



# UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS.

ESTUDIO DEL EFECTO DE LAS FIBRAS DE  
LUFFA (ESTROPAJO) EN LAS PROPIEDADES  
MECÁNICAS Y TÉRMICAS DE MATERIALES  
ELABORADOS CON RESINA Y MÁRMOL

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

**FÍSICO**

PRESENTA

**CYNTHIA CASTRO LÓPEZ**

**ASESOR**

**DR. GONZÁLO MARTÍNEZ BARRERA**

**COASESOR**

**DR. JORGE OROZCO VELAZCO**



TOLUCA, MÉXICO, MARZO 2025

# ÍNDICE

DEDICATORIAS .....	¡Error! Marcador no definido.
AGRADECIMIENTOS .....	¡Error! Marcador no definido.
RESUMEN.....	3
INTRODUCCIÓN.....	4
CAPÍTULO 1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	5
1.1. MATERIALES COMPUESTOS .....	6
1.2. CONCRETO POLIMÉRICO.....	8
1.2.1. MÁRMOL.....	9
1.2.1 RESINA POLIÉSTER.....	9
1.3. MATERIALES COMPUESTOS CON FIBRAS DE LUFFA.....	12
1.3.1 FIBRAS DE LUFFA .....	13
1.3.2 LUFFA UTILIZADA EN MATERIALES A BASE DE RESINA POLIÉSTER .....	14
1.4. PROPIEDADES MECÁNICAS.....	17
1.4.1. RESISTENCIA MECÁNICA .....	18
1.4.2. MEDICIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD .....	20
1.5. DIFRACCIÓN DE RAYOS X .....	22
CAPÍTULO 2 DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	23
2.1. MATERIALES.....	24
2.2. ELABORACIÓN DE LAS PROBETAS DE CONCRETO POLIMÉRICO .....	28
2.3. PRUEBAS MECÁNICAS .....	34
CAPÍTULO 3 RESULTADOS .....	37
RESULTADOS .....	38
3.1 CONCRETO POLIMÉRICO.....	38
3.1.1. RESISTENCIA.....	38
3.1.2. DEFORMACIÓN A LA RUPTURA .....	41
3.1.3. MÓDULO DE ELASTICIDAD .....	44
3.2. CONCRETO POLIMÉRICO CON FIBRAS DE LUFFA.....	47
3.2.1. RESISTENCIA.....	47
3.2.2. DEFORMACIÓN A LA RUPTURA .....	52
3.2.3. MÓDULO DE ELASTICIDAD .....	56

<b>3.3. COMPARACIÓN DE LOS MÁXIMOS VALORES PARA CONCRETOS CON Y SIN FIBRAS DE LUFFA .....</b>	<b>59</b>
<b>3.4. MORFOLOGÍA DE LA LUFFA .....</b>	<b>60</b>
<b>3.5. DIFRACCIÓN DE RAYOS y EDS DE LA LUFFA .....</b>	<b>61</b>
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>63</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>65</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>70</b>

## RESUMEN

El presente trabajo se centró en la elaboración de materiales compuestos, hechos a base de resina poliéster, mármol y fibras de Luffa, de los cuales se evaluaron las propiedades mecánicas, para obtener mejoras en la resistencia del compuesto.

El mármol usado en la elaboración consto de dos tamaños, marmolina fina con tamaño promedio de 0.30 mm y marmolina gruesa de 2 mm, utilizándolas de manera individual y en combinación. Las fibras de Luffa fueron recortadas en rectángulos de 1 cm de largo y 0.5 cm de ancho, y fibras de 0.2 - 0.3 mm de largo. Se prepararon probetas para pruebas de tensión, flexión y compresión, se elaboraron con 70, 75 y 80% de mármol, y con 20, 25 y 30% de resina, con el agregado del 1% y 3% de fibras de Luffa.

Estas probetas fueron sometidas a pruebas mecánicas realizadas en una Maquina Universal de Pruebas marca CONTROLS modelo 70-S17C2 (Cernusco, Italy), con una capacidad de 30 toneladas, ubicada en el Laboratorio de Investigación y Desarrollo de Materiales Avanzados (LIDMA), de la Facultad de Química, UAEMex.

Dentro de los resultados obtenidos se observan menores resultados al agregar Fibras de Luffa con el 1%, por lo que se observa que, al tener un agregado de fibras de Luffa se absorben los esfuerzos, permitiendo que los concretos permanezcan en una pieza y aumenten su resistencia.

## INTRODUCCIÓN

Dentro del estudio de materiales, se ha centrado en el desarrollo de innovaciones, dentro de estas están el estudio e introducción de fibras naturales o sintéticas, con el uso de fibras naturales se busca tener un enfoque más ecológico, creando materiales compuestos, ya que al tener una mezcla entre polímeros naturales y la celulosa de las fibras, se desarrolla un compuesto biodegradable y ecológico. (Tripathy S., et al., 2020).

Las fibras naturales utilizadas han sido cáñamo, yute, coco, banana, bambú, lino y algodón, la Luffa o mejor conocido como estropajo es utilizado como utensilio de higiene y limpieza, y podría ser una excelente alternativa en el desarrollo de compuestos, ya que puede ser amigable con el medio ambiente, sin embargo, aún al ser una fibra comercial existe poca información en la elaboración de compuestos.

Para el desarrollo de este trabajo se utilizará estropajos de origen mexicano, para la elaboración de materiales compuestos, en los cuales se evaluará las propiedades mecánicas con la finalidad de obtener mejoras en resistencia.

La investigación presenta 3 capítulos, en cada uno se detallan los fundamentos teóricos, desarrollo experimental y análisis de resultados, así como conclusiones.

# **CAPÍTULO 1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

## 1.1. MATERIALES COMPUESTOS

Los materiales compuestos se componen de dos o más materiales con propiedades diferentes. Un material compuesto presenta dos fases, una denominada matriz, la cual es continua y rodea a la otra fase conocida como fase dispersa. Algunos ejemplos de materiales compuestos se muestran en la Figura 1.1.

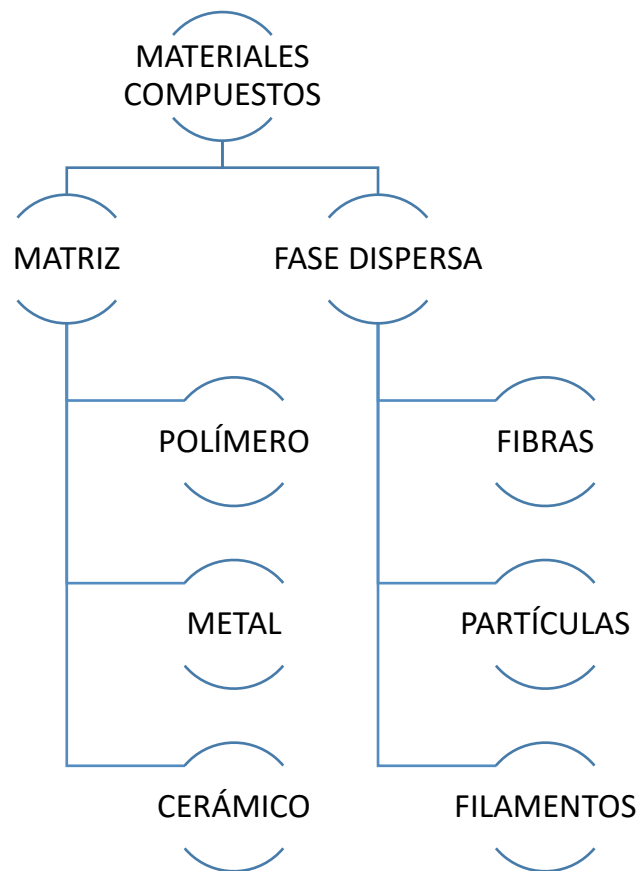


Figura 1.1. Composición de materiales compuestos

Por ejemplo se tienen resinas poliméricas reforzados con fibras, las cuales pueden encontrarse de forma continua, discontinua y alineada, así como de forma discontinua y al azar (OCW, 2001), como se muestra en la Figura 1.2.

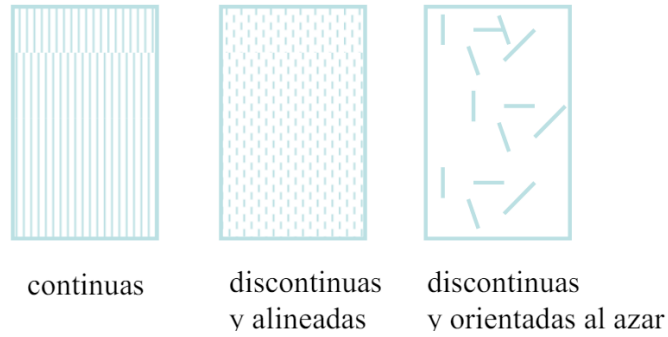


Figura 1.2. Materiales compuestos con fibras.

Estos materiales surgen a partir de la necesidad de cubrir ciertas deficiencias que los materiales cerámicos, plásticos y metálicos, no pueden llegar a proporcionar. Por ejemplo, deficiencias en ligereza, resistencia, corrosión o desgaste. En este sentido, cada una de las dos fases del material compuesto, contribuyen al mejoramiento.

La matriz proporciona las principales propiedades físicas y químicas al material compuesto. Cuando una fuerza es aplicada, la matriz transfiere la carga al refuerzo (fase dispersa). En la mayoría de los casos incrementa la fuerza de adhesión con los refuerzos, con el fin de evitar la propagación de grietas. En el caso de los refuerzos añadidos (partículas, fibras), estos tienen como finalidad mejorar las propiedades de las cuales la matriz carece, por ejemplo, la rigidez, el peso y la resistencia. Por ejemplo, una mayor fuerza de adhesión produce cambios notables en el módulo de elasticidad (Stupenengo, 2011).

## 1.2. CONCRETO POLIMÉRICO

El concreto polimérico es el material compuesto de resina y minerales. Debido a los altos valores de resistencia, representa una alternativa al tradicional concreto a base de cemento Portland (concreto hidráulico). Las propiedades del concreto polimérico se muestran en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1. Propiedades de concreto polimérico.

Propiedad	Valor
Peso volumétrico, kg/m <sup>3</sup>	1,500-2,400
Resistencia a la compresión, MPa	58 – 176
Resistencia a la flexión, MPa	13 – 27
Resistencia a la tensión, MPa	12– 16
Módulo de elasticidad, GPa	3.9 – 4.4
Absorción de agua, % en peso	0.3 – 1

Además:

- El peso volumétrico es de 10% a 33% menor que el del concreto hidráulico.
- Las resistencias a la compresión, flexión y tensión son entre tres y cinco veces mayores que la del concreto hidráulico.
- Son resistentes a la corrosión, a ataques químicos, al ambiente y otras formas de deterioro; características que les permiten tener más tiempo de vida útil.
- Son estables bajo condiciones de congelación y descongelación.
- Se tienen menores costos en el manejo y la instalación; no se requieren equipos especiales. Esto permite que sean rentables.

### **1.2.1.MÁRMOL**

El mármol es una roca metamórfica compacta formada a partir de rocas calizas que, sometidas a elevadas temperaturas y presiones, alcanzan un alto grado de cristalización. El componente básico del mármol es la calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), cuyo contenido supera el 90%. Los demás componentes (arcilla, cuarzo, mica, pirita, óxido de hierro, entre otros), son considerados como impurezas, y permiten que el mármol tenga una gran variedad de colores y diferentes propiedades. Algunas de ellas se muestran en la Tabla xx. El mármol presenta una densidad de  $2,711 \text{ kg/m}^3$ , dureza de 3-4 mohs y punto de fusión de  $899^\circ\text{C}$ . Se utiliza en la industria de la construcción, principalmente en la creación de pisos, cubiertas, muebles y columnas. Después de fragmentarse se utiliza como agregado de concreto (Betancourt et al., 2015).

### **1.2.1 RESINA POLIÉSTER**

Para la elaboración de las resinas se utilizan termoplásticos debido a sus propiedades de rigidez a temperatura ambiente, y de flexibilidad y deformación a altas temperaturas. Las resinas más utilizadas son el poliéster, vinílicas, epoxi y poliuretano (Sivakandhan et. al., 2019).

Las resinas son líquidas a temperatura ambiente, pero con la adición de catalizadores a base de peróxidos llegan al estado sólido. Durante el periodo de curado promovido por el catalizador, la resina llega a contraerse hasta un 7% del volumen, además de liberarse calor, esto hace que la resina pase por un estado gel a un sólido, al endurecerse (Gil, 2012).

Dentro de las resinas de poliéster, se encuentran:

- Ortoftálica: que son de uso general.
- Isoftálica: que contienen neopentil glicol, las cuales presentan alta resistencia química y al ambiente.

Las propiedades mecánicas de resina poliéster se muestran en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2. Propiedades mecánicas y térmicas de resina poliéster.

<b>Propiedad</b>	<b>Ortoftálica</b>	<b>Isoftálica</b>
Resistencia a la compresión, MPa	60-80	120
Resistencia a la flexión, MPa	80	130
Resistencia a la tensión, MPa	55	75
Módulo de flexión, GPa	3.45	3.59
Módulo de tensión, GPa	3.45	3.38
Elongación, %	2.1	3.3
Dureza, Barcol	30-40	40
Temperatura de exoterma, °C	140-160	215
Tiempo de gel, min	9-12	11-15
Tiempo de exoterma, min	23-33	25

Las etapas del proceso de curado de la resina poliéster se muestra en la Figura 1.3. Se observan tiempos y características durante el curado. Existen dos tiempos, el de gel, que es característico de la etapa de gelificación. Mientras que el tiempo de reacción se relaciona con el endurecimiento, e indica cuando se la resina alcanza un pico exotérmico.

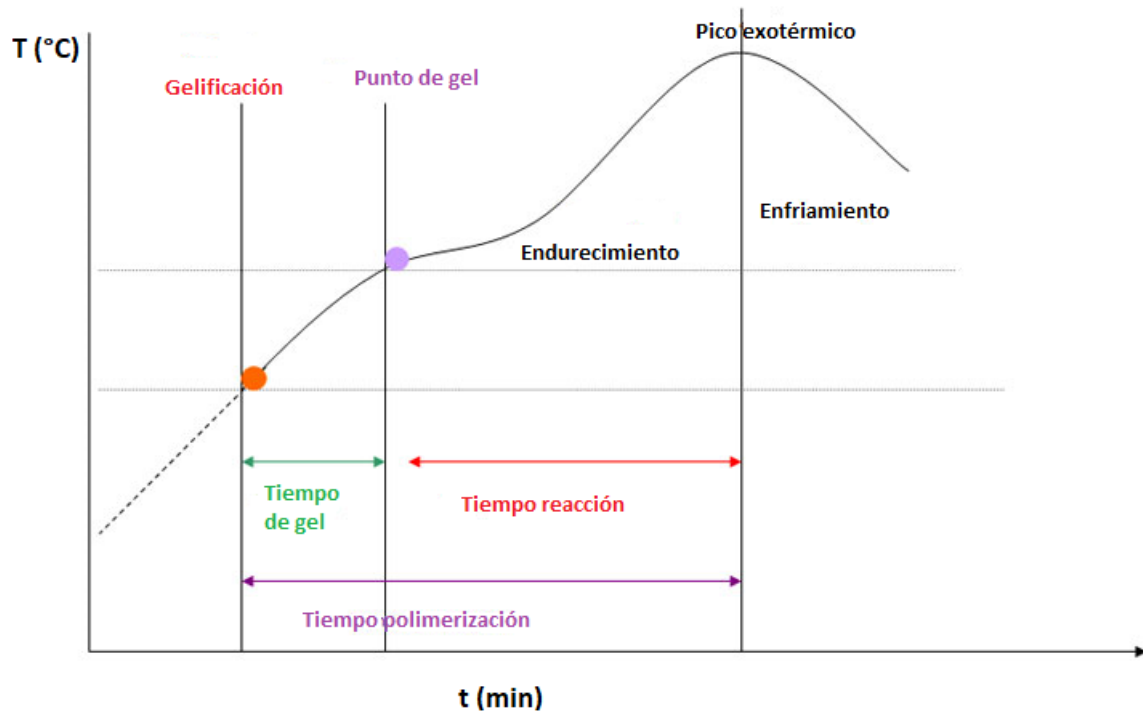


Figura 1.3. Etapas del proceso de curado de la resina de poliéster (Gazechim, 2013).

### 1.3. MATERIALES COMPUESTOS CON FIBRAS DE LUFFA

Las fibras naturales han sido utilizadas en diversos materiales de construcción como refuerzos, por ejemplo, el uso de paja en el barro para la elaboración de tabicones. Las fibras se han usado en el ámbito de la higiene personal, doméstico e industrial. Algunas de estas son fibras de Luffa, de caña de azúcar, yute, algodón, coco y sisal. En la Figura 1.4 se muestran las diferentes fibras de plantas (Pozo et. al., 2019; Lavoignet et.al., 2022).

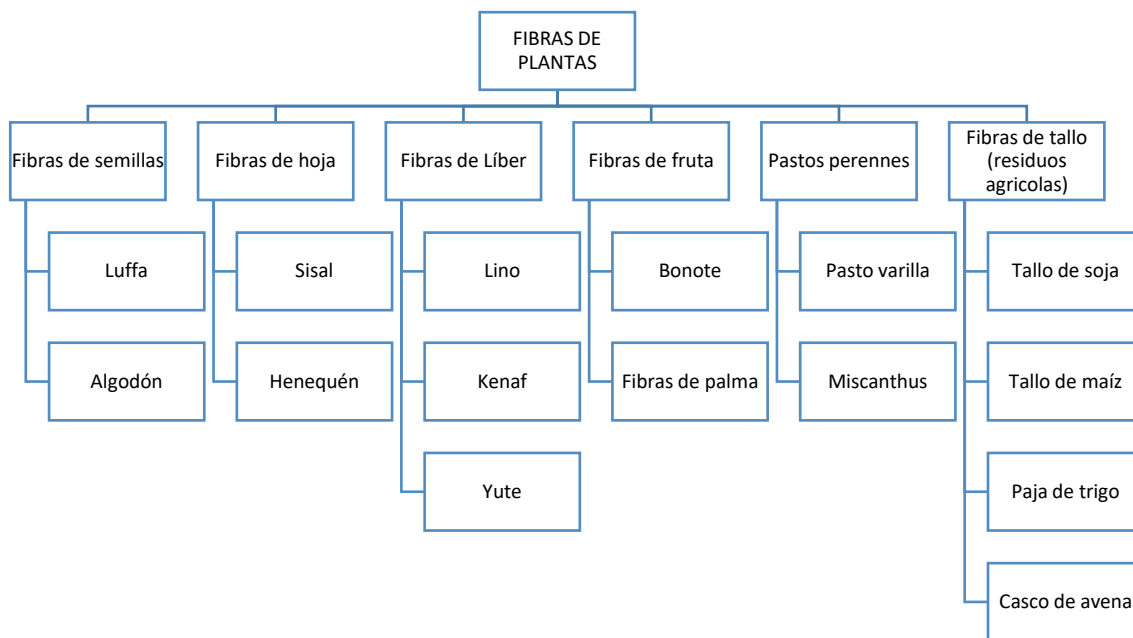


Figura 1.4. Tipos de fibras naturales. (Martínez et al., 2022).

Las fibras naturales, están compuestas primordialmente de celulosa, hemicelulosa y lignina, cuyas características se mencionan a continuación:

- Celulosa: es un polisacárido semicristalino que transfiere su carácter hidrófilo, otorga rigidez, resistencia, y estabilidad estructural. Su estructura química contiene tres grupos hidroxilos (-OH).

- Hemicelulosa: es un polímero ramificado y amorfo. Esta unida a la celulosa por puentes de hidrógeno. La estructura química contiene grupos hidroxilos (-OH) y acetilos (CH<sub>3</sub>CO-), que son solubles al agua.
- Lignina: es amorfa y aromática, brinda resistencia adicional y acoplamiento con la hemicelulosa.

En la mayoría de los casos la adherencia es baja entre las fibras y la matriz polimérica, esto debido al carácter hidrofóbico de la matriz, y a la poca absorción de humedad. Por lo que se recomienda la aplicación de un tratamiento químico a las fibras.

### **1.3.1 FIBRAS DE LUFFA**

Las fibras de Luffa tienen un alto potencial de uso comercial e industrial. A nivel mundial, se producen 30 millones de toneladas. El uso de estas fibras en la construcción ha ido en aumento, por ejemplo, en el concreto, vigas y paredes. La Luffa es un fruto de una planta subtropical de la familia Cucurbitácea, el cual consiste en una red interconectada fibrosa, con dos regiones: un núcleo central parecido a un panal, y un núcleo externo que presenta paredes multidireccionales. A pesar de su baja densidad, las fibras tienen adecuadas propiedades mecánicas y físicas. Las fibras están compuestas de 60% de celulosa, 30% de hemicelulosa y 10% de lignina (Figura 1.5). (Martínez López, 2012; Khaloo and Kim, 1996). Las propiedades de la Luffa se muestran en la Tabla 1.4.

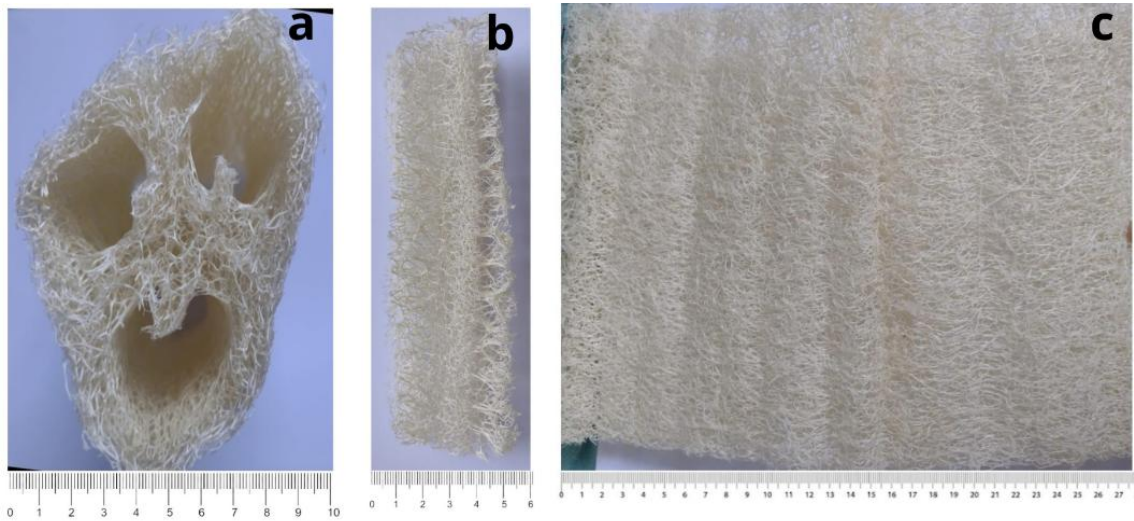


Figura 1.5. Fruto de Luffa: a) Corte trasversal, b) núcleo central, c) núcleo externo.

Tabla 1.4. Propiedades de las fibras de Luffa.

Propiedad	Valor
Resistencia a la tensión, MPa	21.3 ± 6.6
Módulo de elasticidad, GPa	0.8 ± 0.3
Elongación, %	4.5 ± 0.4
Área superficial, m <sup>2</sup> /g	123.0
Absorción de agua desionizada, g/g	13.6

### 1.3.2 LUFFA UTILIZADA EN MATERIALES A BASE DE RESINA POLIÉSTER

La interacción entre fibras naturales y una matriz polimérica son débiles, lo cual causa malas transferencias de cargas en las fibras; esto por las propiedades de absorción de humedad de las fibras. Así mismo, la resistencia a la tracción en materiales compuestos con fibras naturales es menor que en las fibras sintéticas, mientras que el módulo de elasticidad es del mismo orden.

Considerando estas consideraciones, la mala distribución en una matriz polimérica, la mala compatibilidad, con agentes de acoplamiento comercial, el uso de Luffa (fibra lignocelulósica), con relleno o refuerzo en materiales compuestos ha aumentado la atención, debido al uso de tratamientos químicos. Considerando que los problemas en las propiedades mecánicas, pueden ser provocadas por la mala adhesión entre el polímero y la carga. Dentro de los materiales compuestos, se han usado diferentes matrices como epoxi, poliéster, resorcinol-formaldehído, ácido poliláctico, polietileno de base biológica (HDPE), éster vinílico, espuma de poliuretano, poliuretano (PU) y polipropileno (Mazali y Alves, 2005; Ghali. et al., 2009).

Se utilizó Luffa cilíndrica (15-30%) como refuerzo en un material compuesto a base de resina de poliéster. Los resultados muestran que a medida que aumenta el porcentaje de luffa, la resistencia y el módulo de elasticidad disminuyen. Con un 30% de Luffa, la resistencia es de 30,1 MPa y el módulo de elasticidad es de 1,7 GPa. Por el contrario, el modo de fractura pasa de un modo abrupto a un modo más controlado y seguro. Cabe señalar que la resistencia obtenida es comparable a la de los compuestos de resina y bagazo de caña utilizados en la fabricación de muebles de bajo costo (Boynard y D'Almeida, 2000).

La fibra de Luffa se usa como refuerzo en la resina de poliéster, sin embargo, por la mala compatibilidad entre ellas, se desarrolla una mala adhesión entre ellas, para lo cual se han incrementado el uso de tratamientos superficiales como el físico (descarga de corona), químico (tratamiento alcalino, acetilación) o el tratamiento térmico (Tanobe et al., 2014).

La acetilación disminuye la absorción de humedad de las fibras de Luffa debido a la sustitución de grupo hidroxilo por grupos acetilo hidrofóbicos, el hidróxido de sodio provoca pequeños rayones en la fibra debido a la eliminación del contenido de lignina y hemicelulosa. Además, las soluciones de hidróxido de sodio/antraquinona pueden eliminar materiales cerosos y gomosos de las fibras. Como es sabido, todos estos tratamientos pueden provocar cambios en las fibras naturales.

Dentro de los cambios en las fibras naturales a causa de tratamientos pueden ser la eliminación de regiones amorfas, disolución parcial de lignina o el desarrollo de calulosa cristalina. (Ghali et al., 2011; Tanobe et al., 2014).

Los compuestos producidos con resina de poliéster y fibras cortas de Luffa (tamaño 0,25-0,42 mm), se sometieron a un tratamiento superficial con NaOH (2% durante 90 min). Los resultados muestran una energía de fractura de 3.500-3.710 J/m<sup>2</sup> y ningún cambio significativo en la resistencia a la tracción en comparación con los compuestos no tratados. En otro estudio, se utilizó Luffa en su estructura de estera original (35%) después del mismo tratamiento con NaOH, los resultados muestran un aumento del 57% en la resistencia a la tracción y un aumento del 62% en el módulo de Young en comparación con los valores de los compuestos con esteras de fibra sin tratar ( es decir, resistencia a la tracción de 14 MPa y módulo de Young de 3,2 GPa). La mejora cuando se utilizaron esteras sugiere que la orientación en la estructura de Luffa reduce la fragilidad de la matriz de poliéster (Tanobe et al., 2014).

## 1.4. PROPIEDADES MECÁNICAS

Los esfuerzos son fuerzas que actúan por unidad de área, produciendo cierta grado de deformación. Cuando la deformación se recupera, es decir, cuando el material vuelve a su forma original una vez que se elimina la fuerza aplicada, se tiene una deformación elástica. Mientras que si el material no recupera su forma, se tiene una deformación plástica.

El esfuerzo ( $S$ ) se define como:

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

Donde:

$F$  = Fuerza

$A_0$  = área de la sección transversal original (antes de la prueba)

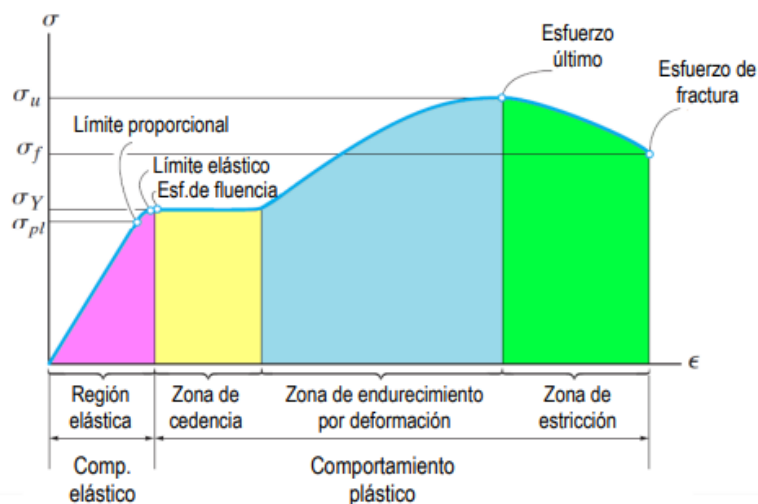
La deformación ( $e$ ) como:

$$e = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2)$$

$\Delta L$  = cambio de longitud después de aplicar fuerza

$L_0$  = distancia original entre marcas calibradas

El diagrama de Esfuerzo – Deformación representa gráficamente la relación entre el esfuerzo aplicado a un material y la deformación que este experimenta (Figura



1.6).

Figura 1.6. Diagrama de esfuerzo – deformación. (Yépez, 2014).

El diagrama presenta diferentes zonas:

- Región elástica: en donde el material puede deformarse de manera reversible, es decir regresa a su forma original si se retira la carga. Además, en esta zona se obtiene la pendiente de la recta con la cual se calcula el módulo de elasticidad.
- Límite de proporcionalidad: es el esfuerzo máximo aplicado a la prueba, el esfuerzo es directamente proporcional a la deformación.
- Límite elástico: es el esfuerzo máximo, que el material soporta mientras esta en la deformación elástica. Este es el punto límite en donde el material aún puede regresar a su forma original si se elimina la carga.
- Zona plástica: en esta área se presentan las deformaciones permanentes, es decir, el material ya no regresa a su forma original al retirar la carga.
- Zona de fractura: es el área en donde el material ya no soporta ninguna carga y se rompe, la curva ya no tiene continuidad (Martínez, 2012).

### 1.4.1. RESISTENCIA MECÁNICA

La resistencia en un material depende de la capacidad para soportar fuerzas, sin que se rompa o deforme permanentemente. Las unidades son las del esfuerzo, es decir MPa.

- **Tensión**



En esta prueba se aplica una fuerza que jala el material, alargándolo y reduciendo su diámetro. Los esfuerzos aplicados y las deformaciones correspondientes se grafican, como se muestra en el ejemplo de la Figura 1.7.

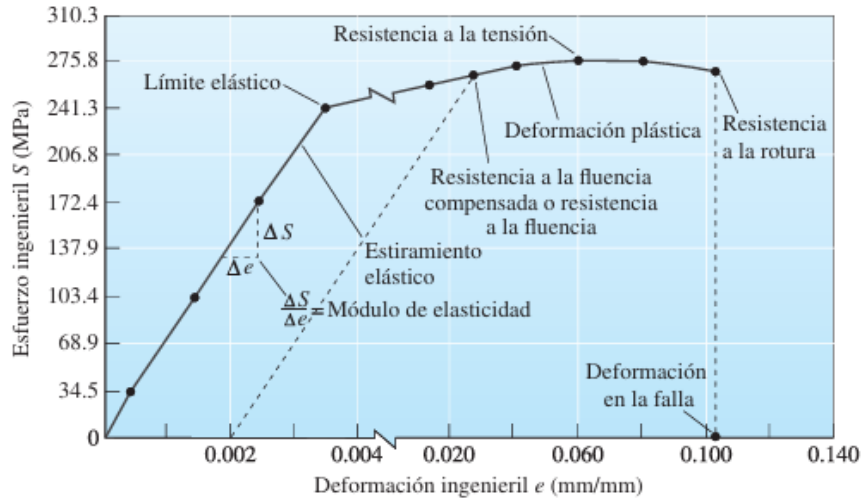


Figura 1.7. Curva esfuerzo-deformación, resultados de prueba de tensión (Askeland y Wright, 2017)

- **Compresión**



En esta prueba se aplica una fuerza que aplasta a la probeta, reduciendo su altura y ampliando el área transversal.

- **Flexión**

En esta prueba, la probeta se apoya en dos extremos y se aplica una fuerza en el centro, la cual va causando una deformación gradual, hasta que la probeta se rompe. A esta forma de prueba se le conoce como resistencia a la flexión en tres puntos (Askeland y Wright, 2017).

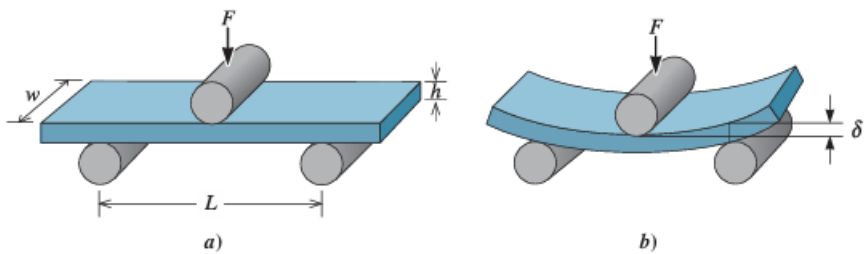


Figura 1.8. a) prueba de flexión de 3 puntos, b)  $\delta$  es el doblado de la probeta (deflexión).

La resistencia de tres puntos está definida como:

$$\sigma_{\text{flexión}} = \frac{3FL}{2wh^2} \quad (3)$$

Donde:

F = Fuerza de fractura

L = distancia entre los dos puntos externos

w = ancho del espécimen

h = altura del espécimen

### **1.4.2. MEDICIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD**

El módulo de elasticidad se basa en la Ley de Hooke, que describe el comportamiento elástico de los materiales. Se establece una relación lineal entre el esfuerzo elástico y la deformación elástica, como se muestra en la Figura xx. Donde la pendiente de la línea define módulo de elasticidad (o módulo de Young) (Askeland et al., 2017).

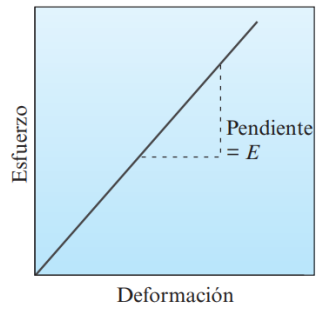


Figura 1.9. Línea se esfuerzo vs deformación.

El módulo se define por la ecuación:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (4)$$

Donde:

$E$  = módulo de elasticidad

$\sigma$  = esfuerzo

$\epsilon$  = deformación unitaria

Si el valor del módulo es alto, el material es rígido y se deforma poco, pero si el módulo es bajo, el material es flexible.

El módulo de elasticidad en la flexión o módulo de flexión de tres puntos se calcula con :

$$E_{\text{flexión}} = \frac{L^3 F}{4wh^3 \delta} \quad (5)$$

Donde:

F = Fuerza de fractura

L = distancia entre los dos puntos externos

w = ancho del especimen

h = altura del especimen

$\delta$  = deflexión de la viga

## **1.5. DIFRACCIÓN DE RAYOS X**

La técnica de difracción de rayos X consiste en hacer incidir un haz de electrones en el material a estudiar, generando diferentes señales que proporcionan información de su composición y estructura cristalina. De acuerdo a las intensidades de las reflexiones se determina la distribución de átomos y la red cristalina que forman. En una gráfica se colocan las intensidades en función del ángulo ( $2\theta$ ), de acuerdo a los picos de difracción.

# **CAPÍTULO 2 DESARROLLO EXPERIMENTAL**

## 2.1. MATERIALES

### Resina poliéster

La resina poliéster utilizada para la elaboración de las probetas fue obtenida de la empresa POLIFORMAS con código PP-70\*60. Es una resina poliéster insaturada ortoftálica pre-acelerada para una reacción media, de curado rápido, y con viscosidad adecuada para humectar de forma fácil y rápida.



Figura 2.1. Resina poliéster.

Las propiedades de la resina, proporcionadas por el proveedor se muestran en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Propiedades de la resina poliéster.

<b>PROPIEDADES</b>	<b>VALORES</b>
Viscosidad (25°C), cps	320 ± 40
Densidad, g/mL	1.10 ± 0.02
Tiempo de gel (25°C), min	12 ± 2
Tiempo de curado, min	20 ± 5
Temperatura de exoterma (°C)	175 ± 10
Dureza en pastilla, barcol	40 ± 5
color	Rosa

### **Marmolina**

Para la elaboración de las probetas se utilizó marmolina fina con tamaño promedio de 0.30 mm y marmolina gruesa de 2 mm, las cuales fueron donadas por la empresa PRODIMAR S.A. de C.V. (Pérez de Galeana, México).

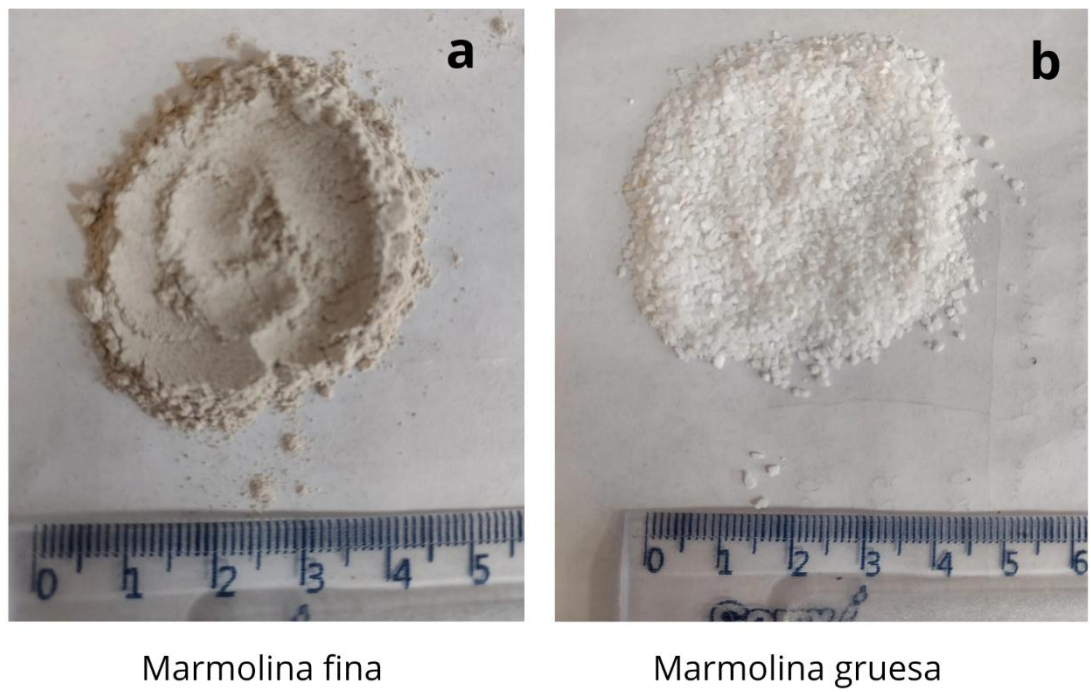


Figura 2.2. Marmolina utilizado en los concretos poliméricos, a) marmolina fina, b) marmolina gruesa.

La marmolina contiene 90% de carbonato de calcio (calcita) y 10% de magnesio (dolomita). Tiene una densidad e  $2.71 \text{ g/cm}^3$  y una dureza (Moh) de 3 a 4.

### **Fibras de Luffa (estropajo)**

En la investigación se utilizaron fibras de Luffa de la marca comercial FROTASH de la empresa dedicada a la higiene, Productos Ami-Rom (Chiautla de Tapia,



Puebla).

Figura 2.3. Luffa comercial (estropajo).

En los estropajos se separó mediante un corte con tijeras, el núcleo interno (núcleo central), del núcleo exterior.



Figura 2.4. Luffa en donde se observan los núcleos interiores.

De este, se cortaron manualmente con tijeras rectángulos y fibras de tamaños diferentes:

- Rectángulos de 1 cm de largo y 0.5 cm de ancho.
- Fibras de 0.2 - 0.3 mm de largo.

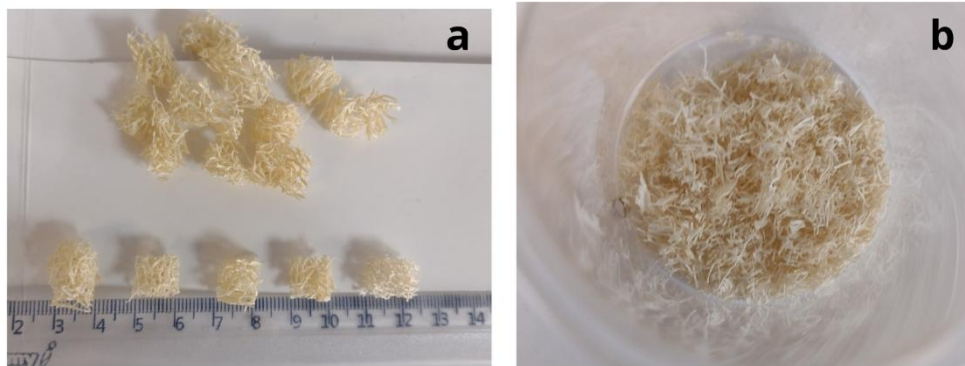


Figura 2.5. Luffa de: a) 1 cm de largo y b) 0.2-0.3 cm de largo.

## 2.2. ELABORACIÓN DE LAS PROBETAS DE CONCRETO POLIMÉRICO

Las probetas de concreto polimérico denominadas como Control, se elaboraron con 70, 75 y 80% de marmolina (M), y con 20, 25 y 30% de resina (R). Mientras que en las del concreto con fibras de Luffa (LC), se tuvieron cantidades de 1 y 3% de fibras. Para ambos tipos de concreto se utilizaron, por separado las marmolinas (M1 y M2), así como la combinación de ambas marmolina (M1/M2).

Las etapas seguidas para la elaboración de los concretos poliméricos, se muestran en la Figura 2.6.

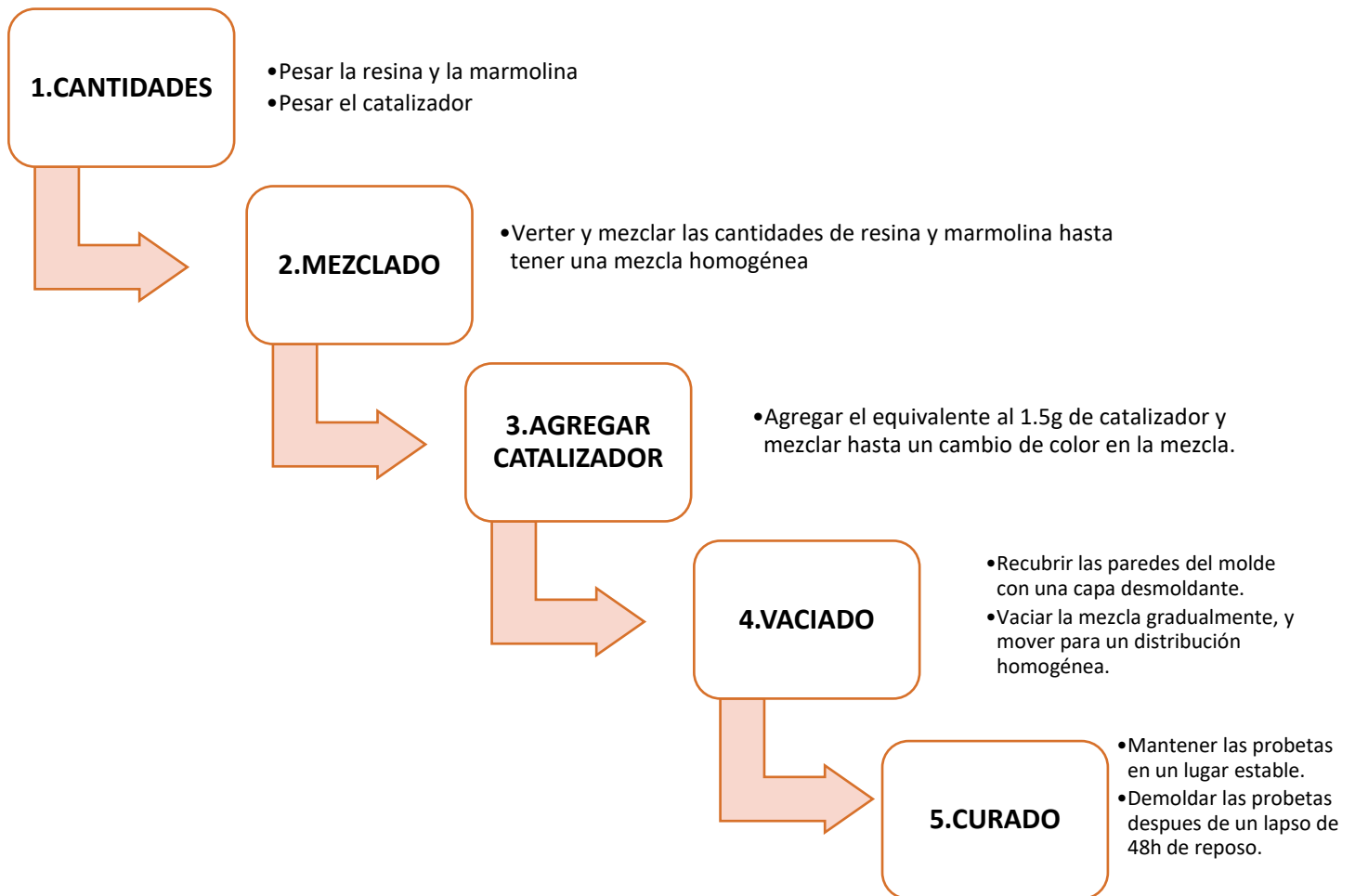


Figura 2.6. Diagrama de bloques del procedimiento para la obtención de los concretos poliméricos.

De acuerdo al diagrama, con base en las cantidades calculadas en gramos (etapa 1), en un recipiente de acero inoxidable se mezclaron la resina y el marmolina, moviendo continuamente, hasta obtener una mezcla homogénea (etapa 2). Posteriormente, se añadió 1.5% de catalizador, por cada 100 g de resina, para lograr el curado de la mezcla (etapa 3). Luego, se tomaron moldes con tres espacios de 4x4x16 cm (Figura 2.7); en las cuales se recubrieron las paredes con una capa de material desmoldante. Finalmente, la mezcla se vertió en los moldes (etapa 4), y se dejó por espacio de 48 horas, para su desmolde (etapa 5).



Figura 2.7. Etapas para la elaboración de las probetas de compresión y flexión.

Para las pruebas de tensión se utilizó menor cantidad de resina y marmolina. En un vaso de precipitado de 150 ml, PYREX, se mezclaron la resina poliéster, marmolina y las fibras Luffa, con movimiento continuo hasta tener una mezcla homogénea. Posteriormente se agregó el catalizador, para iniciar la polimerización. Se utilizó un molde de acero inoxidable, consistente de tres cavidades de 17 cm de largo (Figura 2.8), cuyas paredes fueron cubiertas con cera desmoldante. Finalmente, Las mezclas se vertieron en cada cavidad y fueron dejadas en reposo durante 48 horas.

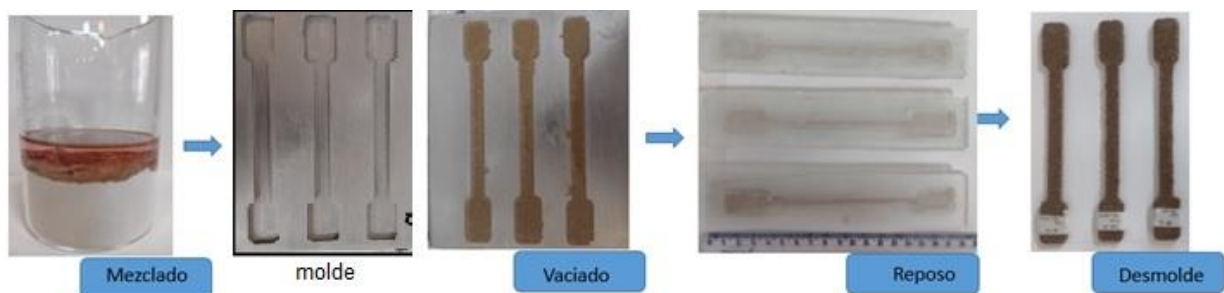


Figura 2.8. Etapas de la elaboración de probetas para pruebas de tensión.

Las cantidades de las probetas elaboradas para las pruebas de compresión y flexión se muestran en la Tabla 2.2. Mientras que las cantidades para las probetas ensayadas en tensión se muestran en la Tabla 2.3.

Tabla 2.2. Composición en porcentaje y en masa de los concretos poliméricos para las pruebas de compresión y flexión.

<b>Probeta (Código)</b>	<b>Marmolina (%)</b>	<b>Resina Poliéster (%)</b>	<b>Marmolina (g)</b>		<b>Resina Poliéster (g)</b>
80M1/20R	80	20	400		100
75M1/25R	75	25	375		125
70M1/30R	70	30	350		150
80M2/20R	80	20	400		100
75M2/25R	75	25	375		125
70M2/30R	70	30	350		150
40M1/40M2/20R	80	20	200	200	100
38M1/37M2/25R	75	25	188	187	125
35M1/35M2/30R	70	30	175	175	150

Tabla 2.3. Composición en porcentaje y en masa de los concretos poliméricos para la prueba de tensión.

<b>Probeta (Código)</b>	<b>Marmolina (%)</b>	<b>Resina Poliéster (%)</b>	<b>Marmolina (g)</b>		<b>Resina Poliéster (g)</b>
80M1/20R	80	20	16		4
75M1/25R	75	25	15		5
70M1/30R	70	30	14		6
80M2/20R	80	20	16		4
75M2/25R	75	25	15		5
70M2/30R	70	30	14		6
40M1/40M2/20R	80	20	8	8	4
38M1/37M2/25R	75	25	8	7	5
35M1/35M2/30R	70	30	7	7	6

Para los concretos con fibras de Luffa, las cantidades de probetas elaboradas para las pruebas de compresión y flexión se muestran en la Tabla 2.4 y la de las probetas ensayadas en tensión en la Tabla 2.5.

Tabla 2.4. Composición en porcentaje y en masa de los concretos poliméricos con Luffa.

<b>Probeta (Código)</b>	<b>Marmolina (%)</b>	<b>Resina Poliéster (%)</b>	<b>Marmolina (g)</b>		<b>Resina Poliéster (g)</b>	<b>Luffa (g)</b>
79M1/1LC/20R	80	20	395		100	5
74M1/1LC/25R	75	25	370		125	5
69M1/1LC/30R	70	30	345		150	5
79M2/1LC/20R	80	20	395		100	5
74M2/1LC/25R	75	25	370		125	5
69M2/1LC/30R	70	30	345		150	5
40M1/39M2/1LC/20R	80	20	198	197	100	5
37M1/37M2/1LC/25R	75	25	185	185	125	5
35M1/34M2/1LC/30R	70	30	173	172	150	5

Tabla 2.5. Composición en porcentaje y en masa de los concretos poliméricos con Luffa para prueba de tensión.

<b>Probeta (Código)</b>	<b>Marmolina (%)</b>	<b>Resina Poliéster (%)</b>	<b>Marmolina (g)</b>	<b>Resina Poliéster (g)</b>	<b>Luffa (g)</b>
79M1/1LC/20R	80	20	16	4	0.2
74M1/1LC/25R	75	25	15	5	0.2
69M1/1LC/30R	70	30	14	6	0.2

## 2.3. PRUEBAS MECÁNICAS

### Ensayo en flexión

La prueba consiste en colocar la probeta prismática (4x4x16 cm), sobre dos soportes, posteriormente la máquina aplica una fuerza en el punto medio de la probeta, como se muestra en la Figura 2.9. Con esta prueba se obtienen los resultados de máxima resistencia a la flexión, deformación en el punto de máxima resistencia y el módulo de flexión.



Figura 2.9. Prueba de flexión.

Las condiciones del ensayo en flexión se muestran en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6. Condiciones del ensayo en flexión de los concretos poliméricos.

CONDICIONES	VALOR
Velocidad en fuerza, Kg/s	25
Velocidad en posición, mm/min	0.3
Límite superior de fuerza, t	25,000
Límite superior de posición, mm	4.5

### **Ensayo en compresión**

En esta prueba se aplica una fuerza que presiona la probeta de concreto polimérico. Al comprimirse la probeta reduce su altura, pero aumenta su parte central (Figura 2.10). Las condiciones del ensayo en compresión, son las mismas que las de la prueba de flexión, mostrada en Tabla 2.6.



Figura 2.10. Prueba de compresión.

Las pruebas de flexión y compresión se realizaron en una Máquina Universal de Pruebas de la marca CONTROLS modelo 70-S17C2 (Cernusco, Italy), con una capacidad de 30 toneladas, ubicada en el Laboratorio de Investigación y Desarrollo de Materiales Avanzados (LIDMA), de la Facultad de Química, UAEMex.



Figura 2.11. Máquina Universal de Pruebas, CONTROLS.

En la Figura 2.12. se muestra el ejemplo del panel de control de la Máquina Universal de Pruebas.

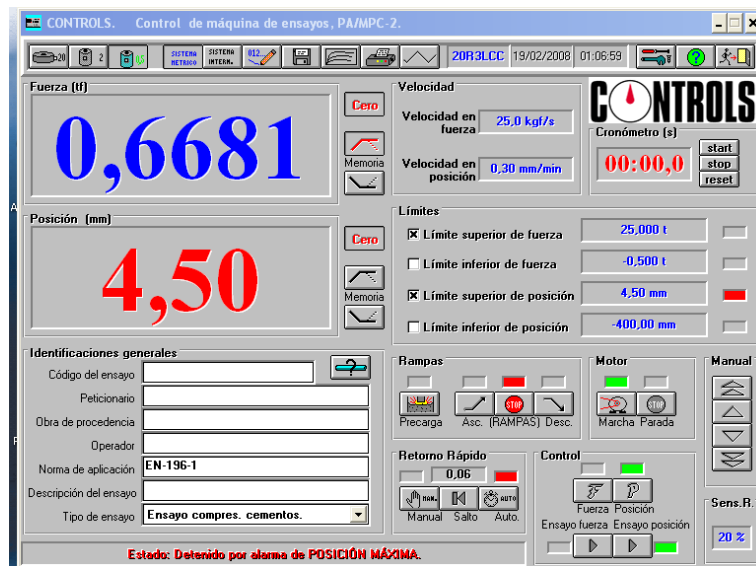


Figura 2.12. Panel de control de la Máquina Universal de Pruebas.

## **CAPÍTULO 3 RESULTADOS**

## **RESULTADOS**

Los resultados de las cuatro propiedades mecánicas:

- Resistencia a la compresión
- Resistencia a la flexión
- Deformación en la ruptura
- Módulo de elasticidad

Se analizaron conforme a los parámetros: a) tamaño de marmolina y b) cantidad de resina utilizados.

### **3.1 CONCRETO POLIMÉRICO**

#### **3.1.1. RESISTENCIA**

Para una mejor visualización de los resultados de las pruebas de resistencia, se muestran en una sola grafica los tres tipos de resistencia: compresión, flexión y tensión (Figura 3.1). I) Los resultados tomando en consideración el tamaño de la marmolina, muestran que los valores de resistencia a la compresión son mayores para los concretos con marmolina fina, seguidos por los de concretos con la combinación de marmolinas (fina y gruesa), y finalmente por los que utilizaron marmolina gruesa. Es decir, los valores de mayor resistencia en concretos con marmolina fina se deben al tamaño de las mismas, ya que estas tiene un mejor acomodo en el concreto y adherencia con la resina poliéster, y cuando se aplica la fuerza al concreto, cada partícula de mármol produce cierta distribución de esfuerzos en todo el concreto, haciendo que la resistencia aumente.

En el caso de la resistencia a la flexión y a la tensión se presenta el mismo comportamiento, los valores son mayores para concretos con marmolina fina, seguidos por los valores obtenidos para concretos con la combinación de marmolinas, y finalmente por los que utilizaron marmolina gruesa.

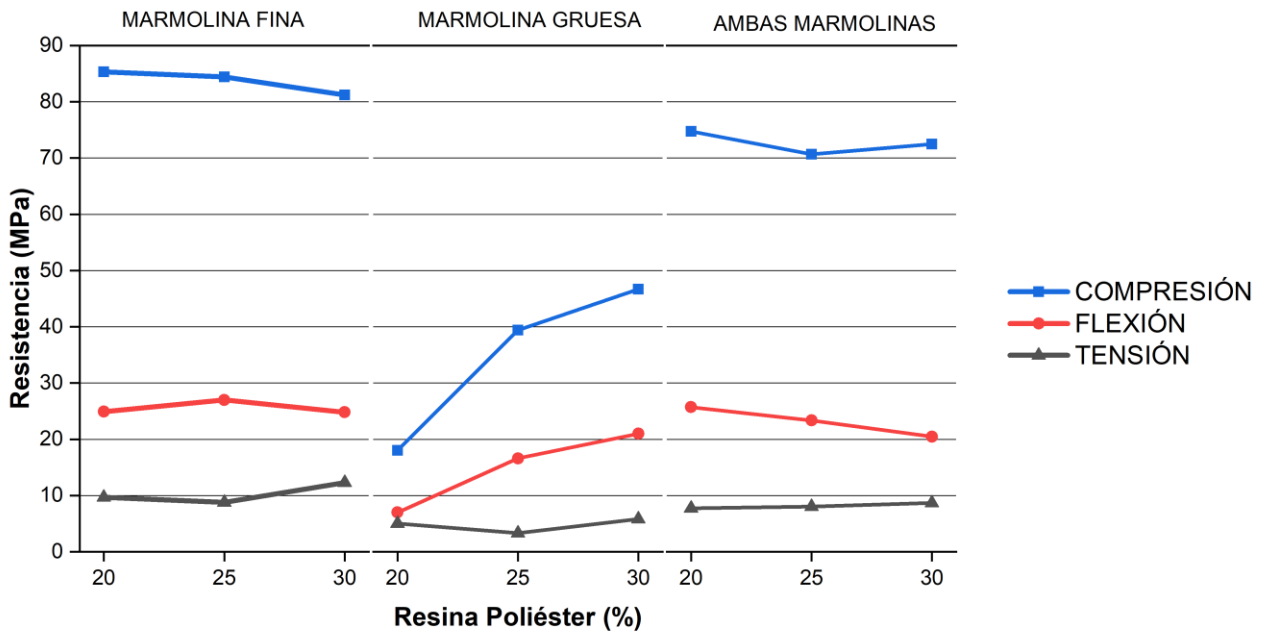


Figura 3.1. Resistencia a la compresión, flexión y tensión de los concretos poliméricos.

La mayor resistencia obtenida, como se ha mencionado, se logra con marmolina fina, esto puede relacionarse con las probetas ensayadas, por ejemplo, las mostradas en la figura 3.2, correspondiente a las probetas de concreto polimérico ensayadas en flexión. En donde, las probetas con marmolina fina presentan una superficie más lisa sin la presencia de huecos, sin embargo, las probetas con marmolina gruesa muestran una superficie rugosa con algunos huecos, lo que hace que disminuya su resistencia.



a) Marmolina fina

b) Marmolina gruesa

c) Ambas marmolinas

Figura 3.2. Probetas de concreto polimérico despues del ensayo de flexion.

Con respecto a la cantidad de resina utilizada, se observan diferentes comportamientos. Se observa que conforme se adiciona más cantidad de resina poliéster los valores de la resistencia a la compresión y a la flexión disminuyen un poco, esto para concretos con marmolina fina o concretos con la combinación de marmolina fina y gruesa. Es decir, una mayor cantidad de resina cubre totalmente a las partículas de marmolina, limitando que estas interactúen entre sí, lo que hace que la transferencia de esfuerzos disminuya y en consecuencia disminuya la resistencia. Sin embargo, al agregar mayor de cantidad de resina en concreto con marmolina gruesa, los valores de resistencia aumentan. Es decir, una mayor cantidad de resina es suficiente para cubrir cada partícula de marmolina gruesa, las cuales están en mayor contacto (debido a su tamaño), y generan mayor transferencia de esfuerzos durante la aplicación de la fuerza, produciendo mayor resistencia. No obstante, los concretos con marmolina gruesa presentan mayor espaciamiento entre partículas, lo cual produce menor adherencia con la resina.

En el caso de la resistencia a la tensión, se observa que cuando se agrega más cantidad de resina, los valores tienen muy poca diferencia entre ellos. De hecho los valores para concretos con la combinación de marmolina fina y gruesa, son prácticamente los mismos.

Los valores máximos de resistencia a la compresión fueron de 85.3 MPa, los cuales se obtuvieron para concreto con marmolina fina. Seguidos por los concretos con la combinación de marmolinas, que tuvieron una máxima resistencia de 74.7 MPa, y finalmente por los que utilizaron marmolina gruesa de 46.7 MPa. Es notable que el uso de dos tamaños diferentes de marmolina, pueda presentar una gran diferencia en los valores de resistencia a la compresión.

Para el caso de la resistencia a la flexión, los valores máximos presentan menor variación, ya que los concretos con marmolina fina, tuvieron 27 MPa; un valor muy cercano al obtenido para concretos con la combinación de marmolinas, de 25.7 MPa, pero mucho mayor al de los concretos con marmolina gruesa, cuya resistencia fue de 19.9 MPa.

En el caso de los valores de resistencia a la tensión, el valor máximo para el concreto con marmolina fina fue de 12.2 MPa, seguido por el de concreto con la combinación de marmolina (8.7 MPa), y finalmente por el concreto con marmolina gruesa con 5.8 MPa.

### **3.1.2. DEFORMACIÓN A LA RUPTURA**

Los resultados de la deformación en compresión, flexión y tensión se muestran en la Figura 3.3. 1) Tomando en consideración el tamaño de marmolina, para la deformación en compresión, se observan mayores valores para concretos con marmolina fina, seguidos por los del concreto con la combinación de marmolinas y finalmente con los que contienen marmolina gruesa. Es decir, la marmolina fina permite mayor compactación, lo cual permite que exista mayor transferencia y distribución de esfuerzos en el concreto, haciendo que la deformación se incremente. No así para concretos con marmolina gruesa, para el cual la deformación disminuye.

En el caso de la deformación en flexión, sucede algo diferente, ya que los mayores valores son para concreto con marmolina gruesa, seguidos por los que contienen marmolina fina. Esto significa, que las partículas de mayor tamaño (marmolina gruesa) promueven a que exista mayor deformación en flexión. Esto debido a que existe mayor espaciamiento entre las partículas de marmolina y menor adherencia entre la marmolina y la resina, produciendo mayor deformación en flexión.

Finalmente, para la deformación en tensión los mayores valores se obtuvieron con marmolina gruesa, seguidos por los de concreto con marmolina fina y finalmente por los que contienen la combinación de ambas.

II) Con respecto a la cantidad de resina utilizada, se tienen diferentes comportamientos. Para el caso de la deformación en compresión, los valores disminuyen cuando se utiliza 25% de resina y posteriormente aumentan para 30% de resina, independientemente del tamaño de marmolina utilizada. Es decir, el 25% de resina añadida permite tener un concreto menos deformado, en el cual existe un acomodo de las partículas de marmolina.

Mientras que para la deformación en flexión, el valor aumenta cuando se agrega 25% de resina y disminuye para una mayor cantidad (30%), esto independientemente del tamaño de marmolina utilizada. Es decir, con 25% de resina se logra el espaciamiento idóneo para que suceda la mayor deformación en flexión.

La deformación en tensión se incrementa un poco cuando se agrega 25% de resina y luego disminuye para mayor cantidad de resina, esto para concretos con marmolina fina o gruesa. Ya que, para los concretos con la combinación de marmolinas, los valores son casi constantes.

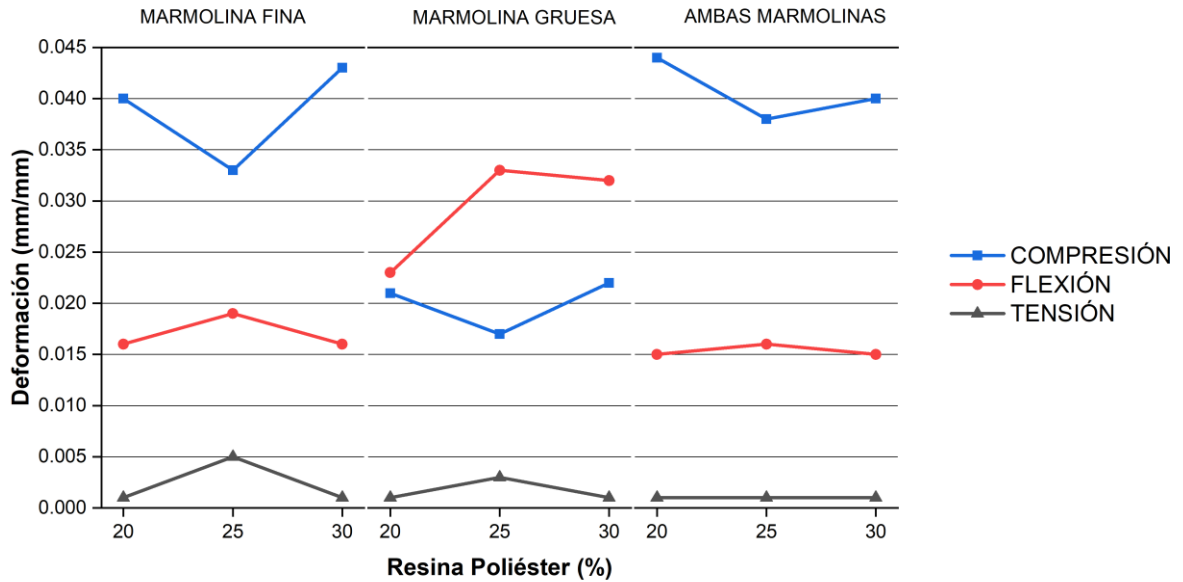


Figura 3.3. Deformación en compresión, flexión y tensión de los concretos poliméricos.

Los valores máximos de deformación a la compresión, 0.044 mm/mm, se obtuvieron en concreto polimérico elaborado con 20% de resina y la combinación de las marmolinas, seguidos por un valor de 0.043 mm/mm para concreto con 30% de resina y marmolina fina. Finalmente, un valor máximo de 0.022 mm/mm para concreto 30% de resina y marmolina gruesa.

Los valores máximos de deformación en flexión fueron de 0.033 mm/mm, para concretos elaborados con 25% de resina y marmolina gruesa; seguidos por los concretos con 25% de resina y fina (0.019 mm/mm), y finalmente para los que utilizaron 25% de resina y la combinación de marmolinas (0.016 mm/mm).

En el caso de la deformación en tensión el valor máximo fue de 0.005 mm/mm para concretos con 25% de resina y marmolina fina, seguidos de los concretos con 25% resina y marmolina gruesa (0.003 mm/mm), y finalmente para concretos con la combinación de marmolinas independientemente de la cantidad de resina utilizada, con 0.001 mm/mm.

### 3.1.3. MÓDULO DE ELASTICIDAD

Los resultados de los módulos de elasticidad en compresión, flexión y tensión, se muestran en la Figura 3.4. I) Con respecto al tamaño de marmolina, para los módulos en compresión, los mayores valores se obtuvieron para concretos con marmolina fina, seguidos por los que utilizaron la combinación de marmolinas y finalmente lo que utilizaron marmolina gruesa. Es decir, el uso de marmolina fina permite que el concreto polimérico tenga mayor rigidez, por lo cual se requiere de una mayor fuerza para lograr la deformación.

En el caso del módulo en flexión, los mayores valores se obtienen con la combinación de marmolinas. Es decir, el usar dos diferentes tamaños de partículas produce una mejor adhesión entre partículas, que permite una buena distribución y transferencia de esfuerzos después de la aplicación de la fuerza.

El módulo en tensión es mayor para concretos con marmolina gruesa, seguidos por los de concretos con marmolina fina. Los valores varían muy poco entre ellos. La mayor rigidez cuando las probetas se someten a tensión se obtiene con partículas de marmolina gruesa.

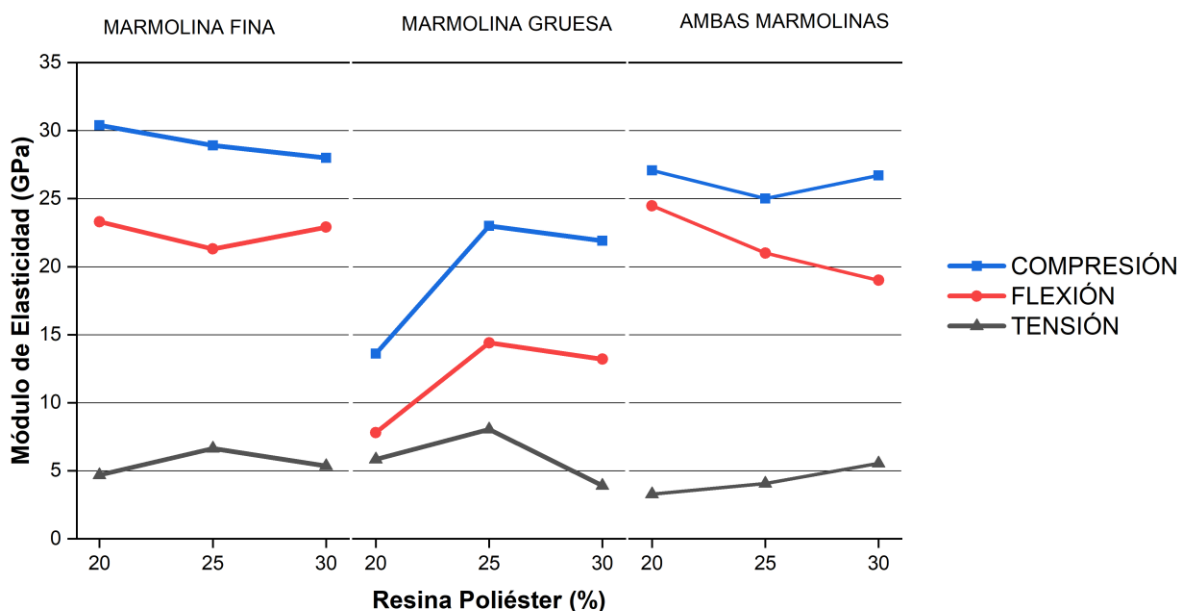


Figura 3.4. Módulo de elasticidad en compresión, flexión y tensión de los concretos poliméricos.

La notable diferencia de los módulos de elasticidad obtenidos para la prueba de compresión, se pueden relacionar con el deterioro causado después del ensayo, como se muestra en la Figura 3.5. Se observa en los concretos con marmolina fina (a), mientras que en los concretos con la combinación de marmolinas (c)

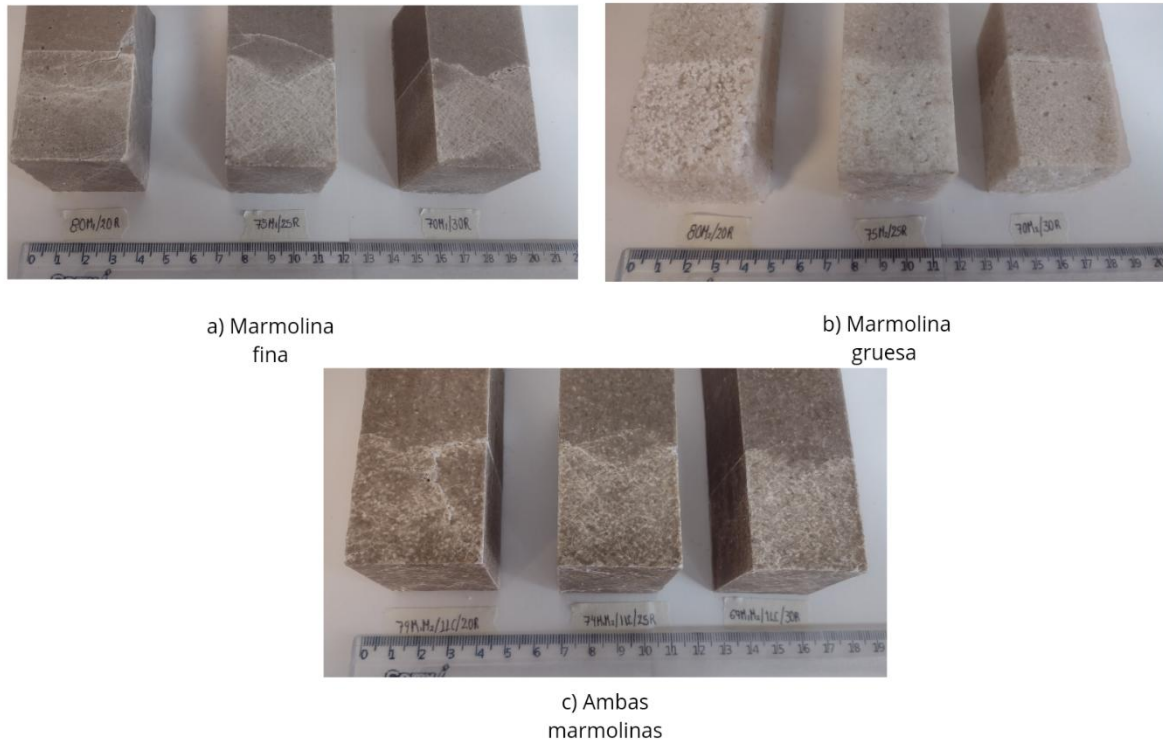


Figura 3.5. Probetas después del ensayo de compresión.

b) Con respecto a la cantidad de resina utilizada, se observan diferentes comportamientos. En el caso de los módulos en compresión los valores aumentan conforme se añade más resina, esto para concreto con marmolina gruesa, pero disminuyen cuando se utiliza marmolina fina o con la combinación de marmolina.

Los módulos en flexión también presentan diferentes comportamientos: aumentan cuando se incrementa la cantidad de resina, esto para concreto con marmolina gruesa, es decir, tamaños grandes de partículas permiten soportar mayores esfuerzos. Sin embargo, los valores disminuyen para concretos con marmolina fina o con la combinación de ambas. Es decir, tamaños pequeños o bien la

combinación de tamaño pequeño con uno grande hace que la mezcla sea más homogénea, lo cual permite una menor distribución de esfuerzos.

Los módulos en tensión presenta dos comportamientos diferentes: a) cuando se incrementa la cantidad de resina, los módulos se incrementan, esto para concreto con la combinación de marmolinas, b) los valores se incrementan para un 25% de resina y después disminuyen para 30% de resina, esto para concretos con marmolina fina o gruesa.

Los máximos valores del módulo de elasticidad en compresión fueron de 30.4 GPa, para concreto con 20% de resina y marmolina fina. Mientras que los máximos valores para los módulos en flexión fueron de 24.4 GPa para concretos con 20% de resina y la combinación de marmolinas. Finalmente, los máximos valores para los módulos en tensión fueron de 8.0 MPa para los concretos con 25% de resina y marmolina gruesa.

## 3.2. CONCRETO POLIMÉRICO CON FIBRAS DE LUFFA

### 3.2.1. RESISTENCIA

Los valores de resistencia a la compresión, flexión y tensión para concretos con fibras de Luffa se muestra en la Figura 3.6. Los resultados de estos concretos se analizaron de acuerdo a:

- El tamaño de la marmolina
- Cantidad de resina utilizada
- Cantidad de fibra de Luffa añadida

En cada gráfica se añaden los resultados de los concretos sin fibras de Luffa, para su comparación.

#### a) De acuerdo al tamaño de marmolina:

Los valores de mayor resistencia a la compresión son para concretos con marmolina fina, seguidos por los concretos con la combinación de marmolinas (fina y gruesa).

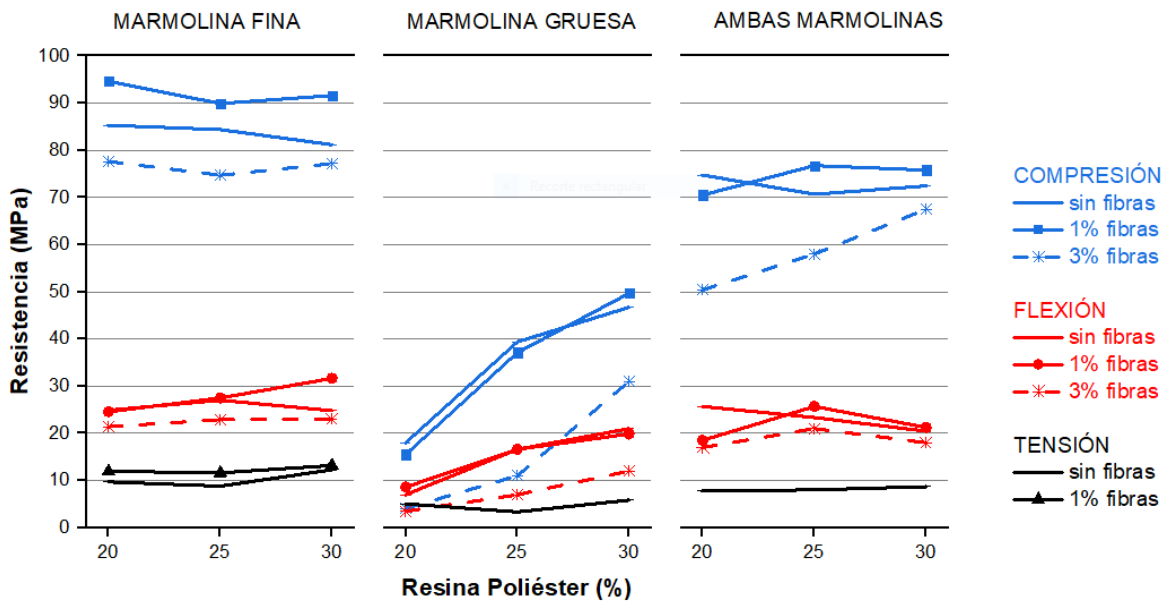


Figura 3.6. Resistencia a la compresión, flexión y tensión de los concretos poliméricos con Luffa.

En la Figura 3.7, se muestran los concretos con marmolina gruesa para las pruebas de compresión, se aprecian las fibras de Luffa (indicada en el círculo) y algunos orificios (indicado por la flecha). Estas características morfológicas hacen que el concreto presente los valores más bajos. No obstante, las fibras de Luffa se adhieren muy bien a la resina, como se muestra en la Figura.

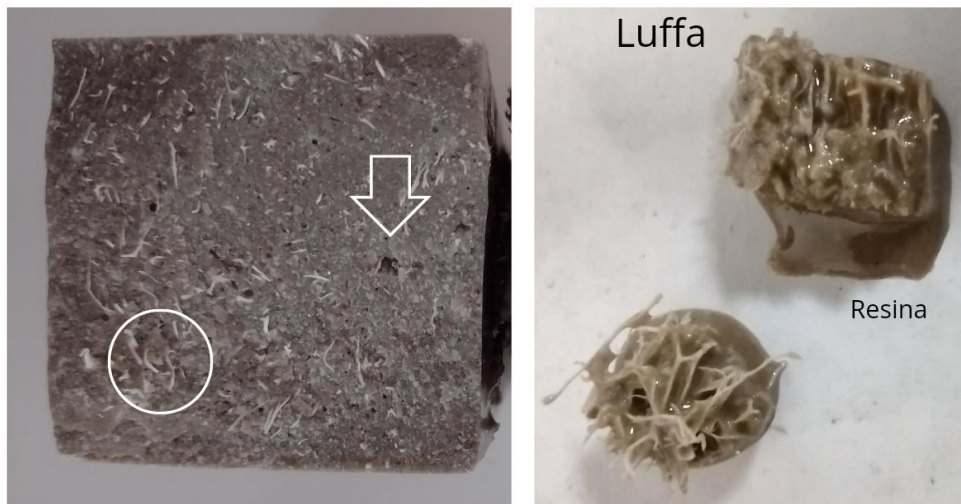


Figura 3.7. Probeta de concreto polimérico para la prueba de compresión y figura de la adherencia entre la resina y las fibras de Luffa.

En el caso de la resistencia a la flexión, los mayores valores son para concretos con marmolina fina, seguidos por los de concretos con la combinación de marmolinas. El comportamiento de las resistencias en flexión, se puede relacionar con las imágenes de las probetas concreto después de la prueba de flexión (Figura 3.8, Figura 3.9), en las cuales se observan superficies lisas para concreto con marmolina fina (las de mayores valores), seguidas por superficies un poco rugosas para concreto con la combinación de marmolinas (las que siguen en valores), y finalmente superficies muy rugosas cuando se utiliza marmolina gruesa, las de menores valores en flexión.



a) Marmolina fina

b) Marmolina gruesa

c) Ambas marmolinas

Figura 3.8. Concreto polimérico con 1% de Luffa después de la prueba de flexión.



a) Marmolina fina

b) Marmolina gruesa

c) Ambas marmolinas

Figura 3.9. Concreto polimérico con 3% de Luffa después de la prueba de flexión.



a) 20 % resina

b) 25 % resina

c) 30% resina

Figura 3.10. Concreto polimérico y concreto polimérico con 1% de Luffa después de la prueba de tensión.

De la resistencia a la tensión (Figura 3.10) solo se muestran los valores para concretos con marmolina fina y 1% de fibras de Luffa, los cuales son muy similares. No se tuvieron resultados para concretos con marmolina gruesa (o con la combinación de marmolinas), ya que no tuvo un mezclado adecuado cuando se agregaron las fibras de Luffa, dadas las dimensiones de las probetas para pruebas de tensión, las cuales son muy delgadas.

#### **b) Con respecto a la cantidad de resina utilizada**

Se observan diferentes comportamientos. Para la resistencia a la compresión se tienen dos comportamientos, I) los valores se incrementan conforme se incrementa la cantidad de resina, esto para concretos con marmolina gruesa o con la combinación de marmolinas. II) los valores disminuyen para concretos con marmolina fina.

Los valores de resistencia a la flexión presentan un solo tipo de comportamiento, estos aumentan conforme se añade mayor cantidad de resina. En el caso de la resistencia a la flexión, los valores son muy similares, independientemente de la cantidad de resina agregada.

Los máximos valores de resistencia a la compresión fueron de 94.6 MPa para concreto con 20% de resina y marmolina fina. En el caso de la resistencia a la flexión, los máximos valores fueron de 31.6 MPa para concreto con 30% de resina y marmolina fina. Finalmente, los valores de resistencia a la tensión fueron de 12 MPa.

### **c) Con respecto a la cantidad de fibra añadida**

Los mayores valores de la resistencia en compresión y flexión se obtuvieron con una concentración del 1% de Luffa. Es decir, con una menor cantidad de Luffa se logra una adecuada distribución de las mismas, sin formarse aglomeraciones. Distribución que permite mayor transferencia de esfuerzos entre la matriz y las fibras, lo que permite mayor resistencia mecánica.

### **d) Comparación con los concretos sin fibra**

En la Figura 3.6. se muestran las curvas de resistencia a la compresión, flexión y tensión de los concreto con y sin Luffa. En las cuales se observa que la resistencia a la compresión tiene los valores máximos cuando se añade 1% de Luffa y se tiene marmolina fina, seguidos por los que utilizan 1% de Luffa pero con la combinación de las dos marmolinas. Los menores valores se logran cuando se utiliza marmolina gruesa.

En el caso de la flexión, los concretos con 1% de Luffa y con marmolina fina o gruesa tienen un comportamiento similar al de los concretos sin Luffa. Sin embargo, con la combinación de marmolinas, los valores disminuyen. Con respecto a la tensión, la adición del 1% de Luffa resulta en un aumento de los valores de resistencia, primordialmente cuando se utiliza la combinación de marmolinas.

Con la adición de 3% de Luffa los valores son menores, que los de concretos sin Luffa o con 1% de Luffa, esto se debe a la aglomeración producida las fibras, así

como su inadecuada distribución en el concreto, como se observa en la Figura 3.12.



Figura 3.12. Probeta con 20 % de resina y 3% de Luffa.

### 3.2.2. DEFORMACIÓN A LA RUPTURA

Los resultados de la deformación a la compresión, flexión y tensión de los concretos con 1% de Luffa, se muestran en la Figura 3.13.

#### a) De acuerdo al tamaño de marmolina:

La deformación en compresión presenta mayores valores cuando se utiliza marmolina fina, seguida por los valores para el concreto que utiliza la combinación de marmolinas y finalmente, los menores valores se obtienen con el uso de marmolina gruesa.

Es notable, que la deformación en flexión presente valores muy similares para cada tipo de concreto (con marmolina fina, gruesa o la combinación de ambas). No obstante, los mayores valores fueron para concreto con marmolina fina.

En el caso de la deformación en tensión, los concretos con marmolina fina presentan valores muy pequeños de deformación (0.002-0.003 mm/mm).

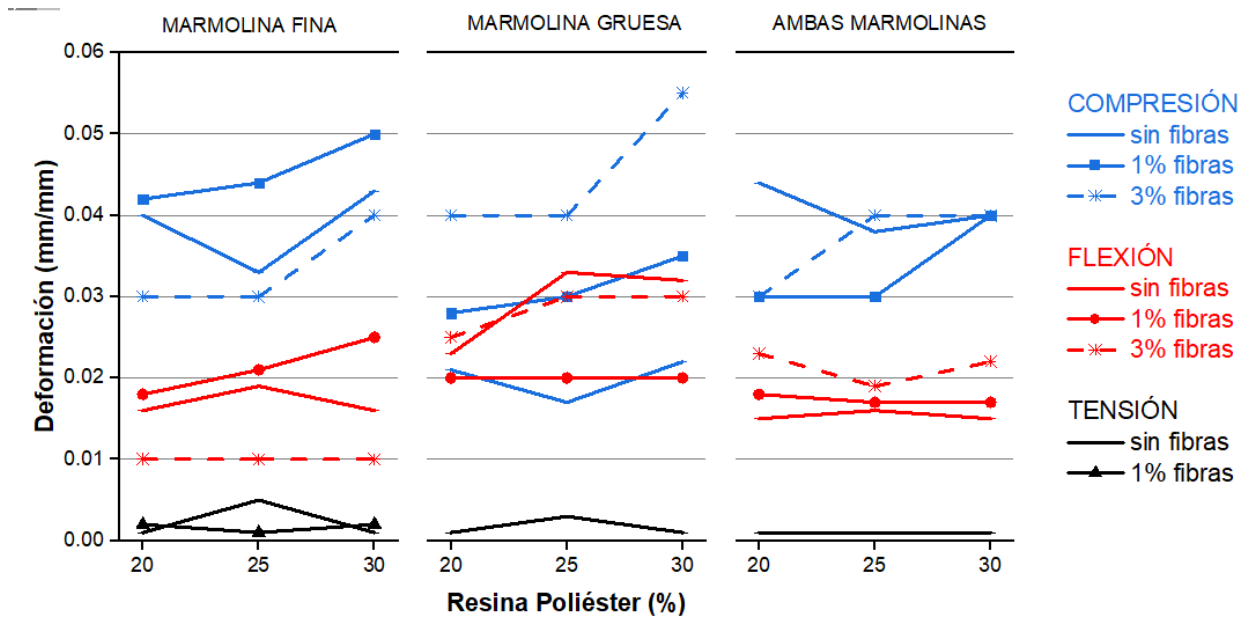


Figura 3.13. Deformación a la ruptura de los concretos poliméricos con 1% de Luffa.

**b) Con respecto a la cantidad de resina utilizada:**

La deformación en compresión presenta el mismo comportamiento para cada tipo de concreto, ya que los valores aumentan conforme se incrementa la cantidad de resina. Es decir, una mayor cantidad de resina cubre mejor las partículas de marmolina, generándose una adecuada adhesión entre la resina, la marmolina y las fibras de Luffa. La presencia de estas últimas hace que el concreto tenga mayor deformación plástica, ya que absorben los esfuerzos producidos durante la aplicación de la fuerza.

De nueva cuenta es notable, que la deformación en flexión para concretos con 1% de Luffa, presente valores muy similares para cada cantidad de resina utilizada. De hecho, después de la prueba de flexión, las probetas de concreto con fibras presentan un deterioro muy semejante y una superficie muy parecida, como se observa en la Figura 3.14.

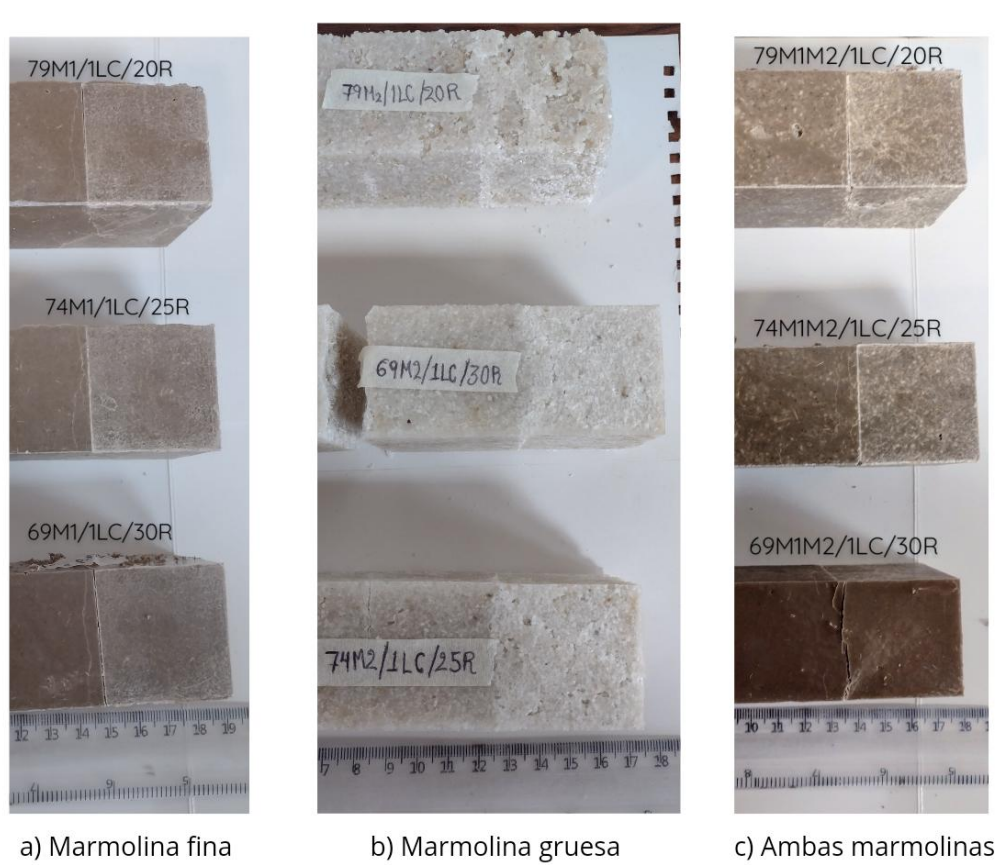


Figura 3.14. Concreto polimérico con 1% de Luffa después de la prueba de flexión.

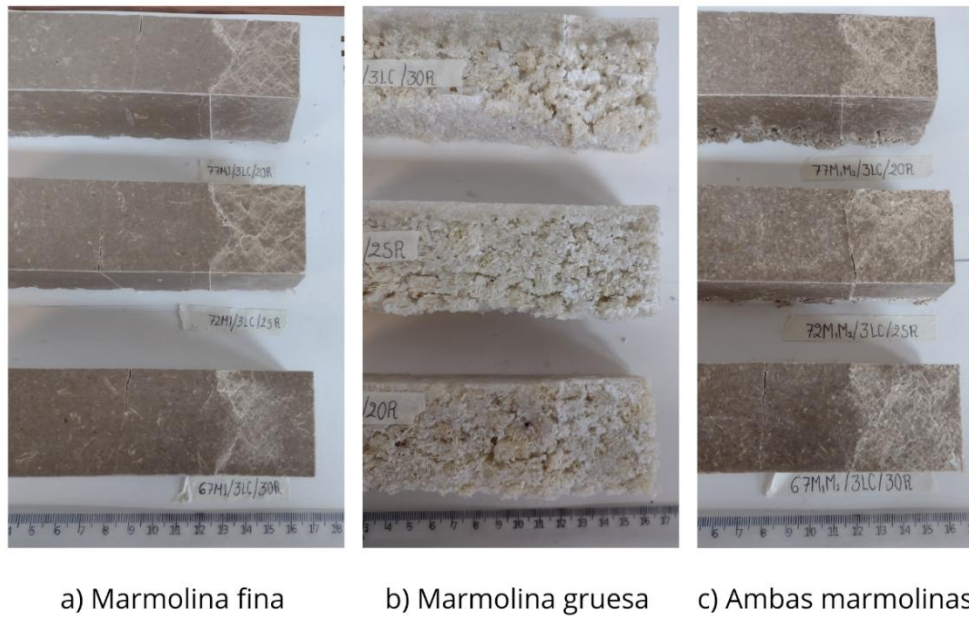


Figura 3.15. Concreto polimérico con 3% de Luffa después de la prueba de flexión.

Los valores de la deformación en tensión varían muy poco con respecto a la cantidad de resina utilizada.

Los valores máximos de la deformación en compresión fueron de 0.05 mm/mm para concreto 30% y marmolina fina. Mientras que la máxima deformación en flexión, 0.026 mm/mm se obtuvo para concreto con 30% de resina y marmolina fina. Los valores de deformación en tensión son muy similares, para cada cantidad de resina agregada.

**c) Con respecto a la cantidad de fibra añadida:**

Los mayores valores de la deformación presentan dos comportamientos con respecto a la cantidad de fibra añadida. Son mayores, cuando:

- Se tiene 1% de fibra y se utiliza marmolina fina.
- Se tiene 3% de fibra y se utiliza, ya sea marmolina gruesa o la combinación de marmolinas.

Es decir, existe una dependencia entre la cantidad de fibra y el tamaño de marmolina. Para un tamaño pequeño de marmolina se requiere poca fibra (1%), pero a mayores tamaños es necesario mayor cantidad de fibras (3%). De alguna manera, existe un acomodo entre las partículas y las fibras, que permite mayor deformación de las probetas.

**d) Comparación con los concretos sin fibra**

De acuerdo con la Figura 3.13, los mayores valores de deformación en compresión se presentan para concreto con 1% de Luffa y con marmolina fina. Sin embargo, cuando se utiliza marmolina gruesa, los mayores valores se obtienen con el 3% de Luffa. El uso de marmolina gruesa permite menor adhesión entre la Luffa y la matriz polimérica (Figura 3.16).

Con respecto a la deformación en flexión, los mayores valores se obtienen con el uso de marmolina gruesa, pero sin la adición de Luffa. Sin embargo, con marmolina fina, los valores mayores se logran al añadir 1% de Luffa.



Figura 3.16. Deformación de probeta con 3% de Luffa.

### 3.2.3. MÓDULO DE ELASTICIDAD

Los resultados del módulo de elasticidad de los concretos con 1% de fibras de Luffa, se muestran en la Figura 3.17.

#### a) De acuerdo al tamaño de marmolina:

Los mayores valores del módulo de elasticidad en compresión se obtuvieron para concretos con marmolina fina, seguidos por los que utilizan ambas marmolinas, y finalmente los que contienen marmolina gruesa.

Los mayores valores del módulo de elasticidad en flexión se presentan para concreto con la combinación de marmolinas, seguidos por los que utilizan marmolina fina y finalmente por los concretos con marmolina gruesa. En el caso de los módulos de elasticidad en tensión, los concretos con marmolina fina tienen valores con poca diferencia.

**b) Con respecto a la cantidad de resina utilizada:**

Los valores de módulo de elasticidad en compresión presentan dos comportamientos: I) aumentan conforme aumenta la cantidad de resina utilizada, esto para concretos con marmolina gruesa. II) disminuyen conforme se incrementa la cantidad de resina para concretos con marmolina fina o con la combinación de ambas.

Los módulos de elasticidad en flexión presentan los mismos dos comportamientos que los módulos en compresión, es decir: I) aumentan conforme aumenta la cantidad de resina utilizada, esto para concretos con marmolina gruesa. II) disminuyen conforme se incrementa la cantidad de resina para concretos con marmolina fina o con la combinación de ambas. Es decir, cuando se tiene marmolina gruesa y fibras de Luffa, es necesaria mayor cantidad de resina para que los módulos se incrementen y se tenga un concreto más rígido. Pero si se tienen partículas de menor tamaño (marmolina fina), la adición de más cantidad de resina provoca un concreto más dúctil.

Los módulos de elasticidad en tensión para concretos con marmolina fina presentan un comportamiento diferente, ya que los valores disminuyen cuando se agrega 25% de resina.

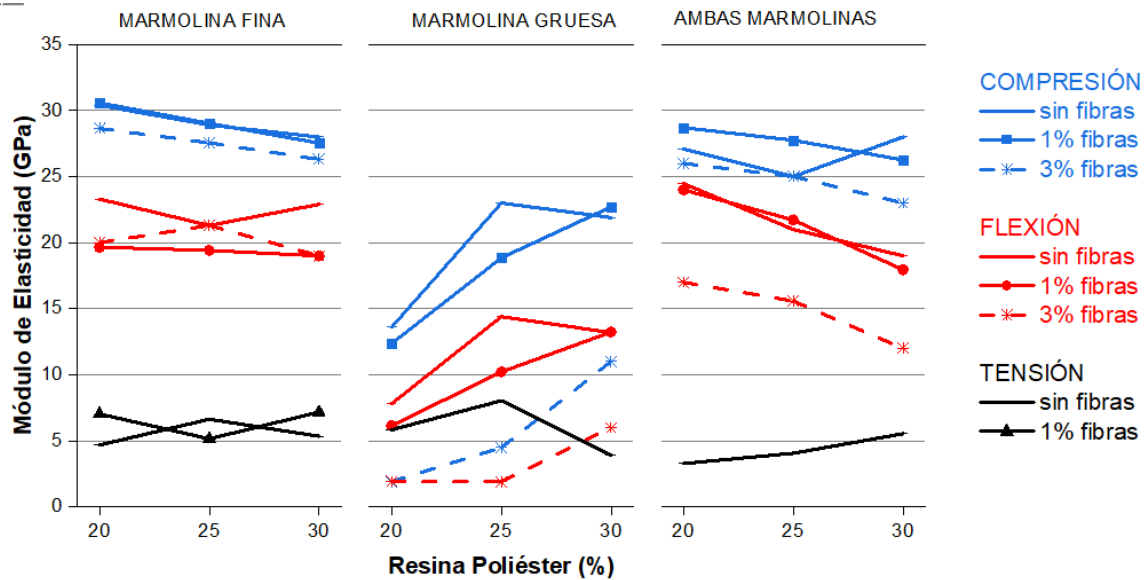


Figura 3.17. Módulo de elasticidad de los concretos poliméricos con 1% de Luffa.

Los mayores valores del módulo de elasticidad en compresión, 30.5 GPa se obtienen para concreto con 20% de resina y marmolina fina. Mientras que los mayores valores del módulo en flexión, 23.1 GPa para concreto con 20% de resina y la combinación de marmolinas. Finalmente, los mayores valores del módulo en tensión fueron de 7.2 GPa para concreto con 20% de resina y marmolina fina.

**c) Con respecto a la cantidad de fibra añadida:**

Los mayores valores de los módulos de elasticidad se presentan para las probetas con el 1% de fibras de Luffa. A mayor cantidad de fibras, los módulos disminuyen, tanto en compresión como en flexión, es decir las probetas van presentando mayor ductilidad.

**d) Comparación con los concretos sin fibra**

Respecto a las curvas de la Figura 3.17, del módulo de elasticidad. En compresión los mayores valores se presentan cuando se añade 1% de Luffa y se utiliza marmolina fina. Mientras que el uso de marmolina gruesa produce menores valores de los módulos de elasticidad. Con respecto a los módulos en flexión, los valores mayores se obtienen para concreto sin Luffa y utilizando marmolina fina. A

diferencia de los concretos con marmolina gruesa, que presentan los valores más bajos.

### 3.3. COMPARACIÓN DE LOS MÁXIMOS VALORES PARA CONCRETOS CON Y SIN FIBRAS DE LUFFA

En la Tabla 3.1 se muestran los mayores valores para cada una de las propiedades mecánicas, tanto de concretos con y sin fibras de Luffa.

Tabla 3.1. Máximos valores de propiedades mecánicas de concretos.

	Concreto	Concreto con 1% de fibras de Luffa	Concreto con 3% de fibras de Luffa	Porcentaje de aumento (%)
<b>Compresión</b>				
Resistencia en compresión, MPa	85.3	94.6	77.6	10.9
Deformación en compresión, mm/mm	0.044	0.05	0.055	25.0
Módulo en compresión, GPa	30.4	30.5	28.6	0.3
<b>Flexión</b>				
Resistencia en flexión, MPa	27	31.6	23.9	17.0
Deformación en flexión, mm/mm	0.033	0.026	0.03	--
Módulo en flexión, GPa	24.4	23.1	19.9	--
<b>Tensión</b>				
Resistencia a la tensión, MPa	12.2	12	--	--
Deformación en tensión, mm/mm	0.005	0.003	--	--
Módulo en tensión, GPa	8.0	7.2	--	--

La adición de fibras de Luffa produce aumento en las propiedades de compresión, y en la resistencia a la flexión.

### **3.4. MORFOLOGÍA DE LA LUFFA**

El comportamiento de las propiedades mecánicas de los concretos poliméricos se puede relacionar con la morfología de las fibras de Luffa, mostrada en la Figura 3.18. Se observan superficies rugosas y homogéneas, con partículas de lignina con diferentes formas (indicada por flechas), capas delgadas de lignina y hemicelulosa cubriendo las fibrillas celulósicas (indicada por círculos), además de micro-canales con un ancho de 2-12  $\mu\text{m}$ .

Algunos de los micro-canales no pueden ser llenados por completo por marmolina o resina poliéster durante el proceso de elaboración del concreto, por lo que se genera cierto grado de porosidad en el interior del concreto. Además, mayor aglomeración de fibras de Luffa hacen disminuir la resistencia y el módulo de elasticidad.

De acuerdo con los resultados de resistencia a la compresión, flexión y tensión, los valores de estas propiedades disminuyen cuando se incrementa la concentración de fibras de Luffa. Esto puede ser atribuido a las sus características:

- Micro-canales, los cuales no pueden ser llenados completamente con resina o marmolina después del proceso de mezclado, por lo cual se generan poros dentro del concreto. Estos poros actúan como defectos en el concreto haciendo que la resistencia disminuya, obteniéndose un concreto más dúctil.
- Al existir más fibras de Luffa se generan más puntos de contacto entre esta y la resina, y en consecuencia las áreas de contacto aumentan entre los

componentes (Luffa, resina y marmolina). Esto ocasiona que el concreto resista menos carga en cierta orientación, de acuerdo a las formas de las fibras.

- La humedad en la Luffa puede generar enlaces débiles con la resina poliéster y por lo tanto generar una deficiente transferencia de esfuerzos.

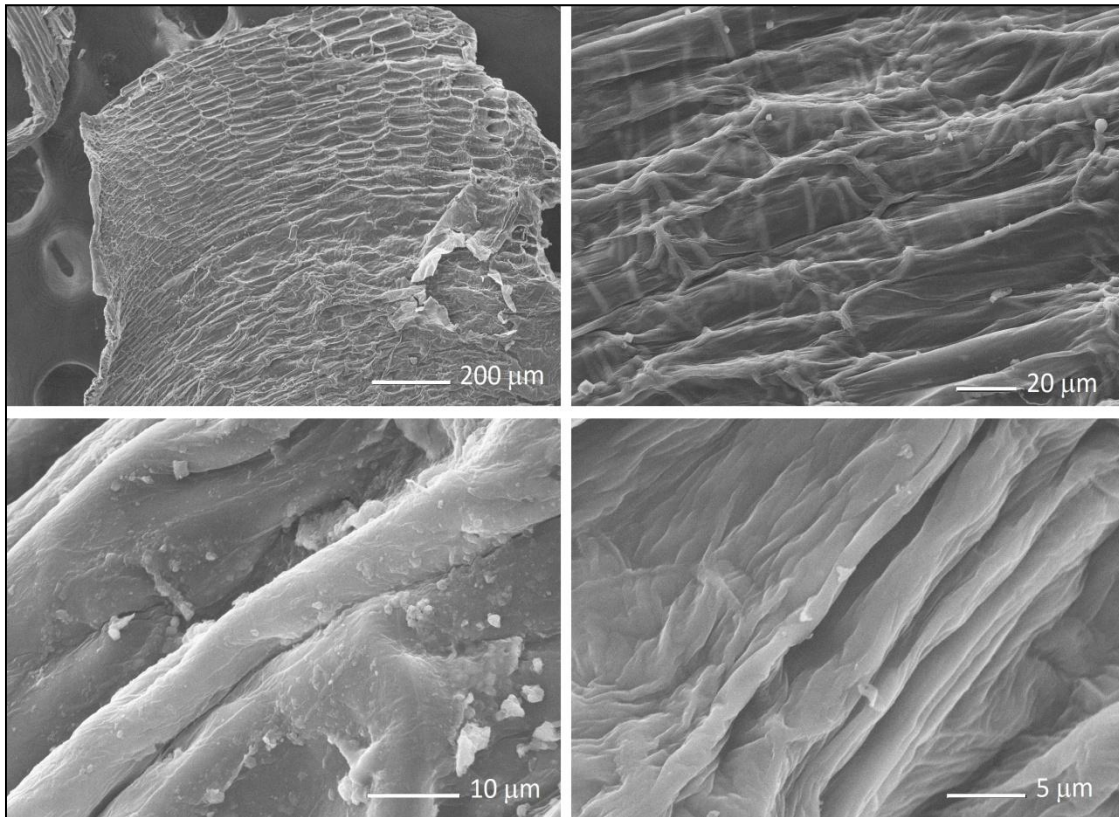


Figura 3.18. Imágenes SEM de fibras de Luffa.

### 3.5. DIFRACCIÓN DE RAYOS y EDS DE LA LUFFA

En la Figura 3.19, se muestra el espectro de difracción de la Luffa. Se pueden observar dos picos, a  $16^\circ$  ( $2\theta$ ) que corresponde a la fase amorfa y el pico a  $22^\circ$  ( $2\theta$ ) a la fase cristalina. Los cuales concuerdan con los datos reportados por Martinez-Pavetti (2021).

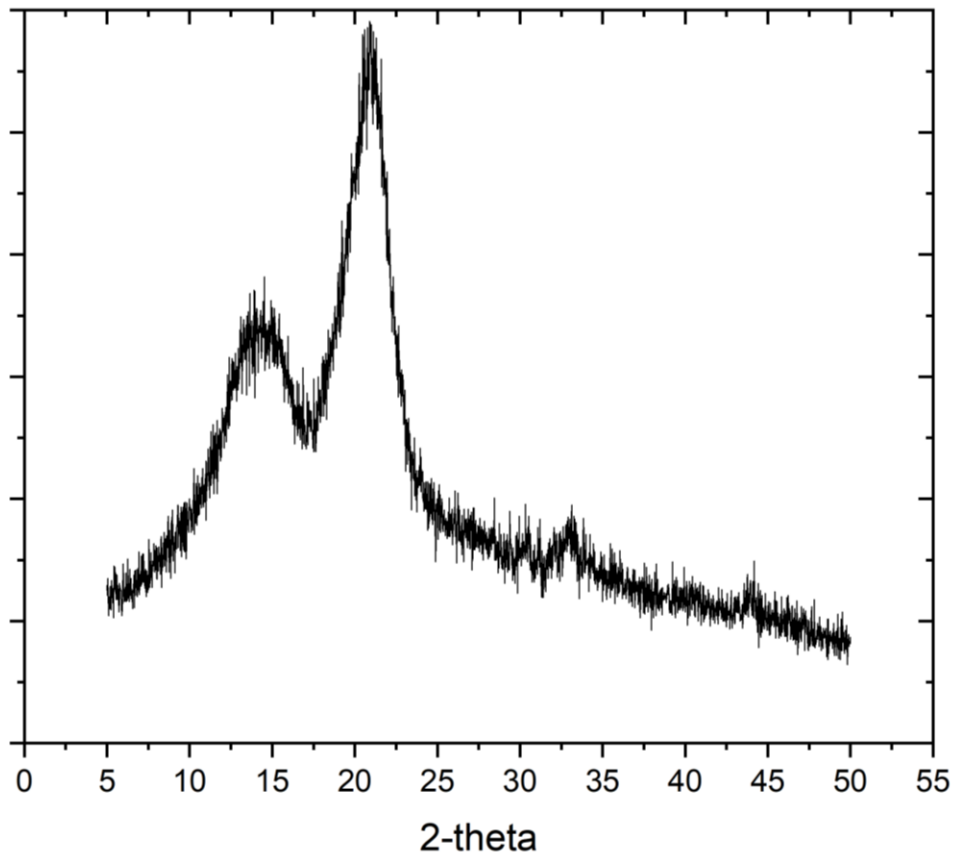


Figura 3.19. Espectro de difracción de la Luffa cylindrica.

De acuerdo con los resultados de EDS y de difracción de Rayos X, en la Tabla 3.2, se muestra la composición química y el porcentaje de cristalinidad de la Luffa.

Tabla 3.2. Composición química e índice se cristalinidad de Luffa cylindrica

<b>Elemento</b>	<b>%</b>
<b>C</b>	54.9
<b>O</b>	38.78
<b>Ca</b>	3.7
<b>K</b>	2.83
<b>Otros</b>	0.42

## **CONCLUSIONES**

Las mayores resistencias de los concretos poliméricos se logran teniendo marmolina fina, siendo de 85.3 MPa en compresión, 27 MPa en flexión y 12.2 en tensión, mientras que los valores más bajos se presentan cuando se utiliza marmolina gruesa. El tamaño pequeño de la marmolina produce mejor adherencia entre la resina y las fibras de Luffa, así como mejor distribución de los esfuerzos en el concreto.

Se encontró una relación entre la cantidad de resina poliéster y el tamaño de las marmolinas. Con marmolina gruesa, se obtiene un material poroso, que permite mayor adherencia y distribución de esfuerzos cuando se tiene mayor cantidad de resina. Sin embargo, con marmolina fina los valores disminuyen, para mayor cantidad de resina. En el caso de los resultados en tensión, los valores son similares para las distintas cantidades de resina ya que los esfuerzos aplicados se distribuyen de manera uniforme en el concreto.

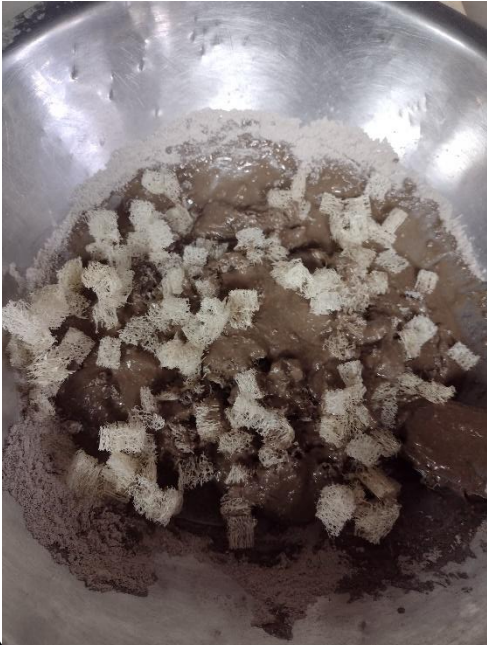
Los mayores valores de deformación en los concretos se obtienen utilizando la combinación de marmolina fina y gruesa. Se logra un valor de 0.044 mm/mm, en compresión, debido a una adecuada distribución de las marmolinas. Con respecto al módulo de elasticidad, los mayores valores se logran con el uso de marmolina fina, produciendo concreto con mayor rigidez. No obstante, con una mayor cantidad de resina y utilizando marmolina gruesa, también se logra mayor rigidez.

En el caso de los concretos con fibras de Luffa, las resistencias a la compresión son mayores que las de concretos sin Luffa. Los valores más altos se logran con 1% de Luffa, siendo de 94.6 MPa. Para la deformación los mayores valores se logran con marmolina fina. Valores que se mantienen casi constantes cuando se

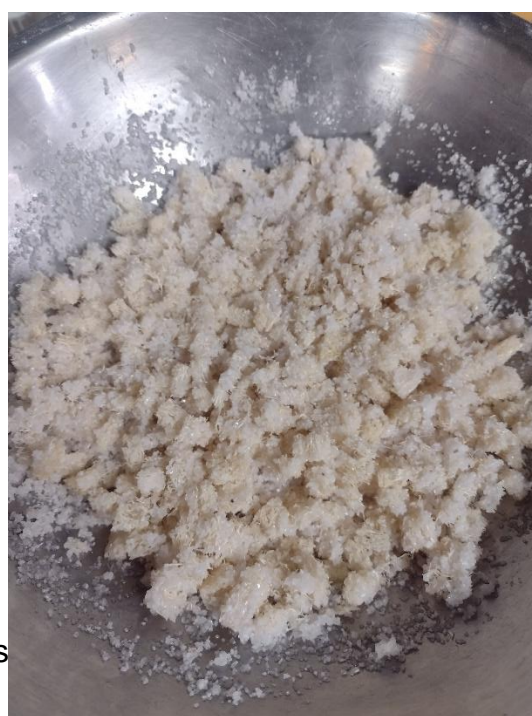
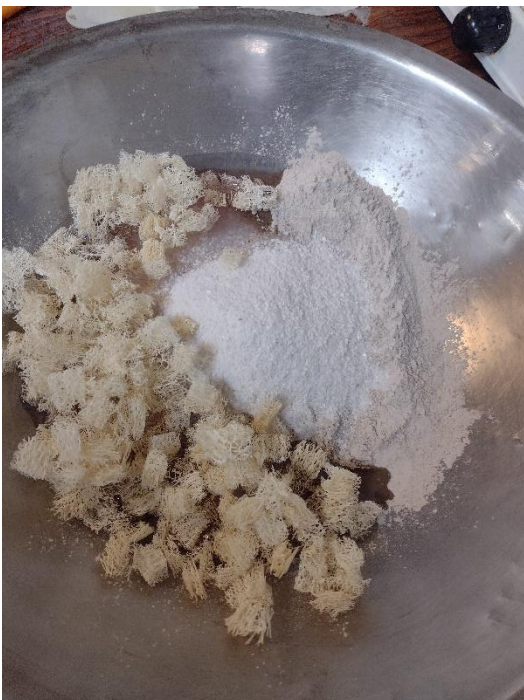
añaden fibras de Luffa (de 0.05 mm/mm). Finalmente, en el caso de los módulos de elasticidad, estos son mayores cuando se usa marmolina fina. Si se agregan fibras de Luffa los valores permanecen casi constantes (30.5 GPa).

Para concreto sin o con Luffa los mayores valores se tienen el 1% de fibras. Para concretos con 3% de fibras, los valores disminuyen, ya que estas se aglomeran y no se dispersan de manera uniforme, causando baja distribución de esfuerzos. En las pruebas de flexión hasta el punto de fractura de concretos con Luffa, se observa que las probetas se mantienen en una pieza, siendo visible las líneas de fractura. Para concretos sin fibras de Luffa, las probetas se fracturan y se separan en dos partes. Es decir, al agregar fibras de Luffa se absorben los esfuerzos.

## ANEXOS



ANEXO 1. Mezclado de marmolina fina, resina y Lufa.



grues



Anexo 3. Luffa con marmolina fina



Anexo 4. Luffa con marmolina gruesa.



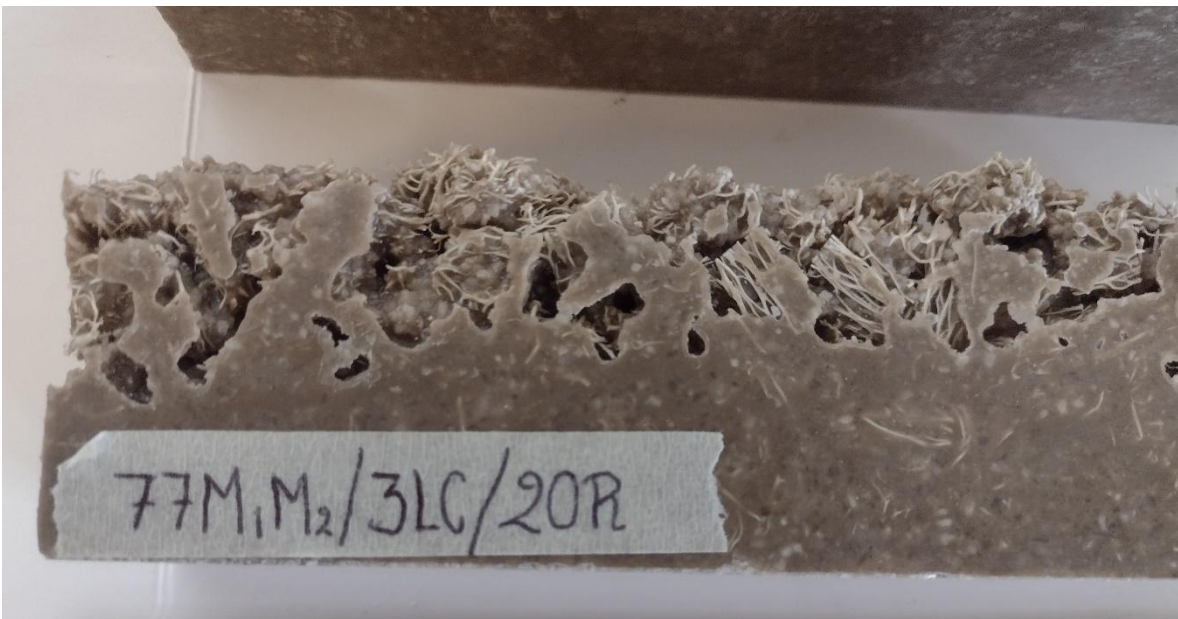
Anexo 5. Vaciado en molde, marmolina gruesa, resina Luffa



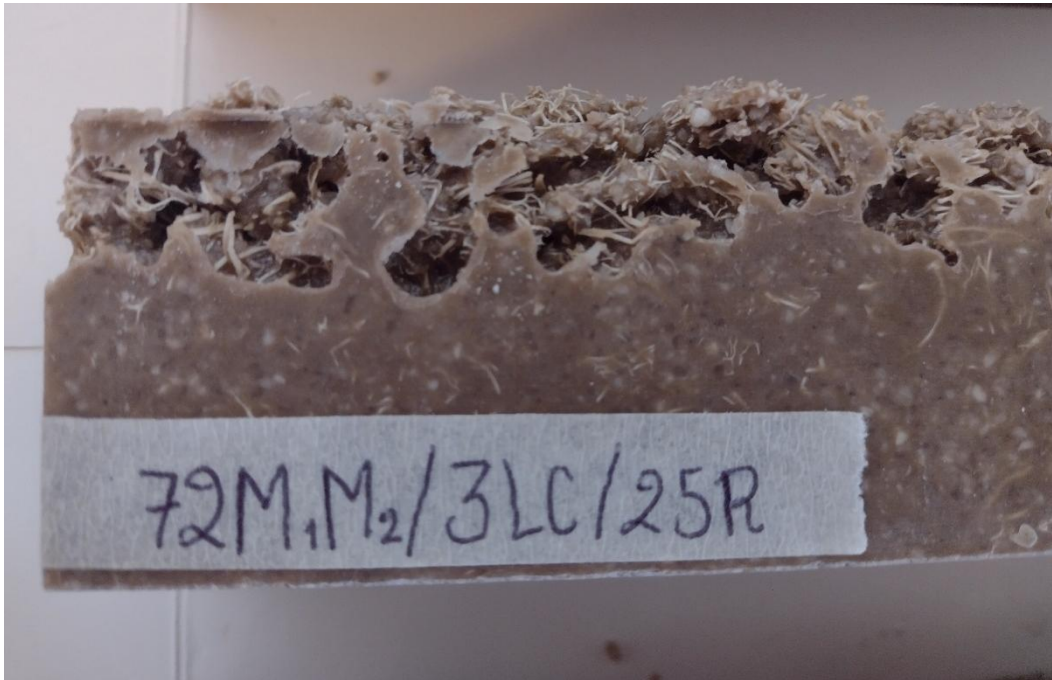
Anexo 6. Vaciado en molde, marmolina fina, resina Luffa



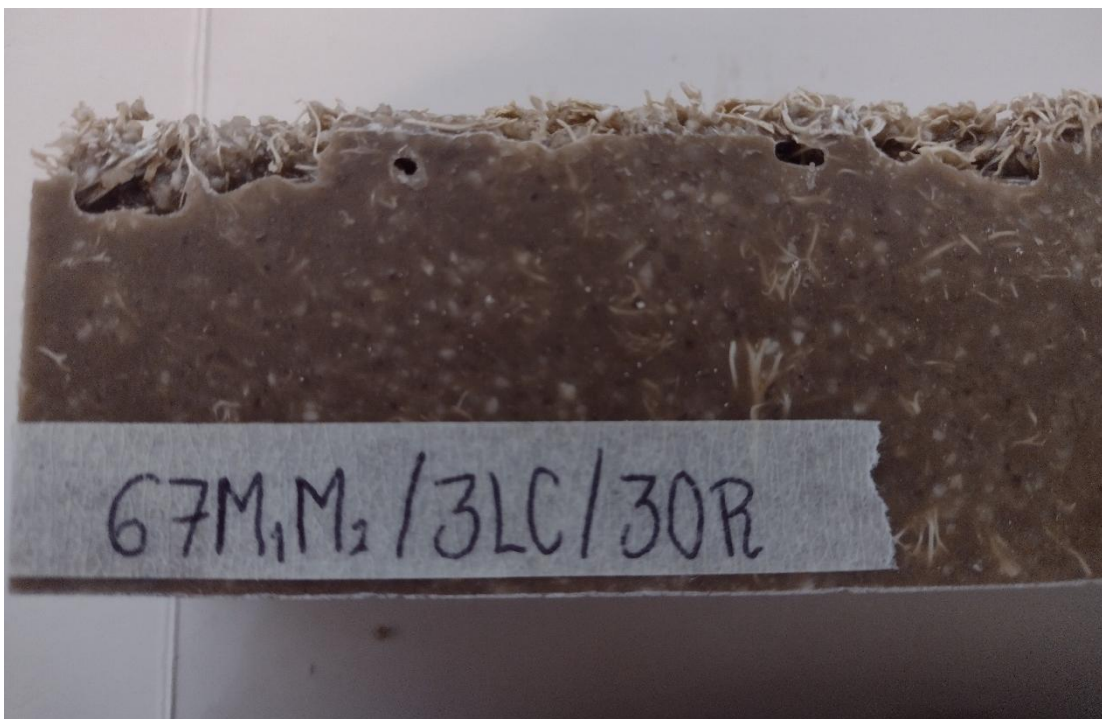
Anexo 7. Preparación de mezcla para probetas de tensión.



Anexo 8. Imperfecciones de probeta con 3% de Luffa y 20 % de resina.



Anexo 9. Imperfecciones de probeta con 3% de Luffa y 25 % de resina.



Anexo 10. Imperfecciones de probeta con 3% de Luffa y 30 % de resina.



Anexo 11. Prueba compresión marmolina gruesa, resina y Luffa.



Anexo 12. Probeta de tensión resina 100%

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aparicio, M.E. (2021). Utilidad de la difracción de Rayos X en las nanociencias. Mundo Nano 3, 2.

[https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2448-6912010000200062](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2448-6912010000200062)

Askeland, D.R., Wright, W.J. (2017). Ciencia e Ingeniería de Materiales. 7ª. Edición, 182-240.

Betancourt, C.J.R., Lizárraga, M.L.G., Narayanasamy, R., Olguín, C.F.J. & Saénz L.A. (2015). Revisión sobre el uso de residuos de mármol, para elaborar materiales para la construcción, Revista de Arquitectura e Ingeniería 9(3), 1-12.

<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193943013004>

Besednjak A. (2011). Los materiales compuestos. UPCommons.

<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/340600/22636-3142.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Boynard, C.A., & D'Almeida, J.R.M. (2000). Morphological characterization and mechanical behavior of sponge gourd (*Luffa cylindrica*)–polyester composite materials, Polymer-Plastic Technology and Engineering, 39 (3), 489-499.

<https://doi.org/10.1081/PPT-100100042>

Ghali, L., Msahli, S., Zidi, M., & Sakli, F. (2009). Effect of pre-treatment of Luffa fibres on the structural properties, Materials Letters 63, 61-63.

<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2008.09.008>

Ghali, L., Aloui, M., Zidi, M., Bendaly, H., Msahli, S., & Sakli, F. (2011). Effect of chemical modification of Luffa cylindrical fibers on the mechanical and hygrothermal behaviours of polyester/Luffa composites, BioResources 6 (4), 3836-3849.

DOI: [10.15376/biores.6.4.3836-3849](https://doi.org/10.15376/biores.6.4.3836-3849)

García, R.M.A. & Monasterio, G.N. (2018). Introducción a la ciencia de los materiales y sus propiedades. Universidad del País Vasco.

[https://ocw.ehu.eus/pluginfile.php/51167/mod\\_resource/content/0/Tema%202%20-%20Enlace%20at%C3%B3mico.pdf](https://ocw.ehu.eus/pluginfile.php/51167/mod_resource/content/0/Tema%202%20-%20Enlace%20at%C3%B3mico.pdf)

Gazechim (2013). Propiedades Resina Poliéster. Gazechim Composites Ibérica.  
<https://www.gazechim.es/noticias/actualidad/resina-poliester1/>

Gil, A. (2012) Resinas de poliéster. EAFIT.  
<https://www.eafit.edu.co/servicios/centrodelaboratorios/Documents/guia%20de%20manejo%20de%20resinas.pdf>

Imaz, G.R. (2013). Resistencia de materiales. Universidad de Cantabria.  
<https://ocw.unican.es/course/view.php?id=250#section-6>

Khaloo, A.R. & Kim, N. (1996). Propiedades mecánicas del hormigón armado con fibras de acero de resistencia normal a alta, Cem. Concr. Agregado. 18 (2), 92–97.

Lavoignet, R.M., Landa, Z.M., García, S.E.L. (2022). Usos actuales y tendencias del estropajo vegetal *Luffa cylindrica* L. en sectores industriales y comerciales. Ingeniantes 1 (2), 65-70.  
<https://citt.itsm.edu.mx/ingeniantes/articulos/ingeniantes9no2vol1/10%20Usos%20actuales%20y%20tendencias%20del%20estropajo%20vegetal.pdf>

Martínez O.A. et. al. (2022). Polímeros reforzados con fibras naturales para su aplicación en la industria automotriz, Journal of Chemical Engineering Theoretical and Applied Chemistry 79 (595), 237-247.  
<https://raco.cat/index.php/afinidad/article/view/399445>

Mazali, I.O., & Alves, O.L. (2005). Morphosynthesis: high fidelity inorganic replica of the fibrous network of loofa sponge (*Luffa cylindrical*), Anais da Academia Brasileira de Ciencias, 77 (1), 25-31.  
<https://doi.org/10.1590/S0001-37652005000100003>

OCW (2001). Introducción a los materiales compuestos. eCampus.  
[https://ocw.ehu.eus/pluginfile.php/40280/mod\\_resource/content/1/materia\\_comp/tema-1-introduccion-a-los-materiales-compuestos.pdf](https://ocw.ehu.eus/pluginfile.php/40280/mod_resource/content/1/materia_comp/tema-1-introduccion-a-los-materiales-compuestos.pdf)

Pozo M.R.A, Güemes, A. & Fernández L.A. (2019). Materiales compuestos de fibras naturales. Universidad Politécnica de Madrid.  
[https://oa.upm.es/55053/1/ANGEL\\_RENATO\\_POZO\\_MORALES.pdf](https://oa.upm.es/55053/1/ANGEL_RENATO_POZO_MORALES.pdf)

Sivakandhan, C., Balaji, R., Ganesh, B.L., Madan, D., Murali, G. (2019). Investigation of mechanical behaviour on sponge/ridge gourd (*Luffa aegyptiaca*) natural fiber using epoxy and polyester resin. *Materials Today: Proceedings* 22.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2019.09.183>

Stupenengo, F. (2011). Materiales y materias primas. Ministerio de educación. Instituto Nacional de Educación Tecnológica. 6-26.  
<https://www.inet.edu.ar/wp-content/uploads/2012/11/materiales-compuestos.pdf>

Tanobe, V.O.A., Flores-Sahagun, T.H.S., Amico, S.C., Muniz, G.I.B., & Satynarayana, K.G. (2014). Sponge gourd (*Luffa Cylindrica*) reinforced polyester composites: Preparation and properties, *Defence Science Journal*, 64 (3), 273-280.  
<https://doi.org/10.14429/dsj.64.7327>

Yépez, C.H. (2014). Resistencia de materiales 1. Pontificia Universidad Católica del Perú.  
<https://textos.pucp.edu.pe/pdf/4121.pdf>