



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO**

**FACULTAD DE QUÍMICA**

---

**“EFECTOS DE LA RADIACIÓN GAMMA Y TETRA PAK DE DESECHO EN LAS  
PROPIEDADES DE COMPRESIÓN Y FLEXIÓN DE CONCRETO POLIMÉRICO ELABORADO  
CON RESINA POLIÉSTER Y MÁRMOL”**

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN CIENCIA DE MATERIALES**

PRESENTA:

**I.Q. CARLOS URIEL ESCOBAR CAMPOS**

DIRIGIDA POR:

**DR. GONZALO MARTÍNEZ BARRERA**

Toluca, Estado de México, septiembre 2024.

El presente trabajo se realizó en el Laboratorio de Investigación y Desarrollo de Materiales Avanzados (LIDMA) de la Facultad de Química de la Universidad Autónoma del Estado de México, bajo la dirección del Dr. Gonzalo Martínez Barrera y con el apoyo económico por parte de CONAHCYT con el número de becario 1232089.

Este trabajo de investigación fue registrado con el título: “Efectos de la radiación gamma y Tetra Pak de desecho en las propiedades de compresión y flexión de concreto polimérico elaborado con resina poliéster y mármol” con número de registro MCM-03-0323 ante la Secretaría de Investigación y Estudios Avanzados (SIEA) de la Universidad Autónoma del Estado de México y dentro de la convocatoria “Becas Nacionales 2022” de CONAHCYT con número de becario 1232089.

## ÍNDICE

<b>Resumen</b>	10
<b>Capítulo 1. Estado del arte</b>	12
1.1 Antecedentes	12
1.2 Concreto Polimérico	12
1.2.1 Resinas	13
1.2.2 Mármol	17
1.3 Tetra Pak	18
1.3.1 Reciclamiento de envases Tetra Pak	19
1.4 Materiales de los envases Tetra Pak utilizados en materiales compuestos	21
1.5 Efectos de la radiación gamma	23
1.5.1 Efectos de la radiación gamma en resina poliéster, celulosa y polietileno	25
1.5.2 Efecto de la radiación gamma en concreto polimérico	30
1.6 Costos de la elaboración del concreto polimérico	31
1.6.1 Concreto polimérico y radiación gamma	32
<b>JUSTIFICACIÓN</b>	34
<b>HIPÓTESIS</b>	35
<b>OBJETIVOS</b>	35
<b>METAS</b>	35
<b>Capítulo 2. Parte experimental</b>	36
2.1 Metodología experimental	36
2.2 Materiales	37
2.2.1 Recolección y corte de los envases Tetra Pak de desecho	37
2.2.2 Resina poliéster y peróxido metiletilcetona	38
2.2.3 Mármol	40
2.3 Elaboración de probetas de concreto polimérico	40
2.4 Pruebas mecánicas del concreto polimérico	41
2.5 Irradiación de concreto polimérico	43
2.6 Evaluación de la superficie mediante microscopia MEB	43

<b>Capítulo 3. Resultados</b>	44
3.1 Corte y tamizado de Tetra Pak	44
3.1.1 Partículas de Tetra Pak. Microscopía electrónica de barrido.	46
3.1.2 Partículas de mármol. Microscopía electrónica de barrido.	47
3.2 Resistencia a la compresión y a la flexión de concretos.	47
3.3 Concretos con partículas de Tetra Pak.	51
3.3.1 Resistencia a la compresión y a la flexión de concretos con partículas de Tetra Pak	52
3.3.2 Deformación en el punto de cedencia de concretos con partículas de Tetra Pak	53
3.3.3 Módulo de elasticidad de concretos con partículas de Tetra Pak	55
3.4 Efectos de la radiación gamma en concreto polimérico	57
3.4.1 Resistencia a la compresión y a la flexión de concretos con partículas de Tetra Pak e irradiados	57
3.4.2 Deformación en el punto de cedencia de concretos con partículas de Tetra Pak e irradiados	59
3.4.3 Módulo de elasticidad de concretos con partículas de Tetra Pak e irradiados	61
3.4.4 Concreto polimérico irradiado. Microscopía electrónica de barrido.	62
3.5 Concreto polimérico con tres tamaños de partículas de Tetra Pak	64
3.5.1 Resistencia a la compresión y a la flexión de concretos con tres tamaños de partículas de Tetra Pak	66
3.5.2 Deformación en el punto de cedencia de concretos con tres tamaños de partículas de Tetra Pak	68
3.5.3 Módulo de elasticidad para concretos con tres tamaños de partículas de Tetra Pak	70
<b>Capítulo 4. Conclusiones</b>	74
<b>Referencias</b>	76
<b>Anexos</b>	83

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1	Resinas poliéster insaturadas: monómeros, técnicas de polimerización y usos
Tabla 2	Comparativa de propiedades mecánicas para concreto polimérico e hidráulico
Tabla 3	Características de los rayos Gamma ( $^{60}\text{Co}$ )
Tabla 4	Precios de los componentes del concreto polimérico
Tabla 5	Porcentaje y masa de concreto polimérico elaborado
Tabla 6	Costo del concreto polimérico con Tetra Pak e irradiado
Tabla 7	Costo del concreto polimérico con Tetra Pak e irradiado para el año 2024.
Tabla 8	Propiedades de la resina Polylyte® 32335
Tabla 9	Características y propiedades del mármol
Tabla 10	Parámetros de control para prueba de compresión y flexión
Tabla 11	Tamizado del Tetra Pak de desecho
Tabla 12	Formulaciones de los concretos poliméricos
Tabla 13	Propiedades mecánicas para la prueba de compresión
Tabla 14	Propiedades mecánicas para la prueba de flexión
Tabla 15	Formulaciones de los concretos con partículas de Tetra Pak
Tabla 16	Resultados de resistencias mecánicas para las pruebas de compresión y flexión para concretos con partículas de Tetra Pak
Tabla 17	Resultados de deformaciones en el punto de cedencia para las pruebas de compresión y flexión para concretos con partículas de Tetra Pak
Tabla 18	Resultados del módulo de elasticidad para las pruebas de compresión y flexión para concretos con partículas de Tetra Pak
Tabla 19	Resultados de resistencias mecánicas para las pruebas de compresión y flexión para concretos con partículas de Tetra Pak e irradiados.
Tabla 20	Resultados de deformaciones en el punto de cedencia para las pruebas de compresión y flexión para concretos con partículas de Tetra Pak e irradiados.
Tabla 21	Resultados de módulo de elasticidad para las pruebas de compresión y flexión para concretos con partículas de Tetra Pak e irradiados
Tabla 22	Cantidades de los componentes del concreto polimérico
Tabla 23	Formulaciones y cantidades de Tetra Pak de desecho utilizado en los concretos con tres tamaños de partículas de Tetra Pak

- Tabla 24 Resistencia a la compresión y flexión de concretos con tres tamaños de partículas de Tetra Pak.
- Tabla 25 Resultados de deformaciones en el punto de cedencia para las pruebas de compresión y flexión para concretos con diferentes tamaños de partículas de Tetra Pak
- Tabla 26 Resultados del módulo de elasticidad para las pruebas de compresión y flexión para concretos con partículas de Tetra Pak
- Tabla 27 Porcentajes de aumento (+) o disminución (-) de cada propiedad mecánica, con respecto al valor del concreto control.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 Reactivos para la elaboración de resina tereftálica insaturada
- Figura 2 Estructura química de la resina poliéster tereftálica insaturada
- Figura 3 Reacción de polimerización entre resina poliéster y estireno
- Figura 4 Arreglo de un envase Tetra Pak
- Figura 5 Proceso industrial de reciclaje de envases de Tetra Pak
- Figura 6 Efectos de la radiación gamma en resinas termoestables
- Figura 7 Actividades realizadas
- Figura 8 Envases Tetra Pak recolectados
- Figura 9 Corte de la parte superior y la base a los envases de Tetra Pak de desecho
- Figura 10 Resina poliéster Tereftálica PolyLite® 32335
- Figura 11 Peróxido de metiletilcetona (MEKP) K-2000
- Figura 12 Saco de mármol y partículas de mármol
- Figura 13 Moldes metálicos (4x4x16 cm)
- Figura 14 Máquina universal marca Controls® con capacidad de 30 toneladas
- Figura 15 Dispositivo de: a) compresión y b) flexión de tres puntos
- Figura 16 Microscopio Electrónico de Barrido NeoScope JCM-6000
- Figura 17 Partículas de Tetra Pak de desecho
- Figura 18 Mallas metálicas en prueba de tamizado números 10, 20, 35, 40, 45, 50 y 60
- Figura 19 Tamaño de partícula de envases Tetra Pak de desecho
- Figura 20 Imágenes MEB de partículas de envases Tetra Pak de desecho
- Figura 21 Imágenes MEB de las capas interior y exterior de partículas Tetra Pak
- Figura 22 Imágenes MEB de partículas de mármol a una escala de: a) 50µm y b) 20µm
- Figura 23 Probetas antes (a) y después (b) de las pruebas de compresión y flexión
- Figura 24 Curvas de Fuerza vs Posición de la prueba de compresión
- Figura 25 Curvas de Fuerza vs Posición de la prueba de flexión
- Figura 26 Resistencia a la compresión y a la flexión de probetas de concreto polimérico con partículas de Tetra Pak de desecho
- Figura 27 Deformación en el punto de cedencia, por compresión y flexión, del concreto polimérico con partículas de Tetra Pak.
- Figura 28 Módulo de elasticidad por compresión y por flexión de concreto polimérico



con partículas de Tetra Pak

- Figura 29 Probetas a dosis de rayos gamma de a) 0 kGy, b) 100 kGy, c) 200 kGy, d) 300 kGy, e) 400 kGy y f) 500 kGy, antes y después de las pruebas mecánicas
- Figura 30 Resistencia a la compresión y a la flexión de concreto con 2 % de partículas de Tetra Pak e irradiados a diferentes dosis
- Figura 31 Deformación en el punto de cedencia para concretos con 2 % de partículas de Tetra Pak e irradiados a diferentes dosis
- Figura 32 Módulo de elasticidad en compresión y flexión de concretos con 2 % de partículas de Tetra Pak e irradiados a diferentes dosis
- Figura 33 Imágenes MEB de concreto polimérico irradiado a diferentes dosis: a) 0 kGy, b) 100 kGy, c) 200 kGy, d) 300 kGy, e) 400 kGy y f) 500 kGy.
- Figura 34 Resultados de la radiación gamma en las pruebas de compresión y flexión
- Figura 35 Partículas de Tetra Pak de desecho en tres tamaños distintos
- Figura 36 Resistencia a la compresión y flexión de concretos con partículas de Tetra Pak de diferentes tamaños
- Figura 37 Deformación en el punto de cedencia para la prueba de compresión y flexión para concretos con diferentes tamaños de partículas
- Figura 38 Módulo de elasticidad para concretos con partículas de Tetra Pak de diferente tamaño.

## RESUMEN

En este trabajo, de investigación científica, se utilizaron envases Tetra Pak de desecho para la elaboración de un concreto polimérico, en un intento de encontrar una segunda alternativa de uso para este material. Se elaboraron probetas de concreto polimérico a base de resina poliéster como matriz y mármol y partículas de Tetra Pak de un solo tamaño y de diferentes tamaños en diversas cantidades porcentuales, como agregados. Las pruebas mecánicas realizadas fueron ensayos de compresión y flexión en tres puntos.

Los primeros resultados mecánicos permitieron establecer una fórmula porcentual en peso de la cantidad de resina y mármol ideales para la incorporación del Tetra Pak de desecho de acuerdo con su resistencia, deformación y módulo de elasticidad.

Cuando se incorporó el material Tetra Pak en un tamaño promedio de 1.00 x 0.63 mm a la formulación del concreto en porcentajes de 1, 2 y 3 % peso, se observó que la prueba de flexión obtuvo los mejores resultados para un concreto con 1 % de partículas de Tetra Pak; siendo la resistencia a la flexión y el módulo de elasticidad un 5 y 13 %, respectivamente, con respecto al concreto de referencia,

Con el análisis de resultados de la experimentación con partículas de Tetra Pak, se decidió utilizar la formulación con 2 % de partículas de Tetra Pak para someter el concreto a radiaciones gamma en dosis de 100, 200, 300, 400 y 500 kGy con el fin de mejorar sus valores de resistencia, deformación y módulo de elasticidad. Los resultados de la radiación muestran que, las propiedades mecánicas estudiadas lograron mayores incrementos en la prueba de compresión; siendo la resistencia, la deformación y el módulo elástico 31, 39 y 13 % mayores que el concreto de control.

En una tercera etapa de experimentación, se incorporaron, a la fórmula inicial de resina poliéster y mármol, diferentes tamaños de partículas de Tetra Pak, las cuales representaron el 1 % en peso de la formulación. Los resultados mecánicos muestran que con la incorporación de Tetra Pak en diferentes tamaños se logra mejorar la resistencia a la compresión y flexión, ambas en 3 %, y el módulo de elasticidad en flexión y compresión en un 39 y 22 %, respectivamente, con referencia al concreto de control, lo cual es altamente significativo, pues con un solo tamaño no se obtuvo dicho resultado.

## Abstract

In this scientific research project, waste Tetra Pak containers were employed to produce polymer concrete, with the objective of identifying a secondary use for this material. Polymer concrete specimens were prepared utilising polyester resin as the matrix and marble and Tetra Pak particles of a single size and various sizes in different percentages as aggregates. The mechanical tests conducted included compression and three-point bending tests.

The initial mechanical results permitted the establishment of an optimal weight percentage formula for the amount of resin and marble to be incorporated into waste Tetra Pak, based on strength, deformation, and modulus of elasticity.

The incorporation of Tetra Pak material with an average size of 1.00 x 0.63 mm into concrete formulations at percentages of 1, 2, and 3% by weight was observed to yield the best results in the bending test. Concrete with 1% Tetra Pak particles exhibited the highest flexural strength and modulus of elasticity, with values 5% and 13% higher, respectively, compared to the reference concrete.

The experimental results obtained with Tetra Pak particles were analysed, and it was decided that the formulation with 2% Tetra Pak particles should be subjected to gamma radiation doses of 100, 200, 300, 400, and 500 kGy in order to improve the strength, deformation, and modulus of elasticity values of the concrete. The results of the radiation treatment demonstrated that the studied mechanical properties exhibited greater increases in the compression test, with the strength, deformation, and elastic modulus being 31%, 39%, and 13% higher than that of the control concrete.

In a third experimental phase, different sizes of Tetra Pak particles, representing 1% by weight of the initial polyester resin and marble formulation, were incorporated. The incorporation of Tetra Pak particles of varying sizes has been observed to enhance the compressive and flexural strength of the concrete by 3% and the flexural and compressive modulus of elasticity by 39% and 22%, respectively. This is a notable outcome, particularly given that this improvement was not achieved with a single particle size.

---

# Capítulo 1. Estado del arte

---

## 1.1 Antecedentes

La industria de la construcción y edificación demanda materiales cada vez más sofisticados, con mejoradas propiedades mecánicas y fisicoquímicas. En el área de la construcción, los materiales que se utilizan son de tipo cerámicos y metálicos. Dentro de los cerámicos se encuentran los vidrios, ladrillos y azulejos (Smith & Javad, 2006).

El concreto elaborado con cemento Portland, es el material cerámico que mayormente se utiliza en la industria de la construcción a nivel mundial. Cabe resaltar que, al poseer una alta porosidad y poca adherencia con ciertos materiales, este concreto convencional presenta propiedades mecánicas relativamente bajas. La presencia de poros contribuye a tener un comportamiento frágil cuando se someten a esfuerzos de tensión y compresión, y contribuye a la formación de grietas. Más aún, cuando aumenta la porosidad, la resistencia a la compresión y el módulo elástico disminuyen (Callister & Rethwisch, 2017; Sánchez, 2017; Askeland & Wright, 2016; Toufigh, 2016).

En el ámbito ambiental, su proceso de fabricación es el responsable, a nivel mundial, del 5 % de las emisiones de dióxido de carbono. Una alternativa para mejorar sus propiedades mecánicas y disminuir la emisión de gases, es usar materiales poliméricos (Silveirinha, 2022).

## 1.2 Concreto Polimérico

El concreto polimérico fue desarrollado en Japón hace 50 años con el fin de explorar su utilidad en la industria de la construcción para trabajos de reparación y de emergencia en minas y/o puentes (Kiruthika *et al.*, 2021). Ha sido señalado como el material compuesto más innovador y selectivo conocido en el siglo XXI, ya que no sólo proporciona propiedades de alta resistencia y bajos requisitos de mantenimiento, sino también características específicas, como alta durabilidad, menor contracción por secado, permeabilidad reducida y

resistencia química o al calor, las cuales son ventajas considerables sobre los concretos a base de cemento (Alhazmi *et al.*, 2021).

Este concreto se utiliza en productos prefabricados, pavimentos de carreteras, cubiertas de puentes, tuberías de aguas residuales y en paneles de construcción decorativos (Ohama, 2008).

Para su elaboración se necesita mezclar una resina termoestable (denominada matriz o fase continua), en una concentración que varía entre 20-30 %, y agregados minerales (denominada fase dispersa); en este contexto, la resina actúa como material cementante de los agregados cerámicos, por ejemplo, mármol, piedra caliza, granito, carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ), arena sílice ( $\text{SiO}_2$ ), alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), entre otros (Nodehi, 2022)

### **1.2.1 Resinas**

Las resinas termoestables más utilizadas para la elaboración de concreto polimérico son: poliéster ortoftálicas, isoftálicas, tereftálicas, epoxi, poliéster de polietilen-tereftalato (PET) y vinil éster (Ramana *et al.*, 2021).

Las resinas de poliéster insaturado se producen por condensación de un glicol con un ácido dicarboxílico insaturado (ácido maleico) y un ácido carboxílico saturado (ácido ftálico, isoftálico o tereftálico). Los poliésteres insaturados son polímeros de condensación, cuyo subproducto es el agua, originada por las reacciones de esterificación (Chanda, 2018).

La tabla 1 muestra los monómeros utilizados para las diferentes resinas termoestables, la polimerización que siguen para su síntesis y curado, así como algunas aplicaciones generales de las resinas tipo poliéster.

Tabla 1. Resinas poliéster insaturadas: monómeros, técnicas de polimerización y usos  
(Chanda, 2018).

Monómero	Polimerización	Usos
Anhídrido ftálico	Policondensación	Construcción
Anhídrido maléico	seguida de	Piezas automotrices
Ácido fumárico	polimerización en	
Ácido isoftálico	cadena, iniciada por	
Etilenglicol	radicales libres	
Propilenglicol		
Estireno		

Para la fabricación de resina poliéster tereftálica insaturada, que es la que se utiliza en este proyecto de investigación, se utilizan tres reactivos que son: propilenglicol, ácido tereftálico y anhídrido maleico (Figura 1).

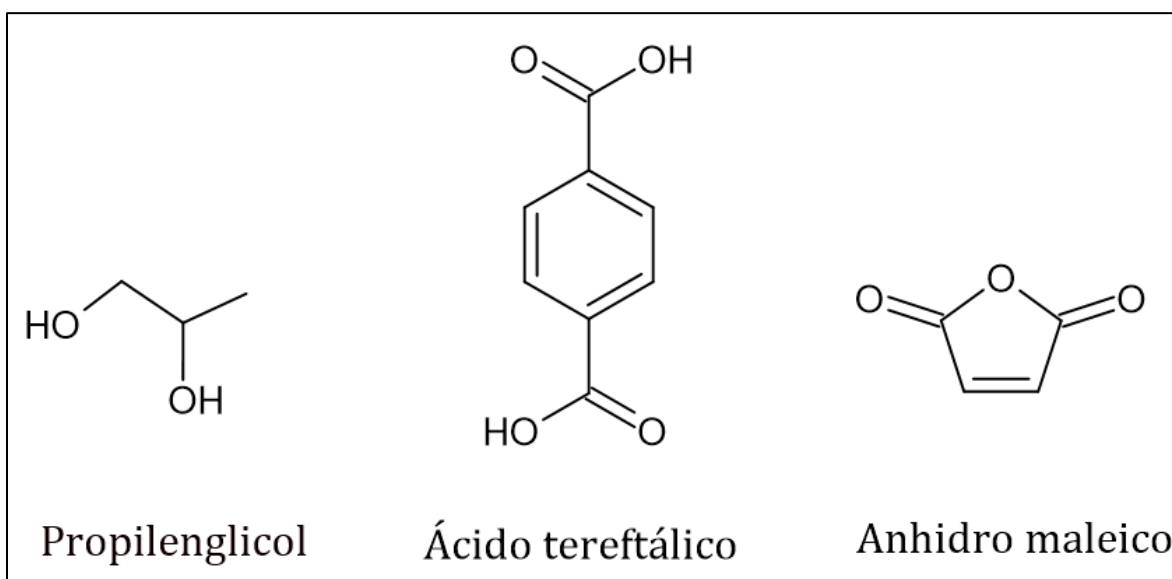


Figura 1. Reactivos para la elaboración de resina tereftálica insaturada.

Fuente: elaboración propia

La figura 2 muestra la estructura química de la resina poliéster tereftálica insaturada, obtenida a partir de los reactivos: propilenglicol, ácido tereftálico y anhídrido maleico.

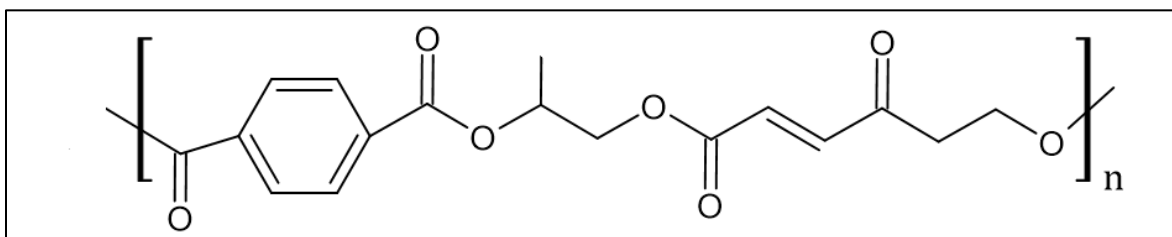


Figura 2. Estructura química de la resina poliéster tereftálica insaturada.

Fuente: elaboración propia

Los poliésteres insaturados se comercializan generalmente en solución con un diluyente, el cual es muy importante para la formulación de resinas insaturadas, ya que no sólo ayuda en el control de la viscosidad de la resina sino también toma parte en la reacción química de curado. El estireno es un claro ejemplo de este tipo de diluyentes.

La resina está, en un principio en estado líquido, pero habiendo terminado su tiempo de curado, se vuelve sólida cuando los radicales libres de un compuesto agregado con enlaces insaturados, se unen a otros enlaces insaturados adyacentes; este proceso se lleva a cabo a través de una reacción en cadena, es decir se va generando la reticulación de cadenas poliméricas. Estos compuestos se conocen como iniciadores, los más comunes son los peróxidos orgánicos, como el peróxido de benzoílo o el de metiletilcetona. Dado que las resinas de poliéster son termoendurecibles y se curan exotérmicamente, es importante controlar la cantidad de iniciador, ya que una cantidad grande puede causar carbonización, es decir, ignición durante el proceso de curado, así como fracturas (Ali, 2020; Chanda, 2018).

La insaturación está presente en especies de maleato en las cadenas del polímero. Dicho maleato, por lo general, no auto polimeriza por reacciones de radicales, pero si reacciona químicamente de forma fácil con el diluyente (estireno). Es sabido que entre el anhídrido y el diluyente se forman copolímeros. Esta es una razón por la que el estireno es el diluyente reactivo estándar más utilizado en la industria de las resinas de poliéster insaturado (Gao,

2019). En la figura 3 se muestra la reacción de curado para la resina poliéster tereftálica insaturada y el diluyente estireno.

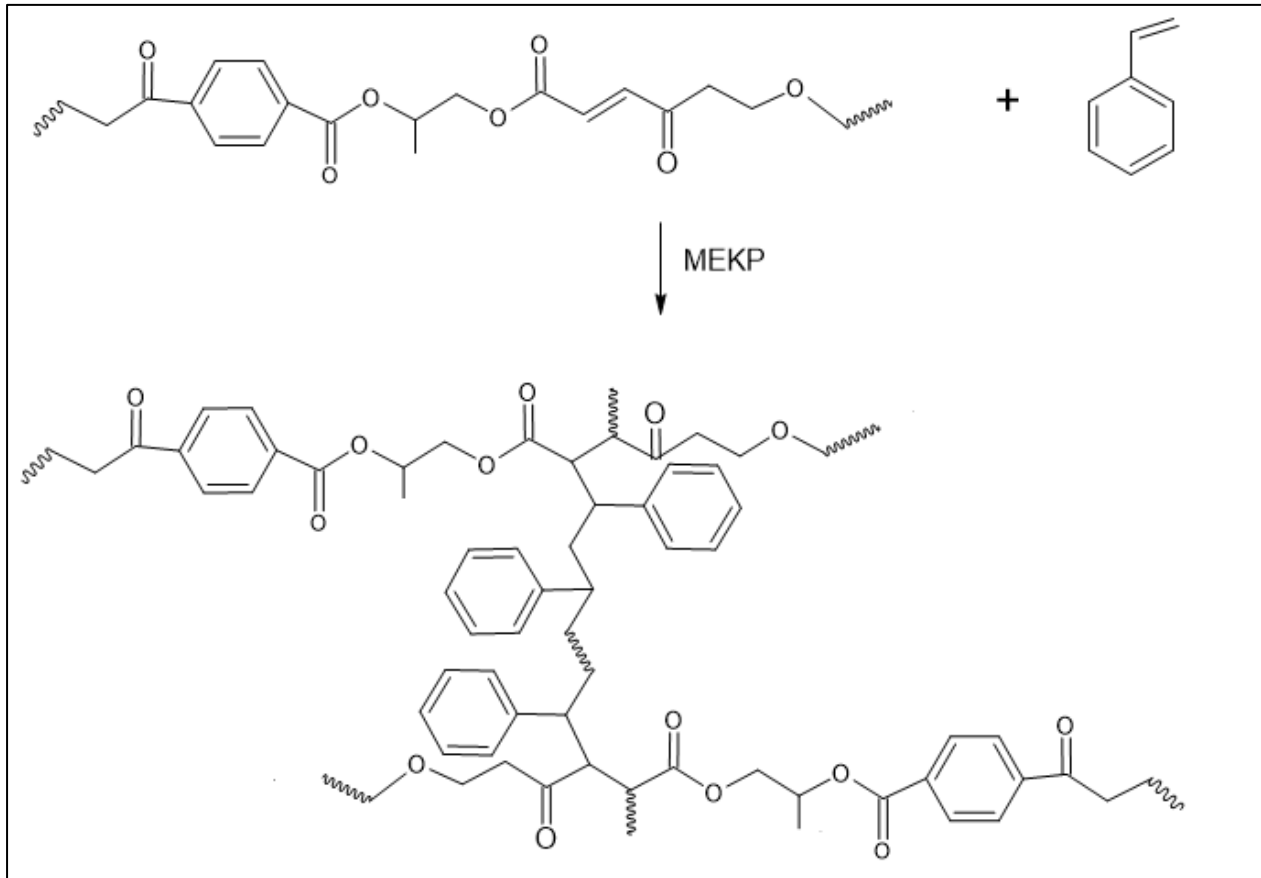


Figura 3. Reacción de polimerización entre resina poliéster y estireno.

Las sales de metales de transición, por ejemplo, las de cobalto son el tipo de promotor más utilizado, estas se añaden habitualmente como catalizadores para lograr la reticulación de las cadenas. En la industria, este tipo de aditivo se conoce como promotor, el cual, por lo general, reduce la energía de disociación de los enlaces del catalizador (Tohidi *et al.*, 2023).

De acuerdo con la polimerización de la resina, la porosidad del concreto polimérico es menor que la del concreto a base de cemento (hidráulico), lo que lleva a una mejor interacción entre la matriz polimérica y los agregados minerales; esto favorece tener valores superiores en las propiedades mecánicas que de la de otros materiales utilizados en la construcción (Niaki, 2022).



En la tabla 2 se muestra un comparativo de los valores de diversas propiedades mecánicas para formulaciones en general de concreto polimérico e hidráulico.

Tabla 2. Comparativa de propiedades mecánicas para concreto polimérico e hidráulico.

<b>Propiedad</b>	Concreto polimérico (Niaki, 2022)	Concreto hidráulico (ACI, 2008)
	<b>Valor</b>	
Resistencia a la compresión, MPa	60-300	20-40
Resistencia a la tensión, MPa	20-100	2-4
Resistencia a la flexión, MPa	20-150	3-7
Módulo de elasticidad, GPa	10-100	20-30
Absorción de agua, %	0.1-0.5	3-8
Densidad, kg/m <sup>3</sup>	2,000-2,500	2,200-2,500

### 1.2.2 Mármol

El mármol es una roca metamórfica compuesta por carbonatos que se utiliza como material de construcción tanto en exteriores como interiores. Sus usos son diversos: en pisos, columnas, escaleras, mesas, chimeneas, cocinas integrales, fachadas, muebles para baño, entre otros. El mármol está formado por calcita y dolomita, el cual proviene de piedra caliza sometida a alta presión y temperatura. Las piedras de mármol se cortan en bloques, de los cuales se genera de 20 a 30 % de mármol de desecho, afectando al medioambiente. Por esta razón, este desecho se ha utilizado en concretos hidráulicos y poliméricos; convirtiéndose en un material de relevancia científica en las últimas décadas (Al-Bashaireh, 2021; Ulubeylia, 2015).

El mármol utilizado en la elaboración de concretos poliméricos, mejora el desempeño mecánico ya que las pequeñas partículas de mármol llenan los huecos de la matriz

polimérica, lo que permite reducir la permeabilidad (Mansour, 2017). En concreto polimérico elaborado con resina poliéster ortoftálica, arena sílice y mármol de desecho en concentraciones hasta de 30 %, se logró mejorar un 12% la resistencia a la flexión (Rokbi, 2019).

En el estudio de Barbuta *et al.* (2017), de concreto polimérico elaborado con resina epoxy, piedra de río y mármol de 0.15 mm; este último en concentraciones de 12.4 % a 87.6 %, los resultados muestran que la resistencia a la compresión y a la flexión se mejoraron en un 16 y 11%, respectivamente, debido al acoplamiento entre la matriz y las partículas de mármol.

### **1.3. Tetra Pak**

El material conocido como Tetra Pak fue diseñado y fabricado en 1940 por el ingeniero sueco Ruben Rausing, para solucionar los problemas de dosificación y almacenamiento de alimentos en envases en esos tiempos (Robertson, 2021).

Con el paso del tiempo, se fueron aceptando las grandes ventajas que aportaba, entre estas, almacenar productos perecederos durante seis meses sin necesidad de refrigeración a un bajo costo, práctica que se ha llevado a cabo en todo el mundo para la conservación de bebidas como leche, jugos y néctares (Muñoz-Batista *et al.*, 2022; Şahin, & Karaboyacı, 2021).

Este material de envase Tetra Pak, contiene 75 % de cartón (celulosa), 20 % de Polietileno y 5 % de Aluminio (Bonocore, 2022). Conformado por seis capas, como se muestra en la figura 4, donde cabe mencionar que, cada capa tiene una función específica:

1ª capa. Polietileno: Protege completamente al alimento.

2ª capa. Polietileno: Impide el contacto del alimento con el aluminio.

3ª capa. Aluminio: Evita el paso de luz y oxígeno, así como la pérdida de aromas.

4ª capa. Polietileno: Adhiere las capas de cartón y aluminio.

5ª capa. Cartón: Ofrece resistencia y estabilidad al envase.

6ª capa. Polietileno: Protege a la celulosa de agentes contaminantes exteriores.

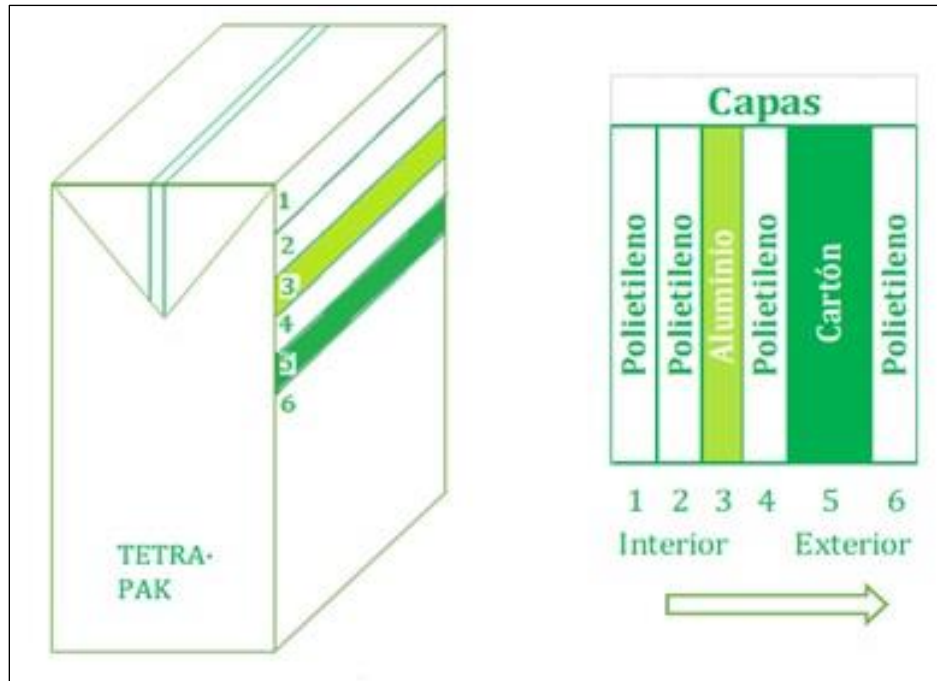


Figura 4. Arreglo de un envase Tetra Pak.

Se sabe que, el mercado de envases asépticos, como el Tetra Pak, tuvo un valor de 15 mil millones de dólares en 2020 y se prevé que aumente a 32 mil millones para 2028, con un crecimiento del 9.8 % entre 2021 y 2028 (Dolle, 2022). Estas cifras muestran la importancia de este tipo de envases y de las tareas que deben realizarse en pro de conservar el medio ambiente, entre ellas el reciclamiento y la reutilización.

### 1.3.1 Reciclamiento de envases Tetra Pak

En México, durante 2020 se reciclaron 43 mil toneladas de envases postconsumo, lo que, increíblemente, representó solo el 30 % de toda la producción. Cantidad relativamente baja en comparación con los porcentajes de reciclamiento por la comunidad europea, entre 65 y 70 %. Cuando se compara con otros materiales de envase, como el aluminio, PET, cartón, que rondan una tasa mínima de reciclaje del 60% (Sandoval García *et al.*, 2023), se observa que el Tetra Pak es de los materiales que menos se recicla, y, por ende, tiene un impacto ambiental negativo en mayor medida. Esta baja tasa de reciclaje del Tetra Pak es debida a la dificultad para separar sus tres componentes que lo constituyen, celulosa, polietileno y aluminio (Zawadiak, *et al.*, 2017).

Diferentes técnicas han sido estudiadas y aplicadas en el proceso de reciclaje de envases de Tetra Pak; manteniendo como propósito separar a los tres componentes que lo constituyen: cartón, polietileno y aluminio (Šleiniūtė *et al.*, 2024). Los procesos reportados se mencionan a continuación:

- Separación química: el proceso se basa en el uso de sustancias químicas, que incluyen soluciones básicas de hidróxido de sodio, hipoclorito de sodio, soluciones de cloroformo y ácidos carboxílicos. Por ejemplo, se prepara un fluido de separación consistente de ácido carboxílico (ácido acético, ácido fórmico o ácido propanoico), un disolvente de hidrocarburo (disolventes de tipo xileno, tolueno o nafta) y un agente de hinchamiento (hidrocarburo líquido de cadena corta). En este caso se hincha la capa de polietileno y se logra separar el aluminio (Dolle, 2022).
- Otro proceso es utilizar alta temperatura para separar los componentes del Tetra Pak, conocido como pirólisis. El cartón (celulosa) y el polietileno se degradan entre 368 °C y 490 °C, mientras que el aluminio se funde a 660 °C (Huo, 2021).
- El proceso más utilizado, y el recomendado por el fabricante, es el de hidropulpeado, que consiste en la separación del cartón, polietileno y aluminio, por medio de flujo de agua y molienda mecánica. Esta técnica consiste en introducir los envases Tetra Pak® en agua a temperatura ambiente en una máquina, llamada hidropulpeador, en la cual, una hélice accionada por un motor eléctrico, gira de forma rotacional y tritura los envases en un tiempo de entre 30 y 45 minutos. En este tiempo el cartón absorbe el agua y se forma la pulpa, la cual se separa del polietileno y el aluminio (conocido como polialumnio) (Posada & Pazmiño, 2016). Se conocen variantes del hidropulpeado, como repulpeo, pulpeo químico, pulpeo semiquímico, las cuales tienen diferentes variables de control, pero la misma finalidad de separación.

En la figura 5 se muestra un esquema del proceso general seguido por la industria del reciclaje, para la separación de los componentes de los envases de Tetra Pak.

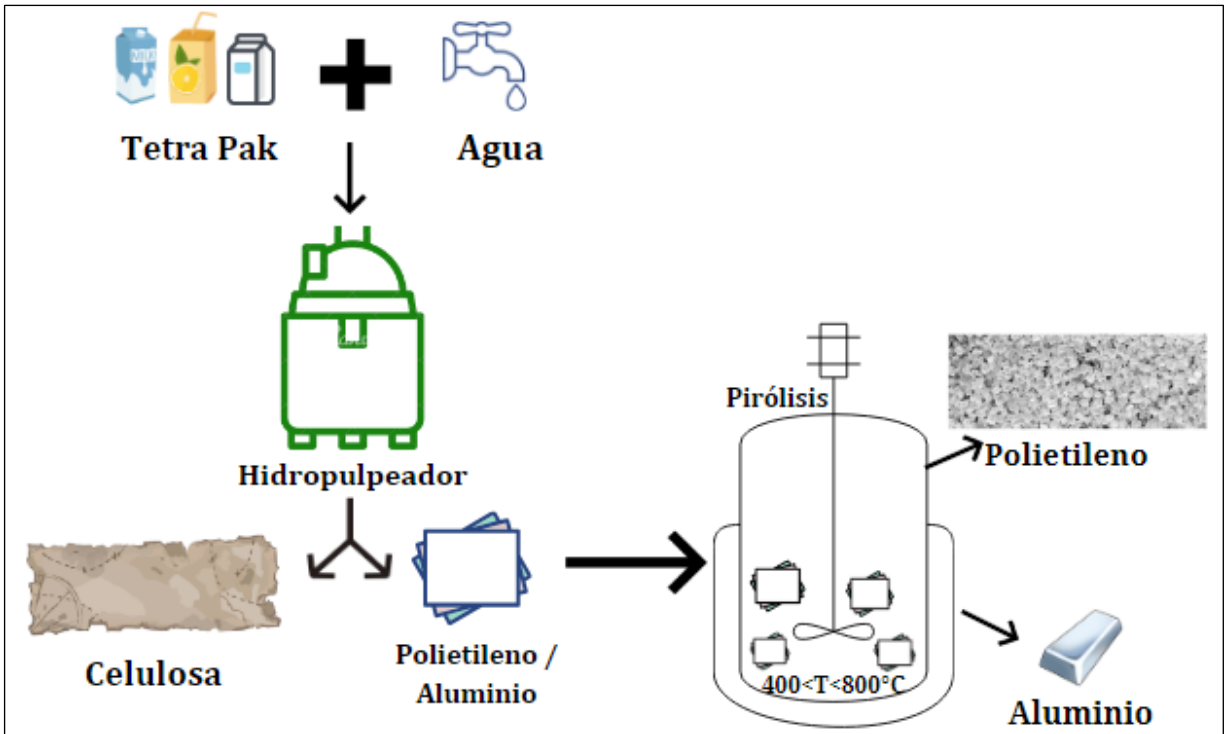


Figura 5. Proceso industrial de reciclaje de envases de Tetra Pak

Como se mencionó anteriormente, lograr esta separación es complicada y costosa, por lo que, en base a un modelo de economía circular (Haigh, 2023; Papamichael *et al.*, 2023), en este trabajo de investigación científica se pretende evitar hacer uso del proceso industrial y, en su lugar, utilizar a los envases de Tetra Pak, en bruto, para su introducción en un concreto polimérico. Algunos estudios científicos en materiales compuestos, utilizando Tetra Pak de desecho como materia prima, se muestran en la sección 1.4.

#### 1.4 Materiales de los envases Tetra Pak utilizados en materiales compuestos

Con la finalidad de aprovechar el aluminio, el cartón y el polietileno de los envases Tetra Pak, se han llevado a cabo algunas investigaciones sobre el uso de estos desechos en la elaboración de materiales compuestos, las cuales se enlistan a continuación.

- I. Partículas de envases de Tetra Pak fueron mezcladas con 5-20 % de hilos de lana de desecho como una alternativa potencial en materiales de construcción. Los resultados muestran que con 85% de Tetra Pak se obtiene un valor 9.2 % mayor

para el módulo de ruptura ( $15.1 \pm 1.01$  MPa), mientras que con 95 % de Tetra Pak se obtiene un valor 18.7% mayor para la resistencia a la tensión ( $5.5 \pm 0.5$  MPa) (Hamouda, 2019).

- II. Se cortaron piezas de 2x2 mm de Tetra Pak, las cuales posteriormente se calentaron a 70°C. Finalmente, se mezclaron con acetato de polivinilo (PVA)-(G) (37-50 % en peso), y urea-formaldehído (U-F) (37-43 % en peso). Los compuestos tuvieron una densidad de  $0.46 \text{ g/cm}^3$ , con los mayores valores de dureza cuando se utilizó un 43 % de Tetra Pak. Estos materiales podrían utilizarse a prueba de calor para contrarrestar la alta conductividad térmica del aluminio Colocándolos, por ejemplo, detrás de radiadores o calentadores eléctricos y así evitar alguna pérdida de calor. (Murathan, 2007).
- III. Se mezclaron laminillas de envases de Tetra Pak (4x18 mm) y yeso; obteniéndose una densidad de  $1.29 \text{ g/cm}^3$ . Los resultados muestran la mayor resistencia a la compresión de  $6.46 \text{ N/mm}^2$ . Este material compuesto puede ser utilizado en la industria de la construcción para aplicaciones no estructurales (Foti, 2019).
- IV. Se produjeron láminas con partículas de Tetra Pak de tres tamaños (4.6x11.85 mm; 10x15 mm y 5x5 mm), con dimensiones de 250x120x7 mm, mediante el método de termoprensado. Los resultados muestran que las láminas con Tetra Pak de 5x5 mm tuvieron los mayores valores de resistencia a la tensión (37.4 MPa), los cuales fueron un 94 % mayores a los obtenidos con láminas de 4.6x11.85 mm. Este material desarrollado puede utilizarse en la industria de la construcción atendiendo propósitos no estructurales (Macías-Gallego *et al.* 2020).
- V. Tableros de maderas plásticas (WPC), con dimensiones de 4x180x220 mm, fueron elaborados con polietileno reciclado (rPE) como matriz, además de harina de madera de pino y envases Tetra Pak molidos, como rellenos. Los resultados muestran que los tableros con 40 % de partículas Tetra Pack, aumentaron la resistencia a flexión en 43 %, la resistencia a la tracción en 38 %, sin embargo, el módulo de flexión disminuyó 17 % y el de tracción 15 %. Estos aumentos

muestran que los compuestos evaluados pueden sustituir a la madera de pino, en la formulación de maderas plásticas (Cihad-Bal, 2022).

- VI. Se produjeron láminas con 30 % de residuos de Tetra Pak y 70 % de Polietileno de alta densidad, mediante los procesos de extrusión a 25 rpm y prensado en caliente a 190 °C. Los valores más altos de resistencia al impacto fueron de 32 J/m, de resistencia a la tracción de 11 MPa y de módulo de flexión de 314 MPa, pudiendo este material integrarse como material alternativo en forma de láminas en la industria de la construcción (Guillén-Mallete et al., 2021).

### 1.5 Efectos de la radiación gamma

Los rayos gamma ( $\gamma$ ) son una forma de radiación electromagnética, con longitudes de onda más cortas que las de los rayos X. Son la forma más energética de radiación electromagnética y son producidos por el decaimiento de átomos radioactivos. Este tipo de radiación tiene una gran capacidad de penetración y es utilizada comúnmente en imágenes médicas, terapia de radiación y aplicaciones industriales. Estos rayos son fotones que no tienen masa, solo energía. Además de ser similares a la luz visible, este tipo de rayos tienen energía mucho más alta que se emite a menudo inmediatamente después de una desintegración alfa o beta de ciertos elementos químicos como lo son el cobalto y níquel (Brock, 2021; Eldridge & Eldridge, 2021). Las características de los rayos Gamma ( $^{60}\text{Co}$ ), se muestran en la tabla 3 (Rao, 2009).

Tabla 3. Características de los rayos Gamma ( $^{60}\text{Co}$ )

Características	Valor
Energía, MeV	0.12 -1.3
Penetración máxima, cm	50
Longitud de onda, $\mu\text{m}$	$10^{-6}$ - $10^{-7}$
Frecuencia, Hz	$10^{19}$ - $10^{24}$
Carga	No tiene
Masa en reposo	cero

Los fotones de los rayos gamma interactúan con la materia teniendo la probabilidad de presentar absorción. Su interacción causa ionización en tres maneras diferentes (Knoll, 2010):

- Efecto fotoeléctrico: ocurre cuando un fotón de rayos gamma colisiona con un átomo, transfiriendo toda su energía a un electrón en la capa interna del átomo. Este electrón es entonces expulsado del átomo, creando un ion cargado positivamente.
- Efecto Compton: también conocido como dispersión de Compton, es un fenómeno en el cual un fotón de rayos gamma colisiona con un electrón, y transfiere parte de su energía a otro electrón. El resultado de esta colisión es la dispersión del fotón en un ángulo diferente a su dirección original.
- Creación de pares: es un proceso en el cual un rayo gamma interactúa con el campo electromagnético cerca de un núcleo y se convierte espontáneamente en un par electrón-positrón.

En el Sistema Internacional de Medidas (SI), la dosis absorbida de 1 Grey (Gy) significa la absorción de 1 Joule de energía de radiación por 1 kg de masa. La tasa de dosis es la cantidad de radiación recibida por unidad de tiempo (Stalter & Howarth, 2012).

La radiación gamma es utilizada como una alternativa para la producción de radicales libres, que son especies altamente reactivas, que permiten lograr el rompimiento de enlaces y el entrecruzamiento de estos. En la figura 6, se muestra gráficamente los efectos de la reticulación de polímeros. Los rayos gamma tienen la capacidad de iniciar reacciones a cualquier temperatura y presión en los estados: sólido, líquido o gas, sin el uso de catalizadores. Más aún, la radiación gamma se puede, ambos, aplicar a temperatura ambiente y manipular la dosis (Lamarsh & Baratta, 2011).



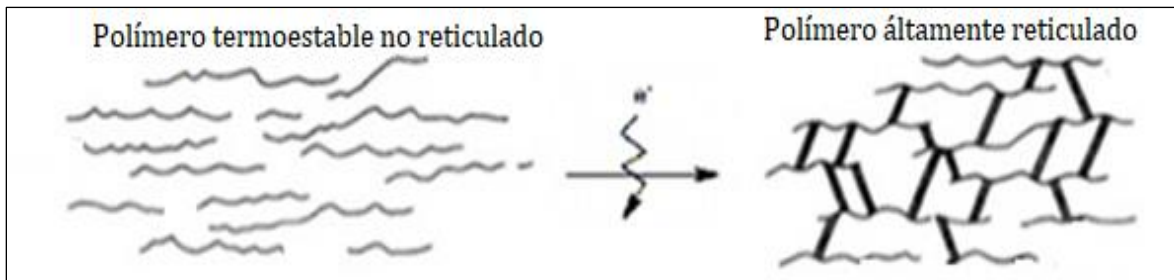


Figura 6. Efectos de la radiación gamma en resinas termoestables.

### 1.5.1 Efectos de la radiación gamma en resina poliéster, celulosa y polietileno

#### Resina Poliéster

En el caso de la resina poliéster, los rayos gamma producen diversos efectos. Por ejemplo, en las propiedades térmicas, la temperatura de transición vítrea aumenta conforme se incrementa la dosis de radiación. Sin embargo, la temperatura de descomposición presenta cambios mínimos. Mientras que, en las propiedades mecánicas, la resistencia a la compresión depende de la dosis de radiación (Drobny, 2021).

Materiales compuestos de resina de poliéster insaturada y 3-10 % de nanoarcillas, se irradiaron a 30 y 50 kGy. Los resultados mostraron incremento en la resistencia a la compresión de hasta el 31%, para compuestos con 5 % de nanoarcilla e irradiados a 50 kGy. También se mejoró la energía de activación de 77 a 110 kJ/mol, para compuestos con 5 % de nanoarcilla e irradiados a 50 kGy (Abdel-Rahman, 2018).

Compuestos a base de resina poliéster insaturada y 40-60% de fibras de yute, se irradiaron a dosis de 2.5-12.5 kGy a una razón de 6 kGy/h. Los resultados muestran que los compuestos sin irradiar aumentaron 40 % su resistencia a la tensión cuando se agregó 59 % de fibras de yute, siendo de 49 MPa. Mientras que la resistencia a la flexión tuvo un valor máximo de 88.2 MPa, después de agregar 53 % de fibras de yute. Los mayores valores se logran con altos contenidos de fibras, esto permite que las fibras participen activamente en la transferencia de esfuerzos y se produzcan deformaciones muy localizadas. Para los compuestos irradiados, se obtuvo una mejora del 29 % en la resistencia a la tensión con 50% de fibras y una dosis de 7.5 kGy, siendo de 37.05 MPa, mientras que la resistencia a la

flexión solo se incrementó 14 %, siendo de 60.1 MPa. Ambos incrementos se deben al rompimiento de cadenas en la resina poliéster y en las fibras de yute, produciendo moléculas más pequeñas pero entrecruzadas, entre cada especie (Khan, 2014).

Abdul-Motaleb *et al.* (2020), elaboraron materiales compuestos tipo sándwich con resina poliéster y tres capas de tela de yute. Materiales que fueron irradiados a dosis de 100-500 kGy. Los resultados muestran que los compuestos irradiados a 300 kGy obtuvieron la resistencia a la tensión más alta, el módulo de elasticidad más alto y la deformación más baja. La resistencia a la tensión se incrementó 97 %, siendo de 39.44 MPa, y el módulo de elasticidad se incrementó hasta cuatro veces, siendo de 1,218 MPa. Se encontró un comportamiento opuesto para la deformación a la rotura del compuesto, ya que ésta disminuyó conforme aumentó la dosis de radiación gamma, hasta los 300 kGy. A dosis de 500 kGy las propiedades mecánicas disminuyeron en un 60-70 %, debido al rompimiento de cadenas en la resina poliéster y en las fibras de yute; produciendo moléculas más pequeñas. Lo cual ocasiona tener un material más quebradizo cuando se somete a cargas de tensión.

En otro trabajo de carácter científico, compuestos de resina poliéster y fibras de jute se irradiaron a dosis de 2.5-7.5 kGy. Los valores de las propiedades mecánicas disminuyeron conforme se incrementó la radiación gamma hasta 7.5 kGy. La resistencia a la tensión disminuyó 5 %; el módulo de elasticidad en tensión disminuyó 14 %, mientras que la deformación a la fractura disminuyó 35 %. Los valores disminuyeron debido al rompimiento de cadenas y la formación de radicales libres en la celulosa y la resina poliéster (Hossain *et al.*, 2017).

### **Celulosa**

Se investigó el efecto de la radiación gamma en las propiedades mecánicas de fibras de algodón y lino, ambas tienen contenidos de celulosa de 90-95%. El algodón es una fibra mono celular, mientras que el lino es una fibra de tallo multicelular, es decir, las fibras se unen a través de impurezas no celulósicas, hemicelulosa, lignina y pectina. Las fibras se irradiaron de 5 a 100 kGy, a una razón de dosis de 1 kGy/h. Los resultados muestran que

cuando se utilizan dosis de 5 a 25 kGy, la resistencia a la tensión disminuye hasta en un 14 %. Mientras que a 100 kGy, disminuye 28% para el algodón y 33% para el lino. En el caso del lino, la disminución se debió a la degradación, tanto de las fibras pequeñas como de las impurezas no celulósicas, es decir, hemicelulosa, lignina y pectinas, las cuales constituyen el 20% (Machnowski, 2012).

En un material compuesto tipo sándwich elaborado mediante la intercalación de láminas de celulosa (45 %) y de polipropileno (55 %). Se evaluó el efecto de la radiación gamma en las propiedades mecánicas. Los compuestos se irradiaron a 250–1,000 kGy, a un intervalo de 250 kGy. Los mejores resultados se obtuvieron a 500 kGy, ya que la resistencia a la tensión aumentó un 27 %, la resistencia a la flexión un 20 % y la resistencia al impacto un 73 %. Mientras que los módulos de tensión un 30%, siendo de 0.96 GPa, y los de flexión un 37%, siendo de 1.13 GPa. Estos aumentos se debieron a ruptura de las cadenas poliméricas en la celulosa y el polipropileno. Se producen radicales libres, que permiten enlazar (reticular) moléculas y cambiar la estructura química del polímero. A dosis de radiación más altas, las propiedades mecánicas disminuyen notablemente debido al rompimiento de las cadenas poliméricas en la celulosa (Zaman *et al.*, 2014).

Tappanawatch *et al.* (2018) elaboraron compuestos de hule natural y 1-5 % de filamentos de celulosa fueron irradiados a 10 y 20 kGy. Los resultados mostraron que la resistencia aumenta conforme aumenta la cantidad de celulosa. La resistencia a la tensión mejoró un 83 %, el módulo de elasticidad en tensión un 25 % y la deformación a la fractura 5 %, para compuestos con 5% de celulosa e irradiados a 20 kGy. La radiación gamma produce mayor densidad de entrecruzamiento entre las cadenas de celulosa y caucho natural, lo cual proporciona mayor rigidez al compuesto. Un comportamiento similar se encontró para el material compuesto de celulosa (añadido en cantidad de 20 y 60 %), hule natural y plastificante, irradiado a 30.1-121.8 kGy; cuyos mejores resultados de resistencia a la tensión y deformación a la fractura se obtuvieron para el material elaborado con 20 % de celulosa en su formulación (Lungu, 2018).

Compuestos a base de celulosa y alginato de sodio (10-40 %), mostraron valores más elevados de elongación a la fractura, pero más bajos de la resistencia a la tensión, que los obtenidos para 100 % de celulosa. Posteriormente, los compuestos fueron irradiados con rayos gamma a dosis de 2.5 a 20 kGy. Para 100 % de celulosa, la resistencia a la tensión aumento 30%, pero la elongación disminuyó 25 % cuando se irradio a 20 kGy, lo que sugiere mayor entrecruzamiento de las cadenas y aumento de la cristalinidad de la celulosa (Ibrahim &Salmawi, 2013).

En otro estudio, fibras de yute de 150 mm fueron comprimidas hasta un espesor de 5 mm, después se expusieron a 100 kGy de radiación gamma. Los resultados muestran cambios mínimos entre las muestras sin irradiar y las irradiadas. En la curva TGA no se observa pérdida de peso entre 100 °C y 245 °C, correspondiente a la hemicelulosa, pero si entre 245 °C y 400 °C, en donde se establece el residuo de carbono y la degradación de la celulosa. Finalmente, la temperatura de degradación se localiza entre 365 °C para muestras sin irradiar y en 372 °C para las irradiadas. Con respecto a las propiedades mecánicas, a una dosis de 50 kGy la resistencia a la tracción disminuyo 22 % y la deformación a la rotura 16 %. Estas disminuciones se atribuyen al rompimiento de cadenas poliméricas de la celulosa provocadas por la radiación y, en menor medida, al entrelazamiento de las fibras (Khan *et al.*, 2006).

Sahadat-Hossain *et al.* (2017) elaboraron compuestos de resina de poliéster insaturado con tejidos de yute, los cuales se irradiaron con rayos gamma a dosis de 2.5, 5 y 7.5 kGy. Los resultados para los compuestos sin irradiar fueron de 43 MPa para la resistencia a la tracción (TS), 1.5 GPa para el módulo de tracción (TM), 10 % para el alargamiento a la rotura (Eb). Valores que fueron mejorados en 14 % para la TS, 10 % para la TM y en 22 % para la Eb, a una dosis de radiación de 5 kGy de radiación. Otra propiedad evaluada fue la absorción de agua de los compuestos irradiados, los cuales después de 10 días no absorbieron agua, por lo que podrían usarse como materiales hidrofóbicos para prevenir el crecimiento de bacterias y hongos. Estos mejoramientos se debieron a la producción de radicales libres en la celulosa por la radiación gamma. Radicales libres tipo H•, OH•

formados a partir de la escisión de los enlaces C<sub>2</sub>-C<sub>3</sub> del yute y de la cadena principal de la celulosa.

### **Polietileno**

La exposición del polietileno de baja densidad (LDPE) a la radiación gamma produce: i) aumento en la concentración de grupos carbonilo polares, ii) aumento del número de grupos polares debido al proceso de degradación oxidativa, iii) aumento del grado de reticulación, lo que restringe el movimiento de las moléculas localizadas en la fase amorfa.

Cuando el polietileno es irradiado con gammas en atmósfera de aire, la temperatura de fusión ( $T_m$ ) disminuye conforme se incrementa la dosis. El grado de cristalinidad aumenta 3 % a dosis de 10 kGy, pero disminuye gradualmente a dosis más elevadas, esto como consecuencia del aumento de la degradación oxidativa. Mientras que, si se irradia en atmósfera de N<sub>2</sub>, la temperatura de fusión ( $T_m$ ) aumenta a dosis de 5 kGy, pero disminuye a dosis más altas (Adrovic, 2012).

En el estudio hecho por Rahman (2019), materiales compuestos fueron elaborados con gránulos de polietileno de baja densidad (LDPE) y 10-60 % de fibras de hoja de piña (PALF). Los materiales compuestos elaborados con gránulos de polietileno de baja densidad (LDPE) y 50 % de fibras de hoja de piña (PALF), presentaron los mayores valores mecánicos, siendo de 33.42 kJ/m<sup>2</sup> la resistencia al impacto. Con este porcentaje se elaboraron los compuestos, que fueron irradiados a dosis de 2.5-10 kGy. Los resultados muestran que la resistencia en tensión aumentó 35 % y el módulo de tensión 16 % para una dosis de 7.5 kGy. Mientras que la deformación a la fractura fue 44.4 % mayor a una dosis de radiación de 10 kGy, esto debido a la degradación del compuesto. Mientras que la resistencia a la flexión aumentó 17 %, el módulo a la flexión 21 % y la resistencia al impacto 36 %, cuando se irradia a 7.5 kGy.

En resumen, las propiedades mecánicas de los compuestos aumentan hasta una determinada dosis y luego disminuyen, debido a los dos fenómenos opuestos: la reticulación y la degradación. A dosis bajas, los radicales libres se estabilizan mediante una

reacción de combinación y se produce la reticulación. Pero a dosis altas, la cadena principal puede romperse y el polímero puede degradarse en fragmentos; dando como resultado, que las propiedades mecánicas disminuyan (Rahman, 2019).

En otro estudio científico, se elaboraron láminas delgadas con gránulos de polietileno (PE), polipropileno y tejidos de yute. Se elaboraron con 50 % de yute, en forma de cuatro capas, que se intercalaron con cinco capas de láminas de PE y PP, así como con láminas de PE/PP. Los mejores resultados se obtuvieron para el compuesto con 20 % de PE y 80 % del PP; teniéndose un incremento de 34% en la resistencia a la tensión; 24 % en la resistencia a la flexión; 30 % en el módulo de tensión; 50 % en el módulo de flexión, y 25 % en la resistencia al impacto tipo Charpy. Por lo que las láminas de 20/80 de PE/PP fueron las que se irradiaron a dosis de 250-1,000 kGy. Los mejores resultados se lograron aplicando una dosis de 500 kGy. La resistencia a la tensión se incrementó 22 %, siendo de 75.7 MPa, y la resistencia a la flexión de 23 %, siendo de 79.4 MPa. Mientras que el módulo en tensión mejoró 55 % y el de flexión 21 %; la resistencia al impacto Charpy mejoró un 23 %. Esto debido a que las altas dosis en los polímeros producen ionización, excitación, rompimiento de cadenas, que producen moléculas más pequeñas (Zaman, 2014).

### **1.5.2 Efecto de la radiación gamma en concreto polimérico**

En el concreto polimérico, la radiación gamma produce cambios en los dos componentes principales del concreto polimérico; es decir, en la resina polimérica y en los agregados minerales. La radiación puede producir tanto la reticulación como la ruptura de cadenas poliméricas. El equilibrio entre la reticulación y la ruptura de cadenas poliméricas es crucial para el mejoramiento o deterioro de las propiedades mecánicas (Dodiuk, 2021; Kumar *et al.*, 2019; Adrovic, 2012).

En particular, si se produce la reticulación:

- Las cadenas poliméricas de la matriz experimentan una mejor interacción entre ellas, ocasionando que la resistencia mecánica aumente, así como su rigidez.
- Aumenta la tenacidad, haciendo que el material sea más resistente a la aparición de grietas y a la fractura.

Si se produce la ruptura de cadenas:

- El peso molecular disminuye.
- La resistencia a la compresión, a la flexión y el módulo de elasticidad disminuyen.

En concreto polimérico elaborado con resina poliéster y mármol, por ejemplo, se mejoró en 20 % la resistencia a la compresión a una dosis de 250 kGy. Se tuvo mayor resistencia y propagación de grietas con partículas de menor tamaño. A dosis de 300 kGy, los valores de la resistencia disminuyen, debido a la ruptura de enlaces en las cadenas poliméricas de la resina poliéster.

Otro ejemplo destaca la obtención de concreto polimérico producido con resina poliéster insaturada, mármol y fibras de polipropileno, tuvo una resistencia a la compresión de 65 MPa cuando se añadió 0.2 % de fibras y se irradia a 250 kGy. Esto se debió al entrecruzamiento de las cadenas poliméricas en la resina, generado por los rayos gamma. Sin embargo, a dosis mayores a 250 kGy, los valores de resistencia disminuyen debido a la ruptura de cadenas.

### 1.6 Costos de la elaboración del concreto polimérico

Los costos de los componentes del concreto mostrados en la tabla 4, con excepción del Tetra Pak de desecho, fueron consultados directamente con el fabricante de cada uno. Mientras que, los del Tetra Pak de desecho, en centros de acopio de materiales de reciclaje, ubicados en Toluca, Estado de México. Cabe mencionar que estos precios corresponden al año en que fueron consultados, 2022.

Tabla 4. Precios de los componentes del concreto polimérico.

<b>Componente</b>	<b>Costo (Pesos/kg)</b>
Resina poliéster Polylite® 32335	225.00
Mármol	1.50
Tetra Pak de desecho	7.00
Catalizador MEKP	120.00

En la tabla 5 se muestran las cantidades en porcentaje y masa de las materias primas utilizadas para la elaboración de 1 kg de concreto polimérico con partículas de Tetra Pak. Se muestra el costo de cada tipo de concreto.

Tabla 5. Porcentaje y masa de concreto polimérico elaborado.

Concreto (código)	Resina		Mármol		Tetra Pak		Costo (peso/kg)
	%	kg	%	kg	%	kg	
25R/75M	25	0.25	75	0.75	0	--	58.00
25R/74M/1T	25	0.25	74	0.74	1	0.01	58.03
25R/73M/2T	25	0.25	73	0.73	2	0.02	58.09
25R/72M/3T	25	0.25	72	0.72	3	0.03	58.14.

### 1.6.1 Concreto polimérico y radiación gamma

De acuerdo con información del Instituto Nacional en Investigaciones Nucleares, ININ, el costo de la radiación gamma es de 10 pesos/kGy para una masa de hasta 50 kg, por lo cual la dosis más baja utilizada, 100 kGy, tiene un costo de 1,000 pesos, mientras que la más alta (500 kGy), de 5,000 pesos. Unitariamente, el costo por irradiar a 100 kGy es de 20 pesos/kg, a 200 kGy es de 40 pesos, a 300 kGy es de 60 pesos, a 400 kGy es de 80 pesos y a 500 kGy es de 100 pesos. Los costos para el concreto con Tetra Pak e irradiado, calculados para el año 2022 se muestran en la tabla 6.

Tabla 6. Costo del concreto polimérico con Tetra Pak e irradiado.

Dosis (kGy)	Costo (pesos/kg)			
	25R/75M	25R/74M/1T	25R/73M/2T	25R/72M/3T
100	78.00	78.00	78.10	78.15
200	98.00	98.00	98.10	98.15
300	118.00	118.00	118.10	118.15
400	138.00	138.00	138.10	138.15
500	158.00	158.00	158.10	158.15



De acuerdo con el Banco de México, en el año 2022 se tuvo una inflación anual del 7.9% en el mercado de mercancías y servicios, en el año 2023 del 5.53% y en el 2024 se tiene un pronóstico del 4%, por lo que, tomando estos porcentajes de inflación en los precios de las materias primas, los precios actualizados para el año 2024, que es cuando se concluye este trabajo de investigación, se muestran en la tabla 7.

Tabla 7. Costo del concreto polimérico con Tetra Pak e irradiado para el año 2024.

<b>Dosis (kGy)</b>	<b>Costo (pesos/kg)</b>			
	<b>25R/75M</b>	<b>25R/74M/1T</b>	<b>25R/73M/2T</b>	<b>25R/72M/3T</b>
100	92.37	92.37	92.49	92.55
200	116.05	116.05	116.17	116.23
300	139.74	139.74	139.86	139.92
400	163.42	163.42	163.54	163.60
500	187.11	187.11	187.22	187.28

## JUSTIFICACIÓN

Se sabe que, los valores de las propiedades mecánicas de un material compuesto pueden aumentar cuando se le añade un material. Se ha demostrado que algunos tipos de fibras (poliméricas, metálicas y naturales) actúan como refuerzo y provocan el aumento en las propiedades mecánicas.

Teniendo en cuenta los problemas ambientales de contaminación y la huella de carbono de materiales de un solo uso, se ha propuesto el uso de materiales de desecho o de reúso para incrementar la resistencia de materiales compuestos, por ejemplo, los materiales provenientes de empaques multicapa (Tetra Pak), polietileno de baja densidad, celulosa y aluminio, con el fin de ayudar en aumentar la tasa promedio de reciclaje de este material de envase (cerca del 30 %), la cual, cabe recordar, es de las más bajas en comparación con otros materiales utilizados para los mismos propósitos de conservación de alimentos.

Aunado a esto, al utilizar rayos gamma, los grados de adhesión entre la matriz y agregados se pueden mejorar, ya que esta energía ionizante es capaz de modificar la estructura química y las propiedades fisicoquímicas de los polímeros, además de permitir la reticulación de cadenas poliméricas en materiales compuestos.

Lograr incluir a este material multicapa, fabricado para la conservación de alimentos, dentro de una formulación de un concreto polimérico no solo planteará una alternativa para reducir su huella de carbono, sino también se habrá incluido en una nueva posible cadena de consumo y suministro, en base a un concepto de economía circular.

En este trabajo se produjo concreto polimérico con resina poliéster, mármol y envases de Tetra Pak de desecho; el cual se expuso a rayos gamma para incrementar los valores de ciertas propiedades mecánicas analizando su costo de fabricación.

## **Hipótesis**

Es posible incrementar la resistencia a la compresión y a la flexión de concreto polimérico elaborado con resina poliéster y mármol, mediante el uso de desechos de envases de Tetra Pak y radiación gamma.

## **Objetivos**

### **Objetivo general:**

Estudiar y analizar los efectos producidos por los desechos de envases de Tetra Pak y la radiación gamma, en las propiedades mecánicas de resistencia a la compresión y flexión de concreto polimérico elaborado con resina poliéster y mármol.

### **Objetivos específicos:**

- Elaboración de probetas de concretos poliméricos con resina poliéster, mármol y partículas de Tetra Pak; estas últimas en cantidades de 1, 2 y 3 % en peso y tamaños menores promedio a 1 mm.
- Elaboración de probetas de concretos poliméricos con resina poliéster, mármol y partículas de Tetra Pak; estas últimas en cantidades de 1 % en peso mezclando tamaños de 1x1, 3x3 y 5x5 mm.
- Irradiar las probetas de concreto polimérico a dosis de radiación gamma igual a 100, 200, 300, 400 y 500 kGy.
- Evaluar las propiedades mecánicas de resistencia a la compresión y a la flexión de las probetas no-irradiadas e irradiadas de concreto polimérico.

### **Metas:**

- Analizar el comportamiento de la resistencia a la flexión y a la compresión causado por la radiación gamma y el Tetra Pak de desecho.
- Estudiar la morfología de concreto polimérico no-irradiado e irradiado, mediante espectroscopía electrónica de barrido (MEB).

---

## Capítulo 2 Parte experimental

---

### 2.1 Metodología experimental

En la figura 7 se muestra el diagrama con las actividades que se siguieron en cada etapa de la investigación.

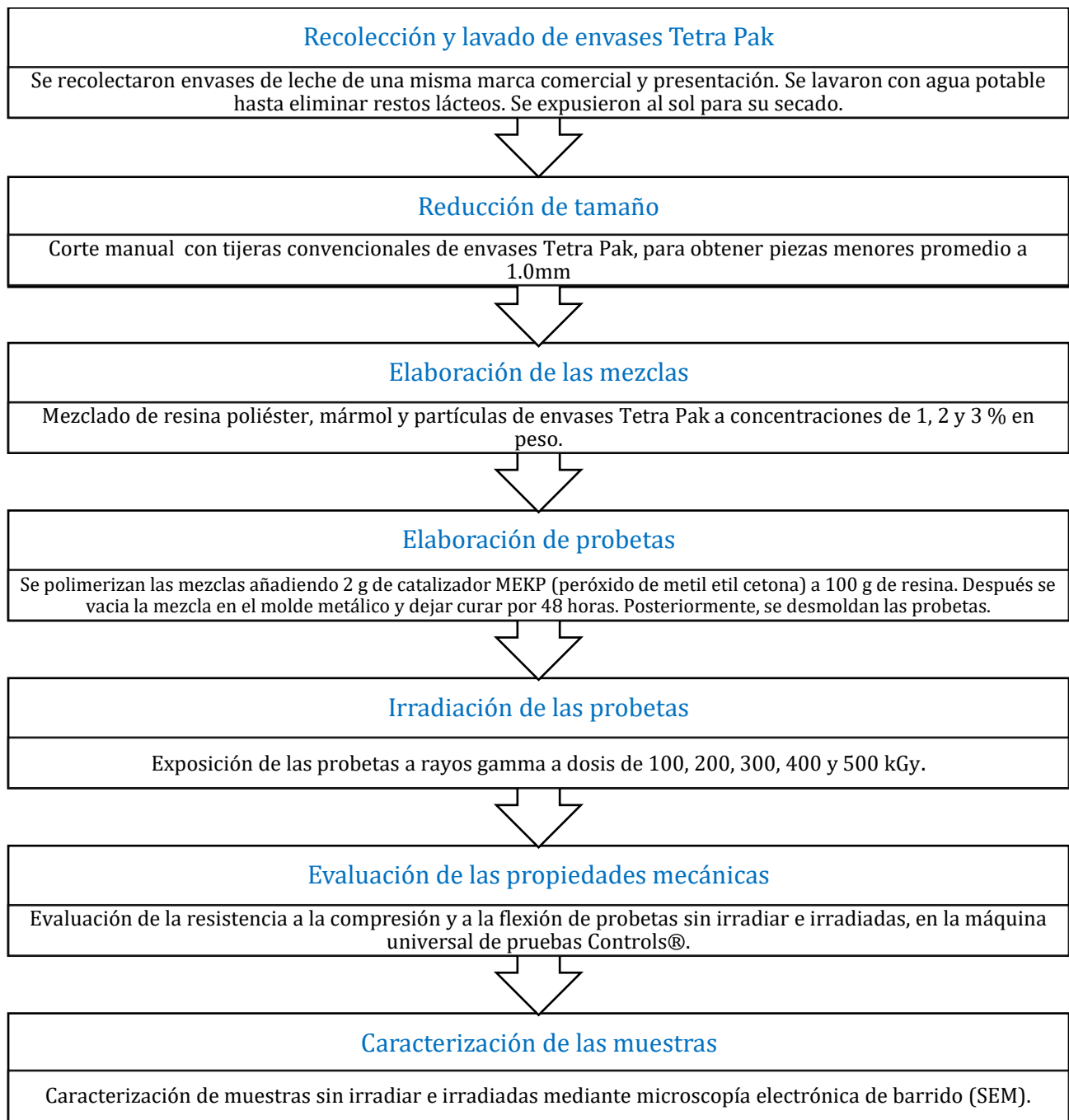


Figura 7. Actividades realizadas.

## 2.2 Materiales

### 2.2.1 Recolección y corte de los envases Tetra Pak de desecho

Se recolectaron envases de Tetra Pak de desecho de una sola marca y presentación (figura 8).



Figura 8. Envases Tetra Pak recolectados.

Los envases fueron lavados con suficiente agua potable para eliminar los residuos del producto almacenado, después fueron secados a la intemperie. Posteriormente, se cortó la parte superior de los envases (donde se localiza la tapa) y la base (figura 9), esto con el fin de hacer más fácil el corte; el cual fue realizado manualmente con tijeras.



Figura 9. Corte de la parte superior y la base a los envases de Tetra Pak de desecho.

Se realizaron tres cortes diferentes de Tetra Pak, los cuales se enlistan a continuación:

- 1x1 mm, a los cuales se les denominó con la letra S, de la palabra Small.
- 3x3 mm, a los cuales se les denominó con la letra M, de la palabra Medium.
- 5x5 mm, a los cuales se les denominó con la letra L, de la palabra Large.

Para el corte de menor tamaño, S, se realizó una prueba de tamizado para conocer con mayor exactitud el tamaño del Tetra Pak. Mientras que, para los dos tamaños restantes, no se llevó a cabo dicha prueba mecánica, pues la especificación de sus dimensiones se pudo controlar con mayor precisión al momento de la actividad de reducción de tamaño de los envases.

### 2.2.2 Resina poliéster y peróxido metiletilcetona

Se utilizó resina poliéster no saturada, tereftálica modificada del fabricante REICHHOLD® identificada como Polylite® 32335 (figura 10). Resina de reactividad media, de baja viscosidad y pre-acelerada. Las propiedades de la resina, proporcionadas por el fabricante, se muestran en la tabla 8.

Tabla 8. Propiedades de la resina Polylite® 32335		Absorción de agua 2h @ 100°C, %	0.64
Propiedad	Valor	Absorción de agua 24h @ 23°C, %	0.14
No. volátiles, %	58-63	Resistencia a la flexión, MPa	107.83
Viscosidad Brookfield LVF, cPs	160-220	Módulo de flexión, MPa	3,659
Densidad, g/cm <sup>3</sup>	1.13	Resistencia a la tensión, MPa	62.5
Color	Café	Módulo de tensión, MPa	3,247
Estabilidad @ 105°C, h	4	Elongación a la ruptura, %	2.31
Tiempo de gel, min	9-13		
Tiempo de curado, min	21		
T. <sup>a</sup> de exotermia, °C	180		



Figura 10. Resina poliéster Tereftálica PolyLite® 32335.

La resina es curada a temperatura ambiente mediante la adición de Peróxido de Metiletilcetona (MEKP), el cual es un líquido generalmente incoloro y con olor parecido a la menta. En el mercado, el producto se comercializa a una concentración del 60 % de MEKP y 40 % de diluyente. Se utilizó peróxido del fabricante Poliformas® con nombre comercial K-2000 (figura 11). Las características del peróxido son: líquido incoloro transparente, alto contenido de oxígeno activo ( $8.9 \pm 0.1$ ) y bajo contenido de agua.



Figura 11. Peróxido de metiletilcetona (MEKP) K-2000.

### 2.2.3 Mármol

En este trabajo se utilizó marmolina fina con tamaño promedio de 0.30 mm, del fabricante PRODIMAR (figura 12). De acuerdo con la literatura, las principales características del mármol se muestran en la tabla 9:

Tabla 9. Características y propiedades del mármol (Maldonado, 2021).

Propiedad	Valor
Composición química	90% de calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) y 10% de dolomita [ $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ]
Densidad	2.71 g/cm <sup>3</sup>
Presión de formación	2 a 4 kbar
Temperatura de formación	Altas temperaturas (575 °C o más)
Propiedades térmicas	Buen índice de conductividad térmico y capacidad calorífica.
Color	Blanco, gris, azul, rojo, verde, crema, amarillo, rosas (dependen de las impurezas)



Figura 12. Saco de mármol y partículas de mármol.

### 2.3 Elaboración de probetas de concreto polimérico

Las probetas de concreto polimérico, con dimensiones 4x4x16 cm, (figura 13) fueron elaboradas en tres etapas. En la primera etapa se utilizó resina poliéster y mármol; en la segunda etapa se utilizó resina poliéster, mármol y partículas de envases Tetra Pak de un



solo tamaño, y en la tercera etapa se utilizó resina poliéster, mármol y la combinación de tamaños de partículas de Tetra Pak.

Para la polimerización de las probetas se utilizaron 2 g del catalizador MEKP por cada 100 g de resina, como lo indica la hoja técnica de la resina poliéster mostrada en el anexo 1. Para cada tipo de concreto se elaboraron 3 probetas en los moldes prismáticos metálicos.



Figura 13. Moldes metálicos (4x4x16 cm).

La elaboración de las probetas fue realizada haciendo un mezclado manual de los diferentes componentes, correspondientes para cada etapa y tipo de concreto polimérico, por 3 minutos utilizando una cuchara y un recipiente tipo “bowl”, ambos metálicos. Enseguida, la formulación, recién mezclada, fue vertida en los moldes metálicos para formar las probetas. esto con el fin de que el material Tetra Pak quedara distribuido aleatoriamente en todo el cuerpo del material.

#### **2.4 Pruebas mecánicas del concreto polimérico**

Para las pruebas mecánicas, se utilizó la Maquina Universal multiensayo de pruebas marca Controls® con capacidad de 30 toneladas (figura 14).



Figura 14. Máquina universal marca Controls® con capacidad de 30 toneladas.

La prueba de compresión fue realizada de acuerdo con la norma ASTM D695 y la de flexión de tres puntos bajo la norma ASTM D7264 siguiendo los parámetros mostrados en la tabla 10. La figura 15 muestra los dispositivos utilizados para cada ensayo mecánico.

Tabla 10. Parámetros de control para prueba de compresión y flexión.

Parámetro	Compresión	Flexión
Velocidad en fuerza, kgf/s	30	25
Velocidad en posición, mm/min	0.1	0.3
Límite superior de fuerza, ton	25	25
Límite superior de posición, mm	4.5	4.5

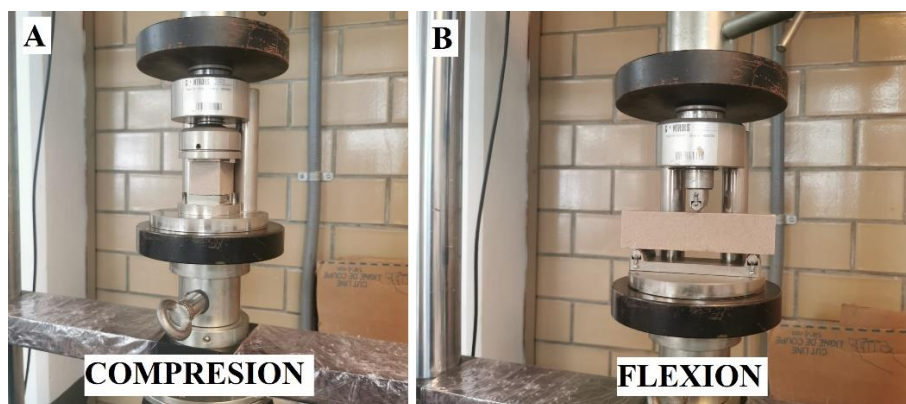


Figura 15. Dispositivo de: a) compresión y b) flexión de tres puntos.

## 2.5 Irradiación de concreto polimérico

Las probetas de concreto polimérico se irradiaron con un irradiador industrial JS-6500 que opera con lápices de cobalto 60 ( $^{60}\text{Co}$ ), de 5.2 años de vida en promedio. Se irradió en atmósfera de aire a temperatura ambiente en el irradiador ubicado en el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ) a una razón de 7.56 kGy/h en la posición del soporte superior del equipo.

## 2.6 Evaluación de las superficies mediante microscopía MEB

Las superficies de las probetas ensayadas fueron observadas en un microscopio electrónico de barrido (MEB) marca NeoScope modelo JCM-6000, que cuenta con filamento de tungsteno, resolución de 1.0  $\mu\text{m}$  y operado a 5 kV de aceleración. Las imágenes fueron obtenidas en el modo de electrones secundarios. El equipo se encuentra ubicado en las instalaciones del Centro Conjunto de Investigación en Química Sustentable UAEM-UNAM (figura 16).



Figura 16. Microscopio Electrónico de Barrido NeoScope JCM-6000

---

## Capítulo 3. Resultados

---

### 3.1 Corte y tamizado de Tetra Pak

El corte del Tetra Pak para el tamaño “S” se muestra en la figura 17. Para conocer con más exactitud el tamaño promedio de este tamaño se realizó una prueba de tamizado, en el cual, se utilizaron las mallas número 10, 20, 35, 40, 45, 50 y 60, cuyos tamaños de abertura son de 2.0, 0.841, 0.417, 0.40, 0.354, 0.297 y 0.25 mm, respectivamente (figura 18).

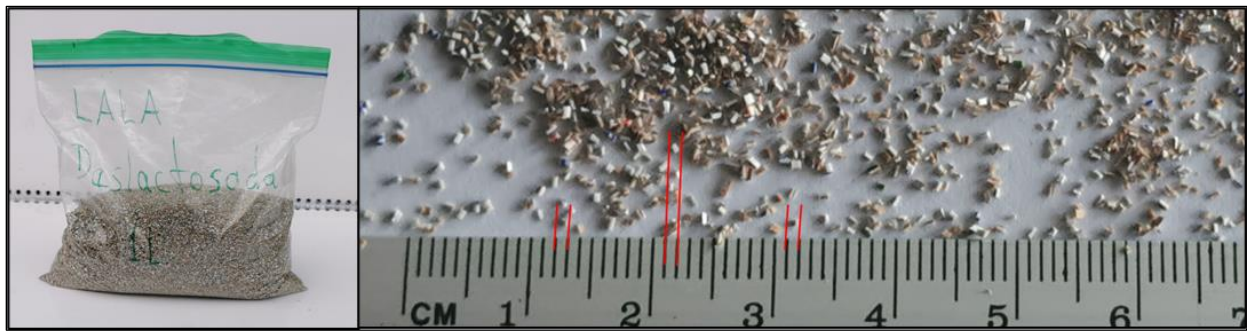


Figura 17. Partículas de Tetra Pak de desecho.



Figura 18. Mallas metálicas en prueba de tamizado números 10, 20, 35, 40, 45, 50 y 60.

Para la experimentación de la prueba de tamizado se utilizaron 250 g de Tetra Pak recortado a un tamaño “S”. En la tabla 11 se muestra los resultados del tamizado del Tetra Pak.

Tabla 11. Tamizado del Tetra Pak de desecho.

No. Malla	Abertura del tamiz(mm)	Tamaño promedio(mm)	Masa retenida (g)	Fracción de masa retenida	Fracción acumulativa
10	2	2	0	0	<b>1.000</b>
20	0.84	1.42	70.17	0.281	0.737
35	0.42	0.63	156.06	0.624	0.113
40	0.40	0.41	7.92	0.032	0.081
45	0.35	0.38	1.71	0.007	0.074
50	0.30	0.33	7.46	0.030	0.044
60	0.25	0.27	4.37	0.017	0.027
PAN	0	0.13	2.30	0.009	0.009
		<b>Σ</b>	<b>250</b>	<b>1</b>	

El tamaño promedio de las partículas de Tetra Pak de desecho y la distribución de estos se muestran en la figura 19. Se observa que el mayor porcentaje de partículas, 62.4%, corresponde a las que tienen un tamaño promedio de 0.63 mm; seguidas por el porcentaje de 28.1% para tamaños de 1.42 mm.

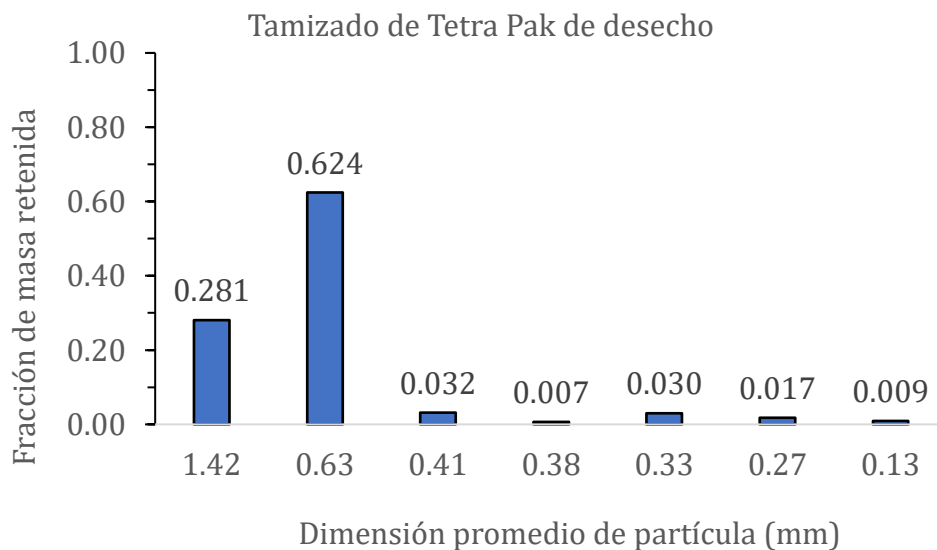


Figura 19. Tamaño de partícula de envases Tetra Pak de desecho.



### 3.1.1 Partículas de Tetra Pak. Microscopía electrónica de barrido.

En la figura 20 se muestran imágenes MEB de partículas de Tetra Pak de desecho sin irradiar. Dado que los envases Tetra Pak contienen seis capas, se tomaron imágenes de la parte interior, donde se localiza el aluminio (Figura 20A), y de la parte exterior donde se localiza el cartón (celulosa), mostrada por la figura 20B.

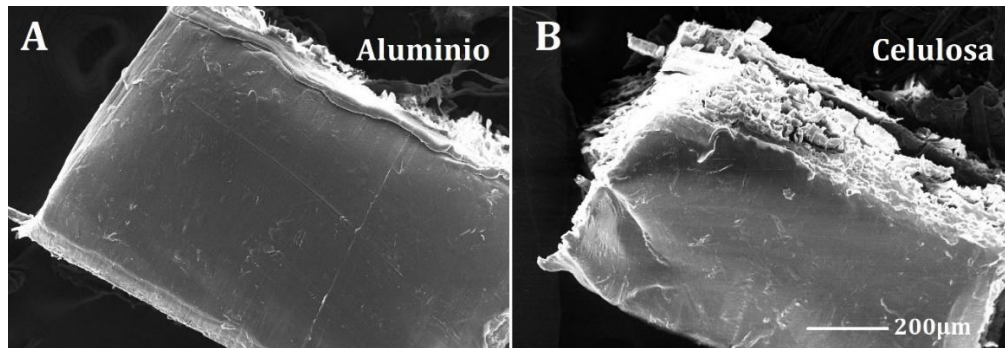


Figura 20. Imágenes MEB de partículas de envases Tetra Pak de desecho.

En la figura 21, se muestran acercamientos de las capas interior y exterior de las partículas de Tetra Pak. En la capa interior, figura 21A, donde se localiza el aluminio, se observa una superficie homogénea, sin regiones rugosas. Las zonas de mayor brillo corresponden al material de la siguiente capa, es decir, polietileno de baja densidad. Mientras que, en la capa exterior, figura 21B, se observan las capas de celulosa, de las cuales se desprenden filamentos de menor tamaño, además de mostrar una superficie más rugosa.

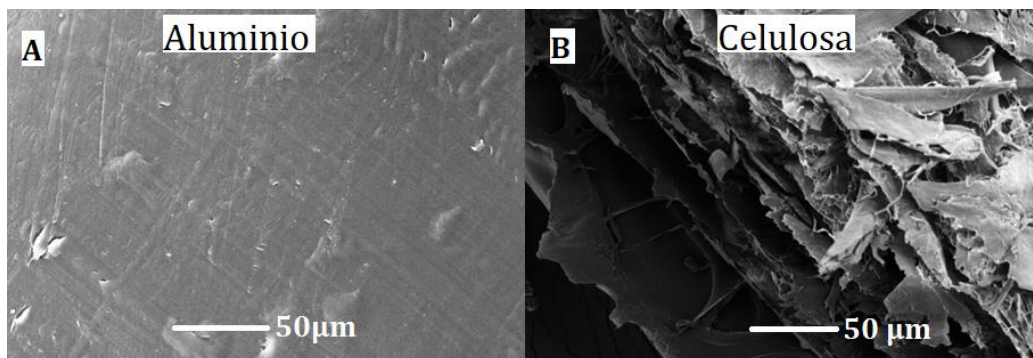


Figura 21. Imágenes MEB de las capas interior y exterior de partículas Tetra Pak.

### 3.1.2 Partículas de mármol. Microscopía electrónica de barrido.

En la figura 22, se muestran imágenes de partículas de mármol. Se observan diferentes formas de las partículas. Los tamaños varían entre 200 y 500  $\mu\text{m}$ , además de mostrar cierta rugosidad en la superficie de los granos.

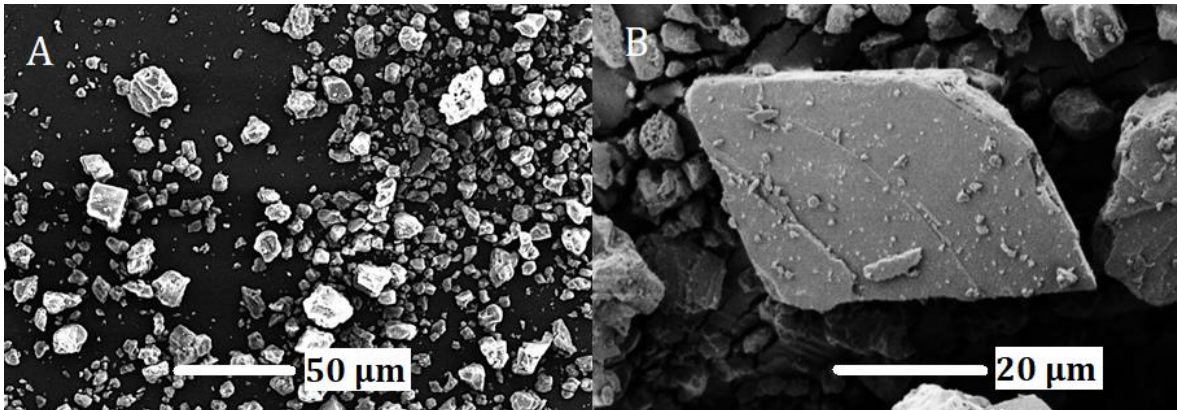


Figura 22. Imágenes MEB de partículas de mármol a una escala de: a)50 $\mu\text{m}$  y b)20 $\mu\text{m}$ .

### 3.2 Resistencia a la compresión y a la flexión de concretos

En la primera etapa del proyecto, se elaboraron diferentes formulaciones de concreto polimérico con resina poliéster y mármol, como se muestra en la tabla 12.

Tabla 12. Formulaciones de los concretos poliméricos.

<b>Probeta (Código)</b>	<b>Resina (%)</b>	<b>Mármol (%)</b>
20R/80M	20	80
25R/75M	25	75
30R/70M	30	70

Posteriormente, se llevaron a cabo las pruebas mecánicas de compresión y flexión en la máquina universal multiensayo marca Controls™, con capacidad de 30 toneladas. Las probetas antes y después de los ensayos de flexión se muestran en la figura 23.

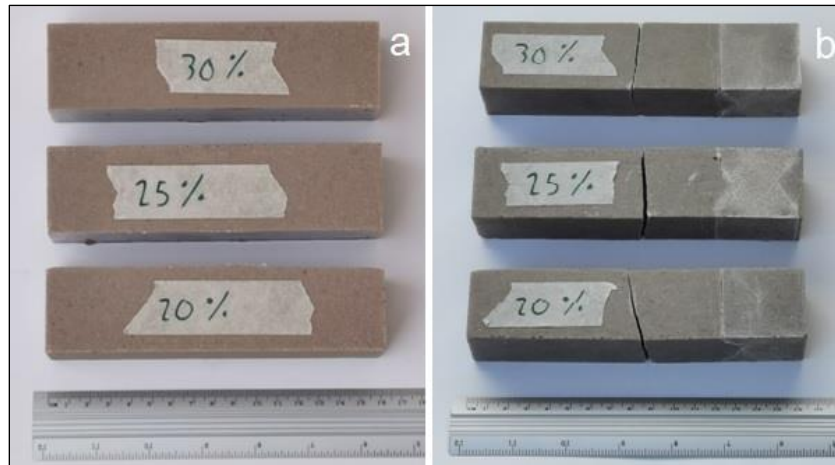


Figura 23. Probetas antes (a) y después (b) de las pruebas de compresión y flexión.

Los resultados del ensayo de compresión se muestran en la figura 24. Estos resultados se grafican con los valores de fuerza y posición proporcionados por la máquina de pruebas mecánicas.

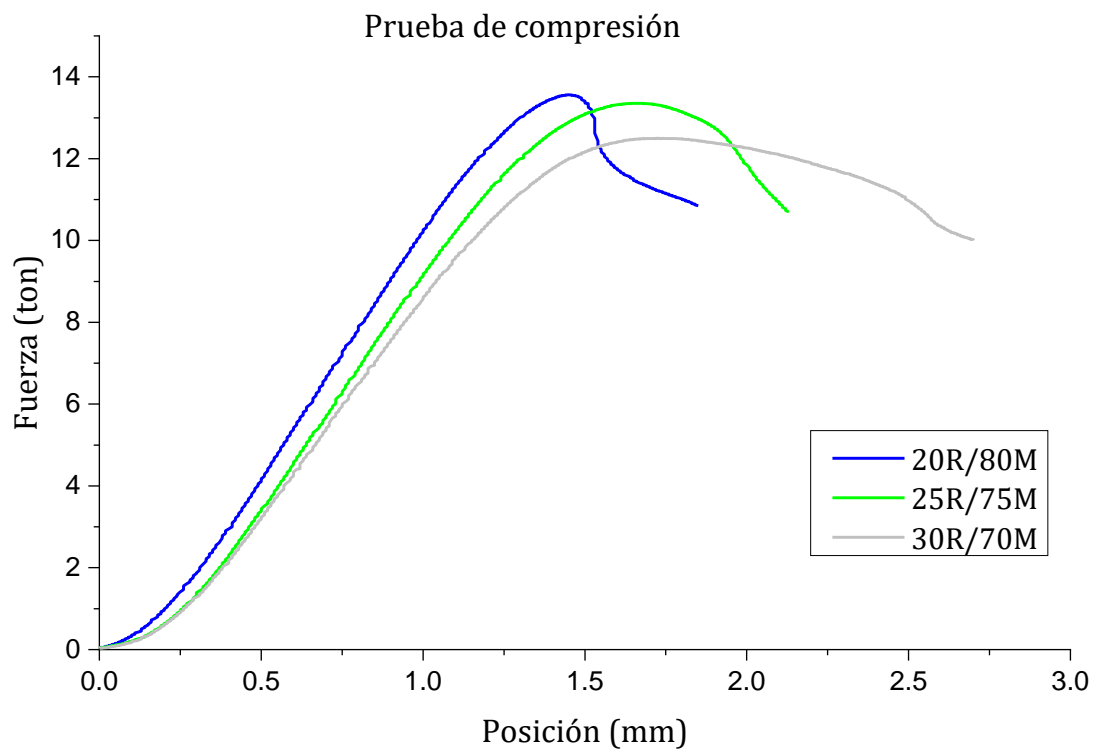


Figura 24. Curvas de Fuerza vs Posición de la prueba de compresión.



De los datos proporcionados por la gráfica de Fuerza vs posición, se obtuvieron los valores de resistencia máxima a la compresión, deformación en el punto máximo de resistencia, y el módulo de elasticidad, los cuales se muestran en la tabla 13.

Tabla 13. Propiedades mecánicas para la prueba de compresión.

<b>Concreto</b>	<b>Resistencia a la compresión (MPa)</b>	<b>Deformación (mm/mm)</b>	<b>Módulo de elasticidad (GPa)</b>
20R/80M	83.100	0.040	23.000
25R/75M	81.800	0.050	19.800
30R/70M	76.600	0.060	19.200

De la tabla 13 se observa que, la probeta 20R/80M, obtuvo el valor más alto para la resistencia a la compresión y para el módulo de elasticidad, 83.100 MPa y 23.00 GPa, respectivamente, pero obtuvo la menor deformación, 0.040 mm/mm. Por el contrario, la probeta 30R/70M obtuvo la menor resistencia a la compresión y el menor módulo de elasticidad, 76.600 MPa y 19.200 GPa, respectivamente, pero la mayor deformación, 0.06 mm/mm. Es decir, cuando se incrementa la cantidad de resina, la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad disminuyen, mientras que la deformación se incrementa. Esto sucede porque al haber una mayor cantidad de resina, el esfuerzo aplicado hace que las cadenas poliméricas de la resina experimenten un mayor movimiento de elongación en comparación con los granos de mármol, que solo presentan movimientos granulares. En este sentido, se observa que las probetas con 25 % de resina presentan valores intermedios para las tres propiedades de compresión estudiadas.

Los valores de Fuerza vs Posición para la prueba de flexión se muestran en la figura 25.

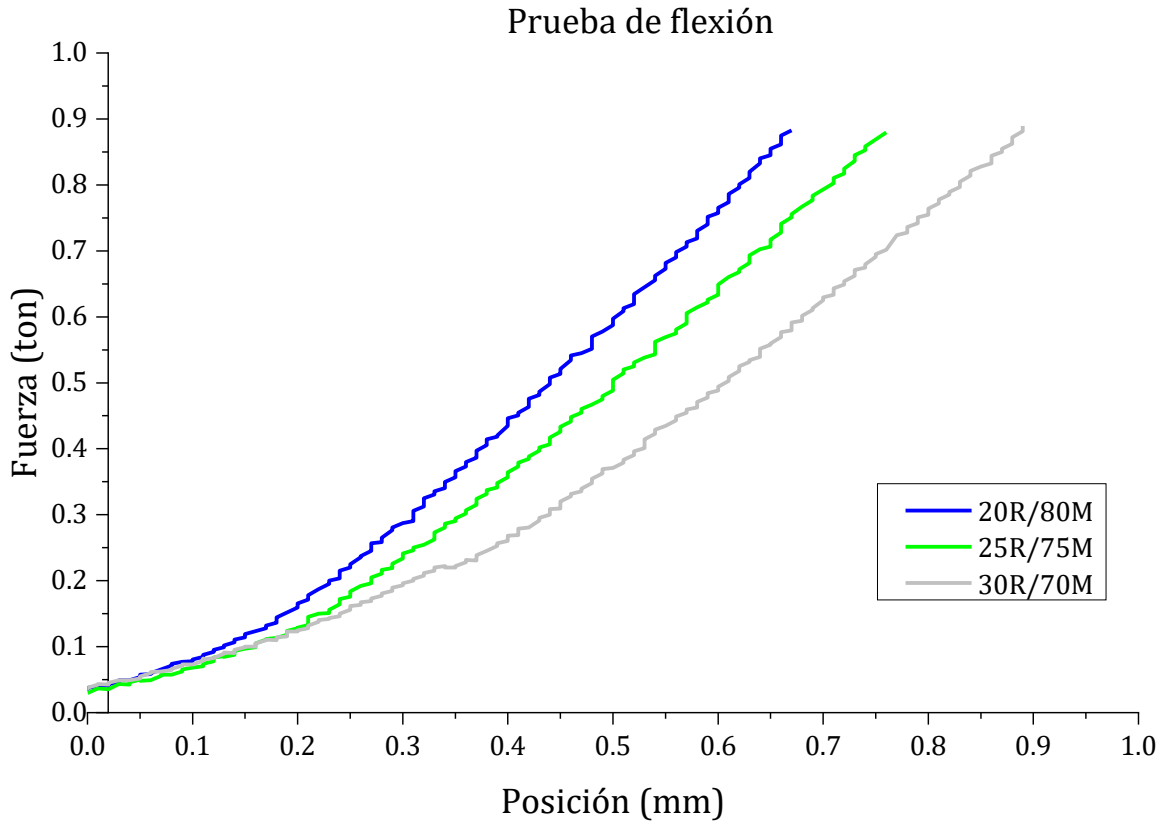


Figura 25. Curvas de Fuerza vs Posición de la prueba de flexión.

De los datos proporcionados por la gráfica 25. Fuerza vs Posición para la prueba de flexión, se obtuvieron los valores de resistencia a la flexión, deformación en el punto máximo de resistencia y el módulo de elasticidad, los cuales se muestran en la tabla 14.

Tabla 14. Propiedades mecánicas para la prueba de flexión.

Concreto	Resistencia a la flexión (MPa)	Deformación (mm/mm)	Módulo de elasticidad (GPa)
20R/80M	25.20	0.017	21.90
25R/75M	24.70	0.019	19.30
30R/70M	24.30	0.022	16.50

De la tabla 14, se observa que, la probeta 20R/80M obtuvo los valores de la resistencia a la flexión y el módulo de elasticidad más altos, 25.200 MPa y 21.900 GPa, respectivamente,

pero la deformación fue la más baja, con un valor de 0.017 mm/mm, mientras que, la probeta 30R/70M obtuvo los valores más bajos para la resistencia a la flexión y para el módulo de elasticidad, 24.300 MPa y 16.500 GPa, respectivamente, pero obtuvo el mayor valor de deformación, 0.022 mm/mm. Lo que infiere que, cuando se incrementa la cantidad de resina, la deformación se incrementa, pero la resistencia a la flexión y el módulo de elasticidad disminuyen. Por ende, la probeta 30R/70M, con mayor contenido de resina, logró deformarse más debido a la existencia de un mayor número de cadenas poliméricas presentes en la resina poliéster, la que hace que el material logre deformar elásticamente en mayor medida a causa del movimiento de estas cadenas poliméricas. De igual manera que en la prueba de compresión, se observa que las probetas con 25 % de resina presentan valores intermedios para las tres propiedades de flexión estudiadas.

De acuerdo con los comportamientos obtenidos para ambas pruebas mecánicas, compresión y flexión, en la segunda etapa del proyecto, se decidió utilizar la formulación de 25 % de resina y 75 % de mármol para la elaboración de los concretos, a los cuales se les agregaron partículas de Tetra Pak y fueron expuestos a rayos gamma, pues dicha fórmula logra equilibrar los valores de las tres propiedades mecánicas estudiadas.

### **3.3 Concretos con partículas de Tetra Pak**

En esta sección se lleva a cabo el estudio de las propiedades mecánicas de compresión y de flexión de las probetas con partículas de Tetra Pak.

En la tabla 15 se muestran las concentraciones de los materiales empleados en la elaboración de los concretos. En estos, las partículas de Tetra Pak sustituyeron parcialmente la cantidad de mármol. Se elaboraron tres probetas para cada formulación.

Tabla 15. Formulaciones de los concretos con partículas de Tetra Pak.

<b>Probeta (Código)</b>	<b>Resina (%)</b>	<b>Mármol (%)</b>	<b>Tetra Pak (%)</b>
25R/75M	25	75	0
25R/74M/1T	25	74	1
25R/73M/2T	25	73	2
25R/72M/3T	25	72	3

### 3.3.1 Resistencia a la compresión y a la flexión de concretos con partículas de Tetra Pak

En la tabla 16 y en la figura 26 se muestran los valores de la resistencia a la compresión y a la flexión de las probetas de concreto polimérico con partículas de Tetra Pak.

De acuerdo con la tabla 16, los resultados obtenidos muestran que, los valores de resistencia a la compresión disminuyen conforme aumenta la cantidad de Tetra Pak de desecho. El valor para concreto sin Tetra Pak es de 88.310 MPa, el cual disminuye 5 % para concreto con 3 % de Tetra Pak. Esta disminución se debe a la distribución de esfuerzos que tienen el Tetra Pak sobre la resina y el mármol. Los polímeros contenidos en el Tetra Pak (celulosa y polietileno), disminuyen los esfuerzos junto con la resina, haciendo que la resistencia disminuya.

Tabla 16. Resultados de resistencias mecánicas para las pruebas de compresión y flexión para concretos con partículas de Tetra Pak.

<b>Ensayo Probeta (Código)</b>	<b>Compresión</b>		<b>Flexión</b>	
	Resistencia (MPa)	Er± 5%	Resistencia (MPa)	Er± 5%
<b>25R/75M</b>	88.310	4.4155	27.080	1.354
<b>25R/74M/1T</b>	86.040	4.302	28.397	1.420
<b>25R/73M/2T</b>	84.060	4.203	28.000	1.400
<b>25R/72M/3T</b>	83.640	4.182	26.400	1.320

Para el caso de la resistencia a la flexión, de la misma tabla 16, el valor para el concreto 25R/75M, sin Tetra Pak, es de 27.080 MPa, el cual aumenta hasta 28.397 MPa, lo que significa un aumento del 5 % para concreto con 1 % de Tetra Pak. Este ligero aumento se debe a que los polímeros del Tetra Pak (75 % de celulosa y 20 % de polietileno), actúan como materiales flexibles y como consecuencia incrementan la resistencia a la flexión. Sin embargo, cuando se agregan un 3 % de partículas de Tetra Pak, el valor disminuye solo un 3 % (26.400 MPa) respecto al valor del concreto control. Es decir, mayor cantidad de partículas de Tetra Pak produce aglomeración, lo que hace que en el concreto se produzca un mayor número de grietas, que hacen disminuir la flexión.

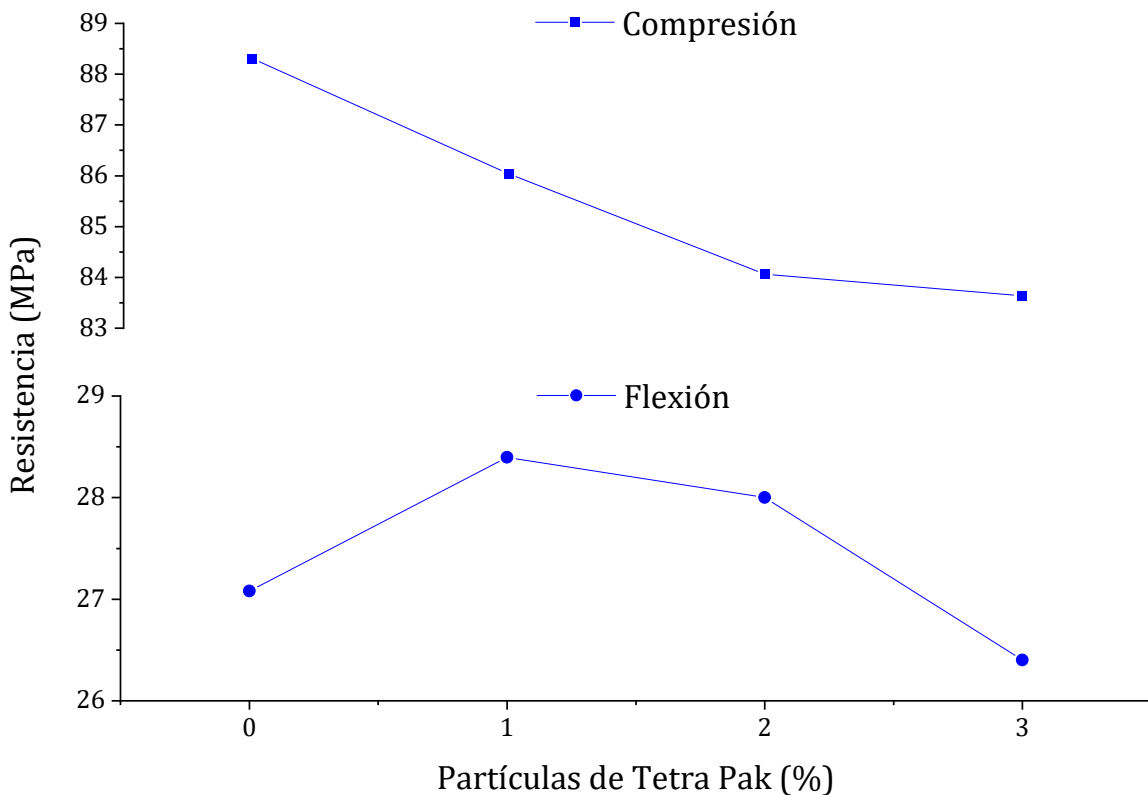


Figura 26. Resistencia a la compresión y a la flexión de probetas de concreto polimérico con partículas de Tetra Pak de desecho.

### 3.3.2 Deformación en el punto de cedencia de concretos con partículas de Tetra Pak

Los resultados de la deformación en el punto de cedencia para la prueba de compresión y flexión se muestran en la tabla 17 y en la figura 27.

Conforme a la tabla 17, para la prueba de compresión los valores de la deformación en el punto de cedencia disminuyen conforme se incrementa la cantidad de partículas de Tetra Pak, siendo el menor valor de 0.039 mm/mm, cuando se agrega el 2 % de partículas, el cual es tan solo un 5 % menor que el valor del concreto sin partículas 0.041 mm/mm. Tal ligera disminución en la deformación se debe a una menor transferencia de esfuerzos de las partículas de Tetra Pak con el mármol y la resina.

Tabla 17. Resultados de deformaciones en el punto de cedencia para las pruebas de compresión y flexión para concretos con partículas de Tetra Pak.

<b>Ensayo Probeta (Código)</b>	<b>Compresión</b>		<b>Flexión</b>	
	Deformación (mm/mm)	Er± 5%	Deformación (mm/mm)	Er± 5%
<b>25R/75M</b>	0.041	0.002	0.022	0.001
<b>25R/74M/1T</b>	0.040	0.002	0.021	0.001
<b>25R/73M/2T</b>	0.039	0.002	0.020	0.001
<b>25R/72M/3T</b>	0.040	0.002	0.020	0.001

Para los valores de la deformación en el punto de cedencia por flexión, la deformación disminuye gradualmente conforme se incrementa la cantidad de partículas de Tetra Pak. El concreto control tuvo un valor de 0.022 mm/mm, y disminuyó hasta 0.020 mm/mm, es decir un 9 %. Esto sucede porque, al estar las partículas de Tetra Pak dispersadas aleatoriamente en el concreto polimérico, su deformación se ve interrumpida por las partículas de mármol que las rodean. Además de existir menor transferencia de esfuerzos entre las partículas de Tetra Pak y la resina.

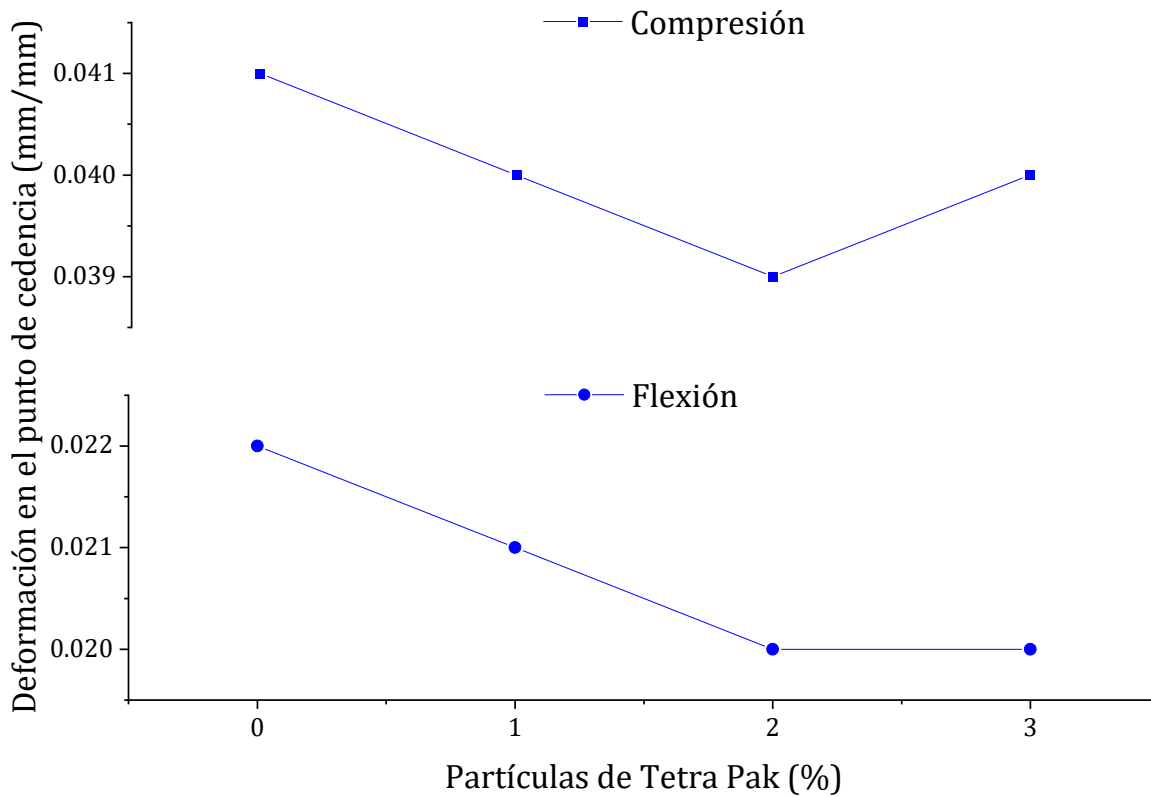


Figura 27. Deformación en el punto de cedencia, por compresión y flexión, del concreto polimérico con partículas de Tetra Pak.

### 3.3.3 Módulo de elasticidad de concretos con partículas de Tetra Pak

Los valores del módulo de elasticidad obtenidos de los ensayos de compresión y flexión se muestran en la tabla 18 y en la figura 28.

Tabla 18. Resultados del módulo de elasticidad para las pruebas de compresión y flexión para concretos con partículas de Tetra Pak.

Ensayo Probeta (Código)	Compresión		Flexión	
	Módulo de elasticidad (Gpa)	Er± 5%	Módulo de elasticidad (Gpa)	Er± 5%
25R/75M	21.540	1.077	18.480	0.924
25R/74M/1T	21.510	1.076	19.660	0.983
25R/73M/2T	21.550	1.078	20.900	1.045
25R/72M/3T	20.910	1.046	19.390	0.970

De acuerdo con la tabla 18, los valores del módulo de elasticidad en compresión son casi constantes para el concreto control, como para el que tiene 1 y 2 % de partículas de Tetra Pak (de 21.510 a 21.550 GPa), pero para 3 % de partículas, los valores disminuyen un 3 % con respecto al valor del concreto control de 21.540 GPa. Con estos valores, se deduce que, las concentraciones seleccionadas de Tetra Pak permiten mantener los valores del módulo de elasticidad. Mientras que el valor del módulo de elasticidad en flexión para el concreto control fue de 18.480 GPa, el cual aumentan 13 % cuando se agregan 2 % de partículas de Tetra Pak, a un valor de 20.900 GPa. Es decir, el concreto en la prueba de flexión, se vuelve más rígido por la presencia de las partículas.

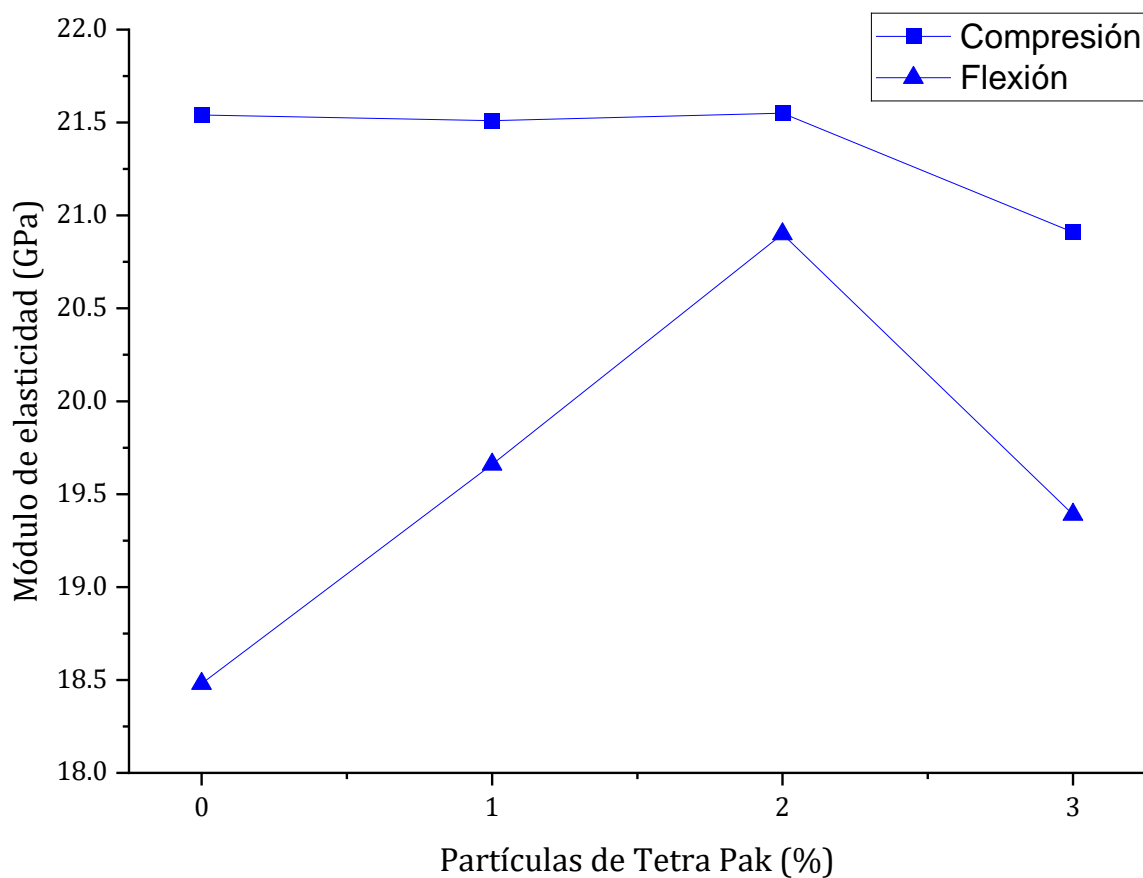


Figura 28. Módulo de elasticidad por compresión y por flexión de concreto polimérico con partículas de Tetra Pak.



### 3.4 Efectos de la radiación gamma en concreto polimérico

En esta sección, se muestran los resultados de las pruebas de compresión y flexión aplicadas a las probetas de concreto polimérico con partículas de Tetra Pak expuestas a la radiación gamma.

Dado que los concretos 25R/73M/2T fueron los que tuvieron mayores valores de resistencia a la flexión y de módulo de elasticidad, estos se eligieron para ser expuestos a la radiación gamma. Es decir, se elaboraron probetas con 2 % de partículas de Tetra Pak, 73 % de mármol y 25 % de resina. Dichos concretos fueron expuestos a dosis de radiación gamma igual a 100, 200, 300, 400 y 500 kGy. Para cada dosis se elaboraron tres probetas.

Algunas probetas a las diferentes radiaciones antes y después de los ensayos de compresión y flexión se muestran en la figura 29. El resto de las imágenes se muestran en el Anexo 2.

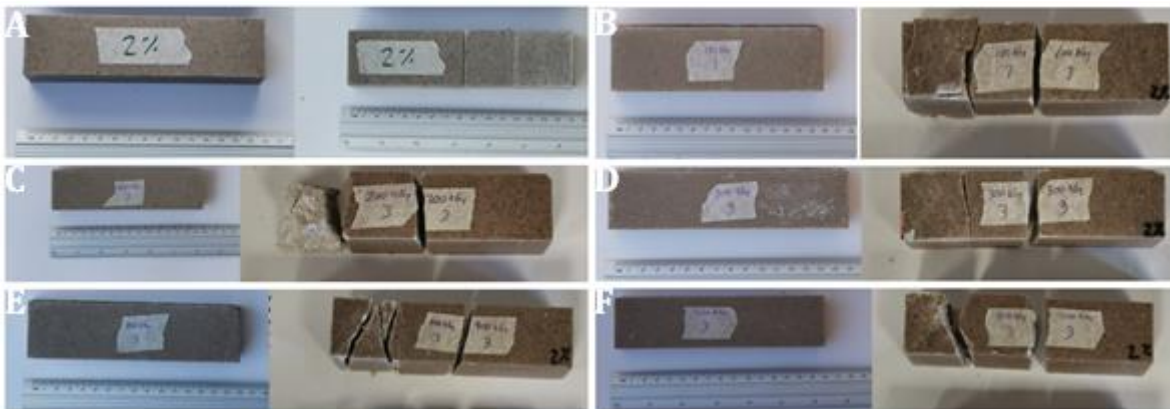


Figura 29. Probetas a dosis de rayos gamma de a) 0 kGy, b) 100 kGy, c) 200 kGy, d) 300 kGy, e) 400 kGy y f) 500 kGy, antes y después de las pruebas mecánicas.

#### 3.4.1 Resistencia a la compresión y a la flexión de concretos con partículas de Tetra Pak e irradiados

Los valores de resistencia a la compresión y flexión para concretos con partículas de Tetra Pak e irradiados se muestran en la tabla 19 y en la figura 30.

Tabla 19. Resultados de resistencias mecánicas para las pruebas de compresión y flexión para concretos con partículas de Tetra Pak e irradiados.

<b>Ensayo Dosis (kGy)</b>	<b>Compresión</b>		<b>Flexión</b>	
	Resistencia (MPa)	Er± 5%	Resistencia (MPa)	Er± 5%
<b>0</b>	84.060	4.203	28.000	1.400
<b>100</b>	110.445	5.522	32.070	1.604
<b>200</b>	108.943	5.447	32.560	1.628
<b>300</b>	109.023	5.451	31.360	1.568
<b>400</b>	108.127	5.406	32.040	1.602
<b>500</b>	109.801	5.490	32.070	1.604

De acuerdo con la tabla 19, el valor de la resistencia a la compresión para el concreto sin irradiar fue de 84.060 MPa, el cual incrementó hasta valores entre 108.127 MPa y 110.445 MPa. El valor máximo de resistencia a la compresión, obtenido a una dosis de 100 kGy, fue 31 % mayor que el concreto sin irradiar. Estos incrementos se debieron a los efectos de la radiación, específicamente a la reticulación de las cadenas poliméricas en la resina poliéster y en la celulosa y el polietileno contenidos en las partículas de Tetra Pak. La reticulación permitió mejorar la transferencia de esfuerzos entre la matriz y los agregados del concreto polimérico.

En el caso de la resistencia a la flexión, se observa un aumento de los valores para todas las dosis de radiación gamma utilizadas. Valores que van desde 31.360 MPa hasta 32.560 MPa, es decir, sin mucha variación entre ellos. El máximo valor de 32.560 MPa, se obtuvo exponiendo el concreto a una dosis de 200 kGy; el cual es 16 % mayor que el obtenido para concreto sin irradiar. El incremento en la resistencia a la flexión se debe a la reticulación de las cadenas poliméricas producida por los rayos gamma en la resina poliéster y las partículas de Tetra Pak. Esto produce una mayor transferencia de esfuerzos entre los componentes del concreto.

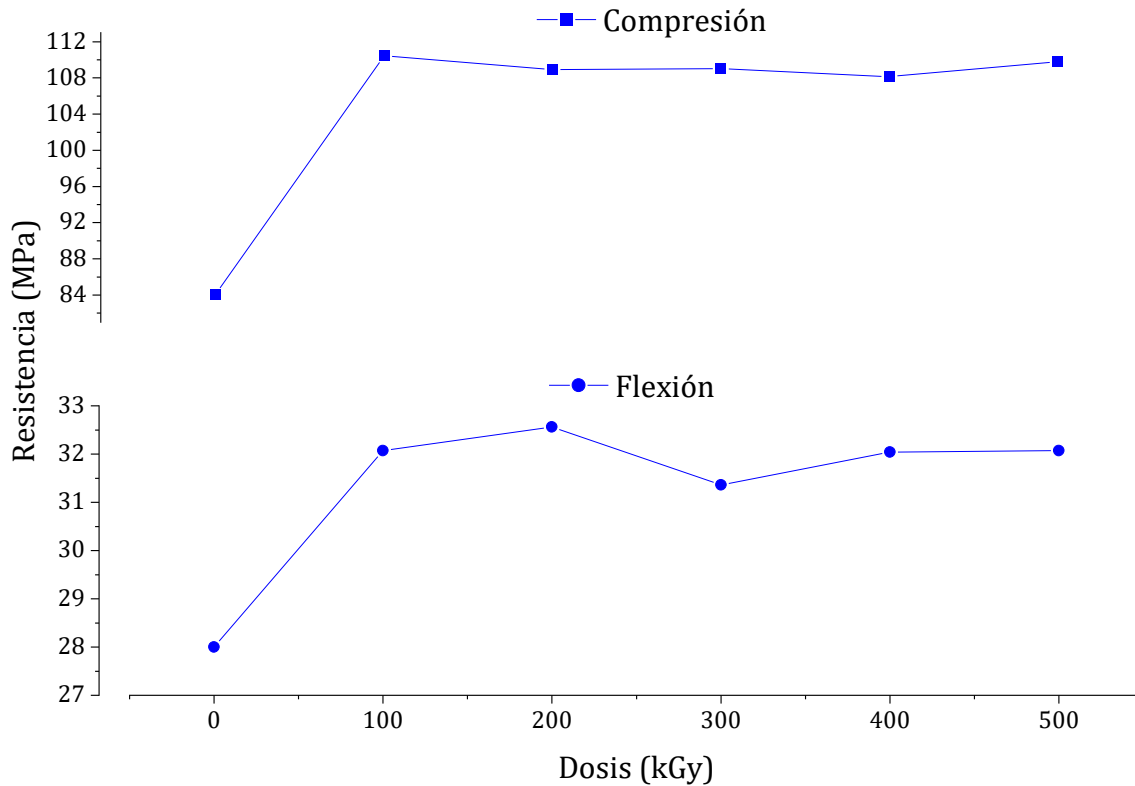


Figura 30. Resistencia a la compresión y a la flexión de concreto con 2 % de partículas de Tetra Pak e irradiados a diferentes dosis.

### 3.4.2 Deformación en el punto de cedencia de concretos con partículas de Tetra Pak e irradiados

Los resultados de la deformación en el punto de cedencia para las pruebas de compresión y flexión de los concretos con partículas de Tetra Pak e irradiados se muestran en la tabla 20 y en la figura 31.

Tabla 20. Resultados de deformaciones en el punto de cedencia para las pruebas de compresión y flexión para concretos con partículas de Tetra Pak e irradiados.

Ensayo Dosis (kGy)	Compresión		Flexión	
	Deformación (mm/mm)	Er± 5%	Deformación (mm/mm)	Er± 5%
0	0.039	0.002	0.020	0.001
100	0.044	0.002	0.018	0.001
200	0.044	0.002	0.018	0.001

<b>300</b>	0.042	0.002	0.018	0.001
<b>400</b>	0.043	0.002	0.018	0.001
<b>500</b>	0.044	0.002	0.018	0.001

Respecto al concreto sin irradiar, cuyo valor es de 0.039 mm/mm, los valores de deformación en el punto de cedencia de la prueba de compresión se incrementan hasta 0.044 mm/mm, significando un 13 % de aumento. De nueva cuenta, este incremento es debido a la reticulación de cadenas poliméricas, causada por la radiación gamma. Esto permite disminuir la propagación de los esfuerzos, y en consecuencia de las grietas, logrando mejorar los valores de la deformación.

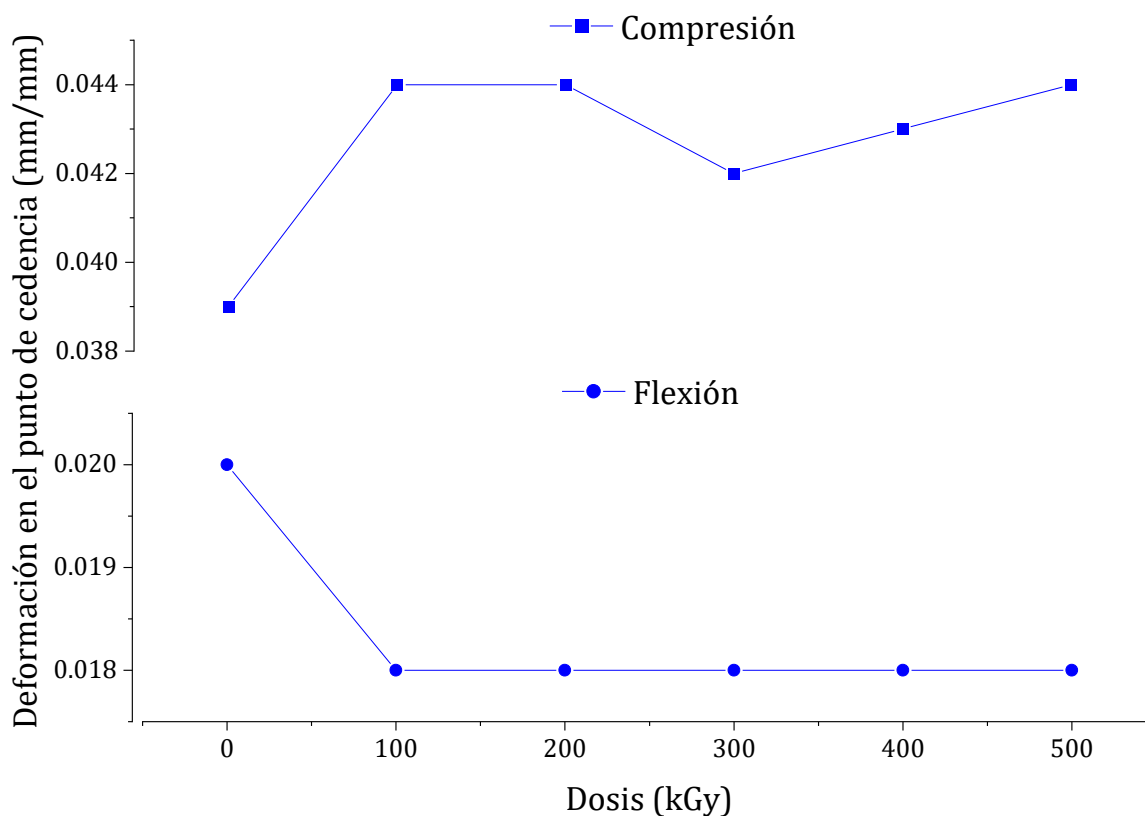


Figura 31. Deformación en el punto de cedencia para concretos con 2 % de partículas de Tetra Pak e irradiados a diferentes dosis.

En el caso de la prueba de flexión, las deformaciones en el punto de cedencia obtenidas para concretos expuestos a la radiación gamma, muestran valores constantes, de 0.018 mm/mm,

lo cual significa una disminución del 10 % en los valores respecto a los concretos sin irradiar (0.020). Los rayos gamma producen reticulación de las cadenas poliméricas e incrementan el grado de cristalización, haciendo que la deformación disminuya.

### 3.4.3 Módulo de elasticidad de concretos con partículas de Tetra Pak e irradiados

Los resultados de los valores de los módulos de elasticidad de las pruebas de compresión y flexión se muestran en la tabla 21 y en la figura 32.

Tabla 21. Resultados de módulo de elasticidad para las pruebas de compresión y flexión para concretos con partículas de Tetra Pak e irradiados.

Ensayo Dosis (kGy)	Compresión		Flexión	
	Módulo de elasticidad (Gpa)	Er± 5%	Módulo de elasticidad (Gpa)	Er± 5%
0	21.550	1.078	20.900	1.045
100	29.640	1.482	26.700	1.335
200	29.940	1.497	26.850	1.343
300	29.820	1.491	26.500	1.325
400	29.790	1.490	27.080	1.354
500	29.460	1.473	27.490	1.375

De la tabla 21 se observa que, para la prueba de compresión, los valores del módulo de elasticidad para los concretos irradiados a diferentes dosis de rayos gamma, son casi constantes, pues van desde un valor de 29.640 GPa a 29.940 GPa. El máximo valor, de 29.940 GPa, fue obtenido por el concreto expuesto a 200 kGy, el cual es un 39 % mayor que el de concreto sin irradiar (21.550 GPa). Los incrementos en el módulo de elasticidad fueron debidos a la reticulación de las cadenas poliméricas presentes en la resina poliéster y en la celulosa y polietileno de las partículas del Tetra Pak de desecho.

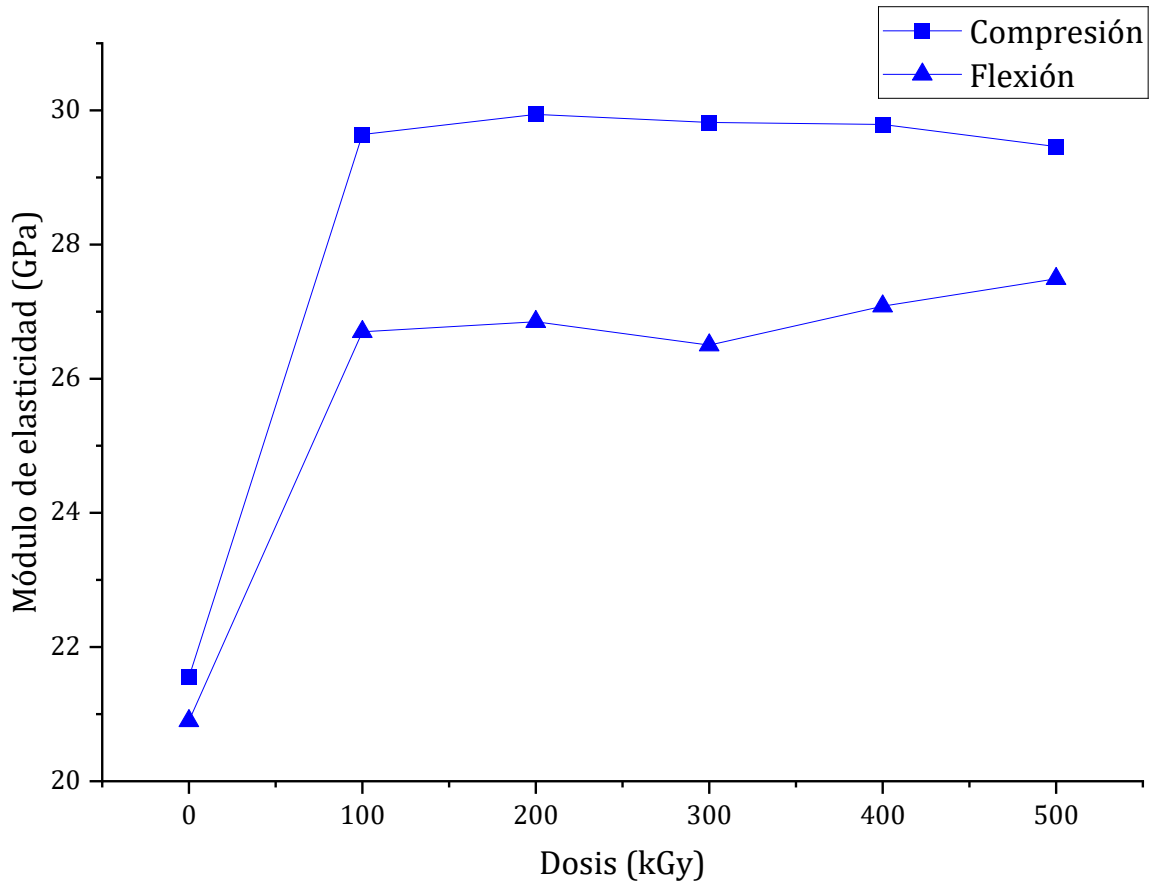


Figura 32. Módulo de elasticidad en compresión y flexión de concretos con 2 % de partículas de Tetra Pak e irradiados a diferentes dosis.

Para la prueba de flexión, los valores del módulo de elasticidad para los concretos irradiados van desde 26.500 GPa hasta 27.490 GPa, es decir, tuvieron valores cercanos entre ellos. El máximo valor se obtuvo exponiendo el concreto polimérico con partículas de tetra Pak a 500 kGy, siendo de 27.490 GPa, el cual es 31 % mayor que el obtenido para el concreto sin irradiar (20.900 GPa). Con este valor máximo, se entiende que, este concreto logró mejorar la reticulación de cadenas poliméricas en comparación con el resto de los concretos irradiados en la misma prueba de flexión.

#### 3.4.4 Concreto polimérico irradiado. Microscopía electrónica de barrido.

En la figura 33, se muestran imágenes MEB de concreto polimérico irradiado a dosis de 100 a 500 kGy, a una escala de 20  $\mu\text{m}$ .

En el concreto control (figura 33A), se observa una superficie homogénea, con una buena adhesión entre la resina y los agregados. Esta superficie se va modificando conforme se incrementa la dosis de radiación. Se aumenta la rugosidad en la resina poliéster, debido al fenómeno de reticulación de las cadenas poliméricas producido por los rayos gamma. Esto permite, que se mejore la transferencia de esfuerzos de entre la resina poliéster, el mármol y partículas de Tetra Pak. Lo que produce un concreto más resistente, con un mayor módulo de elasticidad elástico y menor deformación.

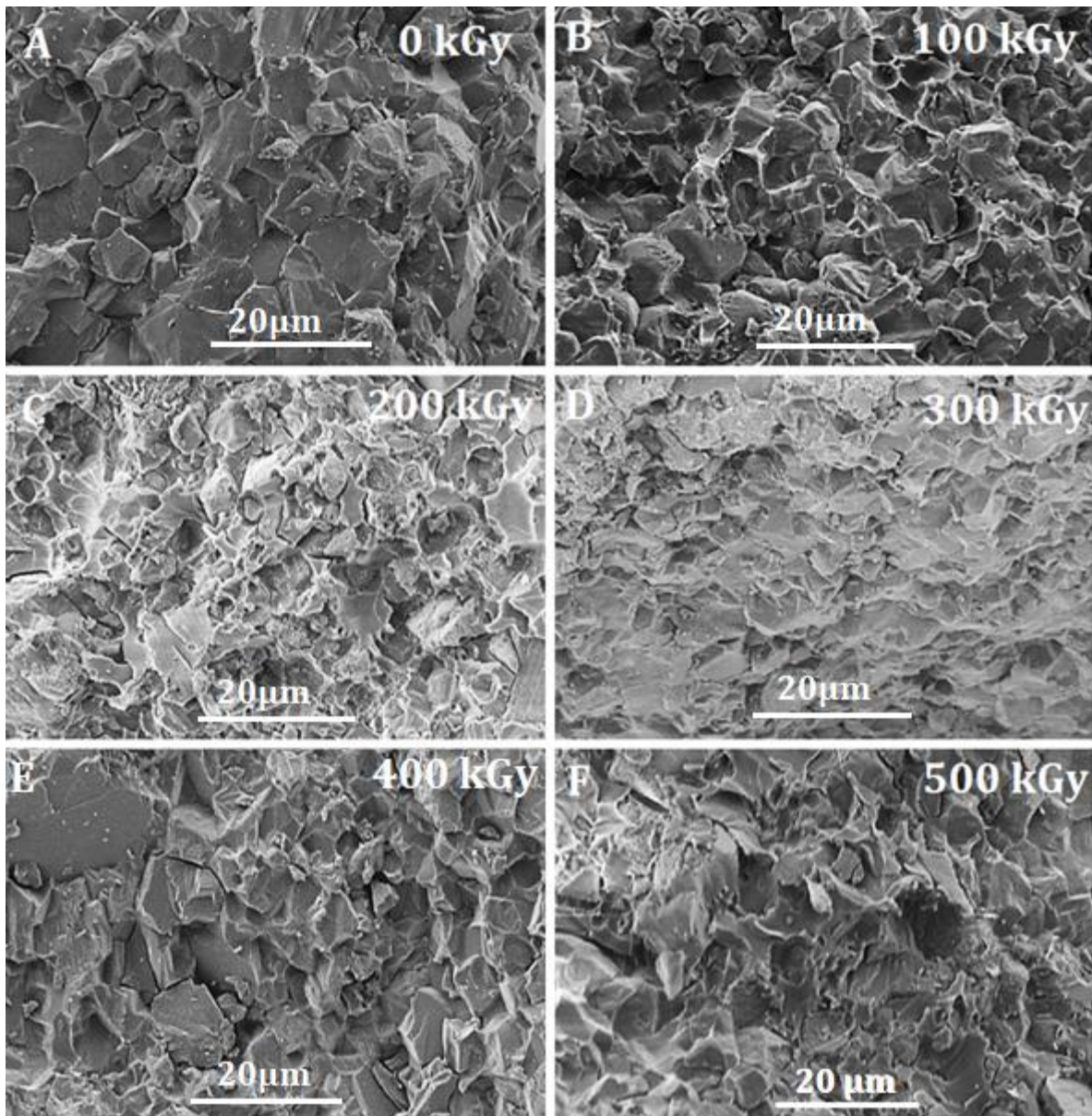


Figura 33. Imágenes MEB de concreto polimérico irradiado a diferentes dosis: a) 0 kGy, b) 100 kGy, c) 200 kGy, d) 300 kGy, e) 400 kGy y f) 500 kGy.

En la figura 34, se muestra los efectos de la radiación gamma en las propiedades de resistencia, deformación en el punto de cedencia y módulo elástico, para las pruebas de flexión y compresión para el concreto con fórmula 25R/73M/2T a 100 kGy de radiación. De las tres propiedades mecánicas estudiadas, se observa un mayor incremento para el módulo elástico, y el menor para la deformación en el punto de cedencia. Así como mayor efecto significativo para la prueba de compresión, por parte de la radiación gamma.

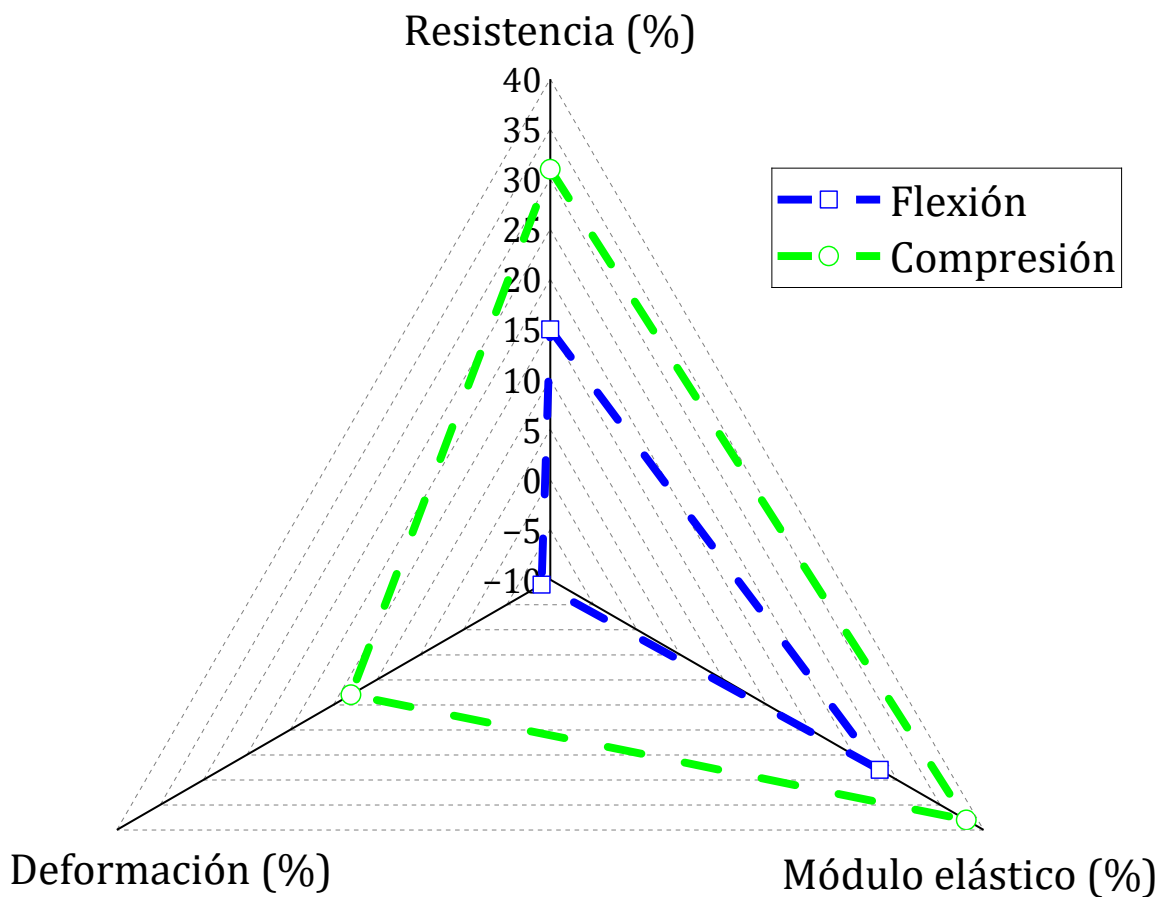


Figura 34. Resultados de la radiación gamma en las pruebas de compresión y flexión.

### 3.5 Concreto polimérico con tres tamaños de partículas de Tetra Pak

Para la elaboración de este tipo de concretos se realizaron las siguientes actividades:

- Corte de los envases Tetra Pak de desecho, en tres tamaños diferentes.
- Elaboración de probetas con resina, mármol y 1 % de partículas de Tetra Pak de desecho.



- Ensayo mecánico de flexión y compresión.
- Obtención de valores de resistencia, módulo elástico y porcentaje de deformación.

Las cantidades en porcentaje de cada material usado en la elaboración del concreto se muestran en la tabla 22.

Tabla 22. Cantidades de los componentes del concreto polimérico.

Resina (%)	Mármol (%)	Tetra Pak (%)
25	74	1

Los tamaños de las partículas de Tetra Pak de desecho fueron:

- 1x 0.63 mm, a los cuales se les denominó con la letra S, de la palabra Small.
- 3x3 mm, a los cuales se les denominó con la letra M, de la palabra Medium.
- 5x5 mm, a los cuales se les denominó con la letra L, de la palabra Large.

La figura 35, muestra imágenes de las partículas de Tetra Pak de desecho de los tres tamaños.

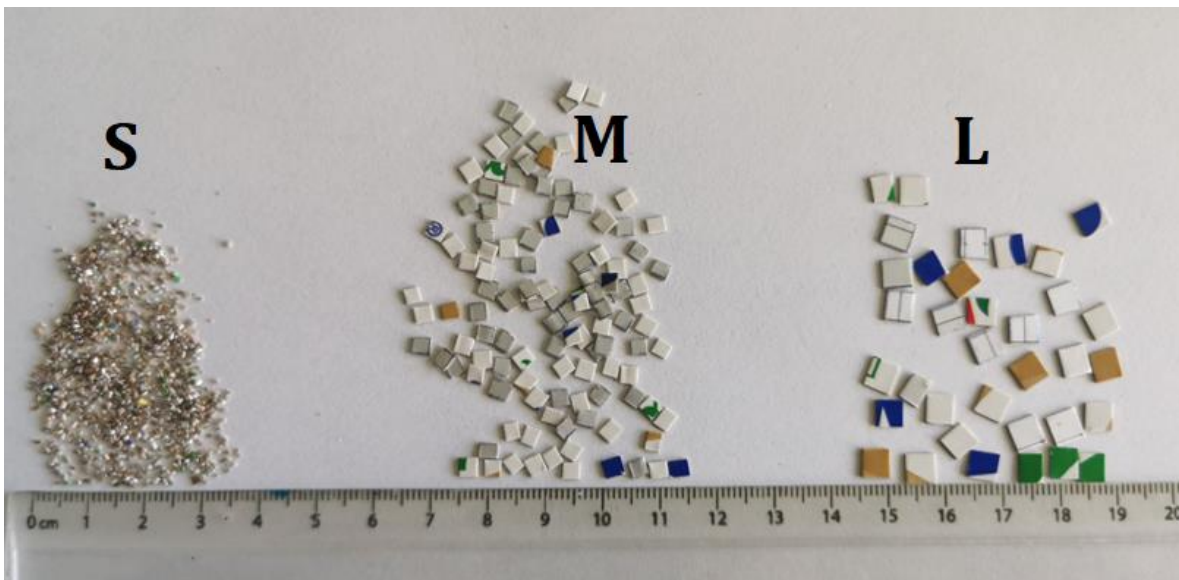


Figura 35. Partículas de Tetra Pak de desecho en tres tamaños distintos.

En esta experimentación, se realizaron concretos variando la concentración de las partículas de Tetra Pak, como se muestra en la tabla 23. Por ejemplo, el concreto denominado “S100” se refiere aquel que tuvo solo 1 % de partículas tamaño pequeño (S: Small), mientras que la combinación de partículas S33/M33/L33, tuvo 0.33 % de partículas de tamaño “S”, 0.33 % de tamaño “M” y 0.33 % de tamaño “L”.

Tabla 23. Formulaciones y cantidades de Tetra Pak de desecho utilizado en los concretos con tres tamaños de partículas de Tetra Pak.

Probeta	Tetra Pak utilizado		
	S %	M %	L %
CONTROL	—	—	—
S100	1	—	—
M100	—	1	—
L100	—	—	1
S33/M33/L33	0.33	0.33	0.33
S50/M33/L17	0.50	0.33	0.17
S50/M17/L33	0.50	0.17	0.33
S33/M50/L17	0.33	0.50	0.17
S17/M50/L33	0.17	0.50	0.33
S33/M17/L50	0.33	0.17	0.50
S17/M33/L50	0.17	0.33	0.50

En el Anexo 2, se muestran las imágenes de las probetas de concreto con partículas de diferentes tamaños, así como imágenes de estas después de su sometimiento a las pruebas mecánicas de compresión y flexión.

### 3.5.1 Resistencia a la compresión y flexión de concretos con tres tamaños de partículas de Tetra Pak

Los resultados obtenidos para la resistencia a la compresión y flexión de concretos con tres tamaños de partículas de Tetra Pak se presentan en la tabla 24 y en la figura 36.

Tabla 24. Resistencia a la compresión y flexión de concretos con tres tamaños de partículas de Tetra Pak.

Probeta	Tetra Pak utilizado			Ensayo			
	S	M	L	Compresión		Flexión	
	%	%	%	Resistencia (MPa)	Er ± 5%	Resistencia (MPa)	Er ± 5%
<b>CONTROL</b>	—	—	—	88.310	4.415	27.080	1.354
<b>S100</b>	1	—	—	86.040	4.302	28.405	1.420
<b>M100</b>	—	1	—	82.814	4.140	26.713	1.335
<b>L100</b>	—	—	1	78.110	3.906	25.600	1.280
<b>S33M33L33</b>	0.33	0.33	0.33	85.657	4.283	26.689	1.334
<b>S50M33L17</b>	0.5	0.33	0.17	90.974	4.549	27.300	1.365
<b>S50M17L33</b>	0.5	0.17	0.33	86.447	4.322	25.744	1.287
<b>S33M50L17</b>	0.33	0.5	0.17	90.040	4.502	26.186	1.309
<b>S17M50L33</b>	0.17	0.5	0.33	86.421	4.321	27.833	1.392
<b>S33M17L50</b>	0.33	0.17	0.5	90.349	4.517	27.283	1.364
<b>S17M33L50</b>	0.17	0.33	0.5	82.707	4.135	24.478	1.224

De la tabla 24, se observa que, el valor de la resistencia a la compresión para el concreto control es de 88.310 MPa. En el caso de concretos con un solo tamaño de partícula de Tetra Pak, se observa que los valores son menores a los del concreto control, más aún, la resistencia a la compresión disminuye conforme se incrementa el tamaño de partícula, como lo demuestran los concreto “M100” y “L100”. Mientras que, los valores de la resistencia a la compresión de concretos con partículas de Tetra Pak de tamaños diferentes se mejoran solo un poco con respecto al del concreto control, ya que presentan un valor máximo de 90.974 MPa cuando se utiliza la combinación S50/M33/L17, el cual es solo un 3 % mayor que la del control.

Con respecto a la resistencia a la flexión, el concreto control tuvo 27.080 MPa de resistencia. Se observa que los concretos con un solo tamaño de partícula de Tetra Pak, tienen mayor resistencia que las del concreto control, pero estos valores disminuyen conforme se incrementa el tamaño de partícula. El mayor valor (28.405 MPa) es del concreto con partículas pequeñas (S), que es 5 % mayor que el del concreto control. Mientras que los concretos con tamaños diferentes de partículas, tiene un máximo valor cuando se utiliza la combinación S17/M50/L33, siendo de 27.833 MPa. Estos incrementos, son resultado de

una mejora de la transferencia de esfuerzos entre la resina y los agregados (mármol y Tetra Pak).

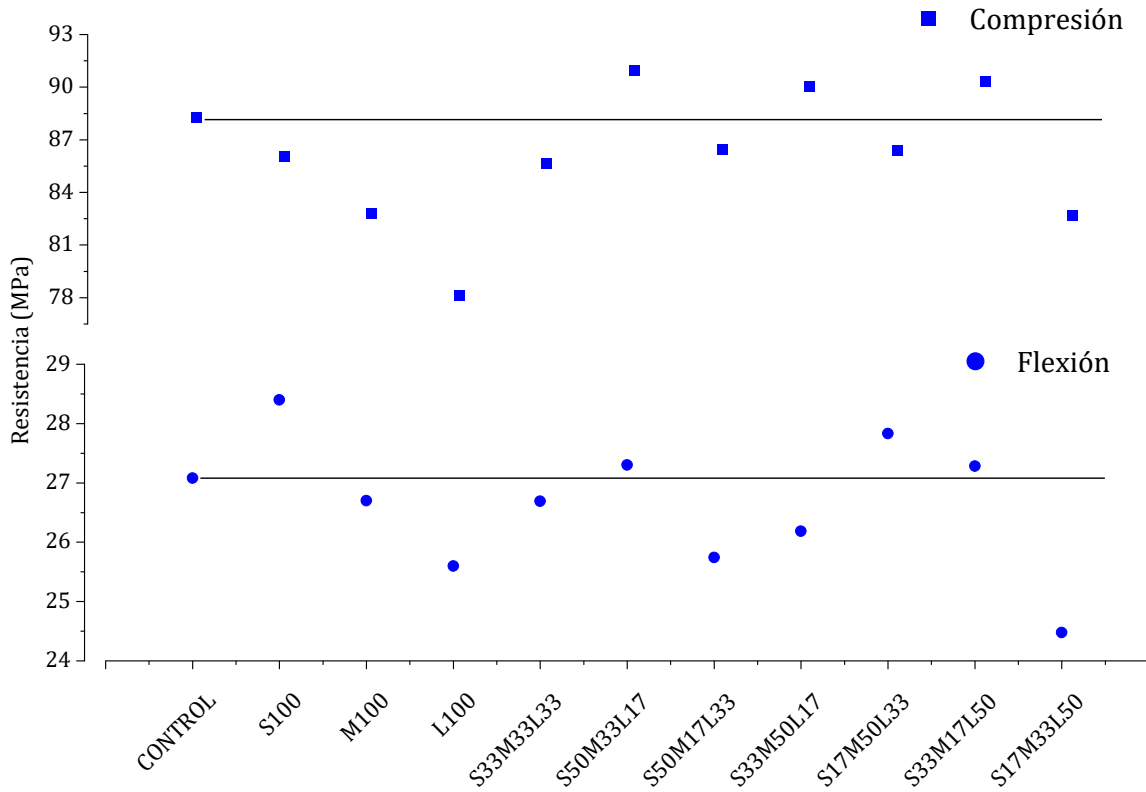


Figura 36. Resistencia a la compresión y flexión de concretos con partículas de Tetra Pak de diferentes tamaños.

### 3.5.2 Deformación en el punto de cedencia de concretos con tres tamaños de partículas de Tetra Pak

Los resultados para la propiedad de deformación en el punto de cedencia en compresión y flexión se muestran en la tabla 25 y en la figura 37.

Tabla 25. Resultados de deformaciones en el punto de cedencia para las pruebas de compresión y flexión para concretos con diferentes tamaños de partículas de Tetra Pak.

Probeta	Tetra Pak utilizado			Ensayo			
	S %	M %	L %	Compresión Deformación (mm/mm)	Er ± 5%	Flexión Deformación (mm/mm)	Er ± 5%
<b>CONTROL</b>	—	—	—	0.041	0.002	0.022	0.001
<b>S100</b>	1	—	—	0.040	0.002	0.021	0.001
<b>M100</b>	—	1	—	0.042	0.002	0.018	0.001
<b>L100</b>	—	—	1	0.042	0.002	0.016	0.001
<b>S33M33L33</b>	0.33	0.33	0.33	0.038	0.002	0.018	0.001
<b>S50M33L17</b>	0.50	0.33	0.17	0.036	0.002	0.017	0.001
<b>S50M17L33</b>	0.50	0.17	0.33	0.038	0.002	0.018	0.001
<b>S33M50L17</b>	0.33	0.50	0.17	0.038	0.002	0.019	0.001
<b>S17M50L33</b>	0.17	0.50	0.33	0.037	0.002	0.016	0.001
<b>S33M17L50</b>	0.33	0.17	0.50	0.037	0.002	0.016	0.001
<b>S17M33L50</b>	0.17	0.33	0.50	0.035	0.002	0.015	0.001

Para la deformación en el punto de cedencia en compresión, de la tabla 25, se muestra que los concretos controles tuvieron 0.041 mm/mm de resistencia. Se observa que los concretos con un solo tamaño de partícula de Tetra Pak, tienen valores muy similares que los del concreto control; no así para los concretos con tamaños diferentes de partículas, que tiene valores menores, de hasta 0.035 mm/mm, es decir 15 % menores que el del concreto control. Esto significa que el concreto se vuelve más rígido, ya que existe una sinigual transferencia de esfuerzos entre las propias partículas de diferente tamaño de Tetra Pak con la matriz y el mármol, haciendo que no se logre disminuir la propagación del esfuerzo, por ende, el material pierde deformación.

En el caso de la deformación en el punto de cedencia producida en la prueba de flexión, el concreto control tuvo una deformación de 0.022 mm/mm. Para concretos con un solo tamaño de partícula, se tuvo hasta un 27 % menor, que corresponde al concreto “L100”. Los valores siguen disminuyendo para concretos que contienen en mayor porcentaje partículas grandes (M y L), como lo demuestran los resultados de los concretos, “S17/M50/L33”, “S33/M17/L50” y “S17/M33/L50”.

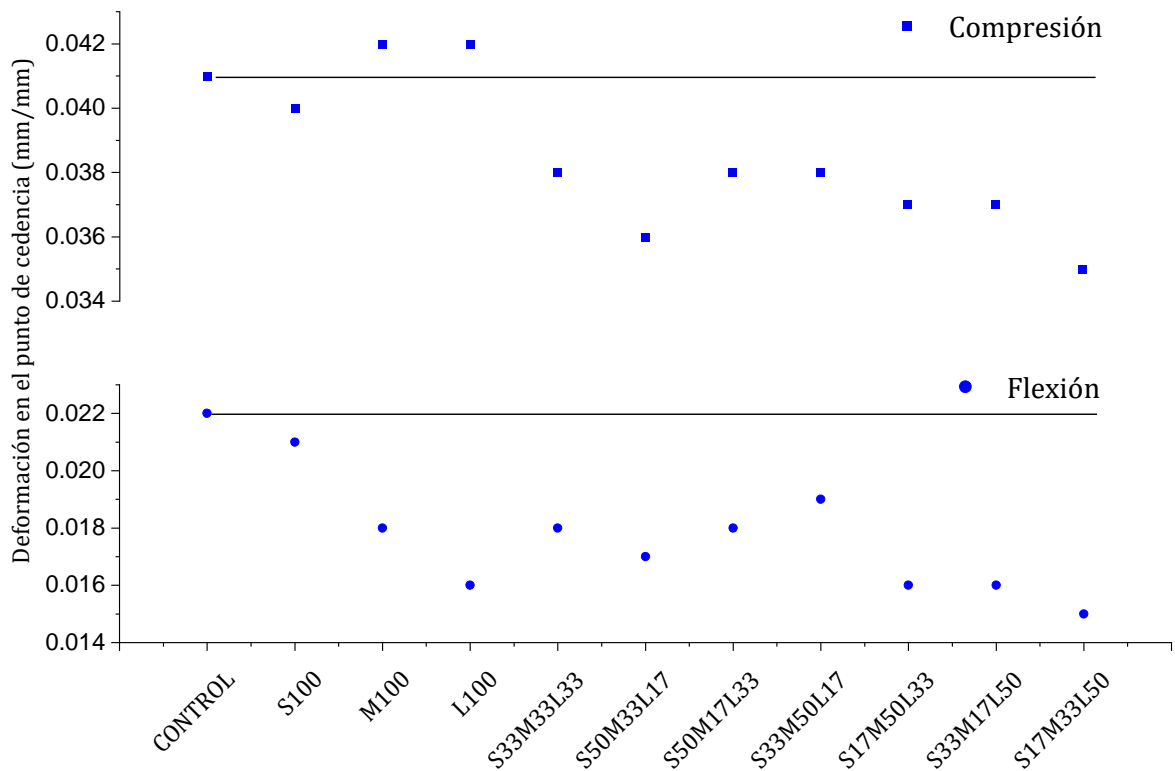


Figura 37. Deformación en el punto de cedencia para la prueba de compresión y flexión para concretos con diferentes tamaños de partículas.

### 3.5.3 Módulo de elasticidad para concretos con tres tamaños de partículas de Tetra Pak

Los resultados para el módulo de elasticidad de los concretos con tres tamaños de partículas de Tetra Pak se muestran en la tabla 26 y en la figura 38.

Tabla 26. Resultados del módulo de elasticidad para las pruebas de compresión y flexión para concretos con partículas de Tetra Pak.

Probeta	Tetra Pak utilizado			Ensayo			
	S	M	L	Compresión	Flexión		Er ± 5%
	%	%	%	Módulo (Gpa)	Er ± 5%	Módulo (Gpa)	
<b>CONTROL</b>	—	—	—	21.540	1.077	18.480	0.924
<b>S100</b>	1	—	—	21.510	1.076	19.500	0.975
<b>M100</b>	—	1	—	21.213	1.061	21.307	1.065

<b>L100</b>	—	—	1	20.731	1.037	23.234	1.162
<b>S33M33L33</b>	0.33	0.33	0.33	25.296	1.265	21.936	1.097
<b>S50M33L17</b>	0.50	0.33	0.17	26.199	1.310	24.103	1.205
<b>S50M17L33</b>	0.50	0.17	0.33	24.775	1.239	22.068	1.103
<b>S33M50L17</b>	0.33	0.50	0.17	24.694	1.235	21.097	1.055
<b>S17M50L33</b>	0.17	0.50	0.33	24.897	1.245	25.677	1.284
<b>S33M17L50</b>	0.33	0.17	0.50	26.177	1.309	25.349	1.267
<b>S17M33L50</b>	0.17	0.33	0.50	24.715	1.236	24.100	1.205

Con referencia en la tabla 26, el módulo de elasticidad en compresión del concreto control fue de 21.540 GPa. Para concretos con un solo tamaño de partícula, los valores disminuyen desde 21.510 hasta 20.731 GPa conforme aumenta el tamaño de partícula, por lo que se infiere que las partículas de tamaño “M” y “L” hace que el concreto pierda rigidez y se deforme más. Sin embargo, para concretos con tamaños diferentes de partículas, se tuvo un incremento del 22 % con la combinación de partículas de S50/M33/L17, lo que corrobora que las partículas pequeñas (S), ayudan a minimizar la pérdida de esfuerzo requerido para deformar al material.

Los resultados del módulo en flexión, de la tabla 26, señalan un valor 18.480 GPa para el concreto control. Para concretos con un solo tamaño de partícula, los valores del concreto con un solo tamaño de partículas están por encima del valor del concreto control, siendo el concreto con partículas (L) con un valor de 23.234 GPa. Mientras que los concretos con partículas de diferentes tamaños, tienen valores mayores, de hasta 25.677 GPa, lo cual significa un 39 % de mejoramiento. Esto para el concreto con la combinación S17/M50/L33. Es decir, un mayor contenido de partículas de tamaño mediano (M), permite mayor rigidez al concreto bajo un ensayo mecánico de flexión.

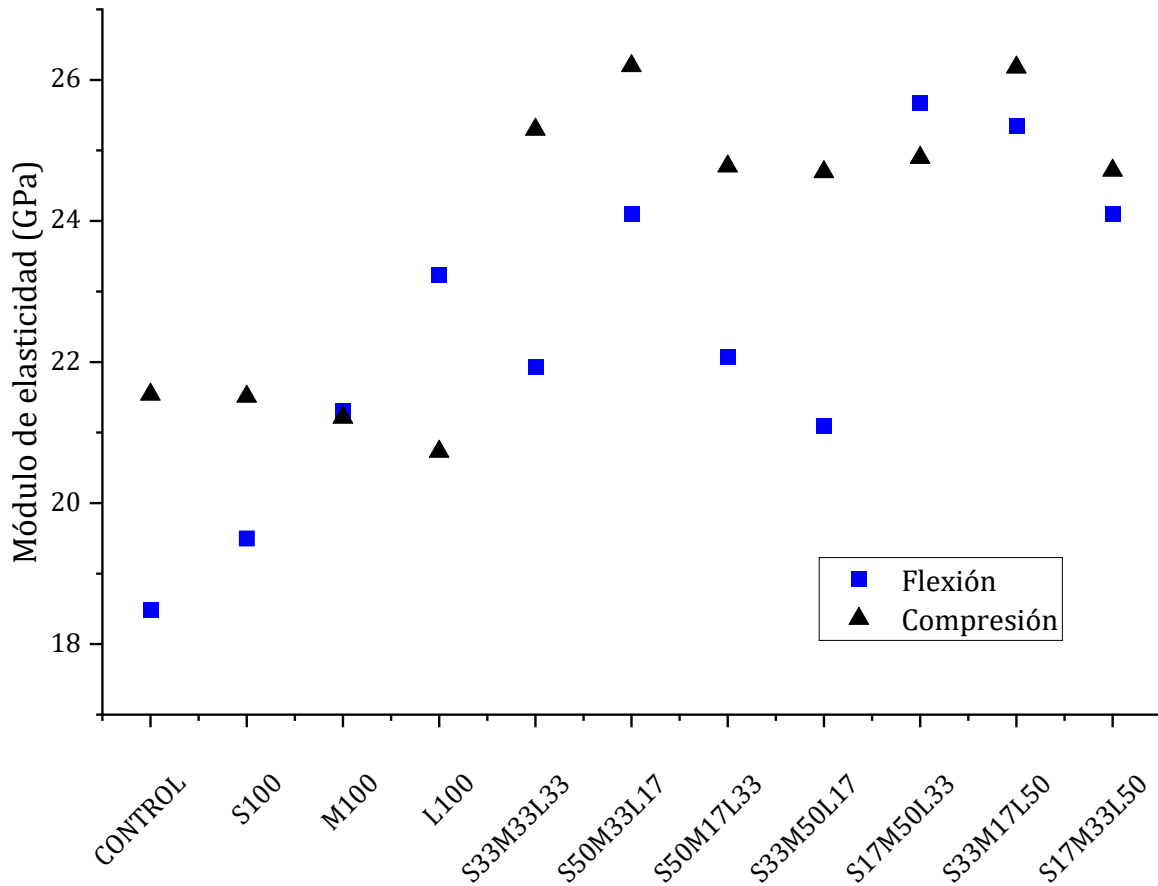


Figura 38. Módulo de elasticidad para concretos con partículas de Tetra Pak de diferente tamaño.

En la tabla 27 se muestra un resumen de los valores obtenidos para cada uno de los concretos producidos.

Tabla 27. Porcentajes de aumento (+) o disminución (-) de cada propiedad mecánica, con respecto al valor del concreto control.

Propiedad	Control	Con partículas de Tetra Pak	Con diferentes tamaños de partículas de Tetra Pak	Con partículas de Tetra Pak e irradiado
Resistencia a la flexión	27.0 MPa	+5	+3	+16



Resistencia a la compresión	88.3 MPa	<b>-3</b>	<b>+3</b>	<b>+31</b>
Módulo de elasticidad en flexión	18.5 GPa	<b>+13</b>	<b>+39</b>	<b>+31</b>
Módulo de elasticidad en compresión	21.5 GPa	<b>-3</b>	<b>+22</b>	<b>+39</b>
Deformación en flexión	0.022 mm/mm	<b>-9</b>	<b>-30</b>	<b>-10</b>
Deformación en compresión	0.041 mm/mm	<b>-5</b>	<b>-15</b>	<b>+13</b>

En resumen:

Cuando se utiliza un solo tamaño de partícula de Tetra Pak, las propiedades tienden a mostrar resultados negativos respecto a los valores de referencia, es decir, un solo tamaño de partícula no es suficiente para mejorar el comportamiento mecánico del concreto. Mientras que, con las combinaciones de tamaños, las propiedades comienzan a mostrar valores positivos, pues la transferencia de esfuerzos se mejora entre partículas de diferentes tamaños. Por otro lado, los efectos de entrecruzamiento de cadenas poliméricas ocasionadas por la radiación gamma hacen que el material presente una considerable mejoría en la transferencia de esfuerzos entre la matriz y los agregados, mármol y Tetra Pak, logrando así los mayores valores de las propiedades mecánicas estudiadas. La resistencia y el módulo de elasticidad de la prueba de flexión se ven mejoradas con el uso de partículas de Tetra Pak, independientemente de si se utiliza o no la radiación gamma. La deformación del material en la prueba de flexión fue la única propiedad que no obtuvo mejora alguna, lo que significa que el Tetra Pak a pesar de contar con deformación plástica, no es capaz de transferir este comportamiento mecánico al concreto.

---

## Capítulo 4. Conclusiones

---

De la primera etapa, con base en los resultados obtenidos de las pruebas de compresión y flexión, se concluye que, conforme se incrementa la cantidad de resina, la deformación aumenta. Mayor cantidad de resina produce mayor movimiento de las cadenas poliméricas, es decir mayor deformación cuando se aplican los esfuerzos.

De la segunda etapa, correspondiente a concretos con Tetra Pak, se concluye que, conforme aumenta la cantidad de Tetra Pak de desecho: I) la resistencia a la compresión disminuye, pero la resistencia a la flexión aumenta ligeramente, esto se deba a que los polímeros contenidos en el Tetra Pak (celulosa y polietileno), y la resina disminuyen los esfuerzos, II) En el caso de la deformación en el punto de cedencia, tanto en compresión como en flexión, disminuye, ya que existe menor transferencia de esfuerzos entre las partículas de Tetra Pak, con el mármol y la resina. III) Para el módulo de elasticidad en compresión, no se altera la cantidad de esfuerzos necesarios para lograr deformar el concreto. Sin embargo, cuando se lleva a cabo en flexión, los valores aumentan, es decir, el concreto se vuelve más rígido por la presencia de las partículas.

De la tercera etapa, correspondiente a los concretos con Tetra Pak e irradiados, se concluye que: I) La resistencia a la compresión y a la flexión, los efectos producidos por los rayos gamma fueron notables, obteniéndose aumentos hasta del 31%, lo cual se debió a los efectos de reticulación de las cadenas poliméricas en la resina poliéster y en la celulosa y el polietileno contenidos en las partículas de Tetra Pak. II) La deformación en compresión aumentó, ya que la reticulación producida en las cadenas poliméricas permite disminuir la propagación de los esfuerzos, y en consecuencia de las grietas, logrando mejorar los valores de la deformación, lo cual no sucedió en flexión. III) Para el módulo de elasticidad en compresión y en flexión, los valores aumentaron considerablemente, ya que se produjo reticulación de las cadenas poliméricas en la resina poliéster, en la celulosa y en el polietileno de las partículas del Tetra Pak de desecho. IV) La prueba de compresión fue la que mayores incrementos mecánicos obtuvo bajo los efectos de la radiación gamma.

De la cuarta etapa, es decir, la experimentación de concretos con diferentes tamaños de partícula de Tetra Pak se concluye que, I) las resistencias de concretos con partículas de diferentes tamaños tienen mayores valores en flexión. II) En el caso de la deformación, se concluye que las partículas de Tetra Pak disminuyen los valores notablemente cuando se combinan. III) El módulo elástico se mejora ampliamente para los concretos con partículas de diferentes tamaños, debido al mejoramiento en la transferencia de esfuerzos entre la resina y los agregados.

De la microscopía electrónica de barrido, se concluye que la rugosidad y las fibrillas de la celulosa contenida en las partículas de Tetra Pak, contribuyen al mejoramiento de las propiedades mecánicas. b) La radiación gamma produce modificaciones en la celulosa y polietileno de las partículas de Tetra Pak, así como en la resina poliéster, aumentando la rugosidad, lo cual se traduce en necesitar mayor esfuerzo para generar fractura en el concreto.

De manera general, se concluye que, de acuerdo con los resultados mecánicos obtenidos de las pruebas mecánicas, el concreto con formulación 25R/73M/2T, es decir, con 2 % de partículas de Tetra Pak, y 100 kGy de radiación gamma fue el mejor concreto formulado, pues obtiene los mejores incrementos en las resistencias mecánicas respecto al concreto “control” minimizando el costo de la irradiación.

Con referencias de precio consultados en el año 2024 en el mercado de concretos de México, se sabe que el concreto convencional prefabricado con una resistencia a la compresión de 24.5 MPa tiene un costo de 0.94 pesos/kg. Mientras que, el concreto polimérico desarrollado en este proyecto tiene un valor de 92.50 pesos/kg, pero con una resistencia a la compresión de 110.5 MPa, obtenido a 100 kGy. La recomendación es continuar con la investigación de este material en aplicaciones donde se presenten esfuerzos en compresión cercanos a este valor mecánico alcanzado con el fin de amortizar el costo de fabricación.

## Referencias

Abdel-Rahman, H.A., Younes, M.M., & Yassene-Ali, A. (2018). Physico-mechanical properties of gamma-irradiated clay/polyester nanocomposites, *Polymer composites*, 39, 3666-3675.

[doi.org/10.1002/pc.24395](https://doi.org/10.1002/pc.24395)

Abdul-Motaleb, K.Z.M., Milasius, R., & Ahad, A. (2020). Influence of gamma radiation on mechanical properties of jute fabric-reinforced polymer composites, *Fibers*, 8, 1-11.

[doi.org/10.3390/fib8090058](https://doi.org/10.3390/fib8090058)

Adrovic, F. (Ed). (2012). *Gamma Radiation*. IntechOpen: Rijeka, Croacia. ISBN: 978-953-51-0316-5.

[doi: 10.5772/34856](https://doi.org/10.5772/34856).

Alhazmi, H., Shah, S.A.R., Anwar, M.K., Raza, A., Ullah, M.K., & Iqbal, F. (2021). Utilization of polymer concrete composites for a circular economy: A comparative review for assessment of recycling and waste utilization. *Polymers*, 13(13), 2135.

[doi.org/10.3390/polym13132135](https://doi.org/10.3390/polym13132135)

Ali, J.B., Abubakar, B.M., Abdullahi, D., & Muhammad, M.B. (2020). Physico-mechanical properties of unsaturated polyester resin reinforced maize cob and jute fiber composites, *Journal of Natural Fibers*, 19, 3195-3207.

[doi.org/10.1080/15440478.2020.1841062](https://doi.org/10.1080/15440478.2020.1841062)

Al-Bashaireh, K. (2021). Ancient white marble trade and its provenance determination, *Journal of Archaeological Science: Reports*, 35, 1-12.

[doi.org/10.1016/j.jasrep.2020.102777](https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2020.102777)

Askeland, D.R., & Wright, W.J. (2016). *Ciencia e ingeniería de materiales*. Cengage Learning. CDMX, México. ISBN: 6075260625

Barbuta, M., Serbanoiu, A.A., Cadere, C., & Helepiciuc, C.M. (2017). Effects of Marble Waste on Properties of Polymer Concrete. *Advanced Engineering Forum*, 21, 213-218.

[doi.org/10.4028/www.scientific.net/aef.21.213](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/aef.21.213)

Brock, J. (Ed). (2021). *Gamma Irradiation: Properties, Effects and Development of New Materials*. Nova Science Publishers: Estados Unidos. ISBN: 978-1-53619-980-2.

Bonocore, G., & De Luca, P. (2022). Preparation and characterization of insulating panels from recycled polylaminate (Tetra Pak) materials, *Sustainability*, 14, 1-15.

[doi.org/10.3390/su14116858](https://doi.org/10.3390/su14116858)

Callister, W.D., & Rethwisch, D.G. (2017). *Materials science and engineering. An introduction*. Wiley. Nueva Jersey, Estados Unidos. ISBN: 1119278562.

Chanda, M. (2018). *Plastics Technology Handbook*. Taylor & Francis Group: Boca Raton FL. Estados Unidos. ISBN: 1498786219.

Cihad-Bal, B. (2022). Mechanical properties of wood-plastic composites produced with recycled polythylene, used Tetra Pak® boxes, and wood flour. *BioResources*, 17(4), 6569-6577.

[doi.org/10.15376/biores.17.4.6569-6577](https://doi.org/10.15376/biores.17.4.6569-6577)

Dodiuk, H. (2021). *Handbook of Thermoset Plastics*. Elsevier Science: Reino Unido. ISBN: 0323899943

Drobny, J.G. (2021). *Radiation Technology for Polymers*. CRC Press: Estados Unidos. ISBN: 9780429574931

Dölle, K., & Kavin, C.J.N. (2022). Aseptic Packaging Container Recovery – A Review. *Journal of Materials Science Research and Reviews*, 10, 38-51.

[institutearchives.uk/id/eprint/18](https://institutearchives.uk/id/eprint/18)

Eldridge, A., & Eldridge, S. (2021). *Understanding and Using Gamma Rays*. Enslow Publishing, LLC.: Estados Unidos. ISBN: 9781978514904

Foti, D., Stergios, A., Eleni, V., Elias, V., Costas, P., Stephen, O.A., & Geoffrey D. (2019). Microstructure and compressive strength of gypsum-bonded composites with papers, paperboards and Tetra Pak recycled materials. *Journal of Wood Science*, 42, 1-8.

[doi.org/10.1186/s10086-019-1821-5](https://doi.org/10.1186/s10086-019-1821-5)

Gao, Y., Romero, P., Zhang, H., Huang, M., & Lai, F. (2019). Unsaturated polyester resin concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 228, 1-18.

[doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116709](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116709)

Guillén-Mallete, J., Carrillo-Baeza, J.G., Aranda-Ayala, A.A., & Rivero-Ayala, M.A. (2021). Optimization of processability and physical and mechanical properties of extruded polyethylene-Tetra Pak cartons composites by experimental design. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 34(11), 1462-1487.

[doi.org/10.1177/0892705719873944](https://doi.org/10.1177/0892705719873944)

Haigh, R., (2023). A decade review of research trends using waste materials in the building and construction industry: A Path way towards a circular economy. *Waste*, 1(4), 935-959. [doi.org/10.3390/waste1040054](https://doi.org/10.3390/waste1040054)

Hamouda, T., Hassanin, A.H., Saba, N., Demirelli, M., Kilic, A., Candan, Z., & Jawaid, M. (2019). Evaluation of mechanical and physical properties of hybrid composites from food packaging and textiles wastes. *Journal of Polymers and the Environment*, 27, 489–497. [doi.org/10.1007/s10924-019-01369-3](https://doi.org/10.1007/s10924-019-01369-3)

Hossain, S., Chowdhury, S., & Ruhul, K. (2017). Effect of disaccharide, gamma radiation and temperature on the physico-mechanical properties of jute fabrics reinforced unsaturated polyester resin-based composite. *Radiation Effects and Defects in Solids*, 172, 517-530. [doi.org/10.1080/10420150.2017.1351442](https://doi.org/10.1080/10420150.2017.1351442)

Huo, H., Ma, Y., & Wang, X. (2021). Recovery of aluminum and preparation of porous carbon from Tetra Pak waste, *Chemistry Select*, 6, 1814-1822. [doi.org/10.1002/slct.202004624](https://doi.org/10.1002/slct.202004624)

Ibrahim, S.M., & Salmawi, K. M. (2013). Preparation and Properties of Carboxymethyl Cellulose (CMC)/ Sodium alginate (SA) Blends Induced by Gamma Irradiation. *Journal of Polymers and the Environment*, 21, 520–527. [doi 10.1007/s10924-012-0464-z](https://doi.org/10.1007/s10924-012-0464-z)

Khan, F., Ahmad, S.R., & Kronfli, E. (2006).  $\gamma$ -Radiation Induced Changes in the Physical and Chemical Properties of Lignocellulose. *Biomacromolecules*, 7, 2303-2309. [doi.org/10.1021/bm060168y](https://doi.org/10.1021/bm060168y)

Khan-Rezaul, K., Shauddin, S.M., Dhar, S.S., & Khan-Mubarak, A. (2014). Comparative experimental studies on the physico-mechanical properties of Jute caddies reinforced polyester and polypropylene composites. *Journal of Polymer and Biopolymer Physics Chemistry*, 2(3), 55-61. [doi:10.12691/jpbpc-2-3-3](https://doi.org/10.12691/jpbpc-2-3-3)

Kiruthika, C., Prabha, S.L., & Neelamegam, M. (2021). Different aspects of polyester polymer concrete for sustainable construction. *Materials Today: Proceedings*, 43, 1622-1625. [doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.766](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.766)

Knoll, G. F. (2010). *Radiation Detection and Measurement*. Wiley: Reino Unido. ISBN: 9780470131480

- Kumar, V., Chaudhary, B., Sharma, V., & Verma, K. (Ed). (2019). *Radiation Effects in Polymeric Materials*. Springer International Publishing: Alemania. ISBN: 9783030057701
- Lamarsh, J.R., & Baratta, A.J. (2011). *Introduction to Nuclear Engineering*. Pearson Prentice Hall, Nueva Jersey, Estados Unidos. ISBN: 0201824981.
- Lungu, I.B., Stelescu, M.D., & Cutrubinis, M. (2018). Studies on gamma irradiated rubber materials. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 294, 1-8.  
[doi:10.1088/1757-899X/294/1/012002](https://doi.org/10.1088/1757-899X/294/1/012002)
- Machnowski, W., Gutarowska, B., Perkowski, J., & Wrzosek, H. (2012). Effects of gamma radiation on the mechanical properties of and susceptibility to biodegradation of natural fibers. *Textile Research Journal*, 83, 44-55.  
[doi:10.1177/0040517512449045](https://doi.org/10.1177/0040517512449045)
- Macías-Gallego, S., Guzmán-Aponte, A., Buitrago-Sierra, R., Santa-Marín, J.F. (2020). Evaluation of mechanical properties of composites manufactured from recycled Tetra Pak® containers. *Tecnura*, 24 (66), 36-46.  
<https://doi.org/10.14483/22487638.16296>
- Maldonado, Y. (2023). Mármol: Propiedades, características y usos. Recuperado el 15 de mayo de 2023, de Geología Web.  
<https://geologiaweb.com/rocas/marmol/>
- Mansour, R., Rahmouni, Z.E.A., & Baali, B. (2017). Performance of polymer concrete incorporating waste marble and alfa fibers, *Advances in Concrete Construction*, 5(4), 331-343.  
[doi.org/10.12989/acc.2017.5.4.331](https://doi.org/10.12989/acc.2017.5.4.331)
- Muñoz-Batista, M.J., Blázquez, G., Franco, J.F., Calero, M., & Martín-Lara, M.A. (2022). Recovery, separation and production of fuel, plastic and aluminum from the Tetra Pak waste to hydrothermal and pyrolysis processes. *Waste Management*, 137, 179-189.  
[doi.org/10.1016/j.wasman.2021.11.007](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.11.007)
- Murathan, A., Selek, M.A., Gürü, M., & Balbasi, M. (2007). Manufacturing low density boards from waste cardboards containing aluminium. *Materials and Design*, 28, 2215–2217.  
[doi:10.1016/j.matdes.2006.06.014](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2006.06.014)
- Niaki, M.H., Ahangari, M.G. (2022). *Polymer Concretes, Advanced Construction Materials*. CRC Press. Boca Raton, Florida, Estados Unidos. ISBN: 9781003326311

[doi.org/10.1201/9781003326311](https://doi.org/10.1201/9781003326311)

Nodehi, M. (2022). Epoxy, polyester and vinyl ester based polymer concrete: a review. *Innovative Infrastructure Solutions*, 7(1), 64.

[doi.org/10.1007/s41062-021-00661-3](https://doi.org/10.1007/s41062-021-00661-3)

Ohama, Y. (2008). 12-Polymer concrete (ed. Mindess, S.). *Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete* (256-269). Woodhead Publishing Limited. Cambridge, Great Abington. ISBN: 9781845692636

[doi.org/10.1533/9781845694685.256](https://doi.org/10.1533/9781845694685.256)

Papamichael, I., Voukkali, I., Loizia, P., & Zorpas, A. A. (2023) Construction and demolition waste framework of circular economy: A mini review. *Waste Management & Research*, 41(12), 1728-1740.

[doi.org/10.1177/0734242X231190804](https://doi.org/10.1177/0734242X231190804)

Posada, C.A., & Pazmiño, Y.J. (2016). *Diseño de un sistema para extraer fibra de celulosa de los envases multicapas para uso alimenticio* [tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción, Escuela Superior Politécnica del Litoral]. Repositorio Dspace.

<http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/handle/123456789/34459>

Rao, V. (2009). 14-Radiation processing of polymers vol. 1. (eds: Sabu, T., & Yang, W.). *Advances in Polymer Processing: From macro- to nano- scales*, (402-437). Woodhead Publishing Limited. Cambridge, Great Abington. ISBN: 9781845693961

[doi.org/10.1533/9781845696429.3.402](https://doi.org/10.1533/9781845696429.3.402)

Rahman, H., Alimuzzaman, S., Alamgir-Sayeed, M.M., & Amin-Khan, R. (2019) Effect of gamma radiation on mechanical properties of pineapple leaf fiber (PALF)-reinforced low-density polyethylene (LDPE) composites. *International Journal of Plastics Technology*, 23, 229–238.

[doi.org/10.1007/s12588-019-09253-4](https://doi.org/10.1007/s12588-019-09253-4)

Ramana, M.V., Thyla, P.R., Mahendrakumar, N., & Praveena, K. (2021). Selection of resin and aggregates for particulate polymer concrete machine tool structures-A review. *Materials Today: Proceedings*, 46, 8621-8628.

[doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.595](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.595)

Robertson, G.L. (2021). Recycling of aseptic beverage cartons: A Review. *Recycling*, 6, 20.



[doi.org/10.3390/recycling6010020](https://doi.org/10.3390/recycling6010020)

Rokbi, M., El-Abidine, R. Z., Brahim, B. (2019). Flexural characterization of polymer concrete comprising waste marble and date palm fibers. *Technical Sciences*, 22(2), 169-182.

[bwmeta1.element.baztech-6d46a6f8-f26b-4e8b-9288-7fc80de90f47](https://bwmeta1.element.baztech-6d46a6f8-f26b-4e8b-9288-7fc80de90f47)

Sahadat-Hossain, M., Sarwaruddin-Chowdhury, A.M., & Khan, R.A. (2017). Effect of disaccharide, gamma radiation and temperature on the physico-mechanical properties of jute fabrics reinforced unsaturated polyester resin-based composite, *Radiation Effects and Defects in Solids*, 172:5-6, 517-530.

[doi.org/10.1080/10420150.2017.1351442](https://doi.org/10.1080/10420150.2017.1351442)

Şahin, G. G., & Karaboyacı, M. (2021). Process and machinery design for the recycling of tetra pak components. *Journal of Cleaner Production*, 323, 129186.

[doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129186](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129186)

Sánchez-Tizapa, S., Villaseñor-Franco, A., Guinto-Herrera, E., Barragán-Trinidad, R., & Mebarki, A. (2017). A proposal of reference values for diagonal compressive strength and compressive strength of masonry design in Guerrero state, Mexico. *ALCONPAT*, 7,231-246.

[doi.org/10.21041/ra.v7i3.159](https://doi.org/10.21041/ra.v7i3.159)

Sandoval García, E., Ramos Rodríguez, G. G., & Correa Torres, A. (2023). Midiendo la economía circular en México. Realidad, datos y espacio. *Revista internacional de estadística y geografía*, 14(1), 38-53

<https://rde.inegi.org.mx/index.php/2023/01/04/midiendo-la-economia-circular-en-mexico/>.

Silveirinha, V.I., Gameiro, T., Capela, M.N., Carvalheiras, J., Caetano, A.P.F., Novo, C., Novais, R.M., Seabra, M.P., & Labrincha, J.A. (2022). Review of recycling alternatives for paper pulp wastes. *Frontiers in Materials*, 9, 1-20.

[doi.org/10.3389/fmats.2022.1006861](https://doi.org/10.3389/fmats.2022.1006861)

Sleiniute, A., Mumladze, T., Denafas, G., Makarevicius, V., Kriukiene, R., Antonov, M., & Vasarevicius, S. (2024). Mechanical Properties of Polymers Recovered from Multilayer Food Packaging by Nitric Acid. *Sustainability*, 16 (5), 2106.

[doi.org/10.3390/su16052106](https://doi.org/10.3390/su16052106)

Smith, W.F., & Javad, H. (2006). *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*. McGraw-Hill Interamericana de España S. L. México. ISBN: 9701056388

Stalter, R., & Howarth, D. (2012). *Gamma Radiation*, (ed. Feriz Adrovic). Intech Open. ISBN: 978-953-51-0316-5

[doi: 10.5772/34856](https://doi.org/10.5772/34856)

Tappanawatch, W., Prapainainar, P., Sae-oui, P., Loykulnant, S., & Dittanet, P. (2018). Effect of Gamma Radiation on Properties of Cellulose Nanocrystal/Natural Rubber Nanocomposites. *Key Engineering Materials*, 772,1 3-17.

[doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.772.13](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.772.13)

Tohidi, M.M., Paymard, B., Vasquez-García, S.R., & Fernández-Quiroz, D. (2023). Recent progress in applications of cobalt catalysts in organic reactions. *Tetrahedron*, 136, 133352.

[doi.org/10.1016/j.tet.2023.133352](https://doi.org/10.1016/j.tet.2023.133352)

Toufigh, V., Hosseinali, M., & Masoud, S.S. (2016). Experimental study and constitutive modeling of polymer concrete's behavior in compression. *Construction and Building Materials*, 112, 183-190.

[doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.100](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.100)

Ulubeylia, G.C., & Artir, R. (2015). Properties of hardened concrete produced by waste marble powder. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 195(3), 2181-2190.

[doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.06.294](https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.06.294)

Zaman, H.U., Khan, A.H., Hossain, M. A., Khan, M.A., & Khan, R.A. (2014). Mechanical and Electrical Properties of Jute Fabrics Reinforced Polyethylene/Polypropylene Composites: Role of Gamma Radiation. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 48, 760-766.

[doi.org/10.1080/03602550902824655](https://doi.org/10.1080/03602550902824655)

Zaman, H.U., Khan, M.A., & Khan, R.A. (2012). Comparative experimental measurements of jute fiber/polypropylene and coir fiber/polypropylene composites as ionizing radiation. *Polymer Composites*, 33, 1077-1084.

[doi.org/10.1002/pc.22184](https://doi.org/10.1002/pc.22184)

Zawadiak, J., Wojciechowski, S., Piotrowski, T., & Krypa, A. (2017). Tetra pak recycling-current trends and new developments. *American Journal of Chemical Engineering*, 5(3), 37-42.

[doi.org/10.11648/j.ajche.20170503.12](https://doi.org/10.11648/j.ajche.20170503.12)

# Anexo 1

## A1. Hoja técnica de la resina poliéster tereftálica insaturada.

<b>REICHHOLD</b>		<b>[BOLETÍN TÉCNICO]</b>	
Noviembre, 2013			
<b>Serie PolyLite® 32335</b>			
Resina Poliéster Tereftálicas Modificadas			
<b>DESCRIPCION</b>			
La serie PolyLite® 32335 son resinas poliéster no saturadas, tereftálicas modificadas, de reactividad media, resilientes, con viscosidad baja y preaceleradas para ser curada a temperatura ambiente mediante la adición de Peróxido de Metil Etil Cetona.			
<b>APLICACION</b>			
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Concreto polimérico.</li> </ul>			
<b>CARACTERÍSTICAS</b>		<b>BENEFICIOS</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baja viscosidad</li> <li>• Curado rápido</li> <li>• Buen balance Flexibilidad – Rigidez</li> <li>• Polímero especial</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Excelente aceptación de cargas minerales</li> <li>• Ciclos cortos de desmoldo</li> <li>• Excelentes propiedades mecánicas,</li> <li>• Modificada poliméricamente para tener resiliencia y buena humectación con la Fibra de vidrio.</li> </ul>	
<b>PROPIEDADES</b>			
<b>PROPIEDADES TÍPICAS DE RESINA LÍQUIDA @ 25 °C</b>			
Propiedades	Unidades	Serie PolyLite 32335	Métodos de Análisis
No volátiles	%	58 – 63	RQMPEA-0041
Viscosidad Brookfield, LVF, 2/60	cPs	160 – 220	RQMPEA-0002
Color Resina Líquida	Visual	Registro (Color típico café)	RQMPEA-0019
Estabilidad @ 105 °C	horas	4 mínimo	RQMPEA-0118
Tiempo de vida mínimo en almacenamiento	meses	3	
<small>La información adjunta es para apoyar a nuestros clientes y definir si nuestros productos son los apropiados para sus aplicaciones. Nuestros productos tienen el propósito de venta en clientes industriales y comerciales. Soliciten a nuestros clientes que inspeccionen y prueben nuestros productos antes de definir la conveniencia de su uso. Garantizamos que todos nuestros productos cumplen con nuestras especificaciones. Nada de lo que se encuentra aquí constituye una garantía expresa o implícita, incluyendo cualquier garantía comercial o convencional. Todos los derechos de patente están registrados. La reparación exclusiva de todas las posibles reclamaciones, será la reposición de nuestros productos y en ningún momento será motivo de aceptación de daños especiales, incidentales o consecuentes.</small>			
<small>Reichhold México - Boulevard Arturo Montiel Rojas no. 10006 Parque Industrial Atlacomulco, CP 50450 Atlacomulco Estado de México</small>			

Propiedades	Unidades	Polylite 32335-10	Polylite 32335-15	Polylite 32335-25	Polylite 32335-00	Métodos de Análisis
Tiempo de gel *	minutos	9 – 13	12 – 17	25 - 30	30 – 35	RQMPEA-0066
Temperatura de exotermia	°C	Registro				RQMPEA-0066
Tiempo de curado	minutos	Registro				RQMPEA-0066

\* 100 g de resina + 1.0 g de MEKP (Butenox M-50) @ 25 °C

**CONDICIONES DE CURADO**

Añadir 1-2 gramos de Peróxido de Metil Etil Cetona al 50% (MEKP) por cada 100 gramos de resina. Se puede curar a temperatura ambiente durante la noche o aplicar un postcurado de 2-4 horas a 60-80 °C. Niveles de peróxido por debajo de 0.8% dan como resultado largos tiempos de gelado y curado, por lo que no son recomendables.

**ALMACENAMIENTO**

Para asegurar una máxima estabilidad y mantener las propiedades óptimas de la resina, esta deberá ser almacenada en contenedores cerrados a temperaturas inferiores de 24 °C (75 °F) y lejos de fuentes de fuego, calor y luz solar. La resina debe ser calentada al menos a 18 °C (65 °F) antes de usarse, a fin de asegurar su apropiado manejo y curado. Todas las áreas de almacenaje y contenedores deberán cumplir los códigos locales de incendios y construcciones. Se debe evitar el uso de contenedores de cobre o aleaciones de cobre para contener la resina. Almacene la resina separada de materiales oxidantes, peróxidos y sales metálicas. Mantenga los contenedores cerrados cuando no estén en uso. Los niveles de inventario deberán guardar un mínimo razonable, con una política de inventarios de primeras entradas, primeras salidas.

**PRESENTACIÓN**

Tambor metálico no retornable de 225 Kg de peso neto o a granel en carro tanque.

**SEGURIDAD**

**LEA Y ENTIENDA LA HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD DEL MATERIAL ANTES DE USAR ESTE PRODUCTO**

Obtenga una copia de la Hoja de Datos de Seguridad del Material (MSDS) antes de usarlo. Las MSDS están disponibles con su representante de ventas en Reichhold. Tal información debe ser solicitada a todos sus proveedores de materiales y entendida antes de usarlos.

**ADVERTENCIA:** se debe tener precaución para evitar el mezclado directo de cualquier peróxido orgánico con jabones metálicos, aminas o cualquier otro tipo de acelerador o promotor, ya que puede ocurrir una descomposición violenta y explosiva.

**INFORMACIÓN GENERAL**

Para información especial sobre esta resina le recomendamos ponerse en contacto con nuestros representantes técnicos o llamar a nuestro departamento de Soporte Técnico al tel. (01 712) 122 95 22 en Atlacomulco, Edo. de México.

---

## Anexo 2

---

### A2. Probetas de concreto antes y después de las pruebas de compresión y flexión.



Figura A2.1. Probetas de concreto control, antes y después de las pruebas mecánicas.



Figura A2.2. Probetas con 1% de Tetra Pak, antes y después de las pruebas mecánicas.





Figura A2.3. Probetas con 2% de Tetra Pak, antes y después de las pruebas mecánicas.

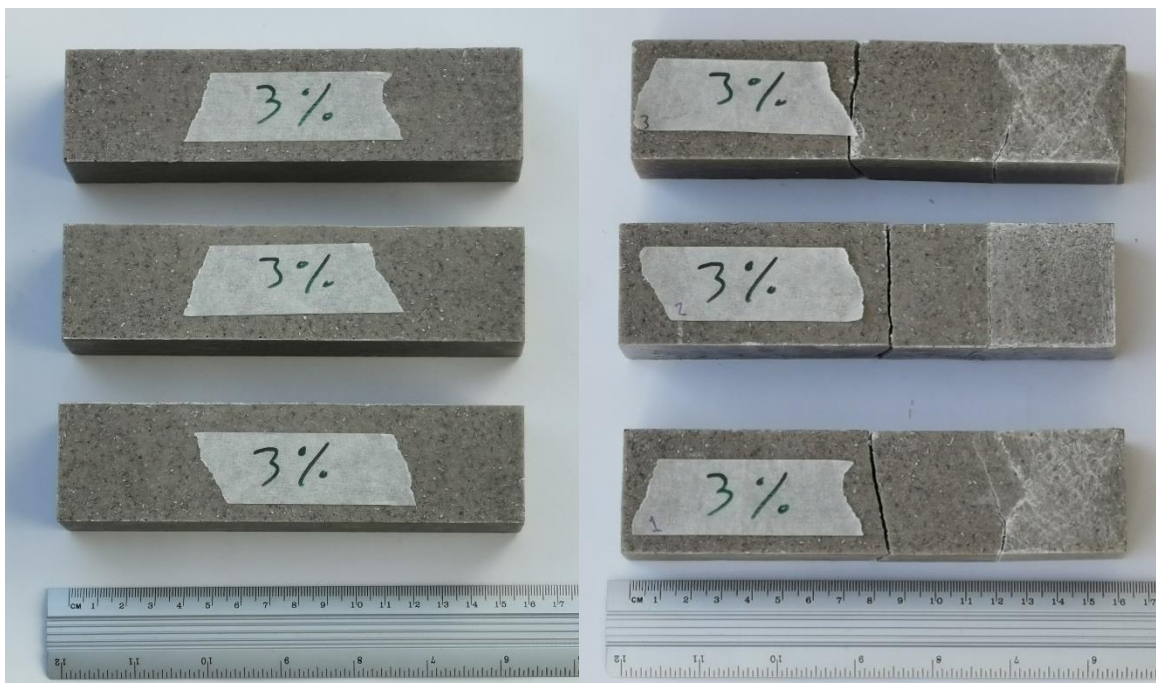


Figura A2.4. Probetas con 3% de Tetra Pak, antes y después de las pruebas mecánicas.

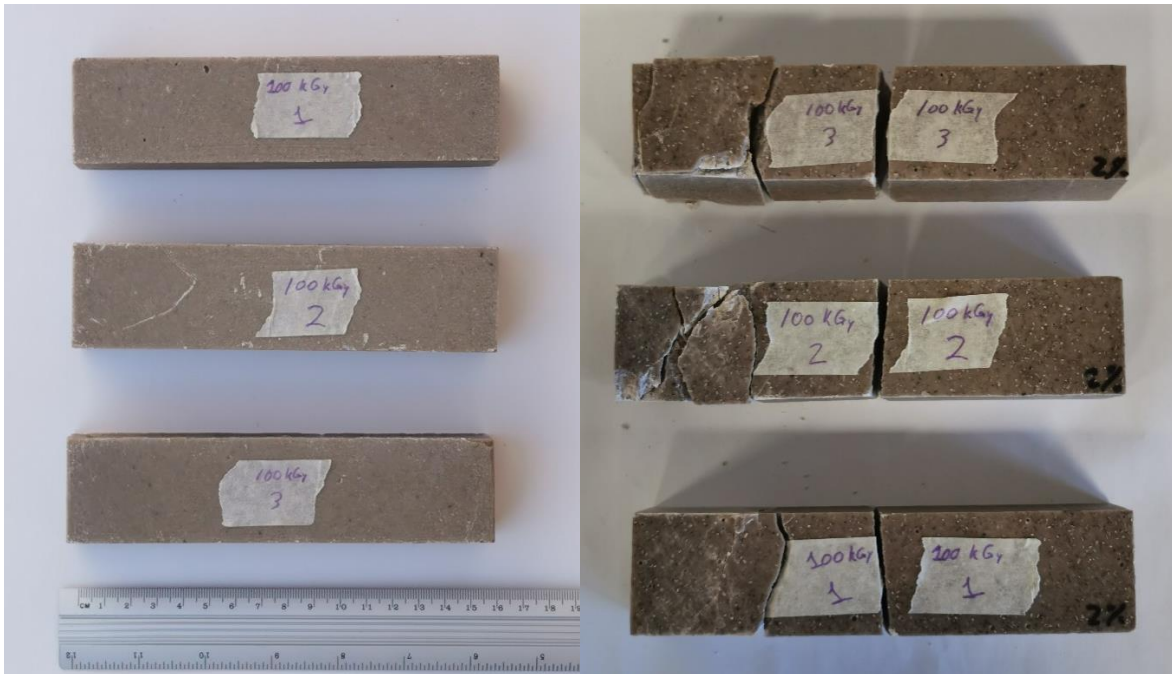


Figura A2.5. Probetas con 2% de Tetra Pak e irradiadas a 100kGy, antes y después de las pruebas mecánicas.

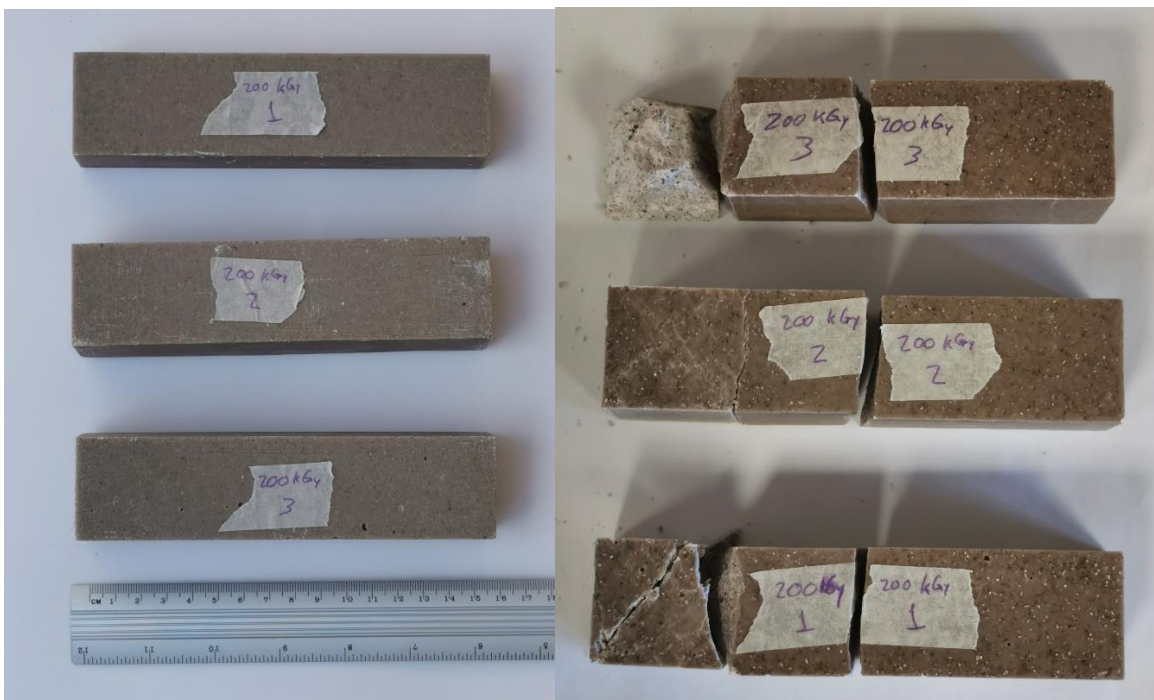


Figura A2.6. Probetas con 2% de Tetra Pak e irradiadas a 200kGy, antes y después de las pruebas mecánicas.





Figura A2.7. Probetas con 2% de Tetra Pak e irradiadas a 300kGy, antes y después de las pruebas mecánicas.



Figura A2.8. Probetas con 2% de Tetra Pak e irradiadas a 400kGy, antes y después de las pruebas mecánicas.





Figura A2.9. Probetas con 2% de Tetra Pak e irradiadas a 500kGy, antes y después de las pruebas mecánicas.



Figura A2.10. Probetas con diferentes combinaciones de tamaños de partículas de Tetra Pak.



Figura A2.11. Probetas con diferentes combinaciones de tamaños de partículas de Tetra Pak, después de las pruebas mecánicas.