



**Universidad Autónoma del Estado de México**  
**Facultad de Química**



**“Concreto polimérico modificado con partículas de llanta de  
desecho y radiación gamma”**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
INGENIERO QUÍMICO**

**PRESENTA:  
DULCE NAYELI MELGAREJO BOLAÑOS**

**DIRIGIDA POR:  
DR. GONZALO MARTÍNEZ BARRERA**

**Toluca, Estado de México, 2023**

## Índice

Relación de tablas .....	5
Relación de figuras .....	6
Resumen .....	8
Abstract.....	10
<b>Capítulo 1. Antecedentes .....</b>	<b>11</b>
1.1. Introducción .....	12
1.2. Llantas.....	14
1.2.1. Tipos de llantas .....	14
1.2.2. Partes de las llantas .....	15
1.2.3. Composición de las llantas.....	16
1.2.4. Reciclaje de llantas.....	18
1.3. Materiales compuestos.....	20
1.4. Concreto polimérico .....	22
1.5. Resina de poliéster .....	25
1.5.1. Proceso de curado de la resina de poliéster .....	27
1.5.2. Monómero de estireno .....	29
1.6. Mármol.....	30
1.7. Radiación gamma.....	32
1.7.1. Efectos de la radiación gamma en elastómeros.....	35
1.8. Propiedades mecánicas .....	36
1.8.1. Resistencia a la flexión y a la compresión.....	37
1.8.2. Módulo de elasticidad.....	37

1.9. Caracterización .....	40
1.9.1. Ensayos mecánicos .....	40
1.9.2. Ensayos de compresión .....	41
1.9.3. Ensayos de flexión.....	41
1.9.4. Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) .....	43
<b>Capítulo 2. Desarrollo experimental .....</b>	<b>46</b>
2.1. Materiales .....	47
2.1.1. Resina de poliéster.....	47
2.1.2. Cera desmoldante.....	48
2.1.3. Peróxido de metil etil cetona.....	49
2.1.4. Mármol.....	50
2.1.5. Partículas de llantas recicladas .....	51
2.2. Metodología .....	52
2.2.1. Análisis de materia prima .....	53
2.2.2. Cálculo de la composición de las probetas .....	53
2.2.3. Irradiación de probetas.....	54
2.2.4. Elaboración de probetas.....	54
2.2.5. Caracterización.....	57
<b>Capítulo 3. Análisis de resultados.....</b>	<b>60</b>
3.1. Resultados del análisis de la materia prima.....	61
3.2. Resultados de la prueba de compresión .....	62
3.2.1. Curvas de Esfuerzo vs. Deformación en compresión .....	62
3.2.2. Resistencia a la compresión .....	63

3.2.3. Deformación en compresión.....	65
3.2.4. Módulo de elasticidad en compresión.....	66
3.3. Resultados de la prueba de flexión.....	68
3.3.1. Curvas Esfuerzo vs. Deformación en flexión.....	68
3.3.2. Resistencia a la flexión.....	68
3.3.3. Deformación en flexión.....	70
3.3.4. Módulo de elasticidad en flexión.....	72
3.4. Morfología de las partículas de llanta.....	73
3.4.1. Morfología de las superficies fracturadas de los concretos.....	74
<b>Capítulo 4. Conclusiones.....</b>	<b>75</b>
Referencias.....	77

## Relación de tablas

<b>Tabla 1.1.</b> Composición porcentual promedio de los residuos en México 2020. <sup>[4]</sup> .....	12
<b>Tabla 1.2.</b> Materiales componentes de llantas <sup>[6]</sup> .....	17
<b>Tabla 1.3.</b> Propiedades del concreto polimérico vs. concreto hidráulico. <sup>[39]</sup> .....	24
<b>Tabla 1.4.</b> Propiedades mecánicas de resinas de poliéster. <sup>[11]</sup> .....	26
<b>Tabla 1.5.</b> Propiedades del mármol <sup>[12, 14]</sup> .....	32
<b>Tabla 2.1.</b> Sistema recomendado para resina de poliéster basado en cobalto y peróxido .....	47
<b>Tabla 2.2.</b> Propiedades de la resina de poliéster .....	48
<b>Tabla 2.3.</b> Especificaciones Cera desmoldante CP-500 .....	49
<b>Tabla 2.4.</b> Composición del Peróxido de Metil Etil Cetona K – 2000 .....	50
<b>Tabla 2.5.</b> Propiedades del mármol .....	51
<b>Tabla 2.6.</b> Composición y propiedades de las partículas de llantas recicladas. ....	51
<b>Tabla 2.7.</b> Composición de las probetas. ....	54
<b>Tabla 2.8.</b> Clasificación de las probetas .....	54
<b>Tabla 2.9.</b> Condiciones de los ensayos mecánicos .....	58
<b>Tabla 3.1</b> Resistencias a la compresión promedio de acuerdo con el tipo de probeta	64
<b>Tabla 3.2</b> Deformación en compresión promedio de acuerdo con el tipo de probeta	66
<b>Tabla 3.3.</b> Resistencia a la flexión promedio de acuerdo con el tipo de probeta .....	70
<b>Tabla 3.4.</b> Deformación en flexión promedio de acuerdo con el tipo de probeta .....	72

## Relación de figuras

<b>Fig. 1.1.</b> Tipos de llantas <sup>[38]</sup> .....	15
<b>Fig. 1.2.</b> Partes principales de una llanta. <sup>[38]</sup> .....	16
<b>Fig. 1.3.</b> Estructuras químicas de hule natural y hules sintéticos <sup>[7]</sup> .....	18
<b>Fig. 1.4.</b> Estructura química de la resina de poliéster insaturada <sup>[11]</sup> .....	25
<b>Fig. 1.5.</b> Peróxido de metil etil cetona .....	27
<b>Fig. 1.6.</b> Descomposición del peróxido de metil etil cetona .....	28
<b>Fig. 1.7.</b> Estructura química del monómero de estireno. <sup>[39]</sup> .....	30
<b>Fig. 1.8.</b> Efecto fotoeléctrico. <sup>[27]</sup> .....	33
<b>Fig. 1.9.</b> Producción de pares electrón-positrón. <sup>[27]</sup> .....	34
<b>Fig. 1.10.</b> Efecto Compton. <sup>[27]</sup> .....	34
<b>Fig. 1.11.</b> Comportamiento elástico y plástico de un material <sup>[27]</sup> .....	38
<b>Fig. 1.12.</b> Diagrama esfuerzo vs. deformación <sup>[43]</sup> .....	39
<b>Fig. 1.13.</b> Ensayos de flexión: a) en 3 puntos. b) en 4 puntos <sup>[34]</sup> .....	42
<b>Fig. 2.1.</b> Resina de poliéster .....	47
<b>Fig. 2.2.</b> Cera desmoldante CP-500 .....	48
<b>Fig. 2.3.</b> Peróxido de metil etil cetona K-2000.....	49
<b>Fig. 2.4.</b> Partículas de mármol.....	50
<b>Fig. 2.5.</b> Partículas de llanta .....	51
<b>Fig. 2.6.</b> Actividades realizadas durante la experimentación. ....	52
<b>Fig. 2.7.</b> Molde para probetas .....	56
<b>Fig. 2.8.</b> Probetas con partículas de llanta (R/M-p) lote D.....	56
<b>Fig. 2.9.</b> Probetas control (R/M) lote A.....	56
<b>Fig. 2.10.</b> Ensayo de compresión. ....	57
<b>Fig. 2.11.</b> Ensayo de flexión en 3 puntos.....	57
<b>Fig. 2.12.</b> Máquina de pruebas universal modelo 70-S17C2.....	58
<b>Fig. 2.13.</b> Software de la máquina de pruebas universal modelo 70-S17C2.....	58

<b>Fig. 3.1.</b> Perfil de exotermia de la resina de poliéster.....	61
<b>Fig. 3.2.</b> Perfil de exotermia mezcla resina de poliéster-mármol.....	61
<b>Fig. 3.3.</b> Esfuerzo vs. Deformación en compresión de probetas. ....	62
<b>Fig. 3.4.</b> Deformación en compresión de las probetas con partículas de llanta.....	65
<b>Fig. 3.5.</b> Módulo de elasticidad en compresión de las probetas con partículas de llantas. ....	67
<b>Fig. 3.6.</b> Esfuerzo vs. Deformación en flexión de las probetas.....	68
<b>Fig. 3.7.</b> Resistencia a la flexión de las probetas. ....	69
<b>Fig. 3.8.</b> Deformación en flexión de las probetas. ....	71
<b>Fig. 3.9.</b> Módulo de elasticidad en flexión de las probetas con partículas de llanta.....	73
<b>Fig. 3.10.</b> Morfología de las partículas de llanta a) no irradiadas, y b) irradiadas .....	73
<b>Fig. 3.11.</b> Morfología de la zona de fractura de probetas: sin llanta (a), con llanta sin irradiar (b), y con llanta irradiada (c).....	74

## Resumen

Hoy en día la excesiva cantidad de llantas automotrices de desecho genera serios problemas ambientales. Una de las formas alternativas para su reciclaje es como relleno en materiales compuestos. Sin embargo, como es sabido, los materiales reciclados que se agregan disminuyen ciertas propiedades mecánicas debido a la mala adherencia entre los rellenos y la matriz. Para resolver este problema se ha utilizado radiación ionizante. Por estas razones, en esta tesis se elaboraron probetas de concreto polimérico con resina poliéster y mármol, este último fue parcialmente sustituido por partículas de llantas automotrices de desecho. Luego se evaluaron las propiedades de compresión de las probetas elaboradas con diferentes concentraciones de partículas de llanta (0.6, 0.9 y 1.2% en peso), de tamaño de 0.85 mm (malla 20) e irradiadas a 150 kGy. La contribución de las partículas de llanta irradiadas a las propiedades mecánicas se analizó mediante Microscopía Electrónica de Barrido (SEM).

Los resultados de la prueba de compresión aplicada a los concretos con partículas de llanta e irradiados, fueron:

- Aumento en el módulo de elasticidad de hasta 168% cuando se agregó 1.2% de partículas.
- Aumento de la resistencia de hasta 5.8% cuando se agregó 0.6% de partículas.
- Disminución de la deformación de 11.4%, cuando se agregó 0.9% de partículas.

En el caso de la prueba de flexión se obtuvo:

- Aumento en el módulo de elasticidad del 25% cuando se agregó 0.6% de partículas.
- Aumento de la resistencia de solo el 2.5% cuando se agregó 0.6% de partículas.
- Disminución de deformación de hasta 8.6%, cuando se agregó 0.9% de partículas.



Los resultados de las pruebas mecánicas se relacionaron con los cambios en la morfología de las partículas de llanta y en las zonas de fractura, producidos por los rayos gamma.

## Abstract

Today, the excessive amount of automotive waste tires generates serious environmental problems. One of the alternative ways to recycle them is as filler in composite materials. However, as is known, the recycled materials that are added decrease certain mechanical properties due to poor adhesion between the fillers and the matrix. Ionizing radiation has been used to solve this problem. For these reasons, in this thesis, samples of polymer concrete with polyester resin and marble were prepared, the latter was partially substituted by particles of scrap automotive tires. The compressive properties of the specimens made with different concentrations of tire particles (0.6, 0.9 and 1.2% by weight), sized 0.85 mm (20 mesh) and irradiated at 150 kGy were evaluated. The contribution of the irradiated tire particles to the mechanical properties was analyzed by Scanning Electron Microscopy (SEM).

The results of the compression test applied to the concrete with tire particles and irradiated, were:

- Increase in modulus of elasticity of up to 168% when 1.2% particles were added.
- Strength increases of up to 5.8% when 0.6% of particles were added.
- Decrease in deformation of 11.4% when 0.9% particles were added.

In the case of the flexural test, the following results were obtained:

- Increase in modulus of elasticity of 25% when 0.6% particles were added.
- Increase in strength of only 2.5% when 0.6% particles were added.
- Decrease in deformation of up to 8.6% when 0.9% particles were added.

The mechanical test results were related to changes in tire particle morphology and fracture zones produced by gamma rays.

# **Capítulo 1. Antecedentes**

## 1.1. Introducción

Diariamente se generan millones de residuos que deben ser tratados de acuerdo con su clasificación para que su disposición final no tenga consecuencias medioambientales negativas; este tratamiento resulta en una problemática ambientalista de suma importancia debido a que el manejo inadecuado de los residuos provoca efectos nocivos como contaminación del suelo, aire y agua, deterioro del paisaje natural, disminución en la biodiversidad, riesgos a la salud, entre otros. En México, según la Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), se generan diariamente 102,895 toneladas de residuos, de los cuales se recolectan 83.93% y se disponen en sitios de disposición final 78.54%, reciclando únicamente el 9.63% de los residuos generados. [1, 3]

Los residuos suelen ser depositados en rellenos sanitarios (sitios construidos bajo normatividad) y vertederos (sitios sin medidas anticontaminación), los cuales están compuestos de materiales como cartón, papel, plásticos, residuos orgánicos, metales, hule, entre otros, pero estos aún pueden poseer algún valor remanente. Sin embargo, al no ser reutilizados o integrados a algún proceso de producción, se desperdician. [2, 3]

En México la composición de los residuos se clasifica en tres categorías, de acuerdo con los subproductos de los residuos (Tabla 1.1). Se tienen las categorías de: 1) susceptibles a aprovechamiento, 2) orgánicos, y 3) otros. [4]

**Tabla 1.1.** Composición porcentual promedio de los residuos en México 2020. [4]

Categoría	Subproductos	Porcentaje
<b>Susceptibles de aprovechamiento:</b> <b>31.55%</b>	Plástico rígido y de película	7.66
	Papel	5.07
	Cartón	4.55

	Vidrio transparente	3.13
	PET	2.63
	Vidrio de color	1.60
	Poliestireno expandido	1.55
	Envase de cartón encerado	1.51
	Lata	0.98
	Material ferroso	0.88
	Material no ferroso	0.57
	Poliuretano	0.55
	Hule	0.54
	Fibras sintéticas	0.34
<b>Orgánicos:</b> <b>46.42%</b>	Residuos alimentarios	33.07
	Residuos de jardinería	10.84
	Madera	0.79
	Fibra dura vegetal	0.73
	Hueso	0.52
	Cuero	0.46
<b>Otros:</b> <b>22.03%</b>	Pañal desechable	6.75
	Trapo	2.82
	Residuo fino	2.25
	Material de construcción	0.70
	Loza y cerámica	0.46
	Algodón	0.15
	Otros	8.90

De acuerdo con la Tabla 1.1 los residuos susceptibles de aprovechamiento representan el 31.55% dentro de los cuales se encuentra el hule con tan solo el 0.54% del total de residuos generados, lo que significa que se generan alrededor de 550

toneladas de hule al día, entre estas se contempla a las llantas automotrices de desecho.

## **1.2. Llantas**

En el siglo XIX se estudió la posibilidad de producir hule más resistente con la ayuda de sustancias químicas. Fue en 1839 cuando se obtuvo hule de calidad, aplicando vapor a presión por 4 o 6 horas a 132°C, proceso que fue denominado vulcanización. Se produjeron llantas pesadas y rígidas, de hule sólido, resistentes a cortes y abrasión. Con el objetivo de disminuir la vibración y mejorar la tracción Robert W. Thomson, fabricó la primera llanta de hule relleno de aire. Donde la parte interna, llamada tubo interno contenía aire comprimido y la parte externa era una carcasa protectora del tubo interno, la cual brindaba a la llanta mejor fricción. [5]

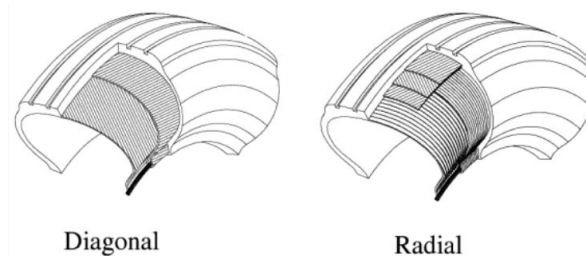
Los neumáticos o llantas tienen como principal finalidad brindar estabilidad al vehículo con el terreno ya que estos son el único punto de contacto en la conducción razón por la cual de los neumáticos depende el comportamiento dinámico del automóvil sobre determinada superficie. [36]

### **1.2.1. Tipos de llantas**

La estructura de las llantas puede ser de dos tipos: radial o diagonal (Figura 1.1), dependiendo de la posición de las capas que la forman. [37, 38]

- I) Radiales: Son el tipo de llanta más utilizadas; se caracterizan porque su carcasa la forman una o más capas de lonas cuyas fibras se encuentran en posición radial extendiéndose de talón a talón formando un ángulo de 90°. Además, la estructura se complementa con un cinturón supuesto entre la carcasa y la banda de rodadura con el fin de aumentar la rigidez. [38]

- II) **Diagonales:** Están formadas de al menos dos capas de lonas cuyas fibras están instaladas de manera cruzada formando ángulos iguales entre 25 y 40 grados con respecto a la dirección de rodamiento. [37, 38]



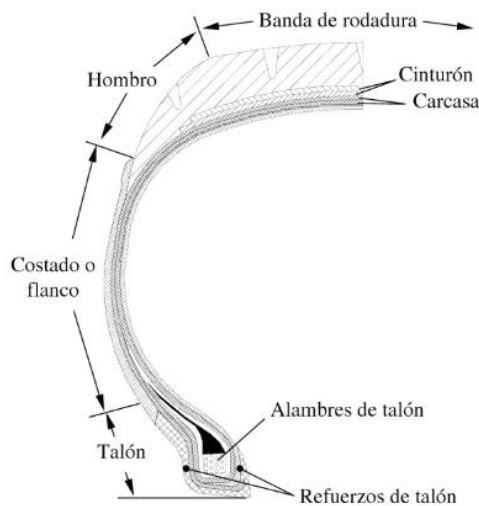
**Fig. 1.1.** Tipos de llantas [38]

### 1.2.2. Partes de las llantas

Las llantas están conformadas por diversas partes (Figura 1.2) tanto internas como externas, dentro de las cuales destacan seis:

- I) **Banda de rodamiento o rodadura:** está diseñada para estar en contacto con el suelo y soporta las fuerzas longitudinales y transversales debido a la dinámica del vehículo por lo tanto permite la tracción de frenado y dirección de este. Está fabricada de hule natural y hules sintéticos principalmente. [38]
- II) **Hombros:** son los externos laterales de la banda de rodamiento los cuales la protegen contra choques y roces; se encargan de minimizar los efectos de las irregularidades del terreno y transferir la carga por frenado y sobreviraje bajo aceleración. [38]
- III) **Costado o flanco:** se encuentran entre los talones y los hombros, al igual que los hombros sirven de protección contra golpes y roces además son flexibles proporcionando amortiguamiento y elasticidad. [37, 38]

- IV) Talones: proporcionan integridad geométrica al neumático y mantiene el diámetro requerido; se trata de un cuerpo de alambres metálicos, compuesto normalmente de acero trenzado cubierto de hule y tejidos. [36, 37, 38]
- V) Cinturón: contribuye a aumentar la rigidez en la carcasa, se compone de varias lonas en forma de anillo. [38]
- VI) Carcasa: se compone por fibras textiles colocadas en ángulos rectos impregnadas de hule extendidas de talón a talón. Confiere la resistencia, soportando la presión de inflado y los esfuerzos exteriores. [37, 38]



**Fig. 1.2.** Partes principales de una llanta. [38]

### 1.2.3. Composición de las llantas

Las llantas de vehículos son productos de ingeniería compleja los cuales se fabrican en su mayoría con hule sintético, pero en las últimas décadas se ha utilizado más hule



natural; el cual se obtiene del látex líquido que segregan ciertas plantas. Se caracteriza por ser flexible, resistente a la abrasión y estable al envejecimiento. [5,37]

Los tipos de hule mayormente empleados en la fabricación de llantas son: [37]

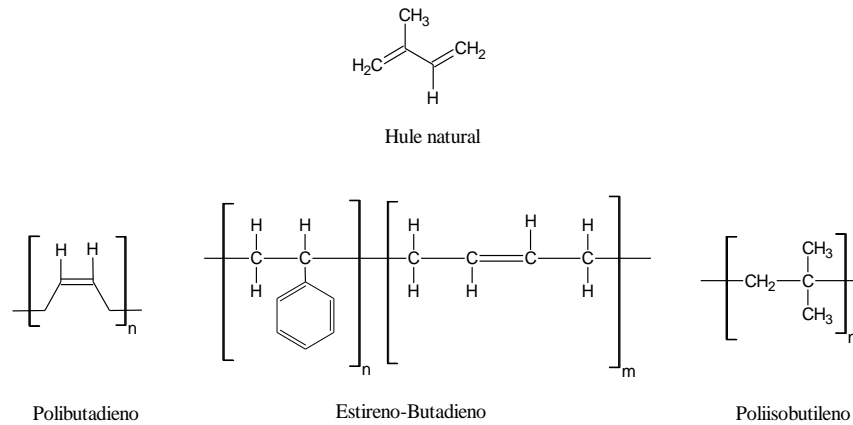
- Hule natural
- Hule Estireno - Butadieno

Las llantas están constituidas de diversos materiales, entre los que destacan el negro de humo, compuestos elastoméricos, acero, fibras y productos químicos y minerales añadidos para permitir o acelerar la vulcanización. El porcentaje de cada material componente dependerá del tipo de vehículo donde se instale la llanta, como se muestra en la Tabla 1.2. [6,37]

**Tabla 1.2.** Materiales componentes de llantas [6]

<b>Tipo de llanta</b>	<b>Hule (%)</b>	<b>Negro de humo (%)</b>	<b>Metal (%)</b>	<b>Textiles (%)</b>	<b>Óxido de zinc (%)</b>
<b>Auto de pasajeros</b>	47	21.5	16.5	5.5	1
<b>Camión</b>	45	22	23	3	2
<b>Todo terreno</b>	47	22	12	10	2

La fracción en la banda de rodamiento de llantas es una mezcla de hule natural y hules sintéticos como polibutadieno, estireno-butadieno y butílico (Figura 1.3).



**Fig. 1.3.** Estructuras químicas de hule natural y hules sintéticos [7]

En el mundo se desechan alrededor de 17 millones de toneladas al año de llantas, lo cual produce problemas ambientales severos. Debido a su tamaño, las llantas suelen ocupar mucho espacio en los rellenos sanitarios y vertederos, en los cuales pueden generar estancamiento de agua, lo que propicia cultivo de bacterias y plagas como mosquitos, permitiendo la propagación de enfermedades. Las llantas también generan contaminación de aire, agua y suelo, después de ser quemadas [8]. A pesar de estos inconvenientes, las llantas representan una gran área de oportunidad en el reciclamiento y en su uso como relleno en novedosos materiales compuestos.

#### 1.2.4. Reciclaje de llantas

Gran parte de las llantas que son desechadas permanecen en vertederos por largos periodos debido a que no se degradan con facilidad, mientras que las restantes son aprovechadas en distintas aplicaciones o son recicladas. [7]. Los procesos de reciclamiento son:

1) Recauchado: es un método para aumentar la vida útil de las llantas, mediante el retiro de la banda de rodadura a través de procesos térmicos, y la colocación de una nueva banda. Para este método se requiere alrededor del 30% de la energía y del 25% de la materia prima requerida para la elaboración de una llanta nueva. El recauchado

es un método ecológico, ya que no genera desechos. Sin embargo, las llantas renovadas disminuyen su calidad y seguridad cuando se utilizan a altas velocidades. [7]

II) Incineración: se utiliza para la producción de energía, debido al alto poder calorífico de las llantas (32.6 MJ/kg), en comparación con otros materiales combustibles como el carbón. Se obtiene vapor, así como negro de humo el cual es utilizado para la fabricación de tintas y pinturas de impresión. Las principales ventajas de la incineración son el bajo costo en la producción de energía y la máxima recuperación de calor. Sin embargo, puede ser riesgosa para el medio ambiente, ya que durante la combustión se emiten partículas y gases nocivos al aire. [7]

III) Pirólisis: consiste en la descomposición térmica de las llantas por encima de los 400°C en un ambiente libre de oxígeno. Mediante la pirólisis de llantas se obtienen tres productos principales: aceite (40-60%), carbón vegetal (30-40%) y gas (5-20%). Estos pueden ser utilizados como combustible, en la elaboración de capacitores y baterías, para la síntesis de nanotubos de carbono, entre otros. Sin embargo, para llevar a cabo la pirolisis es necesario contar con grandes plantas industriales, que son costosas. [7]

IV) Materiales Compuestos: los componentes de las llantas (primordialmente hule natural y hules sintéticos), resultan ser apropiados como refuerzos en materiales compuestos. Con la adición de fibras o partículas de llanta en diversos materiales se obtienen ventajas, entre estas la reducción de materia prima y del precio final de producto, así como el mejoramiento de las propiedades mecánicas. Por ejemplo, la adición de partículas de llantas en el asfalto de carreteras mejora la calidad de la superficie, la estabilidad térmica y la resistencia al envejecimiento. En el concreto, las partículas de llanta mejoran su resistencia a la flexión, a la carga y al agrietamiento. Finalmente, la mezcla de llantas trituradas con matrices poliméricas (plásticos termoestables o termoplásticos), produce materiales compuestos ecológicos y de bajo costo, con posibilidad de sustituir a materiales equivalentes. [7]

### 1.3. Materiales compuestos

Se les denomina materiales compuestos a todos los sistemas o combinación de materiales constituido por la unión de dos o más componentes distinguibles físicamente con el fin de conseguir propiedades optimizadas y posiblemente obtener propiedades únicas en algún aspecto específico, en comparación a las propiedades de los componentes por separado; esta combinación da como resultado un material nuevo con características específicas las cuales dependen de las proporciones de los componentes que lo constituya. El porcentaje máximo de fase discontinua debe limitarse a menos del 80% para asegurar que sea cubierta por la matriz. [22-25, 47]

Los materiales compuestos (composites) se conforman de dos fases: una continua y otra dispersa; la primera está constituida por la matriz y la segunda por el refuerzo siendo este último el que aporta las principales propiedades mecánicas del nuevo material. El refuerzo constituye la parte más rígida y resistente del material y se presenta en forma de partículas o fibras continuas o discontinuas, largas o cortas, en una o varias direcciones, distribuidas uniforme o aleatoriamente. [23,25]

La matriz se encarga de proteger al refuerzo de factores externos o agentes mecánicos que puedan dañarlo, actúa como aglutinante, asegura a las fibras o partículas de refuerzo de acuerdo con el orden preestablecido y se encarga de repartir y transmitir las cargas al refuerzo a través de la interfaz. [23, 25]

La clasificación de los materiales compuestos varía según las ideas y conceptos con los que se identifican; una de las más importantes es según su matriz, la cual se divide en 3 grupos: [23]

1. Materiales compuestos de matriz cerámica
2. Materiales compuestos de matriz metálica
3. Materiales compuestos de matriz polimérica

Los materiales compuestos de matriz cerámica mejoran las propiedades mecánicas de los materiales cerámicos tradicionales como resistencia y tenacidad; se clasifican de acuerdo con el tipo de refuerzo incorporado en: reforzados con partículas, reforzados con fibras discontinuas y reforzados con fibras continuas. En el caso de los materiales compuestos de matriz metálica poseen alta resistencia y muy bajo peso; al igual que los materiales compuestos de matriz cerámica se clasifican de acuerdo con el tipo de refuerzo incorporado, un ejemplo de este tipo de materiales compuestos son las aleaciones de aluminio con refuerzos de fibras de boro. [23]

Los materiales compuestos de matriz polimérica se caracterizan por tener buenas propiedades mecánicas como alta resistencia y rigidez, resistencia a la corrosión y a los agentes químicos; se clasifican en materiales termoestables y termoplásticos. En cuanto a los materiales compuestos termoplásticos se trata de aquellos que se vuelven plásticos y deformables con el calor por lo que tienen una alta deformación límite y resistencia al impacto y a la fractura.[23]

Por otro lado, los materiales compuestos termoestables presentan estabilidad térmica y mayor resistencia a agentes químicos, además presentan comportamiento elástico, con poca fluencia y poca relajación por tensión. Los principales grupos de matrices para esta clase de materiales son las resinas viniléster, fenólicas, epoxi y poliéster.[23]

Los termoestables inicialmente se presentan como un líquido viscoso y tras un proceso denominado curado se transforma de estado líquido a sólido por efecto de una reacción de endurecimiento. A temperatura ambiente son duros y rígidos, pero al mismo tiempo frágiles y con el efecto del calor tienden a reblandecerse mucho menos que los termoplásticos.[23]

Los materiales termoestables presentan muchas ventajas entre las que se pueden destacar alta estabilidad térmica, alta rigidez, bajo peso, resistencia a la fluencia y a la deformación bajo carga, buenos aislante térmicos y eléctricos. [23]

#### 1.4. Concreto polimérico

El concreto polimérico (CP) es un material compuesto con alta resistencia mecánica y durabilidad, que consta básicamente de agregados minerales de granulometría controlada (fase dispersa) y un polímero que, normalmente, es una resina termoestable (fase continua); estos componentes se mezclan uniformemente y a través de un catalizador se realiza el proceso de curado de la resina hasta obtener un material termoestable de alta resistencia a la compresión. [26, 27, 39, 41]

Dentro de las resinas termoestables más utilizadas como matriz en un concreto polimérico se encuentran las resinas tipo poliéster, epóxido, acrílica y vinílica; en el caso de la fase dispersa se suelen emplear minerales como arena de cuarzo, grava de granito, mármol, arena de sílice, marmolina, entre otros. [26, 27, 39, 41]

Los valores de las propiedades mecánicas que los concretos poliméricos presenten dependen de la resina polimérica y el agregado mineral con el que estén elaborados, así como las concentraciones de estos. Además, las propiedades de los concretos poliméricos pueden ser modificadas con la adición de partículas o fibras de refuerzo que afectaran a las propiedades de acuerdo con su tipo y porcentaje. [19, 27]

Los agregados minerales (fase dispersa) aportan rigidez, dureza y estabilidad al concreto polimérico, al igual que aumentan la resistencia química y reducen el coeficiente de expansión térmica y contracción por moldeo. [39]

La interfase de las fases continua y dispersa del concreto polimérico depende en gran medida de la textura del agregado mineral ya que de este es el principal parámetro del grado de adhesión; se ha encontrado que a mayor porosidad de la superficie mayor es la fuerza de adherencia y, por lo tanto, la cantidad de espacios vacíos disminuye evitando la generación de grietas e influyendo directamente en la resistencia mecánica del concreto polimérico. [39]

Actualmente, las principales aplicaciones de los concretos poliméricos son en el área de la construcción como en la fabricación de tuberías y revestimientos al igual que para la fabricación de aislantes eléctricos. [26, 27]

A diferencia del concreto hidráulico el concreto polimérico no requiere de agua ni cemento para su elaboración, en cambio para este se emplea una resina que se mezcla con agregados minerales hasta obtener una mezcla homogénea para posteriormente añadir un catalizador que, comúnmente, es peróxido de metil etil cetona el cual permite el proceso de curado mediante la polimerización de la resina, esta mezcla se vierte en un molde con la forma deseada y finalmente se obtiene un producto final sólido. [39]

El proceso de polimerización de la resina genera un aumento gradual en la viscosidad de esta, así como la generación de radicales libres los cuales disminuyen hasta la solidificación de la resina; durante este proceso se genera una reacción exotérmica con un periodo y temperatura determinados los cuales dependen de la cantidad de monómero estireno que contenga la resina y la cantidad de catalizador empleada. [39]

El concreto convencional presenta una serie de limitantes en cuanto a su funcionalidad debido a su alta porosidad y baja resistencia a esfuerzos de flexión, tensión y a reactivos químicos altamente corrosivos, factores en los que el concreto polimérico es notoriamente superior. Con respecto al concreto convencional algunas de las ventajas que presentan los concretos poliméricos son: [19, 26, 27]

- Ligereza
- Alta resistencia a la flexión, compresión e impacto
- Dureza
- Resistencia química
- Resistencia a los rayos UV

- Estabilidad bajo condiciones de congelación
- Baja absorción de humedad

Una de las principales ventajas que tiene el concreto polimérico con respecto al concreto hidráulico es su ligereza puesto que esto compensa el costo mayor que presenta ya que representa menores costos de transporte y colocación, además con los concretos poliméricos es posible lograr altas resistencias en poco tiempo gracias a su rapidez de endurecimiento. [27]

Algunos valores específicos de las propiedades del concreto polimérico en comparación con el concreto hidráulico se presenta en la Tabla 1.3.

**Tabla 1.3.** Propiedades del concreto polimérico vs. concreto hidráulico. [39]

Propiedad	Concreto	
	Polimérico	Hidráulico
<b>Absorción de agua (% en peso)</b>	0.30 - 0.10	4 - 10
<b>Peso volumétrico (kg/cm<sup>3</sup>)</b>	1,500 - 2,400	2,200 - 2,300
<b>Resistencia a la flexión (MPa)</b>	13.7 - 27.4	0.58 - 4.21
<b>Resistencia a la compresión (MPa)</b>	58.8 - 176.5	9.8 - 58.8
<b>Resistencia a la tensión (MPa)</b>	10.1 - 16.9	0.60 - 4.20

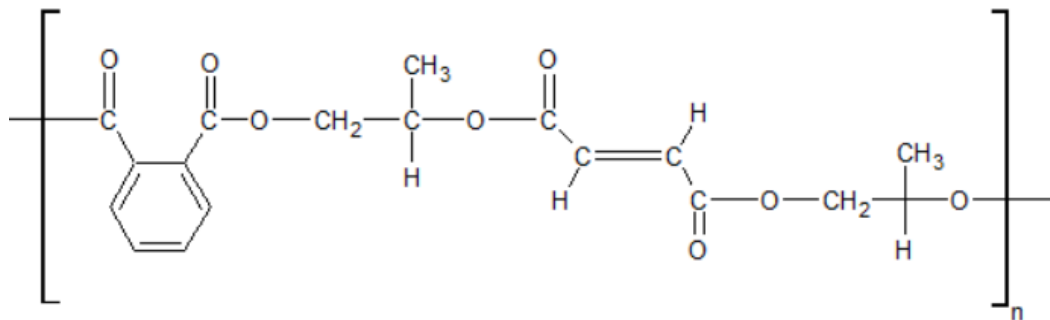
Debido a la alta absorción de agua que presenta el concreto tradicional este tiende a la aparición de grietas durante su proceso de curado, en el caso del concreto polimérico su baja absorción de agua lo hace prácticamente impermeable. Con el fin de evitar una falla por agrietamiento se ha optado por adicionar fibras como material de refuerzo en el concreto tradicional, fibras tales como de propileno; otra solución para evitar el agrietamiento es la incorporación de una capa de resina acrílica sobre el concreto recién curado formando una capa impermeable sobre este. [39]



El concreto polimérico, al igual que el concreto hidráulico, presenta un comportamiento de agrietamiento al aplicar una carga externa el cual se busca reducir con la adición de materiales de refuerzo de tipo sintético como nylon, polipropileno y poliéster. La adición del refuerzo en un concreto polimérico permite mejorar las propiedades mecánicas de resistencia a la compresión, impacto y tensión, principalmente. [39]

### 1.5. Resina de poliéster

Las resinas de poliéster insaturada (Figura 1.4) son polímeros que se obtienen por policondensación de un diácido con un dialcohol y un monómero insaturado (estireno); este tipo de resinas son utilizadas en una amplia gama de aplicaciones. En un material compuesto actúan como matriz o como fase continua. [9, 10]



**Fig. 1.4.** Estructura química de la resina de poliéster insaturada [11]

Las resinas son termoestables, es decir necesitan un agente externo para cambiar su estructura en otra diferente, pero no pueden volver a su estructura original. A temperatura ambiente se encuentran en estado líquido. Las resinas pre-aceleradas deben emplear un catalizador para su solidificación, mientras que las no pre-aceleradas un acelerador y un catalizador. [9-11]

Las resinas poliéster son muy versátiles, en términos de su composición y de los métodos de fabricación. Esta versatilidad permite que las propiedades del producto final se realicen de forma exacta conforme a los requisitos de la aplicación. [9]

Comercialmente, la resina de poliéster está compuesta de polipropileno base poliéster disuelto en monómero de estireno; la disolución en estireno permite la maleabilidad de la resina ya que este disminuye su viscosidad; sin embargo, el estireno también es una parte importante en el proceso de polimerización de la resina (curado) al ser un agente reticulante de la cadena polimérica. [39]

Las propiedades mecánicas de las resinas poliéster son de gran importancia en la aplicación final del producto (Tabla 1.4). Los ensayos mecánicos que suelen aplicarse son: resistencia a la compresión, a la flexión y a la tensión; resistencia al impacto; dureza; módulo de elasticidad en flexión y elongación a la ruptura. También se realizan otros estudios, como peso específico, absorción de agua, temperatura de distorsión y expansión térmica. [10]

**Tabla 1.4.** Propiedades mecánicas de resinas de poliéster. [11]

Resina	Resistencia a la tensión (MPa)	Resistencia a la compresión (MPa)	Resistencia a la flexión (MPa)	Módulo en tensión (GPa)	Módulo en flexión (GPa)	Dureza Barcol	Elongación (%)
Ortoftálica	55	-	80	3.45	3.45	-	2.1
Isoftálica	75	120	130	3.38	3.59	40	3.3
BPA fumarato	40	100	110	2.83	3.38	34	1.4
Clorédico	20	100	120	3.38	3.93	40	-
Vinil éster	80	-	140	3.59	3.72	35	4.0

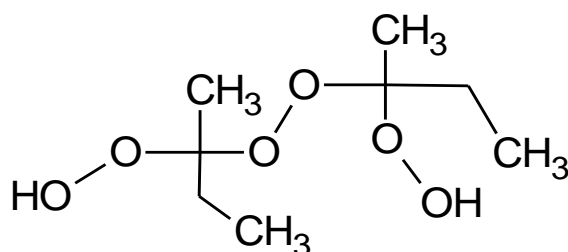
Dentro de las resinas de poliéster se pueden identificar dos tipos principales que se diferencian según la aplicación del concreto que se desea elaborar, estas son la resina

de poliéster ortoftálica y la resina de poliéster isoftálica. La resina ortoftálica se prepara a partir de anhídrido ftálico, anhídrido maléico y propilenglicol, disuelta en una solución de monómero de estireno, se caracteriza por presentar buenas propiedades mecánicas y media resistencia química. La resina isoftálica se prepara a partir del ácido isoftálico, anhídrido maléico y propilenglicol, disuelta en una solución de monómero de estireno, con porcentajes entre 32 y 50%. Se caracteriza por ser altamente resistente a agentes químicos. Ambas resinas presentan casi las mismas propiedades mecánicas. [39]

### 1.5.1. Proceso de curado de la resina de poliéster

La solidificación (curado) de la resina de poliéster, se produce por polimerización vinílica, en la cual los radicales libres activan los dobles enlaces de las cadenas de poliéster y de las moléculas de estireno. El curado puede iniciarse por catálisis térmica, por catálisis inducida químicamente o mediante la exposición a rayos UV. Durante el curado se genera una reacción exotérmica, es decir libera energía en forma de calor, la cual ocurre a medida que transcurre el tiempo. [9-11]

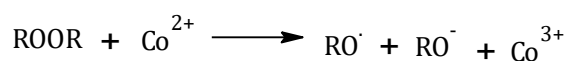
Las resinas de poliéster se presentan como un líquido viscoso, contienen un agente acelerador para la polimerización comúnmente una sal de cobalto. Para su proceso de curado se le adiciona un catalizador generalmente peróxido de metil etil cetona (Figura 1.5). [39]



**Fig. 1.5.** Peróxido de metil etil cetona.

En condiciones normales, la primera fase del curado de la resina consiste en pasar de estado líquido al gel (fase de gelación o gelificación), mientras que en la segunda fase se genera una gran cantidad de calor que permite llegar al endurecimiento de la resina. [9,39]

El peróxido de metil etil cetona en combinación con octoato de cobalto presentan la reacción de la figura 1.6 donde el radical RO· es el que inicia la polimerización reaccionando con un doble enlace del poliéster o del estireno.



**Fig. 1.6.** Descomposición del peróxido de metil etil cetona

Se realiza la polimerización de radicales libres de los dobles enlaces C – C presentes en la resina de poliéster y el monómero estireno. A medida que la polimerización avanza el peso molecular incrementa; este proceso se caracteriza por una reacción exotérmica y el desprendimiento del contenido de estireno. [9,39]

El curado de la matriz en un concreto polimérico presenta dos fases bien definidas en el tiempo: [39]

1. Tiempo de gelado o gelación: periodo que abarca desde que los componentes se mezclan hasta que presentan una consistencia pegajosa y espesa.
2. Tiempo de curado: tiempo total requerido para que la resina se endurezca y pueda desmoldarse.

El proceso de curado sigue un mecanismo de tipo radicalario donde se producen radicales libre a través de una reacción en cadena. En el proceso de curado se pueden identificar tres etapas: [46]

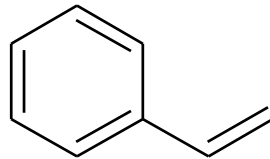
- 1) **Iniciación:** los radicales libres al inicio del proceso son suministrados por un iniciador que se puede descomponer por rotura homolítica del enlace O-O mediante la presencia de calor o de un promotor, que son utilizados para provocar la descomposición química del iniciador. <sup>[46]</sup>
  
- 2) **Propagación:** se continua con un proceso de generación de radicales libres a través de la apertura de los dobles enlaces por los radicales libres ya presentes los cuales pueden reaccionar con el estireno o bien con el poliéster; en este punto las cadenas poliméricas crecen y se entrecruzan, siguiendo tres procesos reactivos: copolimerización estireno-poliéster, homopolimerización del estireno y homopolimerización del poliéster. <sup>[46]</sup>
  
- 3) **Terminación:** los radicales libres presentes en el medio se recombinan finalizando el crecimiento de las cadenas poliméricas a través de múltiples procesos reactivos; reacciones como las denominadas de agotamiento, desproporción y acoplamiento o transferencia de cadena. Otra razón por la que se puede terminar el proceso reactivo es debido al aumento de la viscosidad de medio. <sup>[46]</sup>

### **1.5.2. Monómero de estireno**

El monómero de estireno (Figura 1.7) es un líquido aromático reactivo de baja viscosidad, insoluble en agua y que se puede mezclar con la mayoría de los productos orgánicos; se emplea como disolvente de la resina de poliéster para facilitar el manejo de esta; frente a otros disolventes el monómero de estireno presenta una serie de ventajas para su uso con la resina de poliéster: <sup>[46]</sup>

- Alta compatibilidad con la resina de poliéster
- Gran reactividad química
- Bajo costo

Además, el monómero de estireno favorece la polimerización de la resina de poliéster ya que este sirve de enlace entre las moléculas de poliéster; durante el proceso de polimerización el monómero de estireno contribuye en la reticulación de la resina a través de la generación de radicales libres de los dobles enlaces que presenta y que se unen con los radicales que se forman de los dobles enlaces de los grupos carboxilo del poliéster. [39]



**Fig. 1.7.** Estructura química del monómero de estireno. [39]

Dentro de sus principales aplicaciones se encuentra como agente diluyente para resinas el cual permite modificar las propiedades de viscosidad de las resinas de viniléster y poliéster; la cantidad que se utilice de este agente depende del tipo de resina y la temperatura de trabajo principalmente. [46]

## 1.6. Mármol

En un concreto polimérico se requiere para su elaboración un agregado mineral que constituye la fase dispersa, este se mezcla sin reaccionar con la resina de poliéster o fase continua, este agregado puede ser mármol, arena de sílice, carbonato de calcio, entre otros. Los agregados minerales son añadidos con el fin de favorecer las propiedades mecánicas del concreto polimérico. [39]

El porcentaje de los agregados minerales varía según el concreto polimérico, pero normalmente se emplea un 70% de estos para poder obtener una mezcla homogénea con la resina de poliéster; el agregado mineral no debe influir en la polimerización de la resina. [39]

El tamaño del agregado es otro factor que considerar puesto que emplear un tamaño grande en las partículas o fibras de este puede ocasionar huecos en el producto final y un tamaño menor permite mayor contacto con la resina y por lo tanto menos espacios vacíos; dado que el acomodo de las partículas de los agregados dentro de la matriz determina en gran medida las propiedades mecánicas de este que el agregado mineral tenga un tamaño pequeño permite que la resina esté más compacta internamente contribuyendo a la mejora de las resistencias mecánicas del concreto polimérico. [39]

Estudios han demostrado que concretos poliméricos elaborados a base de resina de poliéster y mármol la resistencia a la compresión se ve favorecida con un tamaño de partícula intermedio (1.4 mm) obteniendo una resistencia de 78 MPa la cual es 33% mayor que las resistencias obtenidas con granulometrías de mayor o menor tamaño. [39]

El mármol es un mineral de origen metamórfico que se produce por recristalización de piedra caliza a alta temperatura y/o presión. El mármol formado a partir de calcita pura es de color blanco, sin embargo, cuando la piedra caliza contiene impurezas se produce mármol de diferentes colores. [12, 13]

El mármol está compuesto con un porcentaje mayor al 90% de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), el resto es arcilla, cuarzo, mica, piritita y óxido de hierro, los cuales le aportan variedad de colores. Además, el mármol puede alcanzar un alto nivel de brillo tras un proceso de pulido por abrasión, sin la necesidad de adicionar ceras o componentes químicos. En cuanto a la apariencia física, el mármol puede ser translúcido, de diferentes colores (blanco, rojo, gris, café, verde, negro, azul o amarillo). Esta coloración puede presentarse de manera uniforme, jaspeada, vetada o una combinación de estas. [12, 14]

El mármol tiene alta dureza, resistencia química, baja conductividad térmica y eléctrica; cuenta con mayor dureza, resistencia y durabilidad que las calizas. Sus propiedades se muestran en la Tabla 1.5.

**Tabla 1.5.** Propiedades del mármol [12, 14]

<b>Propiedad</b>	<b>Valor</b>
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	2.6 – 2.8
Resistencia a la compresión (kg/cm <sup>2</sup> )	600 – 1,000
Resistencia a la tensión (kg/cm <sup>2</sup> )	100 – 360
Dureza Mohs	3 – 4
Absorción de agua (% en peso)	0.2 – 0.7

El mármol se utiliza en diversas actividades de la construcción, como la fabricación de cemento, cal y ladrillos; como recubrimiento de paredes exteriores o interiores de edificaciones; en paredes interiores de pasillos en hospitales o clínicas; en pisos; en escaleras y en acabados de lujo. También se utiliza en la fabricación de muebles o de esculturas. [12, 13]

### **1.7. Radiación gamma**

La radiación ionizante directa consta de partículas cargadas como electrones energéticos, positrones, protones, partículas alfa, entre otros; este tipo de radiación ionizante interactúa con la materia principalmente mediante fuerzas de Coulomb, es decir les hace repeler o atraer electrones de átomos y moléculas en función de sus cargas. Por su parte la radiación ionizante indirecta es producida por partículas sin cargas; los tipos principales de este tipo de radiación ionizante son los generados por fotones con energía superior a 10 keV, rayos gamma y rayos x, y todos los neutrones. [27]

Los rayos gamma son un tipo de radiación ionizante, con altas energías capaces de penetrar materia más profundamente que las radiaciones alfa o beta. La longitud de

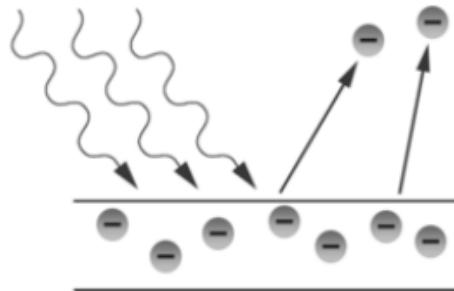


onda de los rayos gamma es menor a  $10^{-11}$  m, tienen una frecuencia mayor a  $3 \times 10^{19}$  Hz y un valor de 10 keV de energía del fotón. Las principales fuentes de rayos gamma son los isotopos radioactivos de Cobalto-60 y Cesio-137. [17- 19]

La radiación gamma es radiación electromagnética emitida por un núcleo cuando experimenta una transición energética de un nivel más alto a uno más bajo; el número de protones y neutrones no se ve afectado. Los rayos gamma suelen emitirse inmediatamente después de una degradación alfa o beta. [27]

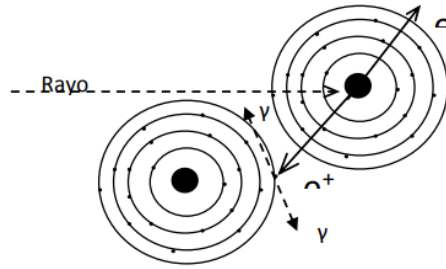
La interacción de la radiación gama con la materia puede ser a través de los siguientes fenómenos:

1. Efecto fotoeléctrico: en este fenómeno un fotón incide con un electrón interno y le transfiere toda su energía necesaria para que salga disparado de su órbita. (Figura 1.8) [39]



**Fig. 1.8.** Efecto fotoeléctrico. [27]

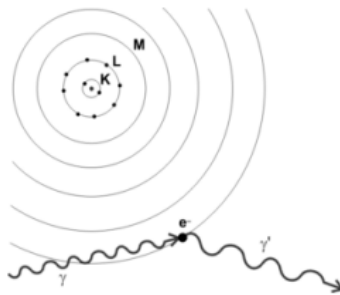
2. Producción de pares electrón-positrón: en este fenómeno un fotón energético se acerca a un campo eléctrico y se transforma en un par electrón-positrón (Figura 1.9). La energía cinética total del par electrón-positrón es igual a la energía del fotón menos la suma de las energías de la masa residual del electrón y el positrón (1.02 MeV). [27]



**Fig. 1.9.** Producción de pares electrón-positrón. [27]

3. Efecto Compton: en este caso un fotón colisiona con un electrón de la capa de valencia de un átomo; la energía se divide en la que necesita el electrón para salir disparado y en la energía restante en forma de otro fotón. (Figura 1.10)

[27]



**Fig. 1.10.** Efecto Compton. [27]

La radiación gamma tiene muchas ventajas para el mejoramiento de materiales de desecho, respecto a otros métodos utilizados, los cuales se realizan a través de reacciones químicas o procesos térmicos. Una de las mayores ventajas es no utilizar catalizadores o aditivos para iniciar las reacciones químicas; con radiación ionizante solo es necesario exponer el material a los rayos gamma; más aún las reacciones que se generan pueden ser controladas. Otra diferencia es referente a la producción de radicales libres, ya que cuando se usan químicos estos se producen a través de la

descomposición en fragmentos del iniciador, mientras que con radiación gamma los radicales libres son causados por la absorción de energía del material. [20]

El reciclamiento de polímeros mediante rayos gamma resulta ser un método ventajoso, debido a la capacidad de modificar las propiedades fisicoquímicas de los materiales de desecho sin la necesidad de utilizar ningún iniciador químico, lo que permite cuidar el medio ambiente. [20]

### **1.7.1. Efectos de la radiación gamma en elastómeros**

Los elastómeros son polímeros flexibles, presentan dobles enlaces a lo largo de la cadena, pero están reticulados en menor extensión, debido a estas características presentan un estado gomoelástico a temperatura ambiente. Dentro de los elastómeros se encuentran el hule natural y los hules sintéticos. [23]

La radiación gamma realiza modificaciones a nivel estructural gracias a que su elevada energía pueden penetrar más profundamente la materia; específicamente en el caso de los polímeros estas modificaciones dependen de los grupos funcionales de estos, así como de sus cadenas poliméricas. [39]

Los cambios en las propiedades físicas y químicas de polímeros, después de su sometimiento a rayos gamma, depende del tipo de polímero, de la dosis aplicada y las condiciones de la radiación. Los cambios afectan propiedades del polímero, como: cristalinidad, densidad, módulo de elasticidad, permeabilidad, resistencia a la corrosión y abrasión, así como el coeficiente de expansión térmica. Los efectos se producen a través de las estructuras moleculares, estos consisten en la reticulación (cross-linking) y ruptura (scission) de cadena poliméricas, así como en procesos de injerto (grafting). [19, 21]

La reticulación (cross-linking), se refiere a la formación de enlaces intermoleculares en las cadenas de los polímeros. El grado de la reticulación depende de la dosis de

radiación que se aplique. El mecanismo de la reticulación varía según el polímero; por lo general se produce por la ruptura del enlace C-H en una cadena del polímero. En cuanto a la ruptura (scission), se trata del proceso opuesto a la reticulación, ya que se produce una ruptura de enlaces C-C, C-H o C-O, la cual depende de la composición de la cadena principal (backbone). La ruptura provoca la disminución del peso molecular del polímero, mientras que la reticulación el aumento de este. Estos cambios se pueden relacionar con las propiedades mecánicas de los polímeros, como la resistencia a la compresión, a la tensión, a la ruptura y al impacto. El proceso de injerto (grafting) un nuevo monómero es polimerizado e integrado a la base de la cadena polimérica. [19, 21, 39]

El entrecruzamiento es más común en los polímeros con mayor número de átomos hidrógeno mientras que el proceso de degradación se presenta mayormente en aquellos polímeros que contienen grupos metilo disustituidos y sustituidos por halógenos. [39]

En el caso de los elastómeros como el hule presente en las llantas, la radiación gamma provoca degradación en la estructura química y en la morfología. Sin embargo, se mejoran las propiedades fisicoquímicas de mezclas que contienen hule sintético, natural o elastómeros reciclados. [20, 21]

## **1.8. Propiedades mecánicas**

Las propiedades mecánicas de los materiales determinan el comportamiento de éstos bajo la acción de fuerzas externas de distintos tipos que se ejercen sobre ellos; propiedades como fragilidad, tenacidad, elasticidad, plasticidad, maleabilidad, dureza, entre otras. [30]

La resistencia de un material es la capacidad que tiene este para soportar cargas tras ser sometido a esfuerzos externos sin que presente deformación excesiva o sufra una falla estructural. [27, 39]

El esfuerzo y la deformación expresan las propiedades elásticas de un material; el esfuerzo es la fuerza sometida sobre un cuerpo por unidad de área transversal y, la deformación es el grado en que un material sufre un cambio con respecto a su forma inicial conforme se le aplica una carga externa. [27, 39]

### **1.8.1. Resistencia a la flexión y a la compresión**

La resistencia a la compresión en un material se expresa como la carga máxima por unidad de área o superficie de contacto que es capaz de soportar hasta que se produzca un falla estructural o rotura; estas cargas se aplican axialmente. [39]

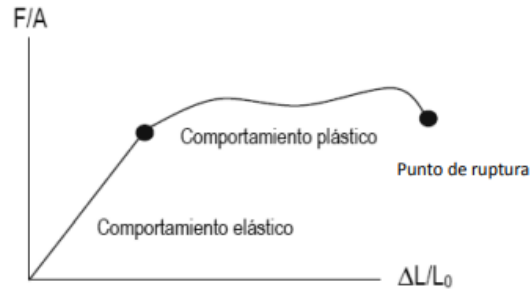
La resistencia a la flexión es la capacidad de un material de soportar fuerzas aplicadas de manera perpendicular a su eje longitudinal. El esfuerzo de flexión se obtiene al aplicar sobre un cuerpo pares de fuerzas perpendiculares a su eje longitudinal; estos esfuerzos longitudinales son de dos tipos: I) de tensión y II) de compresión, estos son aplicados en las caras inferiores de apoyo (superficie convexa) y en las caras superiores de aplicación de carga (superficie cóncava), respectivamente. [33, 34]

### **1.8.2. Módulo de elasticidad**

El módulo de elasticidad es la relación entre el esfuerzo y la deformación asociada a este; representa el grado de rigidez de un material. Cuando un material se somete a un esfuerzo sufre deformaciones directamente proporcionales al esfuerzo aplicado y si después este regresa su forma original tras suprimir dichas fuerzas significa que sufrió una deformación elástica, si, por el contrario, el material no regresa a su forma original sufrió una deformación plástica. [39]

Si se aplica sobre un material un esfuerzo lo suficientemente grande es posible exceder su límite elástico cuando esto sucede el material no regresa a su forma

original después de quitar el esfuerzo al que se le sometió; un material puede deformarse hasta un punto máximo conocido como punto de ruptura. [27]

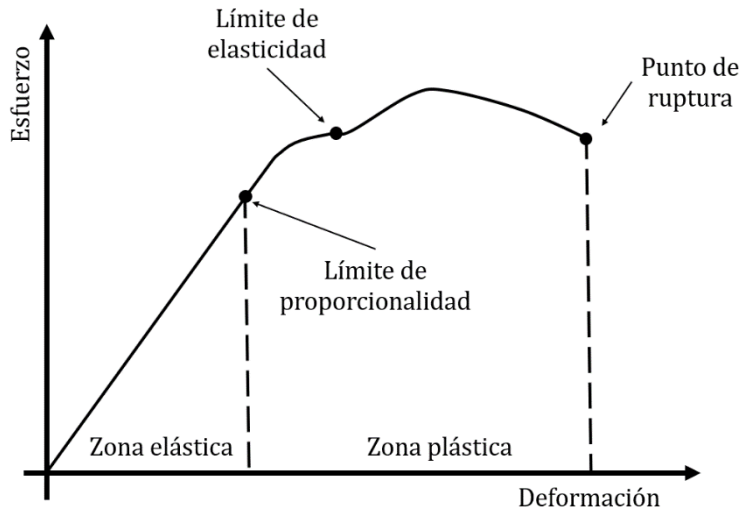


**Fig. 1.11.** Comportamiento elástico y plástico de un material [27]

De acuerdo con su resistencia y deformación un material puede clasificarse en dúctil o frágil, los primeros soportan una gran deformación plástica mientras que los materiales frágiles tienen deformaciones relativamente pequeñas hasta la ruptura la cual ocurre poco después del límite elástico. [39]

### 1.8.2.1. Diagrama esfuerzo vs. deformación

Un diagrama esfuerzo vs. deformación es una representación gráfica de los esfuerzos a las que se le somete a un material en función de la deformación que presenta al mismo tiempo, representando en el eje de las ordenadas los valores de esfuerzo y en el eje de las abscisas los de deformación (figura 1.12). A partir de este gráfico es posible determinar el módulo de elasticidad del material en cuestión. [42, 43]



**Fig. 1.12.** Diagrama esfuerzo vs. deformación [43]

Dentro del diagrama se destacan cinco partes principales:

1. Límite de proporcionalidad: es el máximo esfuerzo aplicado hasta que la deformación deja de presentar una tendencia lineal, esto se debe a que el material genera resisten a los esfuerzos y este recobrará su forma original siempre y cuando no exceda este límite. [27, 42]
2. Límite de elasticidad: es el máximo esfuerzo aplicado para el que no existe una deformación permanente en el material. A menudo se consideran casi idénticos el límite de proporcionalidad y el límite de elasticidad. [27]
3. Zona elástica: es el área de la curva que va desde el origen hasta el límite de proporcionalidad donde el material presenta una deformación elástica. La pendiente de esta sección de la curva se denomina módulo de elasticidad. [27]
4. Zona plástica: es el área de la curva que va desde el límite de proporcionalidad hasta el punto de ruptura donde el material presenta una deformación plástica. [27]

5. Punto de ruptura: es el esfuerzo máximo que soporta un material hasta presentar una falla estructural o ruptura.

## **1.9. Caracterización**

La caracterización de materiales es el procedimiento mediante el cual se estudian las propiedades físicas y químicas, tales como su composición, estructura, morfología, conductividad, resistencia a cargas, entre otras. El objetivo es conocer la información de los compuestos, como la resistencia o sus posibles aplicaciones. De este modo, se facilita la determinación de las propiedades físicas y químicas. [15]

Las técnicas utilizadas son muy variadas y abarcan procedimientos microscópicos y macroscópicos, así como ensayos destructivos y no destructivos. Dentro de las técnicas más comúnmente utilizadas se encuentran las Espectroscopías Infrarroja y Ultravioleta; la Absorción Atómica; la Difracción de Rayos X y la Resonancia Magnética Nuclear, así como la Microscopía, Cromatografía, los ensayos mecánicos, el análisis térmico y los ensayos de corrosión, entre otras. [15]

### **1.9.1. Ensayos mecánicos**

Los ensayos mecánicos se hacen con el fin de cumplir uno de tres objetivos principales: 1) aportar información acerca de la calidad de un material; 2) recabar información acerca de un nuevo material con fines de investigación; o 3) obtener medidas exactas de las propiedades mecánicas de materiales. [29]

Los ensayos mecánicos engloban experimentos de resiliencia, dureza, fatiga, torsión, tracción, compresión y flexión. En algunos ensayos se aplican fuerzas mecánicas tomando en consideración el tiempo; un tipo de fuerza es la periódica, la cual permite estudiar la propagación, así como la generación de defectos, otro tipo de fuerza es la constante, con la cual se observan efectos de relajación de tensión interna; en



ocasiones se utiliza la temperatura como variable experimental. Los ensayos mecánicos se utilizan para comprobar las propiedades de resistencia de los materiales y definir sus aplicaciones prácticas. Siendo las pruebas de compresión, tracción y flexión, las más fundamentales de ensayos mecánicos. [15, 30]

La correcta realización de los ensayos mecánicos permite conocer el comportamiento de los materiales ante los diferentes tipos de fuerza, es decir se analiza la relación entre las fuerzas aplicadas y las deformaciones resultantes; en adición a esto es posible verificar que los materiales cumplen con los estándares deseados o establecidos en la normativa correspondiente. [28]

### **1.9.2. Ensayos de compresión**

Los ensayos de compresión se utilizan para determinar el comportamiento de cierto material sometido a cargas aplastantes aplicadas. A través del ensayo de compresión es posible calcular varias propiedades del material y se esbozan como un diagrama de deformación por esfuerzo el cual es utilizado para determinar cualidades como la resistencia a la compresión y deformación. [30]

En un ensayo de compresión una probeta es sometida a una carga monoaxial gradualmente creciente hasta que ocurre la falla (fractura); un ensayo de compresión se logra sometiendo a un material a una carga en los extremos que produce una acción aplastante. [29]

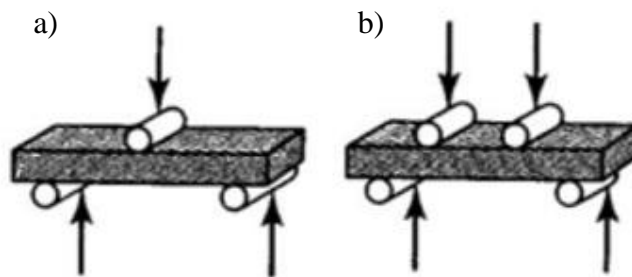
Los ensayos de compresión se realizan en máquinas universales de ensayo las cuales varían en tamaño y capacidad de fuerza, que van desde máquinas de sobremesa hasta máquinas industriales, además. Estas cuentan con un software de medición y accesorios que sirven para adaptarse al tipo de ensayo y de material. [30]

### **1.9.3. Ensayos de flexión**

Se le conoce como flexión a la deformación que sufre un material en una dirección perpendicular a su eje longitudinal. El ensayo de flexión se basa en la aplicación de una fuerza al centro de una probeta soportada en cada extremo, con el fin de determinar la resistencia del material hacia una carga estática o aplicada lentamente. [31]. Este ensayo permite determinar si un material es rígido o flexible. Existen dos tipos de ensayos de flexión en función del número de puntos de presión y del soporte de la muestra de ensayo: [32,33]

- Ensayo de flexión en 3 puntos
- Ensayo de flexión en 4 puntos

El ensayo de flexión en 3 puntos consiste en colocar la probeta a analizar apoyada sobre sus extremos, sin tensión y cargada a la mitad de su longitud y, en el caso del ensayo de flexión en 4 puntos la probeta es igualmente apoyada en sus extremos, sin tensión, pero cargada en dos puntos equidistantes en los extremos. [31]



**Fig. 1.13.** Ensayos de flexión: a) en 3 puntos. b) en 4 puntos [34]

Con los ensayos de flexión se determina la resistencia a la flexión en el caso de los materiales frágiles y el límite de fluencia en el caso de los materiales dúctiles, es decir esta clase de ensayos se realizan con el objetivo de obtener información sobre el comportamiento de flexión de un material a partir de la tensión de flexión en un eje.[27]

Al igual que los ensayos de compresión los ensayos de flexión se realizan en máquinas de ensayos universales; para ello la muestra se coloca en dos soportes y está es doblada con un punzón de prueba que aplica una fuerza creciente moviéndose hacia abajo a velocidad constante hasta que se rompe o se alcanza una deformación determinada. [32]

Los resultados obtenidos por este ensayo describen el comportamiento de un material a través de un diagrama de esfuerzo-deformación, al igual que en los ensayos de compresión.

#### **1.9.4. Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)**

Los análisis microscópicos posibilitan la obtención de registros gráficos de las estructuras más pequeñas de los materiales mediante microscopios tecnológicamente avanzados. La microscopía óptica, la microscopía electrónica, la microscopía de efecto túnel y la microscopía de fuerzas atómicas son algunos de los sistemas más habituales. [15]

La microscopía electrónica es una técnica sumamente útil para la caracterización de nanoestructuras, se basa en la utilización de una fuente de electrones de alta energía para generar imágenes; los electrones se enfocan de tal manera que generan un haz de aproximadamente 5 nm y estos golpean y penetran la superficie de la muestra provocando interacciones que resultan en la emisión de electrones y fotones de la muestra los cuales son recolectados y procesados para formar una imagen. [35]

Existen dos tipos de microscopía electrónica más utilizados: microscopía electrónica de transmisión y microscopía electrónica de barrido, la microscopía electrónica de transmisión da imágenes por medio de electrones que atraviesan la muestra. La microscopía electrónica de barrido produce imágenes con electrones, con radiaciones emitidas o reflejadas por el espécimen del mismo lado que recibe el haz electrónico, de manera que generalmente se observa una superficie de un objeto opaco al haz. [16]

La microscopía electrónica de barrido o SEM (Scanning Electron Microscopy) es la técnica más utilizada dentro de la microscopía electrónica esta proporciona información morfológica y topográfica de la superficie de la muestra; se trata de un método muy versátil en cuanto a la obtención de imágenes con excelente resolución, la fácil preparación de la muestra a analizar, entre otras razones más. [35]

La microscopía se debe realizar en un sistema de vacío de manera que permita el paso del haz de electrones a través de la columna; la interacción de este haz con la materia puede dar información sobre la composición de la muestra, topografía, cristalografía, potencial eléctrico, entre otros. [27]

El microscopio electrónico de barrido cuenta con un emisor de electrones que genera un haz de electrones dirigido por lentes electromagnéticas; el sistema de deflexión mueve el haz en forma de zigzag para hacer un barrido superficial de del material, gracias a la interacción de los electrones con la muestra se producen señales. Estas señales se recolectan por detectores y cada una brinda información específica según el tipo de señal que pueden ser rayos secundarios, rayos retro-dispersados y rayos X, principalmente. [44]

Los electrones secundarios se producen imágenes de la morfología superficial de la muestra para ello un electrón del haz pasa muy cerca del núcleo de un átomo de la muestra proporcionando la energía suficiente a uno o varios electrones más cercanos a la superficie para poder salir de la muestra. Por su parte los electrones retro-dispersados producen imágenes con diferente brillantez en función de la composición química y topografía de la superficie a través del choque frontal del electrón con el núcleo de un átomo de la muestra lo que provoca que el electrón sea repelido fuera de la muestra. Con los rayos X se obtiene información cualitativa de la composición química de la muestra. [44, 45]



## **Capítulo 2. Desarrollo experimental**

## 2.1. Materiales

### 2.1.1. Resina de poliéster

La resina poliéster empleada fue una resina de uso general con el nombre comercial de POLYLITE 32335-10 ( Figura 2.1) proporcionada por la empresa REICHHOLD QUÍMICA DE MÉXICO S.A. DE C.V. ubicada en Atlacomulco Estado de México. Es una resina poliéster no saturada disuelta en estireno, ortoftálica, de reactividad baja, viscosidad media y sin pre-acelerar. Se puede promover con cobalto para obtener un sistema de curado a temperatura ambiente mediante la adición de peróxido de metil etil cetona consultando la Tabla 2.1.



**Fig. 2.1.** Resina de poliéster

**Tabla 2.1.** Sistema recomendado para resina de poliéster basado en cobalto y peróxido.

	Mínimo (%)	Máximo (%)
Octoato de cobalto al 6%	0.1	1.0
Peróxido de Metil Etil Cetona	0.8	2.5

Se empleó octoato de cobalto al 1% como acelerador y 2% de peróxido de metil etil cetona como iniciador. Las propiedades de la resina poliéster proporcionadas por el proveedor, se muestran en la Tabla 2.2.

**Tabla 2.2.** Propiedades de la resina de poliéster

Propiedad	Valor
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	1.1 – 1.2
Viscosidad (cPs)	150 – 750
Contenido de estireno (%)	40 – 44
Resistencia a la tracción (MPa)	50 – 75
Resistencia a la flexión (MPa)	88 – 107

### 2.1.2. Cera desmoldante

Como agente desmoldante se colocó en los moldes para las probetas cera desmoldante CP-500 (Figura 2.2) de la marca Poliformas Plásticas S. A. de C. V. lote T1811C58 cuyas propiedades se muestran en la Tabla 2.3.



**Fig. 2.2.** Cera desmoldante CP-500



**Tabla 2.3.** Especificaciones Cera desmoldante CP-500

<b>Especificación</b>	<b>Valor</b>
Sólidos (%)	30
Densidad (g/mL)	0.72
Apariencia	Pasta tersa
Color	Aromático
Olor	Ligeramente amarillo

### 2.1.3. Peróxido de metil etil cetona

Se empleó como catalizador peróxido de metil etil cetona de nombre comercial K-2000 (Figura 2.3) distribuido por la empresa Poliformas Plásticas, S. A. de C. V. lote 15121F2503 cuya composición se muestran en la Tabla 2.4.



**Fig. 2.3.** Peróxido de metil etil cetona K-2000

**Tabla 2.4.** Composición del Peróxido de Metil Etil Cetona K – 2000

Componentes	Concentración
Peróxido de Metil Etil Cetona	32 – 35
2,2,4-Trimetilpentanodiol-1,3-diisobutirato	15 – 20
Peróxido de hidrógeno	5 – 7
Ftalato de dimetilo	45 – 50

#### 2.1.4. Mármol

El mármol triturado fue donado por la compañía Minerales GOSA S.A., localizada en Atizapán de Zaragoza, México. El tamaño de particular del mármol fue de 1.4 mm (malla 14) como se muestra en la Figura 2.4.



**Fig. 2.4.** Partículas de mármol.

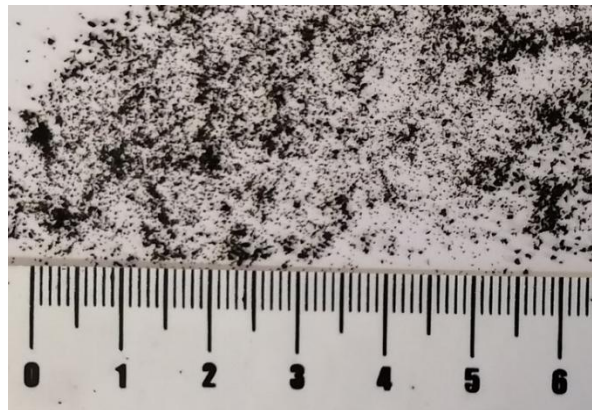
El mármol está compuesto de 90% de calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), y 10% de dolomita [ $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ]. Sus propiedades se muestran en la Tabla 2.5.

**Tabla 2.5.** Propiedades del mármol.

Propiedad	Valor
Densidad, g/cm <sup>3</sup>	2.38 - 2.87
Dureza Mohs	3 - 4
Resistencia a la compresión, MPa	58 - 98
Resistencia a la tensión, MPa	10 - 35

### 2.1.5. Partículas de llantas recicladas

Se utilizaron partículas de llantas recicladas, de tamaño de 0.85 mm (malla 20); cuya composición y propiedades se muestran en la en la Tabla 2.6, las cuales fueron proporcionadas por el proveedor.



**Fig. 2.5.** Partículas de llanta

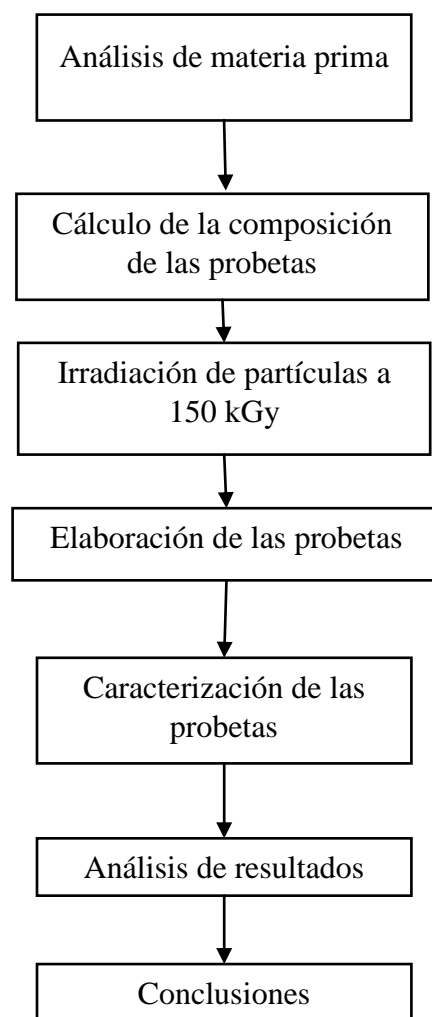
**Tabla 2.6.** Composición y propiedades de las partículas de llantas recicladas.

Componentes	Concentración (%)	Resistencia a la tensión (MPa)	Gravedad específica	Elongación (%)
Hule estireno-butadieno	40	24	0.94	600
Hule natural	30	31	0.92	650

Hule butadieno	20	20	0.91	650
Hule butílico	10	20	0.92	850

## 2.2. Metodología

En la Figura 2.6 se muestra el diagrama de las actividades realizadas durante la experimentación:



**Fig. 2.6.** Actividades realizadas durante la experimentación.

### **2.2.1. Análisis de materia prima**

Dado que la resina que se utilizó estuvo almacenada durante un tiempo considerable, se tuvieron que determinar el tiempo y temperatura de gelación de la resina, así como el tiempo máximo y el perfil de exotermia, con el fin de conocer las condiciones en que se encontraba para su manipulación. Se realizó la determinación de estos parámetros para dos mezclas: 1) 100% resina de poliéster y 2) 70% mármol y 30% resina de poliéster.

1) Se tomaron 100 g de resina y se catalizó con 1.5 g de peróxido de metil etil cetona; tras incorporar el catalizador a la resina, mediante mezclado manual, se tomó la temperatura de esta y se fueron registrando gradualmente las temperaturas que alcanzaba y el tiempo que tardaba en hacerlo hasta que no presentara cambios de temperatura.

2) Para la mezcla de 30% resina y 70% partículas de mármol, primero se pesaron 30 g de resina y 70 g de partículas de mármol; se mezclaron manualmente ambas sustancias y una vez incorporadas se añadieron 0.45 g de catalizador (peróxido de metil etil cetona). Tras incorporar el catalizador se realizó el mismo procedimiento de toma y registro de tiempos y temperatura.

### **2.2.2. Cálculo de la composición de las probetas**

Se elaboraron por duplicado lotes con seis probetas de cuatro tipos, identificadas conforme a la Tabla 2.7; en el primer experimento se les añadieron a las probetas partículas de llanta sin irradiar y en el segundo partículas irradiadas a 150 kGy. Cada probeta tuvo 30% en peso de resina de poliéster y 70% de partículas de mármol. Se sustituyó parcialmente el porcentaje de mármol con partículas de llanta reciclada irradiada y sin irradiar en 0.6%, 0.9% y 1.2% respectivamente.

Conforme a los datos de densidad de la resina de poliéster (1.1 g/cm<sup>3</sup>), del mármol (2.6 g/cm<sup>3</sup>), y de las partículas de llanta (0.92 g/cm<sup>3</sup>), se calcularon las cantidades en gramos de cada componente, mostradas en la Tabla 2.7.

**Tabla 2.7.** Composición de las probetas.

Probetas	Resina de poliéster (%)	Mármol (%)	Partículas de llantas (%)	Resina de poliéster (g)	Mármol (g)	Partículas de llantas (g)
R/M	30.0	70.0	0.0	84.48	465.92	0.0
R/M-6F	30.0	69.4	0.6	84.48	461.92	1.42
R/M-9F	30.0	69.1	0.9	84.48	459.92	2.13
R/M-12F	30.0	68.8	1.2	84.48	457.93	2.84

### 2.2.3. Irradiación de probetas

Las partículas de llanta se sometieron a 150 kGy a la tasa de dosis en la que se encontraba el irradiador, es decir de 3.5 kGy/h. La irradiación se realizó en aire a temperatura ambiente, en un irradiador Transelektro LGI-01 provisto de una fuente de <sup>60</sup>Co fabricada por IZOTOP Institute of Isotopes Co. Ltd., Budapest, Hungría, y ubicado en el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares de México (ININ).

### 2.2.4. Elaboración de probetas

Se elaboraron lotes de probetas con contenido de partículas de llanta diferentes clasificadas de acuerdo con si contenían partículas de llanta irradiada o no irradiada y subclasificadas según el porcentaje de partículas que contenían (Tabla 2.8).

**Tabla 2.8.** Clasificación de las probetas

Clasificación	Subclasificación	Lote	No. de
---------------	------------------	------	--------

			<b>probetas</b>
<b>R/M</b>	-	A	6
<b>R/M-p</b>	R/M-6F	B	6
	R/M-9F	C	6
	R/M-12F	D	6
<b>R/M-i</b>	-	E	6
<b>R/M-p-i</b>	R/M-6F	F	6
	R/M-9F	G	6
	R/M-12F	H	6

Para su elaboración, primeramente, se secó el mármol y las partículas de llanta en un horno a 60°C por tres horas para eliminar la humedad que estos pudieran contener. Una vez determinadas la masa en gramos de cada componente se pesaron las cantidades de cada uno por lote.

En el caso de las probetas control (R/M y R/M-i) se le añadieron las partículas de mármol a la resina de poliéster, posteriormente se mezclaron manualmente hasta impregnar totalmente las partículas de mármol con la resina. Se dejó reposar la mezcla con el fin de liberar las burbujas de aire que esta pudiera contener; se añadió el catalizador, se mezcló y se dejó reposar, posteriormente poco antes de su tiempo de gelación se vació en moldes con espacio para tres probetas prismáticas (4x4x16 cm). Finalmente se procedió al curado de las probetas, que se llevó a cabo durante 24 horas a 25°C.



**Fig. 2.7.** Molde para probetas

Para las probetas con porcentaje de partículas de llanta (R/M-p y R/M-p-i) primeramente se mezclaron las partículas de llantas y la resina de poliéster. Se dejó de mezclar hasta observar la distribución uniforme de las partículas de llanta en la resina. A esta mezcla se le añadieron las partículas de mármol, hasta que estas se incorporaran totalmente. Se dejó reposar la mezcla para liberar las burbujas de aire y añadir el catalizador. Se mezcló nuevamente hasta obtener una pasta homogénea, la cual a continuación, poco antes de su tiempo de gelación, se vació en moldes con espacio para tres probetas prismáticas (4x4x16 cm). Finalmente se procedió al curado de las probetas, que se llevó a cabo durante 24 horas a 25°C.

Se elaboraron 12 probetas para cada porcentaje de llanta; 6 de ellas con partículas que no fueron irradiadas y las otras 6 probetas con partículas que se irradiaron a 150 kGy. Es decir, se produjeron 44 probetas.



**Fig. 2.8.** Probetas con partículas de llanta (R/M-p) lote D



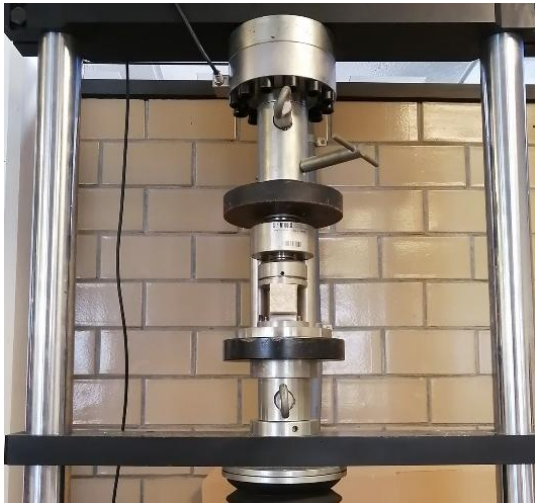
**Fig. 2.9.** Probetas control (R/M) lote A



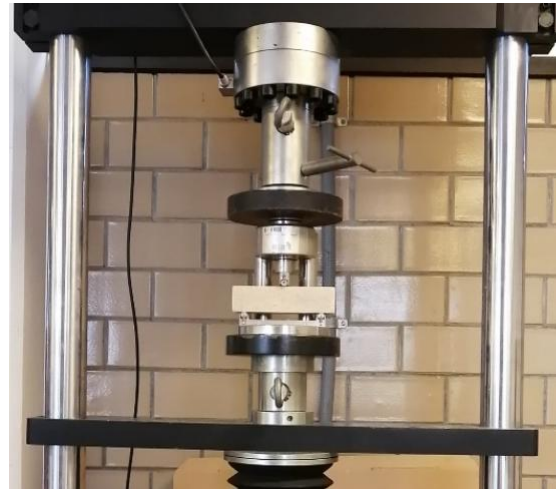
### 2.2.5. Caracterización

La caracterización de las muestras se llevó a cabo mediante microscopía electrónica de barrido y ensayos mecánicos de resistencia a la compresión y a la flexión:

Se evaluaron la resistencia mecánica a la compresión y a la flexión de las probetas en una máquina de pruebas universal modelo 70-S17C2 (Controls™, Cernusco, Italia), figura 2.12, colocando los aditamentos necesarios para cada una de las pruebas como se muestra en las figuras 2.10 y 2.11. Además, se llevó a cabo la prueba de flexión de tres puntos con una distancia entre los soportes de 10 cm. La máquina universal se encuentra en el Laboratorio de Investigación y Desarrollo de Materiales Avanzados (LIDMA), de la Facultad de Química Campus Rosedal, de la Universidad Autónoma del Estado de México. Las condiciones de ambas pruebas se resumen en la Tabla 2.9.



**Fig. 2.10.** Ensayo de compresión.



**Fig. 2.11.** Ensayo de flexión en 3 puntos.

### 2.2.5.1. Ensayos mecánicos de resistencia a la flexión y a la compresión



Fig. 2.12. Máquina de pruebas universal modelo 70-S17C2

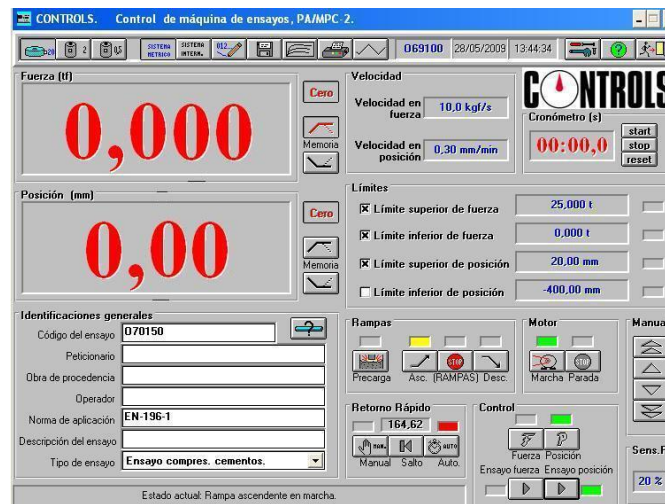


Fig. 2.13. Software de la máquina de pruebas universal modelo 70-S17C2

Tabla 2.9. Condiciones de los ensayos mecánicos.

<b>Condiciones</b>	<b>Resistencia a la compresión</b>	<b>Resistencia a la flexión</b>
Velocidad (mm/min)	1.25	1.00
Límite superior de fuerza (ton)	25.00	10.00
Límite superior de posición (mm)	4.50	4.50

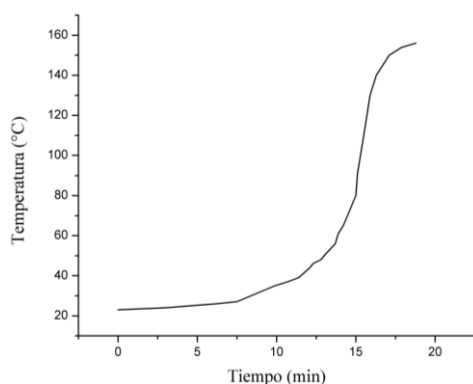
### **2.2.5.2. Morfología de las partículas de llanta**

Las partículas de llanta reciclada fueron observadas en un microscopio electrónico de barrido marca JEOL modelo JSM-6510LV, en el modo de electrones secundarios a 20 keV. El microscopio se encuentra en el Centro Conjunto de Investigación en Química Sustentable UAEM-UNAM (CCIQS).

## **Capítulo 3. Análisis de resultados**

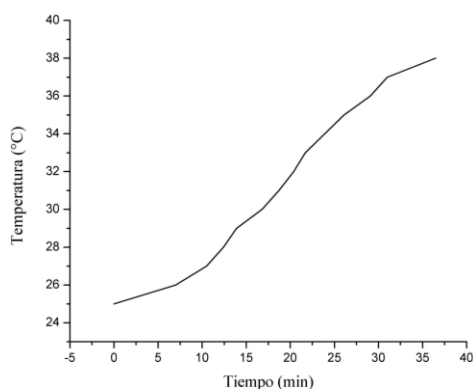
### 3.1. Resultados del análisis de la materia prima

Se determinó el perfil de exotermia de la resina de poliéster mostrado en la Figura 3.1 obteniendo una temperatura máxima de exotermia de 156 °C; se obtuvo un tiempo de gelación de 8.63 minutos con una temperatura de gel de 31 °C.



**Fig. 3.1.** Perfil de exotermia de la resina de poliéster.

De igual forma se determinó el perfil de exotermia de la mezcla 30% resina de poliéster y 70% partículas de mármol (Figura 3.2) obteniendo una temperatura máxima de exotermia de 38 °C; se obtuvo un tiempo de gelación de 13.9 minutos con una temperatura de gel de 29 °C.

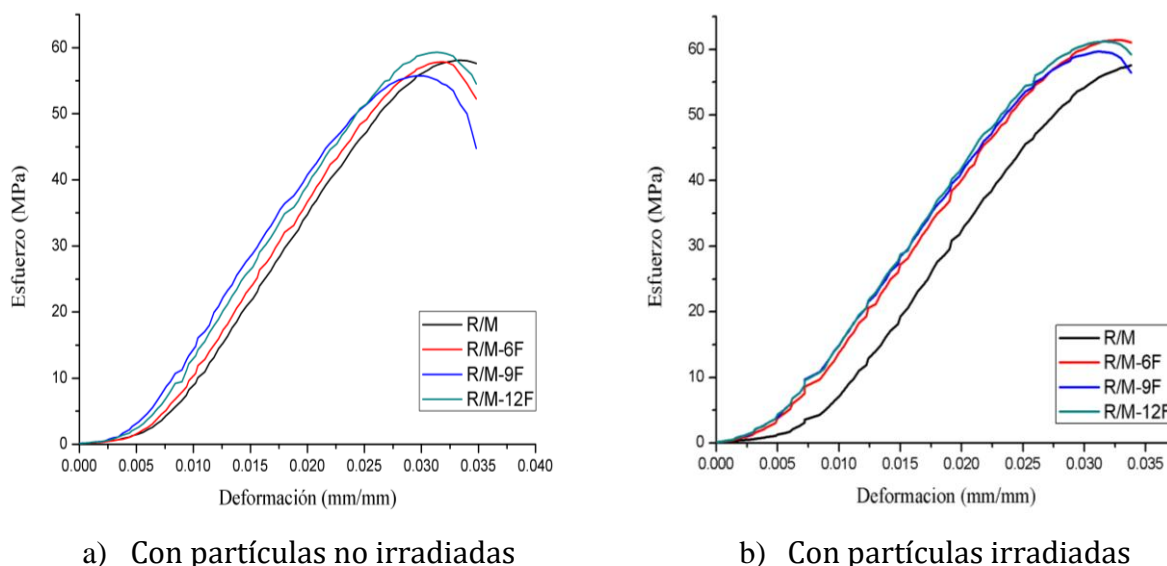


**Fig. 3.2.** Perfil de exotermia mezcla resina de poliéster-mármol

## 3.2. Resultados de la prueba de compresión

### 3.2.1. Curvas de Esfuerzo vs. Deformación en compresión

A partir de los datos obtenidos en los ensayos mecánicos se desarrollaron las curvas de esfuerzo-deformación de cada tipo de concreto polimérico, en la figura 3.3 se muestran cada una de estas curvas.



**Fig. 3.3.** Esfuerzo vs. Deformación en compresión de probetas.

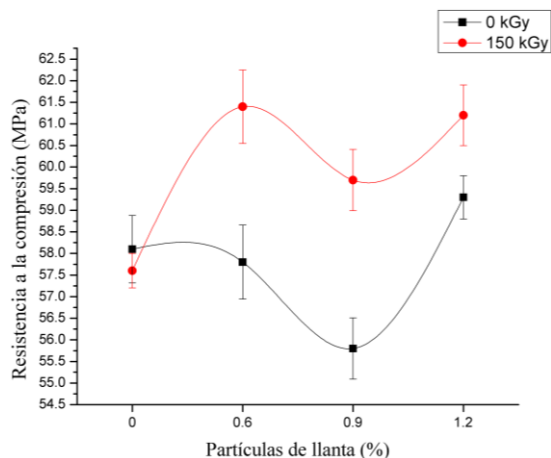
La curva esfuerzo-deformación de cada tipo de probeta presenta un comportamiento similar, es decir la deformación aumenta conforme se incrementa el esfuerzo. Se observa que las probetas con partículas de llantas (R/M-6F, R/M-9F y R/M-12F), correspondientes al 0.6, 0.9, 1.2%, tienen mayores valores de resistencia que las probetas sin partículas de llanta (R/M). Las probetas con partículas no irradiadas presentan los mayores valores cuando se agrega 1.2% de partículas; mientras que aquellas con partículas irradiadas con 0.6% de partículas.

### 3.2.2. Resistencia a la compresión

### 3.2.3. Resistencia a la compresión

La figura 3.4 muestra los datos de resistencia a la compresión de los diferentes tipos de probetas, es decir de las probetas: I) sin partículas de llanta denominadas probetas control para el experimento 1 (partículas sin irradiar), nombradas como (R/M); II) sin partículas de llanta denominadas control para el experimento 2 (partículas irradiadas), (R/M-i); III) con partículas de llanta y no irradiadas (R/M-p), y IV) con partículas de llanta irradiadas (R/M-p-i).

I) Respecto a las probetas sin partículas de llanta (R/M); se obtuvo la resistencia a la compresión promedio de 58.1 MPa; II) la cual disminuyó a 57.6 MPa para las probetas control de las probetas con partículas irradiadas (R/M-i). Sin embargo, esta diferencia no es significativa, como se muestra en la figura 3.4 y en la tabla 3.1.



**Fig. 3.4.** Resistencia a la compresión de las probetas con partículas de llanta.

III) Las probetas con partículas de llanta y no irradiadas (R/M-p) disminuyeron los valores de resistencia a la compresión en comparación a la probeta sin partículas de llanta (R/M) a 57.8 MPa cuando se agregaron 0.6% de partículas de llanta y a 55.8 MPa para 0.9% de partículas de llanta; esto indica que el añadir partículas de llanta a

estas concentraciones disminuyen mínimamente la resistencia a la compresión, esto se debe a que a bajas concentraciones de partículas existe baja adherencia entre estas y la matriz. En el caso del 1.2% de partículas se incrementó la resistencia a 59.2 MPa. Es decir, mayor concentración de partículas de llanta produce mayor resistencia, esto es gracias a que aumentar la concentración de las partículas de llanta permite que exista mayor superficie de contacto entre estas y la matriz y por lo tanto mayor adherencia. Sin embargo, en este caso únicamente la resistencia a la compresión que presentó la probeta con 0.9% de partículas de llanta es significativamente diferente a la resistencia de la probeta control (R/M) (Tabla 3.1, Figura 3.4)

IV) Un comportamiento diferente ocurre para probetas con partículas de llanta e irradiadas (R/M-p-i), ya que se tienen mayores valores que las probetas sin partículas. Valores que van de 59.6 a 61.4 MPa, es decir una diferencia mínima de 2 MPa; obteniéndose el mayor valor cuando se agregan 0.6% de partículas de llanta. Dicho valor es 5.8% mayor que las probetas sin partículas (R/M). Estos incrementos se deben a que los rayos gamma provocan degradación en las partículas a partir del rompimiento de las cadenas poliméricas lo que físicamente se aprecia en una superficie más rugosa que favorece mayor adherencia y por consecuencia mayor resistencia a la compresión. En la Tabla 3.1 se muestran los valores de resistencia a la compresión con sus respectivas incertidumbres.

**Tabla 3.1** Resistencias a la compresión promedio de acuerdo con el tipo de probeta

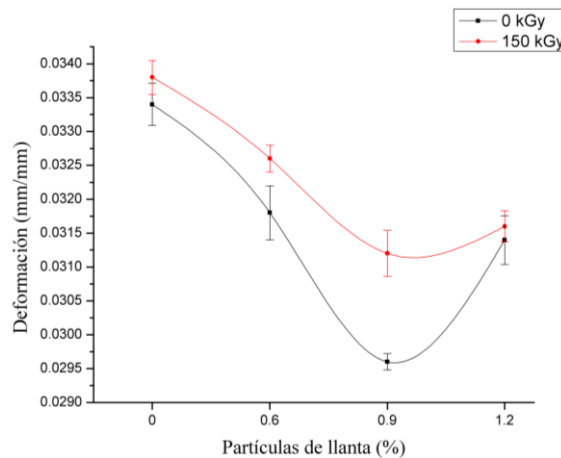
Partículas de llanta (%)	Resistencia a la compresión (MPa)	
	0 kGy	150 kGy
0	58.1±0.78 <sup>Aa</sup>	57.6±0.40 <sup>Aa</sup>
0.6	57.8±0.86 <sup>A</sup>	61.4±0.85 <sup>B</sup>
0.9	55.8±0.71 <sup>B</sup>	59.7±0.71 <sup>C</sup>
1.2	59.3±0.50 <sup>A</sup>	61.2±0.70 <sup>B</sup>



\*Los valores en columna que cuentan con la misma letra mayúscula no presentan diferencia significativa ( $p < 0.05$ ); los valores en fila que cuentan con la misma letra minúscula no presentan diferencia significativa ( $p < 0.05$ )

### 3.2.4. Deformación en compresión

En la figura 3.4 se muestra la deformación en el punto máximo de esfuerzo (mm/mm), para los diferentes tipos de probetas. En el caso de I) probetas sin partículas de llanta (R/M), el valor fue de 0.0333 mm/mm; el cual es ligeramente menor que el obtenido II) con las probetas sin partículas del experimento 2, es decir de 0.0336 mm/mm (R/M-i), lo que de acuerdo con la estadística no es significativamente diferente.



**Fig. 3.4.** Deformación en compresión de las probetas con partículas de llanta.

III) Para probetas con partículas de llanta sin irradiar (R/M-p), el grado de deformación disminuye a medida que aumenta el porcentaje de partículas de llanta de 0.6% a 0.9%. En este último porcentaje de partículas, el valor fue de 0.0296 mm; es decir la deformación disminuyó 11.4% respecto a las probetas sin partículas de llanta. Por otro lado, para el porcentaje de llantas de 1.2% la deformación aumenta teniendo un valor de 0.0314 mm siendo 6% menor que la deformación que presenta la probeta sin partículas. La incorporación de las partículas de llanta al concreto polimérico genera que este sea más dúctil.

IV) Para las probetas con partículas de llanta e irradiadas (R/M-p-i), presenta un comportamiento similar al de las probetas con partículas sin irradiar, pero sus valores son mayores; es decir producen un material más rígido gracias al aumento en la adherencia que la irradiación favorece. El valor mínimo, 0.0312 mm/mm se logró con 0.9% de partículas. El cual es 5.4% mayor que el obtenido para probetas con partículas sin irradiar. En la Tabla 3.2 se muestran los valores de la deformación en compresión con sus respectivas incertidumbres.

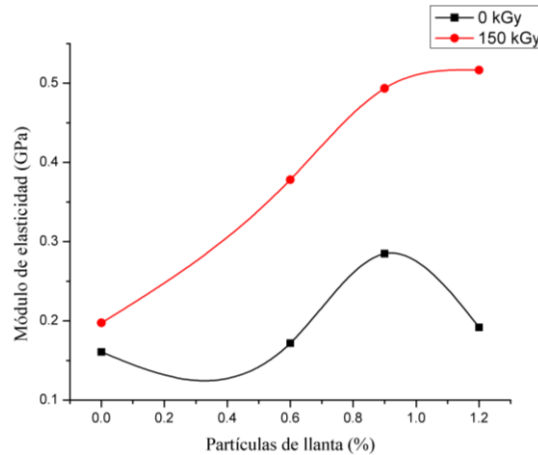
**Tabla 3.2** Deformación en compresión promedio de acuerdo con el tipo de probeta

Partículas de llanta (%)	Deformación (mm/mm)	
	0 kGy	150 kGy
0	0.0334±3.1x10 <sup>-4</sup> Aa	0.0338±2.5x10 <sup>-4</sup> Aa
0.6	0.0318±4x10 <sup>-4</sup> B	0.0326±2x10 <sup>-4</sup> B
0.9	0.0296±1.2x10 <sup>-4</sup> C	0.0312±3.4x10 <sup>-4</sup> C
1.2	0.0314±3.6x10 <sup>-4</sup> Cb	0.0316±2.3x10 <sup>-4</sup> Bb

\*Los valores en columna que cuentan con la misma letra mayúscula no presentan diferencia significativa ( $p < 0.05$ ); los valores en fila que cuentan con la misma letra minúscula no presentan diferencia significativa ( $p < 0.05$ )

### 3.2.5. Módulo de elasticidad en compresión

Los valores de los módulos de elasticidad se calcularon de las pendientes de las curvas Esfuerzo vs. Deformación, y son mostrados en la figura 3.3. I) Para probetas sin partículas (R/M), el valor fue de 0.16 GPa, mientras que II) las probetas sin partículas (R/M-i), tuvieron un valor de 0.19 GPa.



**Fig. 3.5.** Módulo de elasticidad en compresión de las probetas con partículas de llantas.

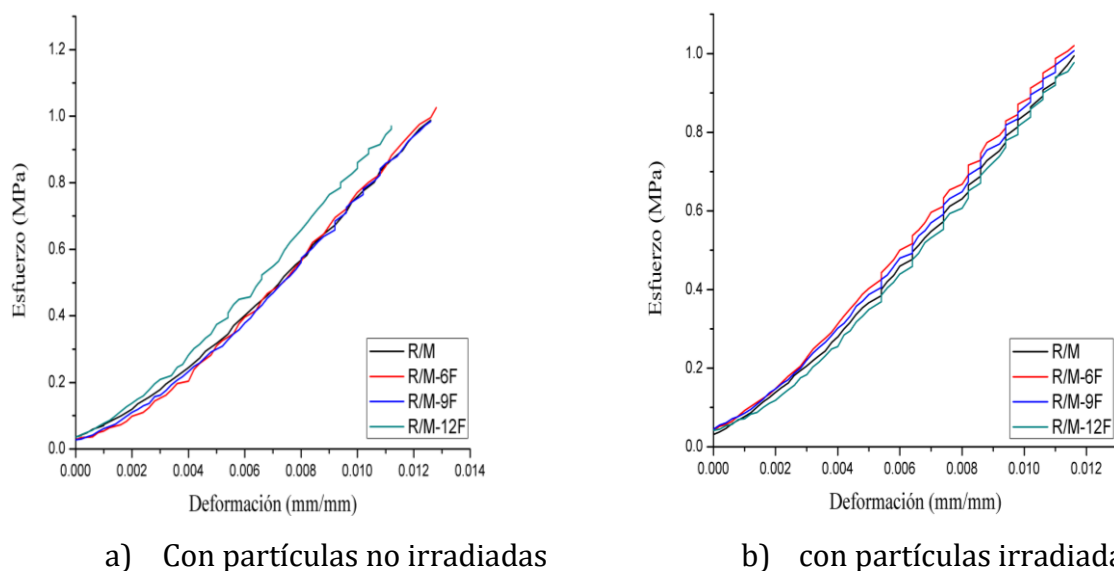
En el caso de III) las probetas con partículas de llanta y no irradiadas (R/M-p), se incrementó el módulo de elasticidad para los porcentajes de 0.6% y 0.9% y decrece en el caso del 1.2% de partículas de llanta, pero sin ser menor al módulo de la probeta sin partículas; en este caso el módulo más alto con un valor de 0.28 GPa se presenta con el 0.9% de partículas de llanta teniendo un incremento del 75% con respecto a la probeta sin partículas y no irradiadas (R/M).

Mientras que IV) las probetas con partículas de llanta e irradiadas (R/M-p-i), muestran que a medida que aumenta el porcentaje de partículas de llanta, el módulo de elasticidad aumenta; siendo la probeta con 1.2% de partículas la que presenta el mayor módulo de elasticidad con 0.51 GPa. Esto significa un incremento del 168%, respecto a las probetas sin partículas. Para ambos casos la adición de partículas incrementa el módulo de elasticidad, pero aquellas que fueron irradiadas denotan superioridad siendo por lo tanto más rígidas y resistentes.

### 3.3. Resultados de la prueba de flexión

#### 3.3.1. Curvas Esfuerzo vs. Deformación en flexión

En la figura 3.6 se muestran las curvas de Esfuerzo-Deformación obtenidas de la prueba de flexión aplicada a cada tipo de concreto polimérico.



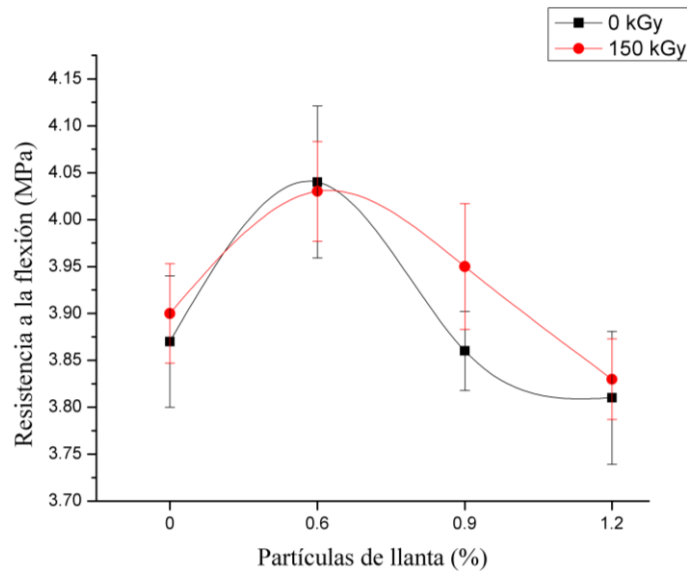
**Fig. 3.6.** Esfuerzo vs. Deformación en flexión de las probetas.

La curva esfuerzo-deformación de cada tipo de probeta presenta un comportamiento similar, es decir la deformación aumenta conforme se incrementa el esfuerzo. Se observa que las probetas con partículas de llantas tienen mayores valores que aquellas sin partículas de llanta.

#### 3.3.2. Resistencia a la flexión

Los valores de la resistencia a la flexión de las probetas son mostrados en la figura 3.7. I) las probetas sin partículas de llanta (R/M) tienen un valor de 3.87 MPa. II) las probetas sin partículas irradiadas (R/M-i) presentaron un ligero aumento en el valor

de resistencia a la flexión, siendo de 3.9 MPa los cuales no son significativamente diferentes. Cabe recordar que se evaluaron 6 probetas para cada concentración de partículas de llanta.



**Fig. 3.7.** Resistencia a la flexión de las probetas.

III) Referente a las probetas con partículas de llanta y no irradiadas (R/M-p), únicamente el porcentaje de 0.6% supera el valor de la resistencia a la flexión de las probetas sin partículas, presenta un valor de 4.02 MPa; para los otros contenidos de partículas (0.9% y 1.2%), los valores disminuyen notablemente. Lo que da a entender que bajas concentraciones de partículas de llanta favorecen la resistencia a la flexión, pero a medida que esta se incrementa la resistencia disminuye. El agregar 0.6% de partículas produce un material con mayor resistencia a la flexión con un incremento del 3.8%. Las partículas actúan como material de refuerzo de la resina. Además de que únicamente la probeta con 0.6 % de partículas de llanta presenta una diferencia significativa con respecto a la probeta sin partículas de llana.

IV) Las probetas con 0.6% y 0.9% de partículas de llanta e irradiadas (R/M-p-i), presenta un valor de 4 MPa y 3.95 MPa, respectivamente; los cuales son mayores que

los de probetas con partículas no irradiadas, sin embargo, al igual que en el caso III el mayor valor de resistencia se obtiene con 0,6% de partículas de llanta.

Esta propiedad no se ve significativamente afectada por la radiación de las partículas de llanta, sin embargo, sí se ve una mejoría tras la incorporación del 0.6% de partículas en ambos casos (partículas sin irradiar y partículas irradiadas). En la Tabla 3.3 se muestran los valores de resistencia a la flexión con sus respectivas incertidumbres.

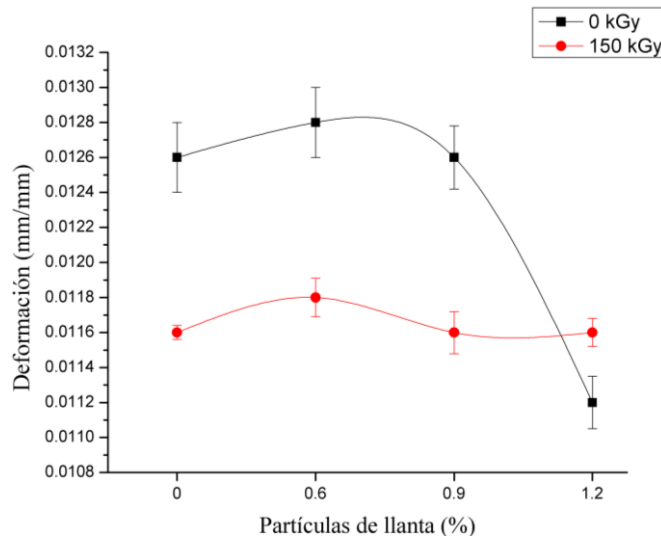
**Tabla 3.3.** Resistencia a la flexión promedio de acuerdo con el tipo de probeta

Partículas de llanta (%)	Resistencia a la flexión (MPa)	
	0 kGy	150 kGy
0	3.87±0.07 <sup>Aa</sup>	3.90±0.05 <sup>Aa</sup>
0.6	4.04±0.08 <sup>Bb</sup>	4.03±0.05 <sup>Bb</sup>
0.9	3.86±0.04 <sup>Ac</sup>	3.95±0.06 <sup>Ac</sup>
1.2	3.81±0.07 <sup>Ad</sup>	3.83±0.04 <sup>Ad</sup>

\*Los valores en columna que cuentan con la misma letra mayúscula no presentan diferencia significativa ( $p < 0.05$ ); los valores en fila que cuentan con la misma letra minúscula no presentan diferencia significativa ( $p < 0.05$ )

### 3.3.3. Deformación en flexión

En la figura 3.8 se muestran los valores de deformación en flexión en el punto máximo de esfuerzo para los distintos tipos de probetas. I) El valor para probetas sin partículas de llanta (R/M), es de 0.0126 mm/mm; II) pero en el caso de las segundas probetas control (R/M-i) disminuyó hasta 0.0116 mm, es decir 7.9% menos.



**Fig. 3.8.** Deformación en flexión de las probetas.

III) En el caso de las probetas con partículas y no irradiadas (R/M-p), los valores de deformación son casi constantes para 0.6 y 0.9% (0.0126-0.0128 mm/mm), sin embargo, para 1.2% de partículas, la deformación disminuye considerablemente hasta un valor de 0.0112 mm/mm, lo que significa una disminución del 11.1%. El agregar partículas de llanta permite mantener los valores de resistencia a la flexión, es decir las partículas de llanta a baja concentración no provocan cambios considerables en la resistencia a la flexión.

IV) Por su parte las probetas con partículas e irradiadas (R/M-p-i), presentan valores menores que los de las probetas con partículas no irradiadas. Sin embargo, los valores son muy similares para los tres contenidos de partículas (0.6, 0.9 y 1.2%), variando entre 0.0116 y 0.0118 mm/mm. Esto permite concluir que la deformación en flexión es casi constante, independientemente de la concentración de partículas agregadas. En la Tabla 3.4 se muestran los valores de deformación en flexión con sus respectivas incertidumbres.

**Tabla 3.4.** Deformación en flexión promedio de acuerdo con el tipo de probeta

Partículas de llanta (%)	Deformación (mm/mm)	
	0 kGy	150 kGy
0	$0.0126 \pm 2 \times 10^{-4} \text{ A}$	$0.0116 \pm 4 \times 10^{-5} \text{ A}$
0.6	$0.0128 \pm 2 \times 10^{-4} \text{ A}$	$0.0118 \pm 1.1 \times 10^{-4} \text{ A}$
0.9	$0.0126 \pm 1.8 \times 10^{-4} \text{ A}$	$0.0116 \pm 1.2 \times 10^{-4} \text{ A}$
1.2	$0.0112 \pm 1.5 \times 10^{-4} \text{ B}$	$0.0116 \pm 8 \times 10^{-5} \text{ A}$

\*Los valores en columna que cuentan con la misma letra mayúscula no presentan diferencia significativa ( $p < 0.05$ ).

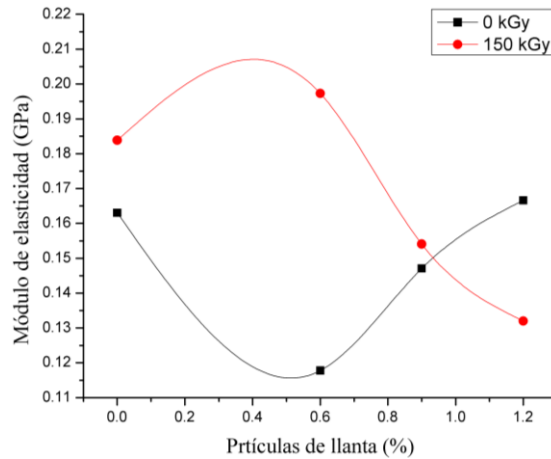
### 3.3.4. Módulo de elasticidad en flexión

Los valores de los módulos de elasticidad se calcularon de las pendientes de las curvas Esfuerzo vs. Deformación, mostradas en la Figura 3.9.

I) Para probetas sin partículas (R/M), el valor fue de 0.163 GPa, mientras que II) las probetas sin partículas (R/M-i), tuvieron un valor de 0.183 GPa.

En el caso de III) las probetas con partículas y no irradiadas (R/M-p), se muestra un incremento del 1.8% en el módulo de elasticidad con respecto a la probeta sin partículas y sin irradiar cuando se agrega 1.2% de partículas con un valor de 0.166 GPa, sin embargo para concentraciones de partículas menores (0.6% y 0.9%) el módulo disminuye hasta un 28.2%; mientras que IV) las probetas con partículas e irradiadas (R/M-p-i), muestran un incremento en el módulo cuando se agrega 0.6% de partículas; pero a mayores concentraciones los valores disminuyen, hasta tener 0.131 GPa cuando se agrega 1.2% de partículas.

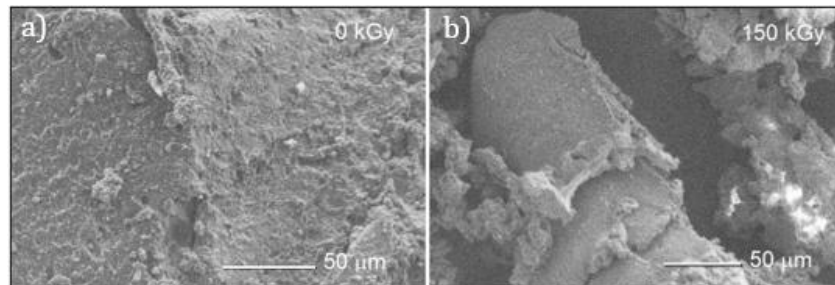




**Fig. 3.9.** Módulo de elasticidad en flexión de las probetas con partículas de llanta.

### 3.4. Morfología de las partículas de llanta

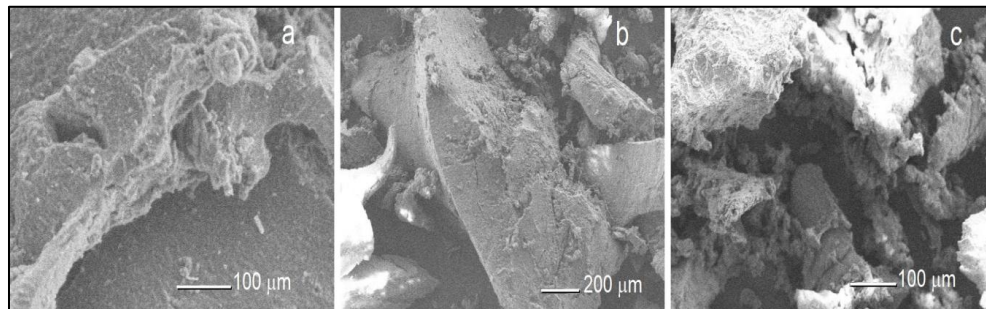
Los efectos producidos en las partículas de llanta por la exposición a la radiación se pueden observar a partir de las imágenes obtenidas de la microscopía electrónica de barrido (figura 3.10); en el caso de las partículas sin irradiar se puede observar una superficie más unificada con cierto grado de rugosidad mientras que en las partículas irradiadas a 150 kGy se puede apreciar cierto grado de degradación generado por la radiación, muestran una superficie más rugosa y con agrietamiento así como partículas dispersas, esto se debe a que la energía ionizante favorece la formación de radicales libres que permiten la ruptura y reticulación de las cadenas poliméricas.



**Fig. 3.10.** Morfología de las partículas de llanta a) no irradiadas, y b) irradiadas

### 3.4.1. Morfología de las superficies fracturadas de los concretos

La morfología de la zona de fractura de las probetas después de los ensayos mecánicos se muestra en la figura 3.11. Se aprecian diferencias significativas en los concretos sin partículas y con partículas no irradiadas e irradiadas. En el caso de probetas sin partículas (a) se observa una superficie más lisa, lo que se puede interpretar como un material más frágil, tal como se muestra en la curva de esfuerzo-deformación con un punto de fractura más bajo. Sin embargo, las probetas con partículas de llanta muestran una superficie más rugosa; siendo significativamente mayor la rugosidad en probetas con partículas irradiadas (c). Debido a esta mayor rugosidad producida por los rayos gamma, es posible incrementar un poco el grado de adherencia entre las partículas y la matriz del concreto polimérico, favoreciendo la resistencia a la compresión, principalmente.



**Fig. 3.11.** Morfología de la zona de fractura de probetas: sin llanta (a), con llanta sin irradiar (b), y con llanta irradiada (c).

## **Capítulo 4. Conclusiones**

Con base en los resultados obtenidos de los ensayos mecánicos se puede concluir que:

La utilización de materiales de desecho como las partículas de llanta en conjunto con la radiación gamma en una opción favorable para la elaboración de concreto polimérico con propiedades mecánicas mejoradas; además de ser una propuesta ecológica para el aprovechamiento de llantas de desecho, cuya vida útil se considera terminada.

En el caso de concretos sometidos a la prueba de compresión, con la adición de partículas de llanta y la aplicación de dosis de 150 kGy, se logró el aumento del 168% en el módulo de elasticidad cuando se agregó 1.2% de partículas y de 5.8% en la resistencia al agregar 0.6% de partículas. Sin embargo, hubo disminución en la deformación de 11.4%, cuando se agregó 0.9% de partículas. Mientras que los resultados de las pruebas de flexión mostraron aumento del 25% en el módulo de elasticidad al agregar 0.6% de partículas y del 2.5% en la resistencia cuando se agregó 0.6% de partículas. Pero 8.6% de disminución en la deformación al agregar 0.9% de partículas.

La combinación de ambos parámetros, la concentración de partículas de llanta y la dosis de radiación, permiten obtener concretos poliméricos con mayores módulos de elasticidad, con ligero aumento en la resistencia, así como ligera disminución de la deformación, es decir se obtiene un material más rígido y resistente.

## Referencias

- [1] Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (2017). Residuos Sólidos Urbanos (RSU). Recuperado el 10 de febrero de 2022.  
<https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/residuos-solidos-urbanos-rsu>
- [2] Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (2017). Residuos Sólidos Urbanos y de Manejo Especial. Recuperado el 10 de febrero de 2022.  
<https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/residuos-solidos-urbanos-y-de-manejo-especial>
- [3] Taboada-González, P., Aguilar-Virgen, Q., Cruz-Sotelo, S.E., Ramírez-Barreto, M.E. (2013). Manejo y potencial de recuperación de residuos sólidos en una comunidad rural de México. *Revista Internacional De Contaminación Ambiental*, 29: 43-48.  
<https://www.revistascca.unam.mx/rica/index.php/rica/article/view/43517>
- [4] SEMARNAT (2020). Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos. Recuperado el 01 de marzo de 2022.  
<https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/554385/DBGIR-15-mayo-2020.pdf>
- [5] Aquilias, D. (2012). Material Recycling: Trends and Perspectives. Dimitris Achilias, Ed. InTech. Cap. 8, 195-212.  
<https://doi.org/10.5772/2003>
- [6] Landi, D., Marconi, M., Meo, I., Germani, M. (2018). Reuse scenarios of tires textile fibers: an environmental evaluation. *ELSEVIER* 21: 329-336.

- [7] Fazli, A., Rodrigue, D. (2020). Recycling Waste Tires into Ground Tire Rubber (GTR)/Rubber Compounds. *Journal of Composites Science* 4 (3): 103.  
<https://doi.org/10.3390/jcs4030103>
- [8] Derakhshan, Z., Gheneian, M.T., Mahvi, H.A., Conti, O.G., Faramarzian, M., Dehghani, M., Ferrante, M. (2017). A new recycling technique for the waste tires reuse. *Environmental Research* 158: 462-469.  
<https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.07.003>
- [9] García C., López E., Muñoz A., Peñas P. (2019). Resina de poliéster. *Ingenia Materiales*, 2: 54-57.  
[http://polired.upm.es/index.php/ingenia\\_materiales/article/viewFile/3942/4039](http://polired.upm.es/index.php/ingenia_materiales/article/viewFile/3942/4039)
- [10] Ramis Juan, X. Estudio de la eficiencia de sistemas químicos del curado de resinas de poliéster insaturado. [Tesis doctoral, UPC, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, 1994] ISBN 846902339X.  
<http://hdl.handle.net/2117/93997>
- [11] Caballero, B. (2019). Concretos Polimérico Modificado con partículas recicladas de PET, policarbonato y llanta. [Tesis de licenciatura] Universidad Autónoma del Estado de México.
- [12] Muyón, E.L., Jácome, I.D. (2020). Análisis comparativo de las propiedades físico-mecánicas entre el hormigón tradicional y el hormigón con inclusión de residuos de mármol. [Tesis, Universidad Central de Ecuador]. Repositorio digital de la Universidad Central de Ecuador.  
<http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/20811/1/T-UCE-0011-ICF-243.pdf>
- [13] Baca, N. (2019). Estudio comparativo de las propiedades físico-mecánicas del mortero de cemento Portland tipo IP elaborado con residuos de mármol en

porcentajes del 10%, 15% y 20% producto de la explotación de la cantera de Cullpahuanca – Quiquijana Quispicanchi – Cusco. [Tesis, Universidad Andina del Cusco]. Repositorio digital Universidad Andina del Cusco.

[https://repositorio.uandina.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12557/3827/No\\_ry\\_Tesis\\_bachiller\\_2019\\_Part.1.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://repositorio.uandina.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12557/3827/No_ry_Tesis_bachiller_2019_Part.1.pdf?sequence=2&isAllowed=y)

- [14] Cruz Orduña, A.H. (2017). Comparación de la resistencia mecánica a la compresión del concreto elaborado con residuos de mármol. [Tesis, Universidad de Huánuco]. Repositorio DSpace UDH.  
<http://repositorio.udh.edu.pe/123456789/646>

- [15] Infinita Industrial Consulting webside (2020). Caracterización de materiales. Principales técnicas empleadas. Recuperado el 08 de marzo de 2022.  
<https://www.infinitiaresearch.com/noticias/caracterizacion-de-materiales-tecnicas/>

- [16] Vázquez Nin, G.; Echeverria, O. (2000). Introducción a la microscopía electrónica aplicada a las ciencias biológicas. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ciencias.

- [17] Reichmanis, E., Frank, C.W., O'Donnell, J.H. (1993). Chapter 1. Radiation Effects on Polymeric Materials a Brief Overview. Irradiation of Polymeric Materials Processes, Mechanisms, and Applications, ACS Publications, pp. 1-8.  
<https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/bk-1993-0527.ch001>

- [18] Fontal, B. (2005). El Espectro Electromagnético y sus Aplicaciones. Escuela Venezolana para la Enseñanza de la Química, pp. 17-23.  
[https://recursos.salonesvirtuales.com/wp-content/uploads/bloques/2012/07/espectro\\_electromagnetico.pdf](https://recursos.salonesvirtuales.com/wp-content/uploads/bloques/2012/07/espectro_electromagnetico.pdf)

- [19] Martínez, E. (2016). Desarrollo y caracterización de concreto polimérico modificado con fibras recicladas: efecto de la radiación gamma. [Tesis de Maestría] Universidad Autónoma del Estado de México.
- [20] Martínez-Barrera, G., González-Rivas, N., Viguera-Santiago, E., Martínez-López, Á., Tello-González, J.A., Menchaca-Campos, C. (2016). Chapter 9, Waste and Recycled Materials and their Impact on the Mechanical Properties of Construction Composite Materials. Composites from Renewable and Sustainable Materials. INTECH. pp. 161-176.  
<http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/79972/2016%20capitulo%2012%20intech%20nov16.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [21] Karaağaç, B., Şen, M., Deniz, V., Güven, O. (2007) Recycling of gamma irradiated inner tubes in butyl based rubber compounds, ELSEVIER, 265: 290-293.  
<http://www.polymer.hacettepe.edu.tr/pdf/5.pdf>
- [22] Hull, D. (2021). An Introduction to Composite Materials. Ed. Reverté. Cap. 1, 1-8.  
[https://books.google.com.mx/books?id=cxo3EAAAQBAJ&lpg=PR5&ots=Bdnp\\_aYNSf&dq=materiales%20compuestos&lr&hl=es&pg=PA7#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.mx/books?id=cxo3EAAAQBAJ&lpg=PR5&ots=Bdnp_aYNSf&dq=materiales%20compuestos&lr&hl=es&pg=PA7#v=onepage&q&f=false)
- [23] Besednjak, A. (2005) Materiales Compuestos: Procesos de fabricación de embarcaciones. Ed. UPC. Cap. 1-2, 15-24  
<https://books.google.com.mx/books?id=gMSg5rURr6sC&lpg=PA7&dq=materiales%20compuestos&lr&hl=es&pg=PA6#v=onepage&q&f=false>
- [24] Escudero, D. (2001) Materiales Compuestos. Aplicaciones. Informes de la construcción. 52: 45-52.  
<https://doi.org/10.3989/ic.2001.v52.i472.676>



- [25] Pérez, M., Sánchez, M. (2014) Aplicaciones avanzadas de los materiales compuestos en la obra civil y la edificación. Ed. OmniaScience. Cap. 2, 19-50.  
<http://hdl.handle.net/2117/23648>
- [26] Valencia, M., Collazos, P., Mina, J., & Toro, E. (2010). Caracterización fisicomecánica de concreto polimérico basado en resina poliéster. Revista Guillermo De Ockham, 8(1).  
<https://doi.org/10.21500/22563202.556>
- [27] Martínez, M. (2012) Elaboración y caracterización de concreto polimérico: efecto del contenido de fibra de luffa y de la radiación gamma. [Tesis de Maestría] Universidad Autónoma del Estado de México.  
<https://core.ac.uk/download/pdf/55531669.pdf>
- [28] AIMPLAS Instituto Tecnológico del Plástico (2018) Ensayos de resistencia a la flexión en plásticos.  
<https://www.aimplas.es/tipos-ensayos/propiedades-mecanicas-de-los-materiales-plasticos/ensayo-de-flexion/>
- [29] Fuentes, F. (1982) Ensayos mecánicos en materiales. [Teisi de Maestría] Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica  
<http://eprints.uanl.mx/5993/1/1020070566.PDF>
- [30] INSTRON (2019) What is Compression Testing?  
<https://www.instron.com/en/resources/test-types/compression-test>
- [31] Medina, E. (s. f.) Guía de Laboratorio Mecánico de Materiales. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad de Ingeniería.  
[https://www.academia.edu/31470711/ENSAYO\\_DE\\_FLEXION](https://www.academia.edu/31470711/ENSAYO_DE_FLEXION)
- [32] AIMPLAS Instituto Tecnológico del Plástico (2018) Ensayo de flexión.

<https://www.aimplas.es/tipos-ensayos/propiedades-mecanicas-de-los-materiales-plasticos/ensayo-de-flexion/>

- [33] Infinita Industrial Consulting webside (2021). Ensayo de flexión en materiales ¿Cuándo se realiza?  
<https://www.infinitiaresearch.com/noticias/ensayo-de-flexion-en-materiales-cuando-se-realizan/>
- [34] Varona, J. M. (2011) Tema IV Comportamiento Mecánico. Universidad de Cantabria.  
<https://ocw.unican.es/pluginfile.php/1382/course/section/1737/Tema5.pdf>
- [35] Rodríguez, J. H. (2009) Análisis de métodos y técnicas de caracterización de materiales nanoestructurados. [Especialización en Química Aplicada] Centro de Investigación en Química Aplicada.  
<https://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1025/385/1/Jesus%20Heriberto%20Rodriguez%20Tobias.pdf>
- [36] Flores, E. (2020) Prototipo de máquina para la extracción del aro de talón en neumáticos usados. [Tesis] Universidad Técnica del Norte, Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas. Repositorio Digital Universidad Técnica del Norte.  
<http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/10786>
- [37] Gallardo Bastidas, J., Helguero González, M. (2013) Diseño de una máquina destalonadora de neumáticos. [Artículo de tesis de grado] Escuela Superior Técnica del Litoral, Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción.  
<http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/24307>

- [38] Luque, P., Álvarez, D., Vera, C. (2008) Ingeniería del Automóvil. Sistemas y comportamiento dinámico. Thomson Ediciones Spain Paraninfo, S. A.  
<https://books.google.es/books?id=JDuzY9j6HwMC&lpg=PP1&ots=IhOMW1vXY4&dq=tipos%20de%20llantas%20radial%20y%20diagonal&lr&hl=es&pg=PA1#v=onepage&q&f=false>
- [39] Bobadilla Sánchez, E. (2012) Concretos Poliméricos: Estudio del efecto de la radiación Gamma en las propiedades mecánicas, térmica y microestructurales. [Tesis de Maestría] Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Química.
- [40] Instituto de Física UNAM (2022) Propiedades Mecánicas y Magnéticas de Materiales. Recuperado el 20 de septiembre de 2022 de  
[https://www.fisica.unam.mx/es/areas\\_investigacion/propiedades\\_mecanicas\\_magneticas\\_materiales.php](https://www.fisica.unam.mx/es/areas_investigacion/propiedades_mecanicas_magneticas_materiales.php)
- [41] Secretaria de comunicaciones y transportes (2002). Calidad de los materiales. Obra civil. Materiales compuestos. Tapa de concreto polimérico. N-CMT-4-01-054/02.  
<http://www3.contraloriadf.gob.mx/prontuario/resources/normatividad/63006.pdf>
- [42] Diagramas esfuerzo deformación (octubre 22, 2020) Diagramaweb.com. Recuperado el 20 de septiembre de 2022 de:  
<https://diagramaweb.com/esfuerzo-deformacion/>
- [43] Diagrama Esfuerzo – Deformación Unitaria (julio 18, 2020) Academia Hook. Recuperado el 20 de septiembre de:  
<https://academiahooke.com/diagrama-esfuerzo-deformacion-unitaria/>

- [44] Rosas, G. (s/f) Microscopía electrónica de barrido y microanálisis de elementos del Clúster Científico y Tecnológico BioMimicR. Instituto de Ecología, A. C. Recuperado el 22 de septiembre de 2022 de:  
<https://www.inecol.mx/inecol/index.php/es/ct-menu-item-25/ct-menu-item-27/17-ciencia-hoy/723-microscopia-electronica-de-barrido-y-microanalisis-de-elementos-del-cluster-cientifico-y-tecnologico-biomimic>
- [45] Microscopía Electrónica de Barrido (s/f) Servicios de apoyo a la investigación. Recuperado el 22 de septiembre de 2022 de:  
<https://www.scai.uma.es/areas/micr/sem/sem.html>
- [46] Carrasco, E. (2016) Influencia de la concentración del peróxido de benzoilo y de la temperatura del ambiente en el tiempo inicial de gelificación de una resina poliéster insaturada. [Tesis] Universidad Nacional “Pedro Ruiz Gallo”, Facultad de Ingeniería Química e Industrias Alimentarias. Repositorio digital Universidad Nacional “Pedro Ruiz Gallo”  
<https://repositorio.unprg.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12893/846/BC-TES-5666.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [47] Olivares Santiago, M., Galán Marín, C., & Roa Fernández, J. (2003). Los composites. Características y aplicaciones en la edificación. Informes De La Construcción, 54(484), 45–62.  
<https://doi.org/10.3989/ic.2003.v54.i484.568>