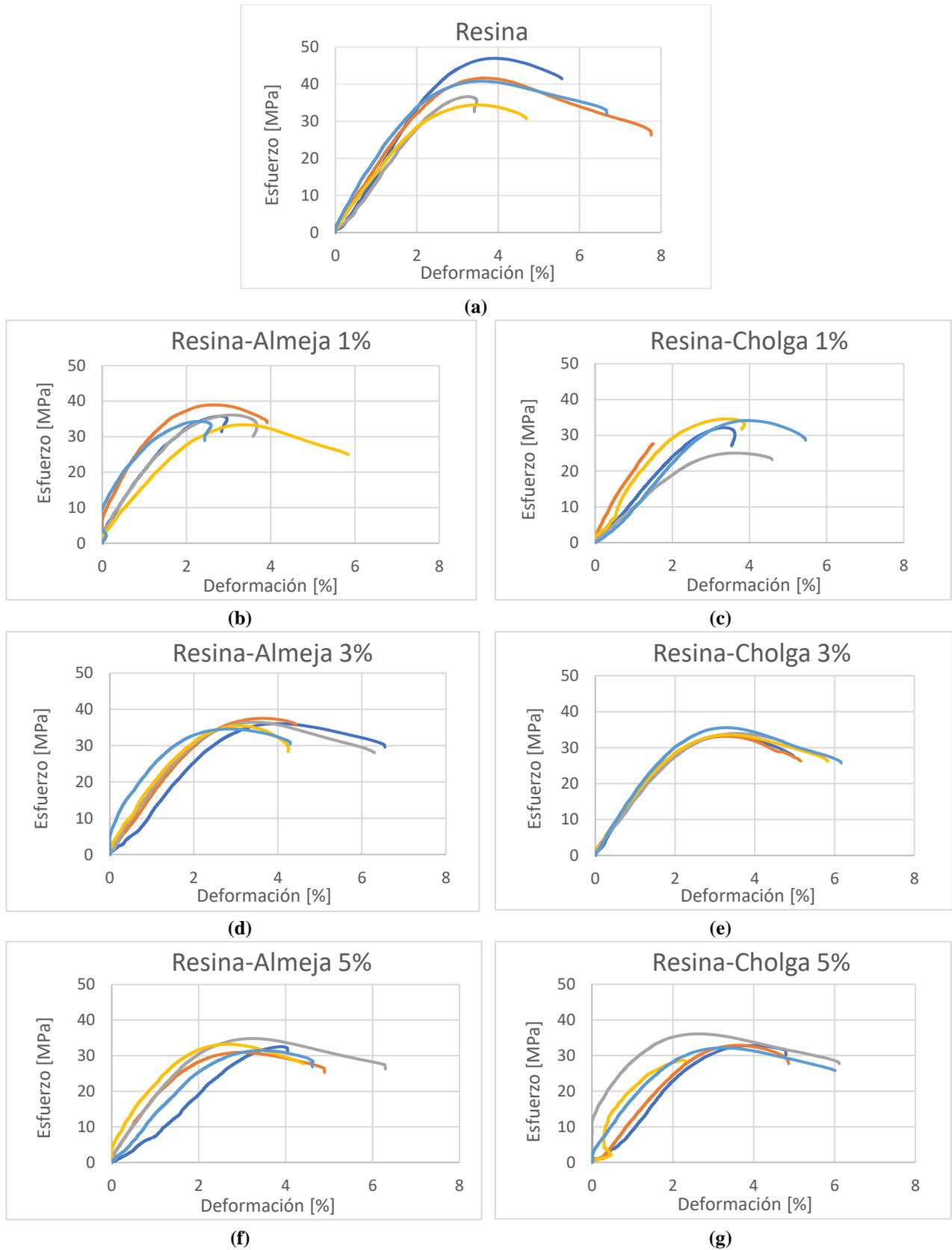
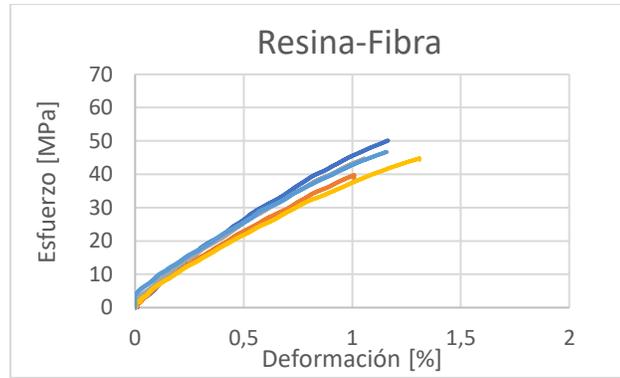
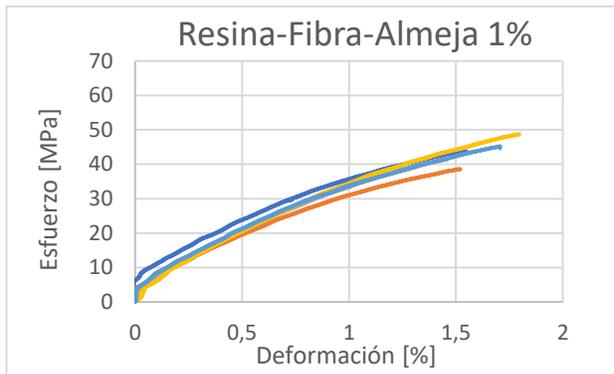


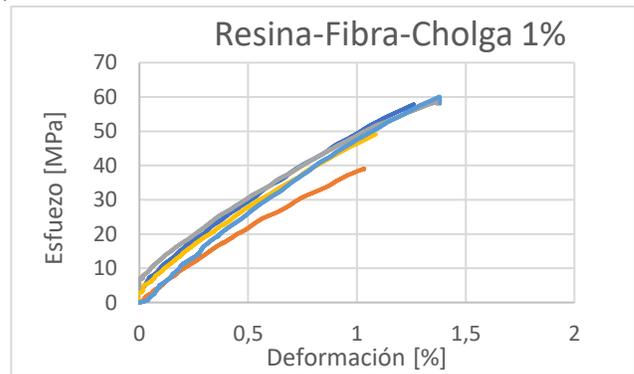
Figura 5.1: Graficas ensayos de tracción: a) R b) RA 1% c) RC 1% d) RA 3% e) RC 3% f) RA 5% g) RC 5%



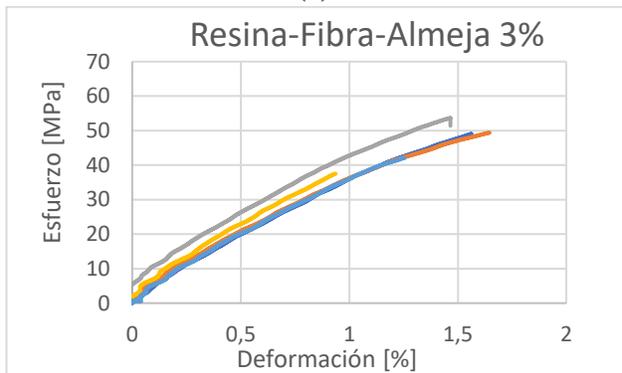
(a)



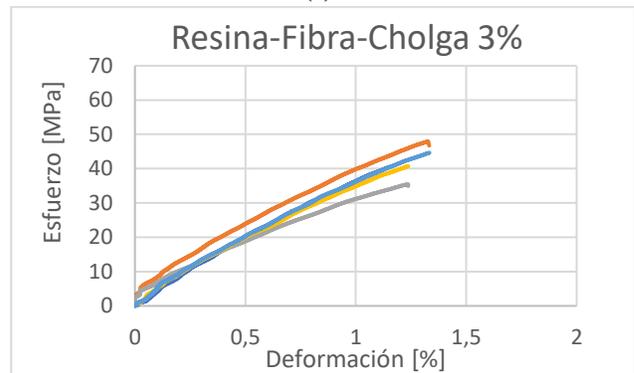
(b)



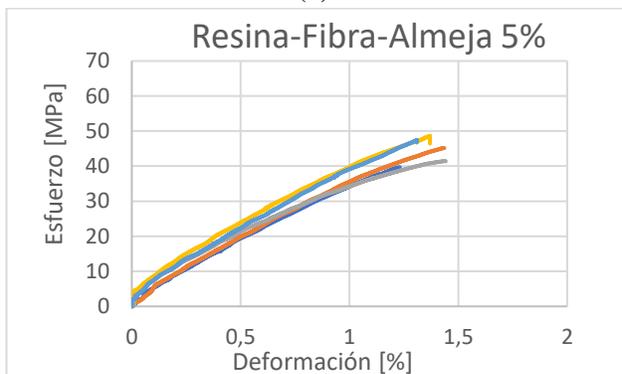
(c)



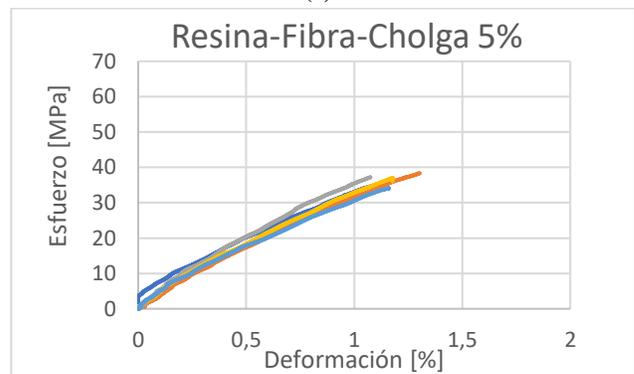
(d)



(e)



(f)



(g)

Figura 5.2: Gráficas ensayos de tracción: a) RF b) RFA 1% c) RFC 1% d) RFA 3% e) RFC 3% f) RFA 5% g) RFC 5%

En la siguientes Tabla 5.1 y 5.2 se muestran los valores promedios de esfuerzo máximo a la tracción, módulo elástico y elongación, junto con el cálculo de incremento/decremento respecto a la resina (R) y resina-fibra (RF) respectivamente. Los valores a partir de los cuales se obtuvieron estos promedios se pueden observar en el anexo.

Tabla 5.1: Parámetros de análisis en probetas de tracción

	Esfuerzo de Ruptura [MPa]	DE	Incremento / Decremento [%]	Módulo Elástico E [MPa]	Incremento / Decremento [%]	DE	Elongación [%]	Incremento / Decremento [%]	DE
R	40,1	3,43		1670		260,70	5,62		1,74
RA 1%	34,8	2,10	-13,22	2028	+21,44	474,30	3,72	-33,81	1,36
RC 1%	30,7	4,19	-23,44	1286	-22,99	401,79	3,77	-32,92	1,49
RA 3%	36,0	2,10	-10,22	1623	-2,81	410,36	5,16	-8,19	1,16
RC 3%	33,9	0,94	-15,46	1628	-2,51	132,91	5,37	-4,45	0,60
RA 5%	32,6	1,53	-18,70	1500	-10,18	472,32	4,83	-14,06	0,90
RC 5%	32,5	2,67	-18,95	1630	-2,40	588,90	4,81	-14,41	1,56

Tabla 5.2: Parámetros de análisis en probetas de tracción

	Esfuerzo de Ruptura [MPa]	DE	Incremento / Decremento [%]	Módulo Elástico E [MPa]	Incremento / Decremento [%]	DE	Elongación [%]	Incremento / Decremento [%]	DE
RF	45,2	3,77		4035		345,01	10,16		0,12
RFA 1%	43,6	3,81	-3,54	3120	-22,68	168,96	1,60	-84,25	0,14
RFC 1%	53,0	8,84	+17,26	4405	+9,17	383,65	1,23	-87,89	0,16
RFA 3%	46,3	6,43	+2,43	3622	-10,24	158,99	1,37	-86,52	0,28
RFC 3%	41,9	4,75	-7,30	3462	-14,20	333,65	1,26	-87,60	0,08
RFA 5%	44,5	3,81	-1,55	3480	-13,75	222,74	1,36	-86,61	0,09
RFC 5%	36,5	1,67	-19,25	3182	-21,14	212,27	1,17	-88,48	0,08

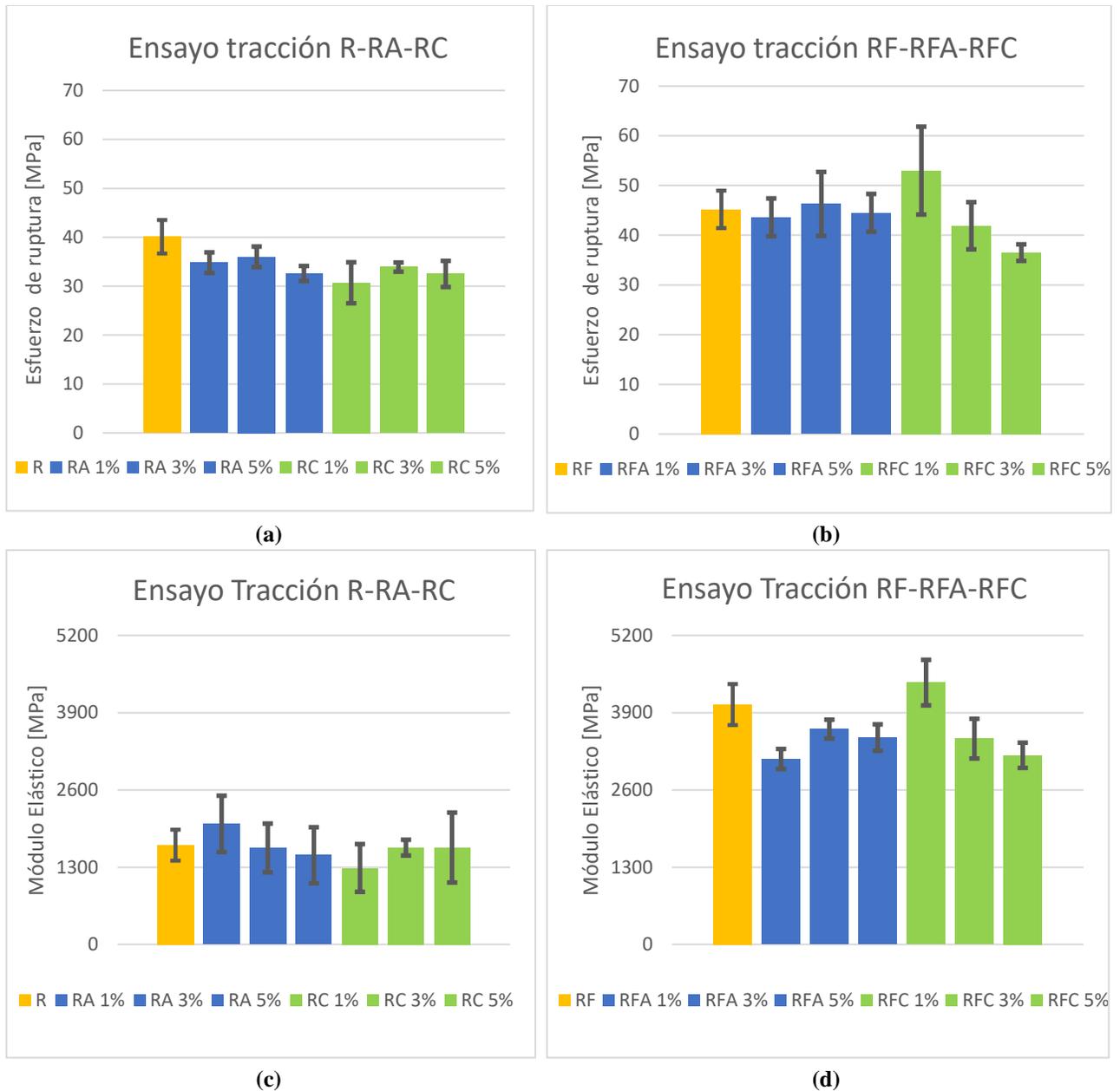


Figura 5.3: Gráficas ensayo de tracción en relación a variación de resultados

Se puede afirmar, dado a los resultados, que para los especímenes con resina y particulado de concha, la inclusión de esta última hace disminuir el esfuerzo de ruptura respecto a la resina sola (40,5 MPa). El valor que más se le acerca corresponde al espécimen RA 3% (36 MPa) el cual presenta un decrecimiento del 10,22%, mientras que el más alejado RC 1% (30,7 MPa) arroja un decremento del 23,44%. Estos decrementos obtenidos pueden ser debido alguna aglomeración parcial y/o una distribución no homogénea de las partículas de concha al mezclarse con la resina [32], lo que promueve la acumulación de tensiones residuales que brindan pérdidas de las propiedades ante las cargas aplicadas [31]. Los resultados para el particulado conforme al 5% en peso del espécimen resina-concha mostraron ser bastante semejantes en relación a los dos tipos de concha estudiados (32,6 MPa para RA 5% y 32,5 MPa para RC 5%). Por otra parte, los especímenes que se componen de resina-

fibra-concha, en relación al esfuerzo de ruptura, presentaron mejora en dos ejemplares, RFC 1% (53 MPa) y RFA 3% (46,3 MPa), respecto a la resina-fibra (45,2 MPa). El resto de los especímenes se mostraron bastante próximos a este último (RFA 1%, RFC 3% y RFA 5%) registrando decrementos que se encuentran dentro del rango de 2 a 7,5%, salvo los ejemplares RFA 5%, quienes se mostraron bastante lejanos, promediando un esfuerzo de ruptura igual a 36,5 MPa y cuyo decremento equivale a un 19,25%. En general, ambas familias de materiales mostraron la misma tendencia observada por otros investigadores [30], quienes trabajaron en la adición de conchas marinas a polímeros reportando que a medida que el contenido de carga se incrementa, la carga máxima que puede soportar la probeta justo antes de la ruptura disminuye, aunque muy ligeramente en los casos de estudio, debido a que las cargas pueden suprimir la formación de cuellos e iniciar el rompimiento por microgrietas.

El módulo elástico del espécimen RA 1% (2028 MPa) es el único que mejora dentro de la familia de materiales resina-concha, pues arroja un aumento del 21,44% con respecto al de la resina (1670 MPa). Los ejemplares RA 3%, RC 3% y RC 5% exhiben valores bastante cercanos al mostrado por la resina, registrando decrementos que no superan el 2,8%, mientras que, para los materiales RC 1% y RA 5% los decrementos fueron mayores, alcanzando los 22,9 y 10,18% respectivamente. Cabe destacar, el comportamiento que presentan los especímenes RA, quienes a medida que aumenta el porcentaje de concha, disminuye su modulo elástico. En cuanto a los especímenes con fibra, al igual que en el caso anterior, existe un único material que supera al material base RF (4035 MPa) el que corresponde a RFC 1% (4405 MPa), este junto al espécimen RA 1% corroboran los resultados de diversos autores [26] los cuales han estudiado la incorporación del CaCO_3 en resinas termoplásticas y determinando que este tipo de cargas de refuerzo mejoran el módulo elástico pero disminuyen otras tales como su dureza y deformación a la ruptura, lo que se debe a la interacción presente entre los materiales que lo componen. Mientras que para el resto de los especímenes solo se presentaron decrecimientos que van desde los 10,24 (RFC 1%) a 22,68% (RFA 1%). También, sucede que la disminución del módulo elástico se ve afectada haciendo aun mayor, por el aumento de porcentaje de concha, pero en este caso, para los especímenes RFC. En cuanto a la variación de resultados respecto al módulo elástico, esto puede deberse principalmente al igual que para el esfuerzo de ruptura a una mala interacción entre los materiales que componen el material compuesto, aglomeraciones que generen tensiones o una mala distribución de las partículas de concha en la placa que se fabrica. Pero también, puede deberse a tareas más prácticas y que tienen que ver con la fabricación de los materiales, entre ellas, el que no se contó con una maquina mezcladora para trabajar la resina-concha, el vacío para las muestras resina-fibra-concha no fue el ideal, el corte con la máquina proxxon pudo haber generado ciertas imperfecciones, entre otras, que dejan sobre la mesa posibles mejoras para un próximo estudio.

5.3 Resultados ensayo de flexión

Los datos obtenidos de los ensayos de flexión realizados en la máquina universal como ocurre para los ensayos de tracción, se muestran en función del esfuerzo y la deformación porcentual producida en las siguientes Figuras 5.3 y 5.4. Mediante esto, se puede obtener el esfuerzo máximo en flexión, modulo elástico y elongación para cada tipo de material, cuyos valores se encuentran en promedio a continuación en las Tablas 5.3 y 5.4.

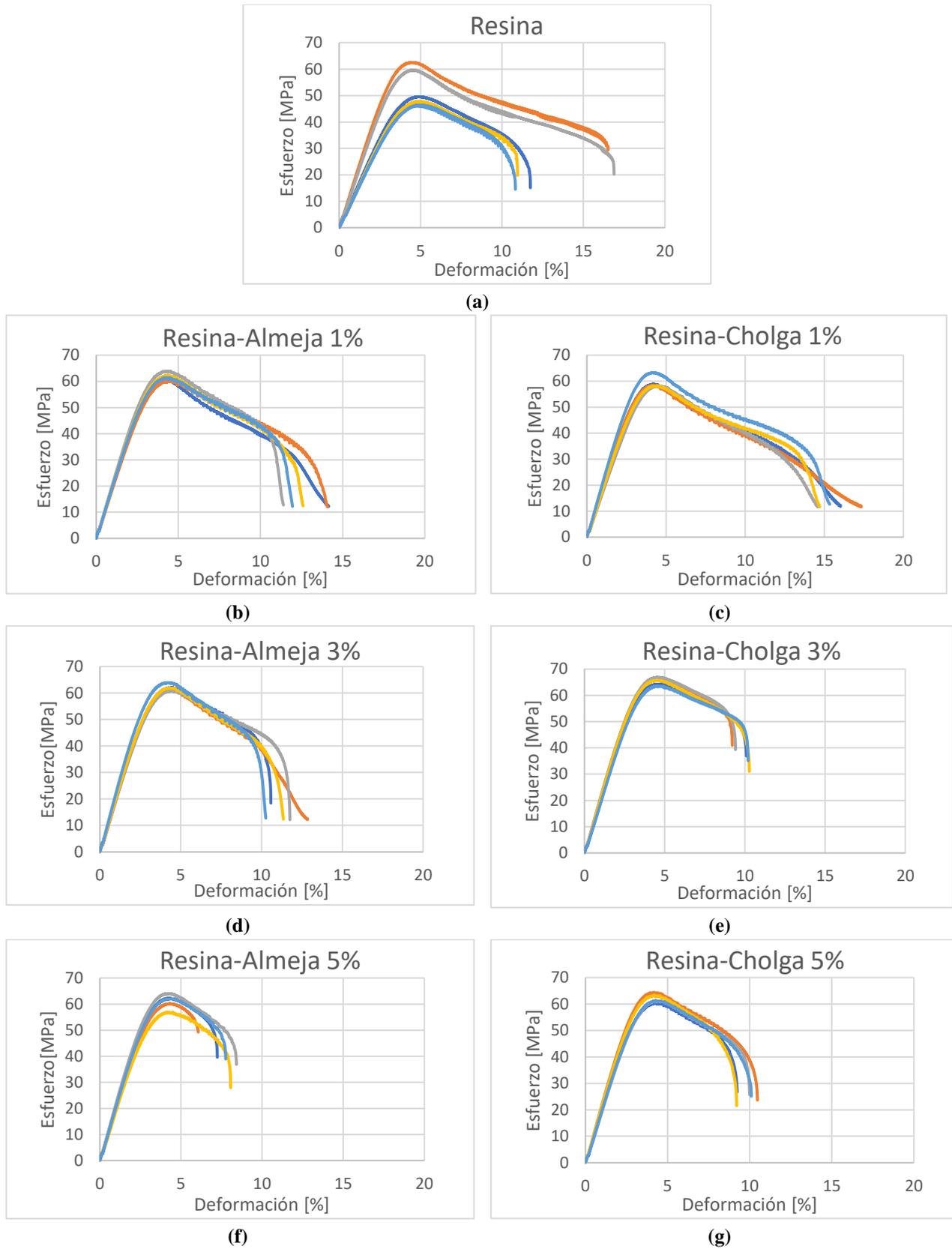


Figura 5.4: Graficas ensayos de flexión. a) R b) RA 1% c) RC 1% d) RA 3% e) RC 3% f) RA 5% g) RC 5%

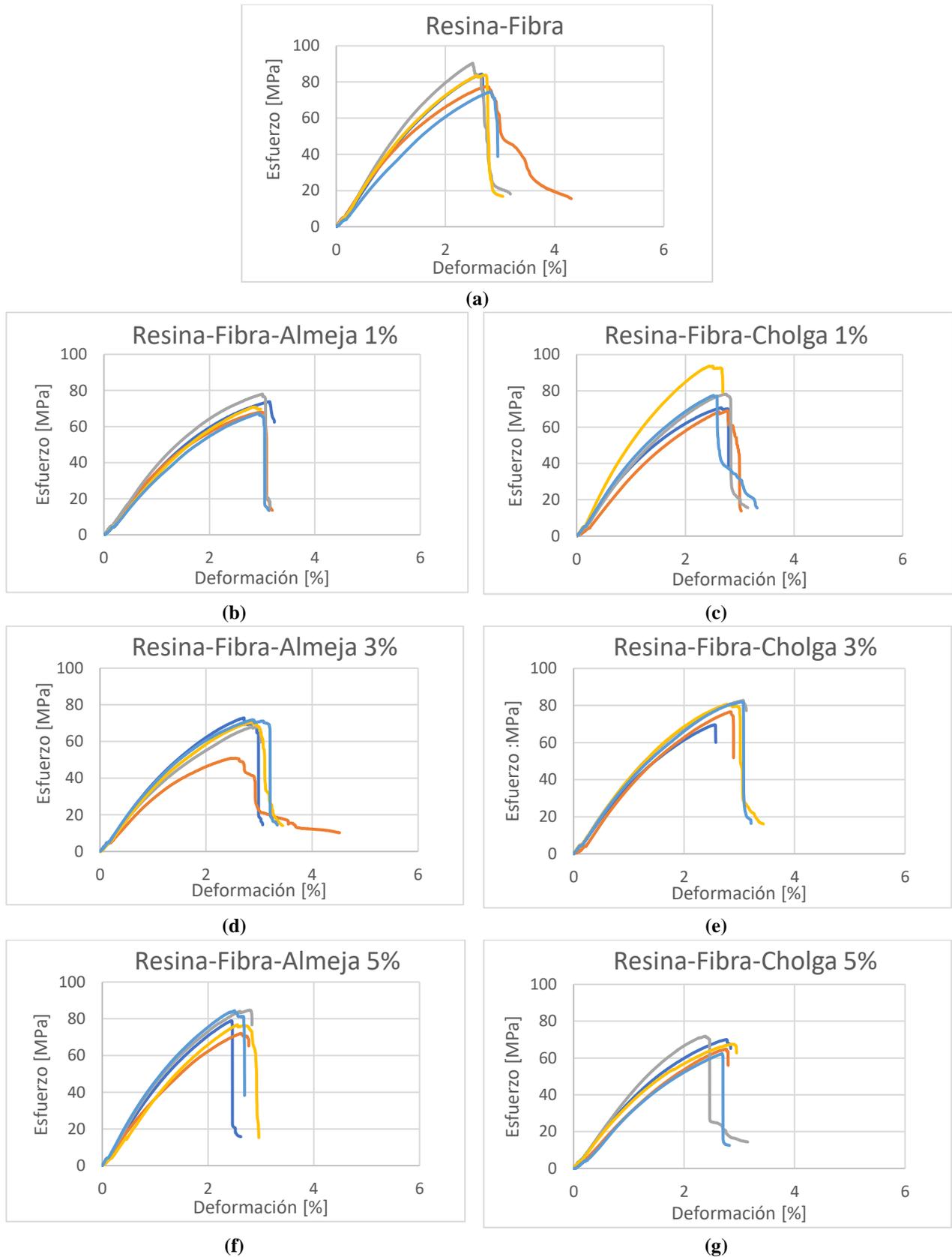


Figura 5.5: Graficas ensayos de flexión. a) RF b) RFA 1% c) RFC 1% d) RFA 3% e) RFC 3% f) RFA 5% g) RFC 5%

En la siguientes Tabla 5.3 y 5.4 se muestran los valores promedios de esfuerzo máximo a la tracción, módulo elástico y elongación, junto con el cálculo de incremento/decremento respecto a la resina y resina-fibra (RF) respectivamente. Los valores a partir de los cuales se obtuvieron estos promedios se pueden observar en el anexo.

Tabla 5.3: Parámetros de análisis en probetas de flexión

	Esfuerzo máximo flexión [MPa]	DE	Incremento / Decremento [%]	Módulo Elástico E	DE	Incremento / Decremento	Elongación [%]	Incremento / Decremento	DE
R	53,2	7,37		1487	282,40		13,38		3,05
RA 1%	61,7	1,43	+15,98	1892	66,31	+27,24	12,83	-4,11	1,24
RC 1%	59,4	2,20	+11,65	1801	151,25	+21,12	15,60	+16,59	1,13
RA 3%	62,0	1,14	+16,54	1932	113,40	+29,93	11,40	-14,80	1,02
RC 3%	65,3	1,45	+22,74	1904	113,39	+28,04	9,84	-26,46	0,49
RA 5%	61,1	2,69	+14,85	1967	87,47	+32,28	7,51	-43,87	0,91
RC 5%	62,1	1,63	+16,73	1927	113,28	+29,59	9,80	-26,76	0,56

Tabla 5.4: Parámetros de análisis en probetas de flexión

	Esfuerzo máximo flexión [MPa]	DE	Incremento / Decremento [%]	Módulo Elástico E	DE	Incremento / Decremento	Elongación [%]	Incremento / Decremento	DE
RF	82,0	6,21		4070	467,42		3,24		0,63
RFA 1%	71,6	4,43	-12,68	3433	252,50	-15,65	3,14	-3,09	0,10
RFC 1%	77,8	9,74	-5,12	4060	689,82	-0,25	3	-7,41	0,26
RFA 3%	66,7	9,05	-18,66	3388	337,24	-16,76	3,48	+4,41	0,61
RFC 3%	78,2	5,44	-4,63	3823	145,26	-6,07	3,05	-5,86	0,33
RFA 5%	79,4	5,36	-3,17	4114	431,06	+1,08	2,77	-14,51	0,13
RFC 5%	67,3	3,82	-17,93	3386	387,33	-16,81	2,91	-10,19	0,15

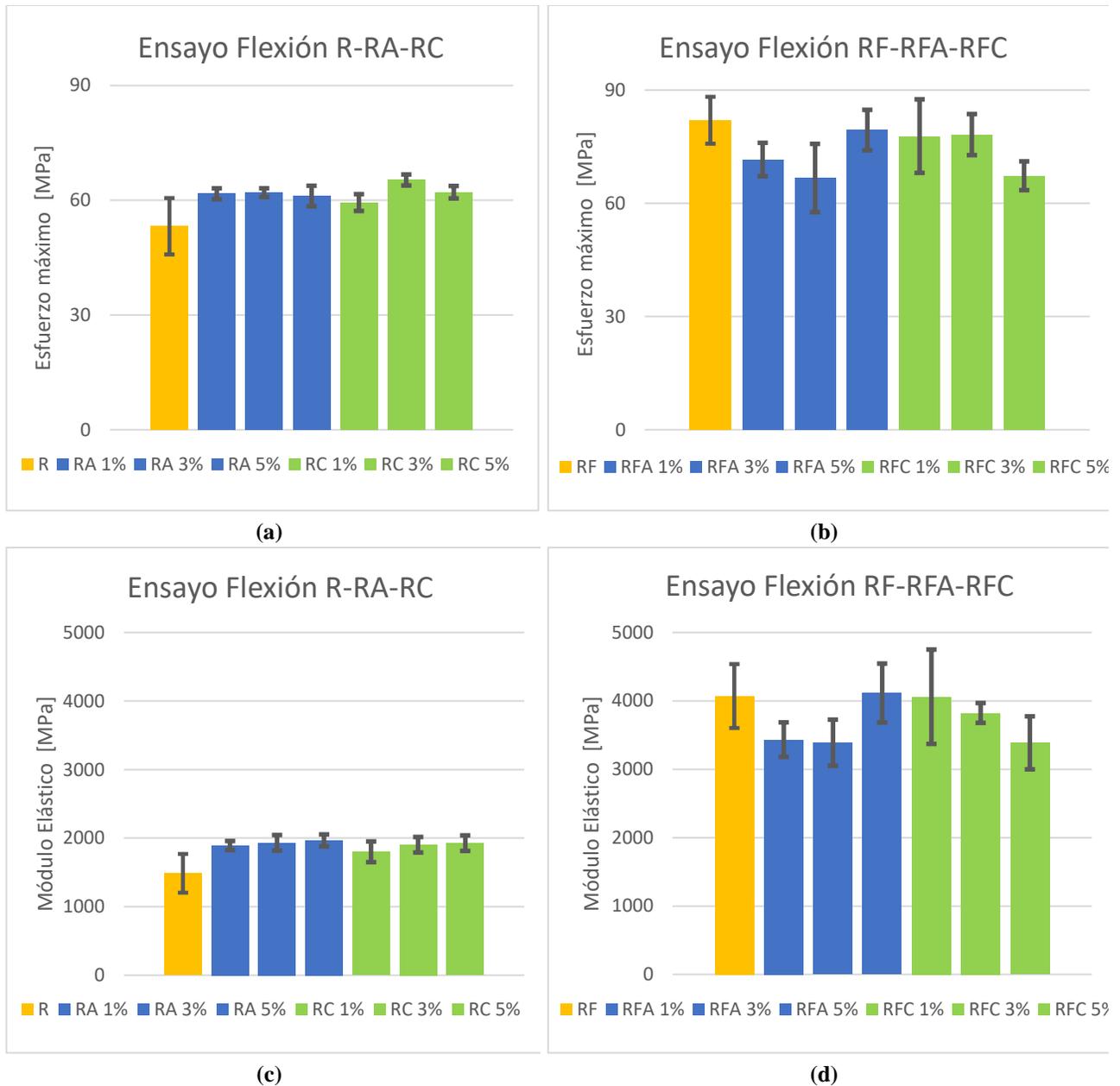


Figura 5.6: Gráficas ensayo de flexión en relación a variación de resultados

El esfuerzo máximo de flexión mejora para todos los especímenes resina-concha respecto al material base, la resina (53,2 MPa), destacando entre ellos a RC 3% (65,3 MPa) que refleja un incremento del 22,74%. El resto de los materiales presentan mejoras para esta variable que van por sobre el 11,65 % (RC1%-59,4 MPa). En cuanto a la familia de especímenes resina-fibra-concha, estos presentaron una disminución respecto al valor entregado por la resina-fibra (82 MPa) y cuyos especímenes más próximos fueron RFC 3% (78,2 MPa) y RFA 5% (79,4 MPa).

El módulo elástico aumenta para los especímenes resina-concha respecto a la resina (1487 MPa) destacando RA 5% (1967 MPa) el cual registra un incremento del 32,28%, mientras que el resto de especímenes presentan aumentos por sobre el 21,12 % (RC 1%-59,4 MPa). También, cabe destacar que, para ambos tipos de especímenes, ya sea RA o RC, a medida que aumenta el porcentaje de concha, el módulo elástico crece.

Las muestras asociadas a la familia de materiales resina-concha-cholga, para el módulo elástico, mostraron un solo caso de mejora, el cual corresponde a RA 5% (4114 MPa), con respecto al materia base resina-fibra (4070 MPa). Luego, los especímenes más próximos fueron RFC 1% (4060 MPa) y RFC 3% (3823 MPa), mientras que el resto, es decir, RFA 3% y RFC 5% presentaron una disminución por sobre el 16,76%. Por último, para las muestras RFC, se logra advertir una disminución mayor, a medida que aumenta el porcentaje de particulado de concha en el peso de la muestra.

Como se muestra en los párrafos anteriores, se tienen resultados que exhiben mejoras en ambas propiedades mecánicas, tanto para resina-fibra como para resina-fibra-concha, lo que coincide con la investigación realizada por [29] en la cual se trabaja con una matriz polimérica de polietileno de alta densidad y residuos de cascara de molusco calcinado modificado con silano, donde se explica que los esfuerzos mecánicos son resistidos a través de la interfaz matriz/refuerzo lo que se debe a una buena interacción.

Por otra parte, sería interesante y de gran ayuda complementar estos datos con pruebas de calcinación para verificar el contenido real de particulado de concha en las muestras ensayadas, el empleo de agentes de acoplamiento como alternativa de mejora en las propiedades mecánicas de los materiales fabricados y también la toma de micrografías a través de microscopio u escáner electrónico, a fin de comprender de mejor forma la interacción matriz/refuerzo y comportamiento mecánico de los materiales estudiados.

CAPITULO 6: Conclusiones

Las conchas marinas poseen características tales como una alta resistencia, dureza y rigidez. Por otra parte, la fibra de cáñamo presenta características como resistencia, durabilidad y habilidad para estirarse. El uso de ambos como refuerzo sobre una matriz polimérica, sirve para estudiar los efectos que estos producen y a la vez fortalecer el conocimiento en nuevas alternativas para la construcción de materiales compuestos que sean más amigables con nuestro planeta.

Dentro de la composición de un material compuesto, la cantidad de refuerzo es fundamental para mejorar o alterar alguna propiedad en específico, en el caso de los biocerámicos como son las conchas marinas, se produce un aumento en las características de rigidez, dureza y resistencia, pero un exceso de material de refuerzo puede conducir a una disminución en cierta propiedad. También es relevante el tamaño de las partículas agregadas puesto que condiciona en gran medida el comportamiento del material compuesto, ya sean nano o micropartículas.

En cuanto a la resistencia y módulo elástico en tracción, la adición de concha para los porcentajes estudiados, tiene efectos ambiguos para el primer caso, y claros para el segundo. Esto pues, en cuanto a la resistencia, los valores que se tienen, aumentan y disminuyen según sea el porcentaje de adición, lo que indica que no tiene una tendencia o patrón claro en las muestras que presentan fibra. Mientras que, para el módulo elástico, se torna una tendencia hacia la baja o disminución, pues para el espécimen RF se obtuvo un valor que esta por sobre todos los demás especímenes, salvo en un caso excepcional (RFC al 1%). Cabe mencionar que las probetas con fibra presentan una mayor dispersión en comparación a las probetas sin ella, lo que se podría explicar debido a las inconsistencias en la fibra de cáñamo.

Las probetas RFA en tracción no presentan una diferencia significativa entre si con respecto a la cantidad de concha marina agregada, ya que se obtienen resultados bastante parejos, no así, con las probetas RFC, las que a medida que al aumentar el contenido de particulado fue decayendo su resistencia a la tracción (53 a 36,5 MPa) y su modulo elástico (4405 a 3182 MPa) en promedio.

Los mejores resultados de los ensayos de flexión para esfuerzo máximo promedio fueron obtenidos para las probetas RF con 82 MPa máximo promedio. Al comparar esta última con RFA 5%, que es la que se le acerca (79,4 MPa), se presenta un decremento del 3,17%, de lo que se infiere que la resistencia a la flexión no viene dada por la adición de concha. Mientras que, para el módulo elástico en flexión, se logra destacar la adición de 5% particulado de concha almeja, la cual obtiene el valor más alto (4114) en relación a todas las demás muestras analizadas.

Mediante esta investigación, se puede afirmar, que la utilización de partículas de conchas marinas en los porcentajes analizados no infiere de manera significativa en las propiedades mecánicas de tracción estudiadas del material compuesto que se fabricó. Sin embargo, para las propiedades mecánicas de flexión, se obtienen resultados bastante interesantes y de mejora destacando al espécimen RC 3% (65,3 MPa) el cual presento una mejora en el esfuerzo máximo de flexión de un 22,74% respecto a la resina sola (53,2 MPa). También destaca el aumento del módulo elástico en flexión, el cual se da para

todos los especímenes resina-concha, llegando a incrementos del 32,38% en el espécimen RA 5%. Lo anterior, junto con que, en la actualidad se encuentran desechadas casi en su totalidad tanto las almejas como cholgas, las convierte en una alternativa real ventajosa para ser un material de refuerzo válido, al reducir los costos de producción de materiales compuestos. Esta investigación suma para avanzar en este tema, aunque de igual forma, resulta necesario una serie de ensayos más, como ensayos de dureza, análisis químico, microestructural, impacto, entre otros, para lograr conclusiones más confiables y exactas.

Trabajos Futuros

En base a lo investigado se recomienda lo siguiente en futuros trabajos:

- Investigar distintos métodos de elaboración para materiales compuestos por fibras y particulado de concha y como estos afectan las propiedades mecánicas.
- Estudiar el cómo distintas orientaciones de la fibra pueden afectar las propiedades mecánicas.
- Estudiar la interacción y adhesión entre la matriz, fibra y concha marina.
- Estudiar porcentajes diferentes del que se vieron en este estudio de particulado de concha y su inclusión en materiales compuestos, de tal manera de identificar efectos significativos en tracción.

Referencias

- [1] U. B. Gopal Krishna, C. S. Srinivasa, N. S. Amara, y S. Gudoor, «Processing, characterization and property evaluation of seashell and glass fibre added epoxy based polymer matrix composite», *Mater. Today Proc.*, vol. 35, pp. 417-422, ene. 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2020.02.818.
- [2] M. A. Bazaes Navarro, «Caracterización mecánica de un material compuesto con agregado de conchas marinas chilenas», p. 64.
- [3] A. Karakoti, P. Tripathy, V. R. Kar, K. Jayakrishnan, M. Rajesh, y M. Manikandan, «1 - Finite element modeling of natural fiber-based hybrid composites», en *Modelling of Damage Processes in Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites*, M. Jawaaid, M. Thariq, y N. Saba, Eds. Woodhead Publishing, 2019, pp. 1-18. doi: 10.1016/B978-0-08-102289-4.000011.
- [4] D. P. Ferreira, J. Cruz, y R. Figueiro, «Chapter 1 - Surface modification of natural fibers in polymer composites», en *Green Composites for Automotive Applications*, G. Koronis y A. Silva, Eds. Woodhead Publishing, 2019, pp. 3-41. doi: 10.1016/B978-0-08-102177-4.00001-X.
- [5] T. Murugan y B. Senthil Kumar, «Studies on mechanical and dynamic mechanical properties of banana fibre nonwoven composite», *Mater. Today Proc.*, vol. 39, pp. 1254-1258, ene. 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2020.04.155.
- [6] D. R. Askeland y W. J. Wright, *Ciencia E Ingeniería de Los Materiales*. CENGAGE Learning, 2016.
- [7] «Moluscos | Servicio Nacional de Pesca y <http://www.sernapesca.cl/recurso/moluscos> (accedido 20 de septiembre de 2022).
- [8] «Almeja», SUBPESCA. Subsecretaría de Pesca y Acuicultura. <https://www.subpesca.cl/portal/616/w3-article-815.html> (accedido 20 de septiembre de 2022).
- [9] «Aulacomya atra», Macrofauna Bentónica de Chile. <https://www.ifop.cl/macrofauna/aulacomya-atra/> (accedido 20 de septiembre de 2022).
- [10] Osorio, C. 2002. Osorio Ruíz, C. 2002. Moluscos marinos en Chile. Especies de importancia económica: Guía para su identificación. Disponible en <https://doi.org/10.34720/hda2-g780>.
- [11] W. F. Smith y J. Hashemi, *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*. McGraw-Hill, 2006.
- [12] F. Marin, N. Le Roy, y B. Marie, «The formation and mineralization of mollusk shell», *Front. Biosci. Sch. Ed.*, vol. 4, pp. 1099-125, ene. 2012.
- [13] SUBPESCA. Subsecretaría de Pesca y Acuicultura, «Especies Hidrobiológicas recursos y especies: Moluscos», SUBPESCA. Subsecretaría de Pesca y Acuicultura, 2022. <https://www.subpesca.cl/portal/616/w3-propertyvalue-617.html> (accedido 21 de abril de 2022).
- [14] «Identification and characterization of a matrix protein (PPP-10) in the periostracum of the pearl *Pinctada fucata* | Elsevier Enhanced Reader». <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S2211546313000582?token=4C9842CE20098D05557E7C07472BE6408B8EF6CA8CE79858B0EE266C67DAEFE7C3151D566473FA5D09F545C474F0A5E9&originRegion=us-east-1&originCreation=20221023152323> (accedido 23 de octubre de 2022).
- [15] J. Huang, Y. Liu, C. Liu, L. Xie, y R. Zhang, «Heterogeneous distribution of shell matrix proteins in the pearl oyster prismatic layer», *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 189, pp. 641-648, oct. 2021, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2021.08.075.
- [16] F. Barthelat, «Nacre from Mollusk Shells: A Model for High-Performance Structural Materials», *Bioinspir. Biomim.*, vol. 5, p. 035001, sep. 2010, doi: 10.1088/1748-3182/5/3/035001.

- [17] O. Zuñiga, «Guía de biodiversidad n°1, volumen 1 macrofauna y algas marinas». CREA, 2003.
- [18] J.Cáceres, «Dinámica del reclutamiento de juveniles de concha nácar *Pteria sterna* en la Bahía de La Paz, Baja California Sur, México», Centro de investigaciones Tecnológicas CIB, 2015.
- [19] «5 Fibras Vegetales en Chile. Manejo tradicional por comunidades locales. by Artesanía UC - Issuu». https://issuu.com/artesaniauc/docs/5_fibras_vegetales_en_chile_2__1_ (accedido 23 de octubre de 2022).
- [20] *Cannabis sativa*. [En línea]. Disponible en: <http://www.theplantlist.org/tp11.1/record/kew2696480>.
- [21] «Yute (*Corchorus capsularis*)», Naturalista Colombia. <https://colombia.inaturalist.org/taxa/276275-Corchorus-capsularis> (accedido 23 de octubre de 2022).
- [22] «Agave sisalana, Sisal o Maguey | Cuidados». <http://www.consultaplantas.com/index.php/es/plantas-por-nombre/plantas-de-la-a-a-la-c/47-cuidados-de-la-planta-agave-sisalana-sisal-o-maguey> (accedido 23 de octubre de 2022).
- [23] S. Prakash Chandar y S. K. Sangeeth Kumar, «Mechanical properties of fiber reinforced concrete – natural fibers: A review», *Mater. Today Proc.*, p. S2214785322055444, sep. 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.08.362.
- [24] J.F.Shackelford, *Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros*. Pearson Educación, 2005.
- [25] J. Cangiotti et al., «Valorization of seashell waste in polypropylene composites: An accessible solution to overcome marine landfilling», *Eur. Polym. J.*, vol. 162, p. 110877, ene. 2022, doi: 10.1016/j.eurpolymj.2021.110877.
- [26] Maiti S. y Mahapatro P. (1991). Mechanical properties of i- PP/CaCO₃ composites, *J. Appl. Polymer Sci.*, 42, p.p. 3101-3110.
- [27] «Mechanical and Tribological Properties of PMMA-Sea Shell based Biocomposite for Dental application», *Procedia Mater. Sci.*, vol. 6, pp. 1989-2000, ene. 2014, doi: 10.1016/j.mspro.2014.07.234.
- [28] V. Fombuena, L. Bernardi, O. Fenollar, T. Boronat, y R. Balart, «Characterization of green composites from biobased epoxy matrices and bio-fillers derived from seashell wastes», *Mater. Des.*, vol. 57, pp. 168-174, may 2014, doi: 10.1016/j.matdes.2013.12.032.
- [29] Thaís Fernandes, «Evaluación de compuesto de HDPE con residuos de cáscara de molusco calcinado y modificado con silano», Universidad Federal de Paraíba, 2019.
- [30] Han C., Sandford C. y Yoo H. (1978). Effects of titanate coupling agents on the rheological and mechanical properties of filled polyolefins, *Polym. Eng. Sci.*, 18 (11), p.p. 849-854.
- [31] Yosvani Guerra Silva, «Obtención y caracterización de materiales compuestos de matriz poliéster ortoftálico insaturado reforzado con fibras de henequén cubano orientadas aleatoriamente y partículas de zeolita cubana», Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría” CUJAE, 2014.
- [32] Fernández, M. V., Rivera, J. L. V., Rodríguez, F. P., Losada, H. F., Abreu, M. E. F., Díaz, F. R. V., ... & García del Pino, G. (2023). Mechanical Characterization of a Polymer/Natural Fibers/Bentonite Composite Material with Implementation of a Continuous Damage Model. *Applied Sciences*, 13(4), 2677.
- [33] J. Abutu, S. A. Lawal, M. B. Ndaliman, R. A. Lafia-Araga, O. Adedipe, y I. A. Choudhury, «Effects of process parameters on the properties of brake pad developed from seashell as 53 reinforcement material using grey relational analysis», *Eng. Sci. Technol. Int. J.*, vol. 21, n.o 4, pp. 787-797, ago. 2018, doi: 10.1016/j.jestch.2018.05.014.

- [34] J. Leguísamo, «Caracterización de un material compuesto de fibra de coco y matriz de resina epoxi Characterization of a compound material of coconut fiber and epoxy resin matrix», vol. 3, p. 7, oct. 2018.
- [35] U. Sharan Gupta et al., «Study on the effects of fiber orientation on the mechanical properties of natural fiber reinforced epoxy composite by finite element method», Mater. Today Proc., vol. 45, pp. 7885-7893, ene. 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2020.12.614.
- [36] M. Kumaresan, S. S, y K. .N, «Effect of fiber orientation on mechanical properties of sisal fiber reinforced epoxy composites», vol. 18, pp. 289-294, ene. 2015, doi: 10.6180/jase.2015.18.3.09.
- [37] Research Scholar, Vels Institute of Science, Technology & Advanced Studies, Chennai, India, D. Deepak*, M. Chandrasekaran*, Professor and Director, Faculty of Mechanical Engineering, Vels Institute of Science, Technology & Advanced Studies, Chennai, India., V. Santhanam, y Professor and Head, Department of Mechatronics Engineering, Rajalakshmi Engineering College, Chennai, India., «Characterisation and Properties of Recycled Craft Shell Powder/Epoxy Composites», Int. J. Recent Technol. Eng. IJRTE, vol. 8, n.o 4, pp. 11766-11770, nov. 2019, doi: 10.35940/ijrte.D4528.118419.
- [38] P. Chris-Okafor, «Reinforcement of High Density Polyethylene with Snail Shell Powder.», ago. 2018.
- [39] «Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials». <https://www.astm.org/d0790-17.html> (accedido 7 de diciembre de 2022).

Anexo A: Datos ensayos

Ensayo de tracción: Resina			
Espécimen	Esfuerzo de Ruptura [MPa]	Módulo Elástico E [MPa]	Elongación [%]
Probeta 1	47,0	1461,34	5,57
Probeta 2	41,6	1585,29	7,76
Probeta 3	36,6	1194,65	3,26
Probeta 4	34,4	1562,01	4,69
Probeta 5	40,8	1919,43	6,67

Ensayo de tracción: Resina-Almeja 1%			
Espécimen	Esfuerzo de Ruptura [MPa]	Módulo Elástico E [MPa]	Elongación [%]
Probeta 1	35,8	1837,69	2,82
Probeta 2	38,9	2633,61	3,91
Probeta 3	36,1	1868,25	3,58
Probeta 4	33,4	1431,98	5,84
Probeta 5	34,3	2368,51	2,28

Ensayo de tracción: Resina-Cholga 1%			
Espécimen	Esfuerzo de Ruptura [MPa]	Módulo Elástico E [MPa]	Elongación [%]
Probeta 1	32,1	1173	3,34
Probeta 2	27,7	1909	1,50
Probeta 3	25,0	957	4,58
Probeta 4	34,6	1440	3,41
Probeta 5	34,1	950	5,46

Ensayo de tracción: Resina-Almeja 3%			
Espécimen	Esfuerzo de Ruptura [MPa]	Módulo Elástico E [MPa]	Elongación [%]
Probeta 1	36,1	1079,20	6,55
Probeta 2	37,5	1346,48	4,43
Probeta 3	36,5	1808,40	6,30
Probeta 4	35,5	1759,55	4,24
Probeta 5	34,6	2121,38	4,29

Ensayo de tracción: Resina-Cholga 3%			
Espécimen	Esfuerzo de Ruptura [MPa]	Módulo Elástico E [MPa]	Elongación [%]
Probeta 1	33,4	1611	4,97
Probeta 2	33,1	1547	5,15
Probeta 3	33,9	1819	4,74
Probeta 4	33,6	1638	5,83
Probeta 5	35,5	1847	6,17

Ensayo de tracción: Resina-Almeja 5%			
Espécimen	Esfuerzo de Ruptura [MPa]	Módulo Elástico E [MPa]	Elongación [%]
Probeta 1	32,5	739	3,91
Probeta 2	30,9	1793	4,89
Probeta 3	34,8	1721	6,30
Probeta 4	33,2	1895	4,41
Probeta 5	31,5	1350	4,61

Ensayo de tracción: Resina-Cholga 5%			
Espécimen	Esfuerzo de Ruptura [MPa]	Módulo Elástico E [MPa]	Elongación [%]
Probeta 1	32,8	830	4,79
Probeta 2	32,9	-	4,86
Probeta 3	36,1	2193	6,16
Probeta 4	28,6	1915	2,27
Probeta 5	32,2	1583	6,01

Ensayo de tracción: Resina-Fibra			
Espécimen	Esfuerzo de Ruptura [MPa]	Módulo Elástico E [MPa]	Elongación [%]
Probeta 1	50,1	4533	1,16
Probeta 2	39,7	3873	1,01
Probeta 3	44,8	4189	1,06
Probeta 4	44,8	3620	1,31
Probeta 5	46,7	3958	1,16

Ensayo de tracción: Resina-Fibra-Almeja 1%			
Espécimen	Esfuerzo de Ruptura [MPa]	Módulo Elástico E [MPa]	Elongación [%]
Probeta 1	44,0	3105	1,54
Probeta 2	38,6	2863	1,52
Probeta 3	41,5	3185	1,46
Probeta 4	48,7	3329	1,80
Probeta 5	45,2	3118	1,71

Ensayo de tracción: Resina-Fibra-Cholga 1%			
Espécimen	Esfuerzo de Ruptura [MPa]	Módulo Elástico E [MPa]	Elongación [%]
Probeta 1	57,9	4649	1,26
Probeta 2	39,1	3811	1,03
Probeta 3	58,6	4321	1,37
Probeta 4	49,1	4425	1,09
Probeta 5	60,0	4816	1,38

Ensayo de tracción: Resina-Fibra-Almeja 3%			
Espécimen	Esfuerzo de Ruptura [MPa]	Módulo Elástico E [MPa]	Elongación [%]
Probeta 1	49,0	3563	1,56
Probeta 2	49,4	3452	1,65
Probeta 3	53,6	3850	1,47
Probeta 4	37,5	3714	0,94
Probeta 5	42,1	3531	1,25

Ensayo de tracción: Resina-Fibra-Cholga 3%			
Espécimen	Esfuerzo de Ruptura [MPa]	Módulo Elástico E [MPa]	Elongación [%]
Probeta 1	40,5	3673	1,15
Probeta 2	48,0	3701	1,33
Probeta 3	35,4	2894	1,24
Probeta 4	40,7	3438	1,24
Probeta 5	44,6	3605	1,33

Ensayo de tracción: Resina-Fibra-Almeja 5%			
Espécimen	Esfuerzo de Ruptura [MPa]	Módulo Elástico E [MPa]	Elongación [%]
Probeta 1	39,7	3337	1,23
Probeta 2	45,1	3507	1,43
Probeta 3	41,4	3181	1,44
Probeta 4	48,6	3705	1,37
Probeta 5	47,4	3673	1,31

Ensayo de tracción: Resina-Fibra-Cholga 5%			
Espécimen	Esfuerzo de Ruptura [MPa]	Módulo Elástico E [MPa]	Elongación [%]
Probeta 1	35,4	3004	1,12
Probeta 2	38,4	3172	1,30
Probeta 3	37,3	3499	1,08
Probeta 4	37,1	3259	1,18
Probeta 5	34,2	2977	1,16

Ensayo de flexión: Resina			
Espécimen	Esfuerzo máximo flexión [MPa]	Módulo Elástico E [MPa]	Elongación [%]
Probeta 1	49,5	1342	11,74
Probeta 2	62,6	1829	16,52
Probeta 3	59,6	1756	16,88
Probeta 4	47,8	1271	10,95
Probeta 5	46,5	1238	10,82

Ensayo de flexión: Resina-Almeja 1%			
Espécimen	Esfuerzo máximo flexión [MPa]	Módulo Elástico E [MPa]	Elongación [%]
Probeta 1	61,1	1923	14,15
Probeta 2	60,0	1793	14,08
Probeta 3	63,8	1974	11,40
Probeta 4	62,3	1886	12,59
Probeta 5	61,3	1884	11,95

Ensayo de flexión: Resina-Cholga 1%			
Espécimen	Esfuerzo máximo flexión [MPa]	Módulo Elástico E [MPa]	Elongación [%]
Probeta 1	58,9	1792	16,02
Probeta 2	58,4	1867	17,33
Probeta 3	58,2	1607	14,59
Probeta 4	58,2	1728	14,70
Probeta 5	63,3	2011	15,34

Ensayo de flexión: Resina-Almeja 3%			
Espécimen	Esfuerzo máximo flexión [MPa]	Módulo Elástico E [MPa]	Elongación [%]
Probeta 1	62,1	1867	10,58
Probeta 2	61,3	1882	12,85
Probeta 3	60,8	1848	11,76
Probeta 4	61,9	1937	11,35
Probeta 5	63,8	2126	10,26

Ensayo de flexión: Resina-Cholga 3%			
Espécimen	Esfuerzo máximo flexión [MPa]	Módulo Elástico E [MPa]	Elongación [%]
Probeta 1	64,2	1798	10,09
Probeta 2	66,4	2007	9,21
Probeta 3	66,8	2001	9,41
Probeta 4	65,7	1945	10,28
Probeta 5	63,4	1768	10,20

Ensayo de flexión: Resina-Almeja 5%			
Espécimen	Esfuerzo máximo flexión [MPa]	Módulo Elástico E [MPa]	Elongación [%]
Probeta 1	62,2	2016	7,24
Probeta 2	60,2	1883	6,07
Probeta 3	64,0	2085	8,42
Probeta 4	56,9	1882	8,06
Probeta 5	62,0	1968	7,76

Ensayo de flexión: Resina-Cholga 5%			
Espécimen	Esfuerzo máximo flexión [MPa]	Módulo Elástico E [MPa]	Elongación [%]
Probeta 1	60,4	1889	9,24
Probeta 2	64,3	2069	10,48
Probeta 3	61,2	1793	9,99
Probeta 4	63,3	2018	9,21
Probeta 5	61,3	1868	10,10

Ensayo de flexión: Resina-Fibra			
Espécimen	Esfuerzo máximo flexión [MPa]	Módulo Elástico E [MPa]	Elongación [%]
Probeta 1	84,3	4162	2,69
Probeta 2	77,4	3998	4,31
Probeta 3	90,3	4598	3,19
Probeta 4	83,7	4262	3,05
Probeta 5	74,5	3332	2,96

Ensayo de flexión: Resina-Fibra-Almeja 1%			
Espécimen	Esfuerzo máximo flexión [MPa]	Módulo Elástico E [MPa]	Elongación [%]
Probeta 1	73,8	3479	3,23
Probeta 2	67,9	3500	3,19
Probeta 3	78,0	3789	3,15
Probeta 4	70,8	3277	2,97
Probeta 5	67,3	3121	3,13

Ensayo de flexión: Resina-Fibra-Cholga 1%			
Espécimen	Esfuerzo máximo flexión [MPa]	Módulo Elástico E [MPa]	Elongación [%]
Probeta 1	70,7	3820	2,80
Probeta 2	68,9	3302	3,03
Probeta 3	78,2	3871	3,15
Probeta 4	93,6	5169	2,69
Probeta 5	77,4	4135	3,32

Ensayo de flexión: Resina-Fibra-Almeja 3%			
Espécimen	Esfuerzo máximo flexión [MPa]	Módulo Elástico E [MPa]	Elongación [%]
Probeta 1	72,8	3665	3,07
Probeta 2	50,9	2854	4,52
Probeta 3	68,0	3279	3,03
Probeta 4	70,3	3490	3,45
Probeta 5	71,8	3654	3,35

Ensayo de flexión: Resina-Fibra-Cholga 3%			
Espécimen	Esfuerzo máximo flexión [MPa]	Módulo Elástico E [MPa]	Elongación [%]
Probeta 1	69,5	3646	2,57
Probeta 2	76,5	3701	2,90
Probeta 3	82,7	3951	3,13
Probeta 4	80,6	3968	3,44
Probeta 5	81,9	3851	3,21

Ensayo de flexión: Resina-Fibra-Almeja 5%			
Espécimen	Esfuerzo máximo flexión [MPa]	Módulo Elástico E [MPa]	Elongación [%]
Probeta 1	78,9	4170	2,62
Probeta 2	72,1	3636	2,77
Probeta 3	84,8	4454	2,83
Probeta 4	76,7	3713	2,96
Probeta 5	84,4	4599	2,69

Ensayo de flexión: Resina-Fibra-Cholga 5%			
Espécimen	Esfuerzo máximo flexión [MPa]	Módulo Elástico E [MPa]	Elongación [%]
Probeta 1	70,0	3574	2,84
Probeta 2	64,9	2979	2,80
Probeta 3	71,8	3910	3,15
Probeta 4	67,5	3431	2,95
Probeta 5	62,3	3036	2,82