



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO



FACULTAD DE QUÍMICA

**Efecto de la radiación gamma en mezclas de resina poliéster envejecida,  
arena de sílice, PET de desecho y nano-sílice**

TESIS

Para obtener el grado de  
Maestro en Ciencia de Materiales

Presenta: Ing. Joel Olaf Camacho Gutiérrez

Dirigida por:

Dr. Gonzalo Martínez Barrera

Dr. Enrique Viguera Santiago

Toluca, México, 2024

## RESUMEN

A causa de la creciente cantidad de desechos plásticos que se generan año tras año, se ha evidenciado la necesidad de adoptar medidas que permitan el control de estos, y seguir evitando su acumulación en el medio ambiente y el consecuente impacto ambiental que ocasiona. Para contribuir a la solución de estos problemas, se han empleado procesos, como el reciclaje y el relleno sanitario, así como procesos alternativos que consisten en usar los desechos plásticos, en la elaboración de materiales compuestos. Una de las propuestas más novedosas, es el uso de alta energía, como los rayos gamma, para modificar y mejorar las propiedades físicas y químicas de los desechos plásticos.

Teniendo en cuenta lo anterior, en este trabajo de investigación se evalúan los efectos de la radiación gamma (a dosis de 100, 200 y 500 kGy), en las propiedades mecánicas, térmicas y reológicas de las mezclas elaboradas con resina poliéster envejecida, arena sílice, PET de desecho y nanosílice. Es importante destacar que uno de los objetivos primordiales es fomentar la reincorporación de la resina poliéster envejecida y PET de desecho al ciclo productivo, mediante su uso en la producción de concretos poliméricos. De igual forma, se enfatiza en el uso de arena sílice de tamaño nanométrico para el reforzamiento mecánico de los concretos.

## **ABSTRACT**

Due to the increasing amount of plastic waste generated year after year, the need to adopt measures to control plastic waste and further prevent its accumulation in the environment and the consequent environmental impact it causes has become evident. To solve these problems, processes such as recycling and landfilling have been used. As well as alternative processes that consists of using plastic waste in the production of composite materials. One of the most innovative proposals is the use of high energies, such as gamma rays, to modify and improve the physical and chemical properties of plastic waste.

Considering the above, this research work evaluates the effects of gamma radiation (at doses of 100, 200 and 500 kGy) on the mechanical, thermal and rheological properties of mixes made with aged polyester resin, silica sand, PET waste and nanosilica. It is important to highlight that one of the main objectives is to promote the reincorporation of aged polyester resin and waste PET into the production cycle, through their use in the production of polymer concretes, as well as the use of silica sand of nanometric size for the mechanical reinforcement of concrete.

## Contenido

RESUMEN.....	2
ABSTRACT .....	3
LISTA DE FIGURAS .....	6
LISTA DE TABLAS.....	7
INTRODUCCIÓN.....	8
CAPÍTULO 1.....	11
1.1. Resina Poliéster .....	12
1.2. Tereftalato de Polietileno (PET).....	13
1.3. Concretos Poliméricos .....	16
1.4. Concretos poliméricos con nanosílice .....	16
1.5. Efecto de la radiación gamma en PET, resina poliéster y nanosílice.....	17
PET .....	18
Resina Poliéster.....	19
Nanosílice .....	19
1.6 Justificación.....	20
1.7 Hipótesis .....	20
1.8 Objetivo General .....	20
1.9 Objetivos Específicos.....	20
CAPÍTULO 2.....	21
2.1 Materiales empleados para la elaboración de los compuestos .....	22
2.1.1. Resina Poliéster Envejecida.....	22
2.1.2 Arena Sílice .....	22
2.1.3 Nanopartículas de sílice .....	22
2.1.4 PET de desecho .....	23
2.1.5 Fibras de PET reciclado .....	23
2.2. Composición de las mezclas .....	24
2.3. Preparación de las muestras .....	24
2.4. Irradiación de las probetas de concreto.....	27
2.5. Evaluación de las propiedades mecánicas.....	28
2.6. Análisis de la morfología mediante Microscopía Electrónica de Barrido.....	29
2.7. Evaluación de las propiedades térmicas .....	29
2.8. Análisis Dinámico Mecánico (DMA).....	30
CAPÍTULO 3.....	33
3.1 CONCRETOS CON PET DE DESECHO .....	34
3.1.1. Módulo de ruptura.....	34
3.1.2. Desplazamiento en flexión .....	38
3.1.3. Módulo de elasticidad en flexión .....	39
3.1.4. Resistencia a la compresión.....	40
3.1.5. Desplazamiento en compresión .....	42
3.1.6. Módulo de elasticidad en compresión .....	43

3.2. CONCRETO CON NANOSÍLICE.....	44
3.2.1 Módulo de ruptura.....	44
3.2.2. Desplazamiento en flexión .....	45
3.2.3. Módulos de Elasticidad en flexión .....	46
3.2.4 Resistencia en compresión .....	47
3.2.5. Desplazamiento en Compresión .....	48
3.2.6. Módulos de Elasticidad en compresión .....	49
3.3 CONCRETO CON UNA CAPA DE FIBRAS DE PET Y NANOSÍLICE DE 200 nm .....	49
3.3.1. Módulo de ruptura.....	50
3.3.2 Desplazamiento en flexión .....	51
3.3.3 Módulo de Elasticidad en flexión .....	51
3.3.4 Resistencia a la compresión.....	52
3.3.5. Desplazamiento en compresión .....	53
3.3.6 Módulo de Elasticidad en compresión.....	54
3.4 CONCRETOS CON UNA CAPA DE FIBRAS DE PET Y NANO-SÍLICE DE 200 nm IRRADIADOS.....	55
3.4.1. Módulo de ruptura.....	55
3.4.2. Desplazamiento en flexión .....	56
3.4.3. Módulo de Elasticidad en flexión .....	58
3.4.4. Resistencia en compresión .....	59
3.4.5. Desplazamiento en compresión .....	61
3.4.6. Módulo de Elasticidad en compresión.....	62
3.4. Propiedades térmicas .....	65
3.4.1. Resina Poliéster.....	65
3.4.2. Concreto Polimérico .....	67
3.5. Propiedades reológicas: efecto de la radiación gamma .....	68
3.5.1. Resina poliéster .....	68
3.5.2. Concreto con hojuelas o fibras de PET de desecho .....	70
3.5.3. Concreto con nanosílice .....	72
3.6. Propiedades morfológicas: efecto de la radiación gamma.....	74
3.6.1. Fibras de PET .....	74
3.6.2. Concretos con fibra de PET y nanosílice .....	74
CONCLUSIONES.....	76
Referencias .....	78

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Estructura química del PET. ....	13
Figura 1.2. Productos obtenidos mediante los distintos procesos químicos empleados para el reciclaje del PET (Elaboración propia). ....	15
Figura 2.1. Resina poliéster envejecida. ....	22
Figura 2.2. Hojuelas de PET de desecho ....	23
Figura 2.3. Fibras empleadas en los concretos poliméricos ....	23
Figura 2.4. Diagrama del procedimiento para la elaboración de las probetas de concreto. ....	25
Figura 2.5. Molde para la preparación de las probetas de concreto.....	26
Figura 2.6. Preparación de los concretos poliméricos.....	26
Figura 2.7. Mezclas de resina poliéster, arena de sílice, nanosílice y fibra de PET ....	27
Figura 2.8. Probetas de concretos poliméricos. ....	27
Figura 2.9. Máquina Universal utilizada para los ensayos de flexión y compresión. ....	28
Figura 2.10. Analizador Dinámico Mecánico ....	30
Figura 2.11. Mordazas del Analizador Dinámico Mecánico ....	30
Figura 2.12. Diagrama del procedimiento para la elaboración de las muestras para los análisis dinámicos mecánicos.....	32
Figura 3.1. Curvas carga-desplazamiento de concretos con PET de desecho, ensayados en flexión.....	34
Figura 3.2. Fractura del concreto control durante el ensayo de flexión. ....	35
Figura 3.3. Módulo de ruptura de concretos poliméricos con PET de desecho. ....	36
Figura 3.4. Fractura del concreto con 3% de hojuelas de PET, después del ensayo de flexión.....	36
Figura 3.5. Superficie de fractura del concreto con 3% de hojuelas de PET, después del ensayo de flexión. ....	37
Figura 3.6. Fractura del concreto con 5% de fibras de PET, después del ensayo de flexión. ....	37
Figura 3.7. Concreto con una capa de fibras de PET, después del ensayo de flexión. ....	38
Figura 3. 8. Desplazamiento en flexión de concretos con PET de desecho. ....	39
Figura 3.9. Concreto con 5% de fibras de PET, después del ensayo de flexión. ....	39
Figura 3.10. Módulos de elasticidad en flexión de concretos con PET de recicló. ....	40
Figura 3.11. Curvas carga-desplazamiento de concretos con PET de desecho, ensayados en compresión. ....	40
Figura 3.12. Microscopia óptica de las hojuelas de PET. ....	41
Figura 3.13. Resistencia a la compresión de los concretos con PET de recicló. ....	41
Figura 3.14. Desplazamiento en compresión de concretos con PET de recicló. ....	43
Figura 3.15. Módulos de elasticidad en compresión de concretos con PET de recicló. ....	44
Figura 3.16. Curvas carga-desplazamiento de concretos con nanosílice, ensayados en flexión.....	44
Figura 3.17. Módulo de ruptura de concretos con nanosílice.....	45
Figura 3.18. Desplazamiento en flexión de concretos con nanosílice.....	46
Figura 3.19. Módulos de elasticidad en flexión de concretos con nanosílice. ....	47
Figura 3.20. Curvas carga-desplazamiento de concretos con nanosílice, ensayados en compresión.....	47
Figura 3.21. Resistencia a la compresión de concretos con nanosílice. ....	48
Figura 3.22. Desplazamiento en compresión de concretos con nanosílice.....	49
Figura 3. 23. Módulos de elasticidad en compresión de concretos con nanosílice. ....	49
Figura 3.24. Curvas carga-desplazamiento de concretos con fibras de PET y nanosílice de 200 nm, ensayados en flexión. ....	50
Figura 3.25. Módulo de ruptura de concretos con nanosílice de 200 nm y una capa de fibras de PET. ....	51
Figura 3.26. Desplazamiento en flexión de concretos con nanosílice de 200 nm y una capa de fibras de PET.....	51
Figura 3.27. Módulos de elasticidad de concretos con nanosílice de 200 nm y una capa de fibras de PET. ....	52
Figura 3.28. Curvas carga-desplazamiento de concretos con una capa de fibras de PET y nanosílice, ensayados en compresión. ....	52
Figura 3.29. Resistencia a la compresión de concretos con una capa de fibras de PET y nanosílice de 200 nm.....	53

Figura 3.30. Desplazamiento en compresión de concretos con una capa de fibras de PET y nanosílice de 200 nm.....	54
Figura 3.31. Módulos de elasticidad de concretos con una capa de fibras de PET y nanosílice de 200 nm, ensayados en compresión.....	54
Figura 3.32. Curvas carga-desplazamiento de concretos con 0.3% y 0.9% de nanosílice, irradiados con rayos gamma, y ensayados en flexión.....	55
Figura 3.33. Módulo de ruptura de concretos con una capa de fibras de PET y nanosílice (0.3% y 0.9%), irradiados a diferentes dosis.....	56
Figura 3.34. Desplazamiento en flexión de concretos con una capa de fibras de PET y nanosílice (0.3% y 0.9%), irradiados a diferentes dosis.....	57
Figura 3.35. Módulos de elasticidad en flexión de concretos con 0.3% y 0.9% de nanosílice, irradiados con rayos gamma.....	59
Figura 3.36. Curvas carga-desplazamiento de concretos con 0.3% y 0.9% de nanosílice, irradiados y ensayados en compresión.....	59
Figura 3.37. Resistencia a la compresión de concretos con nanosílice e irradiados a diferentes dosis.....	60
Figura 3.38. Desplazamiento en compresión de concretos con 0.3% y 0.9% de nanosílice, e irradiados a diferentes dosis.....	62
Figura 3.39. Módulos de elasticidad en compresión de concretos con 0.3% y 0.9% de nanosílice, irradiados a diferentes dosis.....	63
Figura 3.40. Termogramas de resina poliéster expuesta a radiación gamma.....	65
Figura 3.41. Curvas TGA y DTG de resina poliéster envejecida, expuesta a 200 y 500 kGy.....	66
Figura 3.42. Curvas TGA y DTG de los concretos poliméricos.....	67
Figura 3.43. Curvas del Módulo de almacenamiento y la $\tan \delta$ , de la resina poliéster sin irradiar e irradiada.....	68
Figura 3.44. Curvas del Módulo de almacenamiento y de la $\tan \delta$ , de la resina poliéster con hojuelas o fibras de PET de desecho.....	70
Figura 3.45. Desprendimiento de hojuela en el compuesto de resina poliéster con 6% de hojuelas de PET.....	71
Figura 3.46. Curvas del Módulo de almacenamiento y $\tan \delta$ , de la resina poliéster con nanosílice.....	73
Figura 3.47. Fibras de PET sin irradiar e irradiadas.....	74
Figura 3.48. Concretos poliméricos sin irradiar e irradiados.....	75

## LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1. Características de las nanopartículas de sílice empleadas.....	23
Tabla 2.2. Condiciones en los ensayos de flexión y compresión.....	28
Tabla 2.3. Condiciones para los análisis dinámico-mecánicos.....	31
Tabla 2.4. Porcentajes en peso de los refuerzos utilizados en las muestras para los análisis dinámicos mecánicos.....	31
Tabla 3. 1. Porcentajes de aumento (+) o disminución (-) de cada propiedad mecánica, con respecto al valor del concreto control.....	64
Tabla 3.2. Temperatura de transición vítrea de la resina poliéster sin irradiar e irradiada.....	69
Tabla 3.3. $T_g$ y $\tan \delta$ de la resina poliéster con hojuelas o fibras de PET de desecho.....	71
Tabla 3.4. $T_g$ , $\tan \delta$ y $\epsilon'$ , del concreto con nanosílice.....	73

## INTRODUCCIÓN

En las últimas tres décadas ha sido más visible la preocupación por la cantidad de desperdicios plásticos que se generan a nivel mundial, y que tienen un impacto negativo en el medio ambiente cuando se desechan de manera inadecuada. Pese a esta problemática, es muy baja la cantidad de desechos plásticos que son sometidos a algún tipo de proceso que les permita ser utilizados en la fabricación de nuevos productos. Algunas empresas líderes en la industria del plástico (BASF, DOW, BAYER, etc.), crearon la AEW (Alliance to End Plastic Waste), con la finalidad de establecer el compromiso de promover estrategias de sustentabilidad y economía circular (Kaza, 2018; Evode, 2021; AEW, 2021).

Los procesos que normalmente se emplean para el manejo de los desechos plásticos, son el reciclaje (químico o mecánico), los rellenos sanitarios o la incineración. Mediante el reciclaje químico es posible obtener monómeros y oligómeros que pueden ser utilizados para la fabricación de nuevos polímeros, mientras que, con el reciclaje mecánico, se trituran los productos desechados para obtener materiales que puedan ser reincorporados en la fabricación de otros productos. Ambos tipos de reciclaje requieren de procesos de limpieza, que suelen estar contaminados con sustancias y de separación de los desechos, ya que pueden estar mezclados con desechos de distinta naturaleza.

Los rellenos sanitarios ayudan a limitar el daño medioambiental causado por los desperdicios. Sin embargo, su uso conlleva riesgos a largo plazo, ya que la degradación de los productos y la presencia de aditivos puede producir contaminantes orgánicos que afectan negativamente al agua subterránea y al subsuelo. Finalmente, es importante mencionar, que el proceso de incineración de los desechos plásticos puede estar ligado con la emisión de gases como las dioxinas y los furanos, las cuales pueden resultar perjudiciales para el medio ambiente (Shen, 2014).



Se han comenzado a implementar tecnologías alternativas que contribuyen al manejo y reducción de los desechos plásticos. Por ejemplo, mezclar los desechos plásticos con materiales para su uso en la elaboración de pavimentos en carreteras, que muestren mayor grado de flexibilidad. De igual manera, se han utilizado desechos plásticos como combustibles alternativos, principalmente en centrales eléctricas o en plantas industriales dedicadas a la producción de cemento, cal o acero. Con este procedimiento es posible economizar el consumo de combustibles fósiles y materias primas utilizadas para este fin, contribuyendo a procesos más sostenibles. Otros procesos de interés incluyen el uso de la pirolisis por plasma para la disposición de los desechos plásticos, y su procesamiento mediante craqueo térmico para obtener combustibles líquidos, como el diésel y el combustóleo (Anggaravidya, 2012).

Recientemente, ha ganado popularidad la mezcla de desechos plásticos con materiales vírgenes para crear materiales de mayor valor comercial que presenten características diferentes a las que tenían originalmente. Entre los materiales que normalmente se emplean para este fin, destaca la resina poliéster insaturada, ya que cuenta con la capacidad de mezclarse con materiales de desecho, sin embargo, presenta la desventaja de envejecerse después de los primeros seis meses de haber sido producida, es decir va perdiendo sus propiedades físicas y químicas (Reis, 2012).

En la industria, se suelen añadir cargas minerales a las resinas termoestables con el propósito de mejorar sus propiedades y disminuir su costo, lo cual da lugar a lo que se conoce como concreto polimérico. Una carga mineral que ha despertado interés son las nanopartículas de sílice, debido a su alta área superficial específica, alta disponibilidad comercial y precio competitivo. Algunos estudios indican que las propiedades mecánicas de la resina poliéster mejoran cuando se le adicionan partículas de nanosílice. Por lo tanto, la pérdida de propiedades físicas y químicas que esta experimenta debido a su envejecimiento podría mitigarse mediante su incorporación (Rajae, 2019).

Es importante mencionar que las interacciones existentes entre la resina poliéster insaturada y los agregados minerales de un concreto polimérico son físicas, no químicas. Por este motivo, es necesario mejorar las interacciones interfaciales presentes entre ambos componentes. La irradiación de los concretos poliméricos mediante rayos gamma ayuda a incrementar el grado de compatibilidad entre la matriz y los refuerzos utilizados, lo que conduce a una mejora en las propiedades del compuesto (Martínez-López 2018).

Teniendo en cuenta lo mencionado, en el proyecto de investigación se buscó evaluar el efecto que tiene la radiación gamma, a dosis de 100, 200 y 500 kGy, en las propiedades mecánicas y térmicas de concretos poliméricos, elaborados con resina poliéster envejecida, arena de sílice, PET de desecho y nanosílice. Se utilizaron dos tipos de PET de desecho (fibras y hojuelas).

Se espera que los resultados obtenidos fomenten el desarrollo de investigaciones que involucren el uso de desechos plásticos para la elaboración de nuevos productos, y que contribuyan a nuevos procesos sostenibles.

# **CAPÍTULO 1**

## **Marco Teórico**

## 1.1. Resina Poliéster

El desarrollo de la resina poliéster insaturada ha estado ligado a diversas aportaciones científicas, entre los cuales destaca el trabajo de Jöns Jacob Berzelius, quien en 1847 hizo el primer intento de producir una resina poliéster mediante la reacción de ácido tartárico con glicerol. En 1929, Wallace Carothers postuló una teoría sobre la condensación de los polímeros y los poliésteres, la cual sirvió de base para impulsar el desarrollo comercial de las resinas poliéster en 1941.

El término poliéster se utiliza para hacer referencia a polímeros que contienen el grupo funcional éster en su cadena principal. Los poliésteres se producen mediante la polimerización por condensación de un ácido dicarboxílico con un glicol. Con ellos se fabrican botellas, contenedores y fibras textiles. Los dos poliésteres más utilizados son el Tereftalato de Polietileno (PET) y las resinas poliéster.

Las resinas poliéster se pueden clasificar de acuerdo con el tipo de enlace carbono-carbono presente en la cadena principal (saturado o insaturado). En términos generales, las resinas poliéster pueden ser frágiles y duras, resistentes y elásticas, o blandas y flexibles, dependiendo del enlace carbono-carbono y del grado de reticulación.

Las resinas poliéster insaturadas (UPR), son polímeros termoestables cuya producción consta de dos etapas, la primera se refiere a la síntesis del poliéster y la segunda al mezclado de dicha sustancia con un monómero de entrecruzamiento. La síntesis se realiza mediante una reacción de policondensación del propilenglicol con anhídridos ftálicos y maleicos. Una vez obtenido el poliéster lineal, este se disuelve en monómero de estireno (35% en peso). El entrecruzamiento de las cadenas lineales de poliéster se produce en las insaturaciones no aromáticas de la cadena principal (Miskolczi, 2013; Chanteauminis, 2000; Parkyn, 1972).

En la actualidad se manejan diversos tipos de resina poliéster insaturada para la fabricación de fibras, plástico y materiales compuestos. Por ejemplo, las resinas orto se obtienen a partir de ácidos ortoftálicos y glicoles. Sus propiedades incluyen una limitada resistencia térmica y química. Mientras que las resinas iso, se obtienen a partir de un ácido isoftálico y un glicol. Son mucho más costosas, con valores altos de viscosidad, resistencia química, térmica y mecánica (Athawale, 2019).

## 1.2. Tereftalato de Polietileno (PET)

El PET se produjo por primera vez en 1941 por R. Whinfield y J.T. Dickson. Fue patentado para la fabricación de fibras textiles (1946) y películas para el embalaje de productos alimenticios (1952). En la década de los años 1970, se fabricaron envases para bebidas, mediante las técnicas de moldeo por soplado. El PET se produce mediante reacción de policondensación del etilenglicol con tereftalato de dimetilo o ácido tereftálico (Figura 1.1). El PET semicristalino tiene alta rigidez y dureza; mientras que el PET amorfo tiene mayor ductilidad, además de ser de bajo costo y de fácil procesabilidad (Chanteauminos, 2000; Lim, 2017).

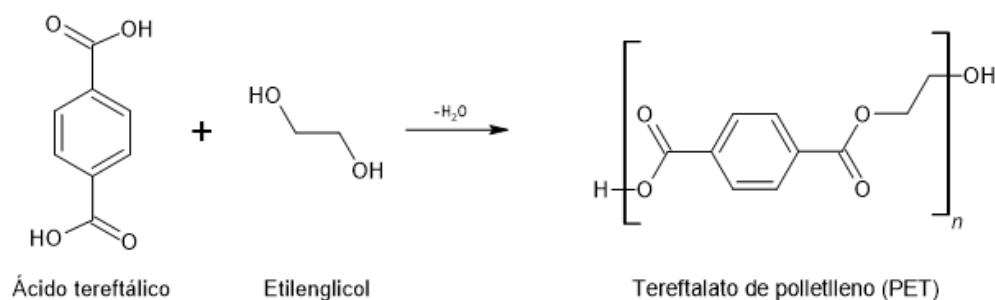


Figura 1.1. Estructura química del PET.

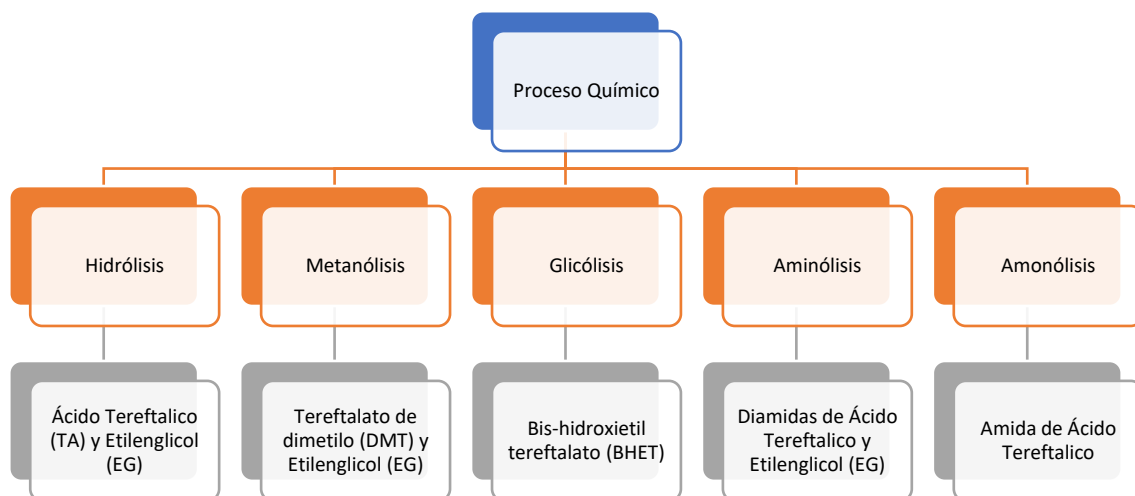
Las características físicas, químicas y térmicas del PET han permitido su empleo en diversas aplicaciones, entre las cuales se encuentran, la fabricación de textiles, artículos termoformados, productos para el hogar, piezas automotrices y botellas para el envasado de bebidas carbonatadas y no carbonatadas. Se estima que, a partir de 2016, el 71% del PET producido a

nivel mundial se destina a la fabricación de botellas (Chanteauminois, 2000; Lim, 2017; Soong, 2022).

La demanda mundial de PET ha experimentado un notable crecimiento a lo largo de los años. En 1997, su consumo era de aproximadamente 11.8 millones de toneladas, cifra que aumentó a 54 millones de toneladas en 2010. En América, este aumento se atribuye principalmente a su uso para la producción de botellas. Sin embargo, se generan enormes cantidades de desechos que terminan en la naturaleza, afectando la vida misma. Aunque el PET no tiene efectos negativos directos en el cuerpo humano ni representa un peligro inmediato para el medio ambiente, su alta resistencia a los agentes ambientales y naturales ocasiona que tarde cientos de años en degradarse por completo (Malik, 2017; Soong, 2022).

Para abordar este problema, se ha optado por implementar y buscar métodos que permitan controlar, reutilizar o disponer adecuadamente de la creciente cantidad de estos desperdicios. Los procesos comúnmente empleados para este fin incluyen el uso de rellenos sanitarios, así como el reciclaje químico y mecánico.

El reciclaje mecánico es uno de los métodos más efectivos para reincorporar los desechos de PET al ciclo productivo. Consiste en procesar nuevamente estos materiales a través de su trituración, con el objetivo de permitir su reutilización en la fabricación de productos, tanto en el sector de origen como en otros sectores. Las etapas que componen a este proceso son: la recolección de los desechos plásticos a tratar, su clasificación manual, triturado, lavado y peletización. En contraste, el reciclaje químico ofrece la posibilidad de descomponer los desechos de PET utilizando diversas técnicas de despolimerización, permitiendo obtener sustancias químicas útiles en la fabricación de nuevos polímeros, como oligómeros y monómeros. Los procesos utilizados para la despolimerización del PET incluyen la metanolisis, hidrólisis, glicólisis, aminólisis y amonólisis (Figura 1.2). (Babaremu, 2022; Raheem, 2019; Thachnatharen, 2021).



*Figura 1.2. Productos obtenidos mediante los distintos procesos químicos empleados para el reciclaje del PET (Elaboración propia).*

Un método para el control de desechos plásticos, que permite su fácil reutilización, consiste en usarlos como refuerzos en materiales compuestos. Las propiedades de estos compuestos dependen de la naturaleza y cantidad de los materiales empleados.

Por ejemplo, Hassebuddin estudió el efecto de la adición de hojuelas de PET de desecho, en las propiedades mecánicas de compuestos elaborados con resina poliéster. Se utilizaron hojuelas de tamaño de 4x6x0.7 mm y cantidades de 5 a 20% en peso. Los resultados mostraron que: I) Conforme aumentó la cantidad de PET, la resistencia a la tensión aumentó, hasta un valor máximo de 10.5 MPa cuando se añadió 10% de PET. II) mientras que la resistencia a la compresión disminuye. El valor máximo fue de 74.1 MPa, cuando se adicionó 5% de PET. III) Esta disminución se debió a la incompatibilidad entre las hojuelas de PET y la resina poliéster, ya que la superficie lisa de las hojuelas de PET dificulta su interacción con la resina poliéster (Hassebuddin, 2021).

### **1.3. Concretos Poliméricos**

Los concretos poliméricos tienen alta resistencia mecánica, lo cual ha permitido utilizarlos como materiales para la construcción. Se producen mezclando un aglomerante polimérico (resina termofija o termoestable), y agregados minerales (arena de sílice, arcilla, marmolina, granito, cuarzo); la polimerización se lleva a cabo con un catalizador. Otras sustancias que pueden emplearse en su elaboración incluyen plastificantes, retardantes de llama y agentes de acoplamiento. El desempeño de los concretos depende de las propiedades, de la geometría, del tamaño y las concentraciones de sus componentes.

Los concretos poliméricos utilizan resinas epoxi, poliéster, de furano, carbamida o metacrilato de metilo. Los que usan resina poliéster tienen alta resistencia química, mecánica y de adhesión, además, de alta resistencia al congelamiento y descongelamiento. Se suelen utilizar compuestos silíceos como cargas minerales, debido a su excelente adherencia a la resina poliéster de uso general, lo cual mejora las propiedades (Bedi, 2013; Figovsky, 2013; Shokrieh, 2015).

Por citar un ejemplo, en un estudio se ha reportado la elaboración de concreto polimérico con 75% de arena de sílice y 25% de resina poliéster de uso general, con una arena de un diámetro máximo de 5 mm. Los resultados muestran un aumento del 20% en la resistencia a la compresión y una reducción del 9.2% en la densidad (Shokrieh, 2015).

### **1.4. Concretos poliméricos con nanosílice**

La adición de nanopartículas a los materiales compuestos suele resultar en un aumento significativo de sus propiedades. Estas mejoras que pueden ser atribuidas a una buena interacción entre las nanopartículas y la matriz utilizada, suelen manifestarse en valores más altos de módulo de ruptura, resistencia a la compresión y/o tensión, así como en una mayor rigidez. Adicionalmente, el uso de nanomateriales como refuerzos reduce en gran medida la porosidad y



dificulta la penetración de agentes agresivos, lo cual mejora considerablemente la resistencia química (Rahmani, 2013).

La adición de nanosílice en compuestos elaborados con resina poliéster tiende a mejorar las propiedades mecánicas y térmicas, debido a la formación de puentes de hidrogeno entre los grupos silanol de la nanosílice y los grupos carbonilo de la resina poliéster. Para lograr una buena interacción entre la nanosílice y la resina poliéster, y lograr aumento en los valores de las propiedades mecánicas, es fundamental que las nanopartículas estén dispersas de manera efectiva en la matriz. También se han utilizado agentes de acoplamiento del tipo de silenos para mejorar las propiedades mecánicas de los compuestos elaborados con nanopartículas (Chen, 2003; Zhou, 2003).

En compuestos elaborados con resina poliéster insaturada y nanosílice (70-80 nm), se obtuvo un incremento del 18% en la resistencia a la tensión (hasta 64 MPa) y del 55% en la elongación (hasta 4.2%) cuando se añadió 1% de nanosílice. Mientras que el módulo de Young se incrementó en 50% cuando se adicione un 0.5% de nanosílice (Anggaravidya, 2012).

La adición de nanosílice en concretos mejora de manera significativa la resistencia a esfuerzos de compresión hasta un 27%, mientras que el módulo de ruptura mejora un 8%, además disminuye la permeabilidad a gases y líquidos (Sikora, 2015).

Compuestos elaborados con Tereftalato de Polietileno (PET) y nanopartículas de sílice (50-100 nm), tuvieron un incremento del 62.8% en la resistencia a la tensión, una disminución del 27% en su alargamiento, cuando se agregó 5% de nanosílice (Kaka, 2021).

## **1.5. Efecto de la radiación gamma en PET, resina poliéster y nanosílice**

La radiación gamma es un tipo de radiación electromagnética procedente de fotones o partículas que cuentan con la suficiente energía como para ionizar

átomos y/o segmentos moleculares. Se produce a partir los procesos subatómicos que toman lugar durante la descomposición de un elemento radioactivo como el Cobalto-60. Su aplicación involucra el uso de una atmosfera inerte (aire o N<sub>2</sub>) a temperatura ambiente (Ashfaq, 2020).

La radiación gamma ha sido empleada para la modificación de las propiedades fisicoquímicas de materiales. Los polímeros sometidos a radiación ionizante presentan cambios fisicoquímicos a través de tres procesos: rompimiento de cadena (scisson), reticulación (cross-linking) e injerto (grafting). Los procesos de rompimiento y reticulación de cadenas producen cambios en la densidad, cristalinidad, permeabilidad, temperatura de transición vítrea y de fusión, coeficiente de expansión térmica, módulo de elasticidad, así como en la resistencia a la corrosión, a la abrasión y a disolventes. Los cambios dependen de la tasa de dosis, la atmósfera y la temperatura a la cual se realiza la irradiación (Abdel-Rahman, 2018; Eyssa, 2018).

## **PET**

En el caso de PET de desecho irradiado hasta dosis de 670 kGy, se produce un incremento en el grado de cristalinidad, lo cual se atribuye a la formación de regiones de empaquetamiento, con la presencia de cadenas reticuladas y alineadas. Además, se obtiene una mayor energía de activación y disminución en la banda prohibida (Eg) (Kumar, 2012). En PET virgen irradiado hasta dosis de 2,000 kGy, se fueron obteniendo resultados de acuerdo con la dosis: a los 10 kGy se genera la ruptura de enlaces y la generación de radicales libres, posteriormente, las cadenas rotas interactuaron para producir reticulación. A dosis de 900 kGy, se obtuvo 35% de reticulación de las cadenas e incremento en la cristalinidad, lo cual produjo mayor estabilidad de sus propiedades fisicoquímicas y mecánicas (Aarya, 2012).

En mezclas de 50% de PET virgen y 50% de PET de desecho, expuestas a dosis de 50 kGy hasta 600 °C, se obtiene mayor estabilidad térmica y menor pérdida de peso, debido al entrecruzamiento de cadenas (Razek, 2010).

## **Resina Poliéster**

En el caso de resina poliéster expuesta a una dosis de 5 kGy, se mejora en 37.48% su resistencia a la tensión, y en 34.82% su módulo de elasticidad. Esto se debe a que la radiación gamma ocasiona la ruptura de los dobles enlaces de la resina poliéster, dando lugar a que las cadenas rotas interactúen entre sí para generar una mayor densidad de entrecruzamiento (Rahman, 2019). Mientras que a dosis de 100 kGy, el proceso de entrecruzamiento de sus cadenas poliméricas continúa, incrementando su grado de cristalinidad y modificando sus propiedades mecánicas. Por otra parte, a dosis mayores a 300 kGy, las cadenas poliméricas se fragmentan en segmentos más pequeños, lo que ocasiona que la resina presente propiedades mecánicas inferiores a las de la resina sin irradiar (Motaleb, 2020).

## **Nanosílice**

Es importante resaltar la escasez de información de los efectos de los rayos gamma en mezclas de resina poliéster y nanosílice. Sin embargo, existen estudios de los efectos de la radiación gamma en las propiedades de materiales compuestos que emplean nanoarcillas como refuerzo. Por ejemplo, compuestos elaborados con una matriz polimérica y nanoarcillas (3-10% en peso) y sometidos a dosis de radiación de 30 y 50 kGy; mostraron un mayor desempeño con 5% de nanoarcillas, debido a la mejor dispersión de estas en la matriz polimérica. Además, la resistencia a la compresión se incrementó gradualmente conforme se incrementó la dosis de radiación (Abdel-Rahman, 2018).

## **Justificación, Hipótesis y Objetivos**

### **1.6 Justificación**

Esta investigación busca fomentar la reincorporación de resinas envejecidas y PET de desecho al ciclo productivo, mediante su uso en la producción de concretos poliméricos; con la posibilidad de lograr una mejora en sus propiedades mecánicas y térmicas al añadir nanosílice y al hacer uso de la radiación gamma.

### **1.7 Hipótesis**

Es posible mejorar las propiedades mecánicas y térmicas de las mezclas de resina de poliéster envejecida, arena sílice, PET de desecho y nanosílice, mediante la aplicación de radiación gamma.

### **1.8 Objetivo General**

Evaluar los efectos de la radiación gamma en las propiedades mecánicas, térmicas y reológicas de mezclas de resina poliéster envejecida, arena sílice, PET de desecho y nanosílice.

### **1.9 Objetivos Específicos**

- Elaborar mezclas con resina poliéster envejecida, arena sílice, PET de desecho y nanosílice, a diferentes concentraciones de estos.
- Irradiar las mezclas con rayos gamma a dosis de 100, 200 y 500 kGy.
- Evaluar las propiedades mecánicas, térmicas y reológicas de las mezclas, antes y después de la irradiación.
- Evaluar el efecto de los rayos gamma en la resina de poliéster envejecida, el PET de desecho, la arena sílice y la nanosílice, mediante microscopía electrónica de barrido.

# **CAPÍTULO 2**

## **Metodología experimental**

## **2.1 Materiales empleados para la elaboración de los compuestos**

Los concretos poliméricos se elaboraron con resina poliéster envejecida, PET de desecho, fibra de PET, arena de sílice y nanosílice. A continuación, se detallan las características de cada uno de ellos.

### **2.1.1. Resina Poliéster Envejecida**

La resina poliéster insaturada ortoftálica utilizada fue donada por la compañía de Concretos Poliméricos S.A. de C.V. (Figura 2.1), una empresa ubicada en el Estado de México. La resina esta disuelto en monómero de estireno, con un contenido de sólidos del 74% y un tiempo de gelificación de 20 minutos.



*Figura 2.1. Resina poliéster envejecida.*

### **2.1.2 Arena Sílice**

La arena de sílice utilizada fue adquirida en la compañía Materiales Gosa, S.A. de C.V. la cual es una empresa ubicada en el estado de México. La arena de sílice es de un tamaño de malla 80 (180  $\mu\text{m}$ ).

### **2.1.3 Nanopartículas de sílice**

Se emplearon nanopartículas de sílice de dos tamaños, las cuales se describen en la tabla 2.1. Estos materiales fueron adquiridos de la empresa Sigma-Aldrich.

Tabla 2.1. Características de las nanopartículas de sílice empleadas

	Tipo 1	Tipo 2
Tamaño, nm	7	200-300
Código	S5130	S5505
Superficie específica, m <sup>2</sup> /g	370-420	175-225
pH	3.8-4.3	3.7- 4.3

#### 2.1.4 PET de desecho

Se cortó manualmente PET de desecho en forma de hojuelas, a partir de botellas. Las hojuelas tuvieron un tamaño de 3x2 mm (Figura 2.2).

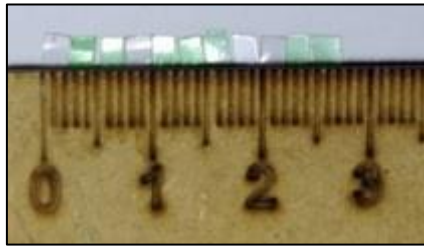


Figura 2.2. Hojuelas de PET de desecho

#### 2.1.5 Fibras de PET reciclado

Las fibras de PET utilizadas en la preparación de los concretos se obtuvieron del reciclaje de botellas de PET; presentando longitudes de entre 5 y 8 mm con un diámetro de 10  $\mu$ m (Figura 2.3).

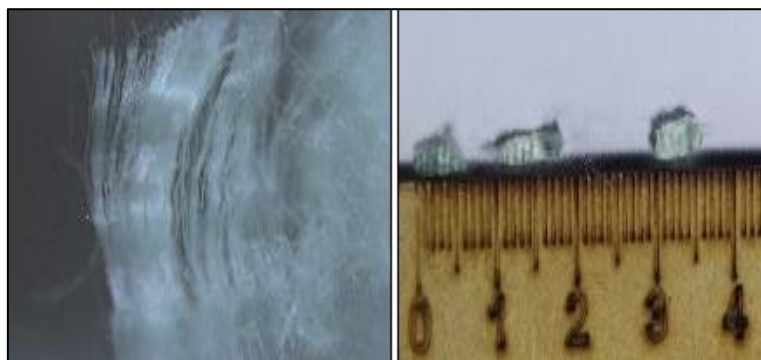


Figura 2.3. Fibras empleadas en los concretos poliméricos

## **2.2. Composición de las mezclas**

Uno de los aspectos fundamentales de esta investigación fue la selección de la matriz polimérica, la cual debía ser económica y de fácil obtención, y que permitiera favorecer la repetibilidad. Se decidió emplear resina de poliéster insaturado. Asimismo, se optó por utilizar arena de sílice como carga mineral debido a su bajo costo y a su fácil mezclado con la resina poliéster (Shokrieh, 2015).

En esta investigación se elaboraron 5 tipos de concretos:

- I. Concretos denominados "Control".  
Los cuales se elaboraron con 70% en peso de arena sílice y 30% de resina poliéster.
- II. Concretos con hojuelas de PET.  
Se sustituyó parcialmente a la arena sílice con 1, 3, y 6% de PET en forma de hojuelas.
- III. Concretos con fibras de PET.  
así como 1, 3, y 5% de PET en forma de fibras.
- IV. Concretos con nanosílice de 7 y 200 nm.  
Se emplearon concentraciones de 0.3% y 0.9% en peso de nanosílice (de 7 y 200 nm).
- V. Concretos con una capa del 1% de fibras de PET y concentraciones de 0.3% y 0.9% en peso de nanosílice de 200 nm.

## **2.3. Preparación de las muestras**

El procedimiento que se siguió para la preparación de las probetas de concreto se muestra en diagrama de la Figura 2.4.



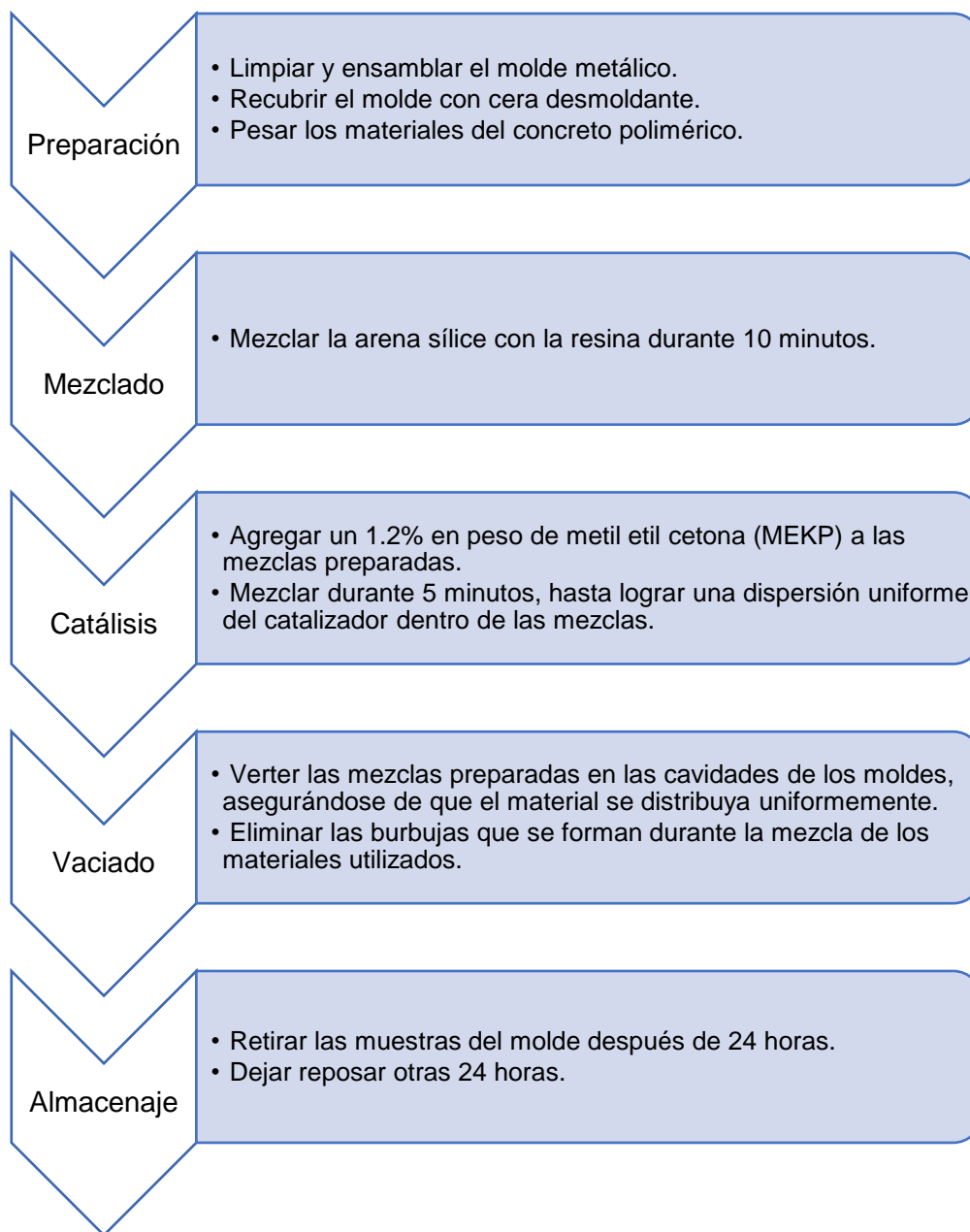


Figura 2.4. Diagrama del procedimiento para la elaboración de las probetas de concreto.

De acuerdo con el diagrama, primero se procedió a limpiar y ensamblar el molde metálico de vaciado, cuyas dimensiones son de 4x4x16 cm (de acuerdo con la norma EN-196-1). Posteriormente, cada espacio del molde se recubrió con una capa de cera desmoldante (Figura 2.5). Luego se pesó la resina, arena sílice, PET y nanosílice.



*Figura 2.5. Molde para la preparación de las probetas de concreto*

A continuación, se procedió a mezclar durante 10 minutos la arena sílice con la resina en un recipiente de acero inoxidable, con el objetivo de lograr una dispersión adecuada (Figura 2.6). Después se agregó un 1.2% en peso de peróxido metil etil cetona (MEKP) y se mezcló durante 5 minutos adicionales. Finalmente, se procedió a vaciar las mezclas en las cavidades del molde, y agitarlas para asegurar una distribución uniforme y no permitir la formación de burbujas de aire.



*Figura 2.6. Preparación de los concretos poliméricos*

En el caso de las probetas tipo IV, se colocó una capa de fibras de PET y se dispersó la nanosílice, de manera uniforme (figura 2.7).



*Figura 2.7. Mezclas de resina poliéster, arena de sílice, nanosílice y fibra de PET*

Todas las mezclas se dejaron reposar durante 24 horas; posteriormente se retiraron las muestras del molde y se colocaron en un espacio ventilado y libre de polvo (figura 2.8).



*Figura 2.8. Probetas de concretos poliméricos.*

## **2.4. Irradiación de las probetas de concreto**

Las probetas de concreto polimérico se expusieron a tres dosis de radiación gamma (100, 200 y 500 kGy), con una tasa de irradiación de 3.5 kGy/h. Dichas dosis fueron seleccionadas porque, según la literatura, dentro de este intervalo ocurren procesos que contribuyen a optimizar las propiedades de los concretos poliméricos, tales como el incremento en el grado de entrecruzamiento de la

matriz polimérica utilizada o la mejora del grado de adhesión entre la matriz polimérica y los refuerzos empleados en la preparación de los compuestos (Gao, 2019; Ashfaq, 2020; Singh, 2022; Silva, 2020; Hossain, 2023). La irradiación se realizó en el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ), utilizando el Irradiador Industrial JS-6500, el cual utiliza lápices de cobalto para su funcionamiento.

## 2.5. Evaluación de las propiedades mecánicas

Las pruebas de compresión y flexión se llevaron a cabo en una Máquina Universal de la marca Controls<sup>MR</sup> (Figura 2.9), ubicada en el Laboratorio de Investigación y Desarrollo de Materiales Avanzados (LIDMA), de la Facultad de Química de la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMex).



Figura 2.9. Máquina Universal utilizada para los ensayos de flexión y compresión.

Los ensayos de flexión a tres puntos y las pruebas de compresión se realizaron utilizando los parámetros que se muestran en la tabla 2.2.

Tabla 2.2. Condiciones en los ensayos de flexión y compresión

Parámetro	Valor
Límite superior de fuerza	25 ton
Límite superior de posición	4.5 mm
Velocidad en posición	0.3 mm/mm
Velocidad en fuerza	25 kgf/s

Los ensayos de compresión y flexión se realizaron conforme al procedimiento establecido en la norma BS EN 1015.

Asimismo, para el cálculo de la resistencia en compresión, se tomó en consideración la norma BS EN 1015 y, para el módulo de fractura, la norma ASTM C293, en la cual se establece lo siguiente:

$$R = \frac{3PL}{2bd^2}$$

Donde:

R= Módulo de ruptura (psi. o MPa.)

P= Carga máxima aplicada a la muestra (lbf. o N.)

L= Longitud del vano entre los soportes (in. o mm.)

b= Ancho promedio de la muestra (in. o mm.)

d= Profundidad promedio de la muestra (in. o mm.)

## **2.6. Análisis de la morfología mediante Microscopía Electrónica de Barrido**

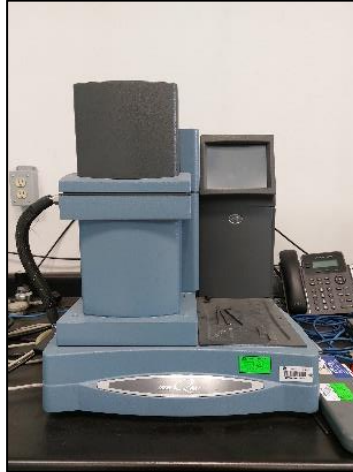
Las muestras de los concretos poliméricos y las fibras de PET, sometidas a 0, 200 y 500 kGy, fueron secadas en un evaporador rotatorio durante 24 horas, para, posteriormente, ser depositadas sobre una cinta adhesiva conductora de carbono y estudiadas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) en un microscopio de la marca JEOL modelo JSM, ubicado en el Centro Conjunto de Investigación en Química Sustentable (CCIQS).

## **2.7. Evaluación de las propiedades térmicas**

La evaluación del comportamiento térmico de los concretos poliméricos se realizó en un calorímetro diferencial de barrido (DSC) y en un equipo de análisis termogravimétrico (TGA). Se efectuó en un intervalo de 25 °C a 600 °C, con una rampa de calentamiento de 10 °C/min. Ambos equipos ubicados en el Laboratorio de Investigación y Desarrollo de Materiales Avanzados (LIDMA) de la UAEMex.

## 2.8. Análisis Dinámico Mecánico (DMA)

El comportamiento reológico de los concretos poliméricos, se analizó mediante análisis dinámico-mecánicos, realizados conforme a la norma ISO 6721, en un equipo DMA 800 de la marca TA Instruments (Figura 2.10).



*Figura 2.10. Analizador Dinámico Mecánico*

El Analizador Dinámico Mecánico está equipado con mordazas ajustables, un brazo oscilante (cantiléver) y un horno cerrado. En la figura 2.11, se observan las mordazas del DMA.



*Figura 2.11. Mordazas del Analizador Dinámico Mecánico*

Los ensayos se realizaron conforme a los parámetros mostrados en la tabla 2.3. Cabe mencionar, que se utilizó el mismo valor de compliancia para todas las pruebas.

Tabla 2.3. Condiciones para los análisis dinámico-mecánicos.

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Rampa de calentamiento, °C/min	5
Método usado	Amplitud
Valor de amplitud, $\mu\text{m}$	30
Compliancia, $\mu\text{m}/\text{N}$	0.773

Para la elaboración de las muestras utilizadas en estos análisis, se añadieron refuerzos en los porcentajes establecidos en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4. Porcentajes en peso de los refuerzos utilizados en las muestras para los análisis dinámicos mecánicos.

<b>Refuerzo</b>	<b>Porcentaje en peso</b>
Fibra de PET corta (con longitudes de entre 5 mm y 8 mm)	1, 3 y 5
Fibra de PET larga con una longitud de 15 mm	1, 3 y 5
Hojuelas de PET	1, 3 y 6
Nano-sílice con diámetros de 7 nm y 200 nm	0.3 y 0.9

Asimismo, el procedimiento empleado para la preparación de dichos especímenes se muestra en la figura 2.12.

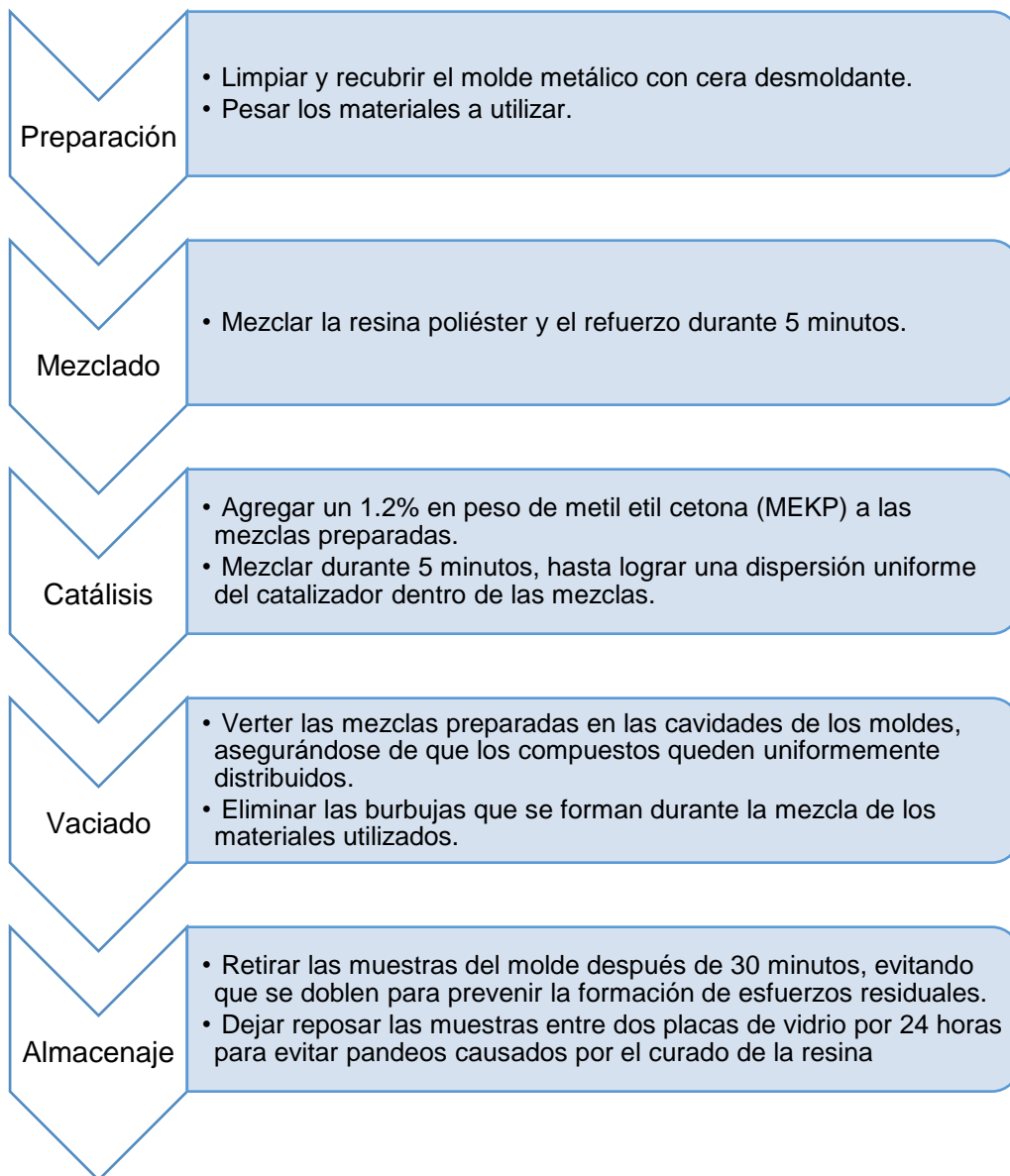


Figura 2.12. Diagrama del procedimiento para la elaboración de las muestras para los análisis dinámicos mecánicos.



# **CAPÍTULO 3**

## **Resultados**

## Resultados

Los concretos poliméricos fueron ensayados en flexión y compresión. Se evaluaron los 6 tipos de concretos:

- I. Concretos Control.
- II. Concretos con hojuelas de PET de desecho.
- III. Concretos con fibras de PET de desecho.
- IV. Concretos con una capa de fibras de PET
- V. Concretos con nanosílice.
- VI. Concretos con una capa de fibras de PET y nanosílice.

### 3.1 CONCRETOS CON PET DE DESECHO

#### 3.1.1. Módulo de ruptura

Las curvas de carga vs desplazamiento obtenidas para los concretos poliméricos se muestran en la figura 3.1. Tras realizar los cálculos correspondientes, se observa que, para el concreto Control, se tiene un módulo de ruptura de 24.6 MPa, el cual es el mayor valor de todas las probetas.

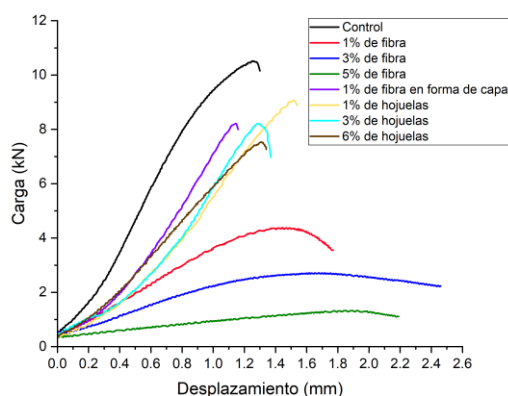


Figura 3.1. Curvas carga-desplazamiento de concretos con PET de desecho, ensayados en flexión.

Las fracturas producidas en los concretos Control, después de la prueba de flexión, mostraron un comportamiento común, es decir se obtuvo una fractura continua, como se muestra en la figura 3.2.



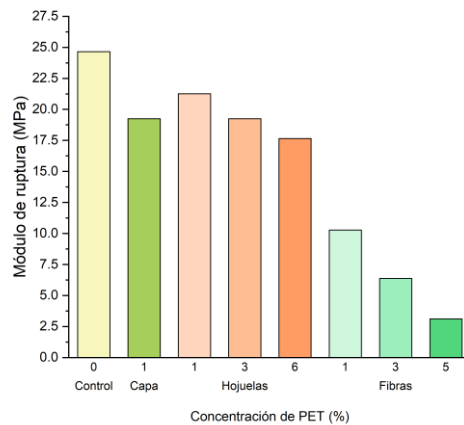
*Figura 3.2. Fractura del concreto control durante el ensayo de flexión.*

De la figura 3.1 de curvas carga-desplazamiento, se analizaron:

- El módulo de ruptura
- El desplazamiento máximo
- Módulo de elasticidad

Para el caso del módulo de ruptura, los resultados se muestran en la figura 3.3. En donde, el módulo de ruptura del concreto control fue de 24.6 MPa. Este disminuye gradualmente conforme se incrementa la cantidad de PET añadido, ya sean hojuelas o fibras. En el caso del concreto con hojuelas de PET, los valores disminuyeron hasta 28%; mientras que el concreto con fibras de PET, 89%, ambos con respecto a los valores del concreto control.

Es importante señalar que se utilizó el 1, 3 y 6% de hojuelas de PET, pero en el caso de fibras de PET, solo se utilizó hasta un 5%, con el cual se obtuvo una mejor adhesión entre las fibras, la arena y la resina. Debido a la mayor cantidad de fibras, la resina fue insuficiente para cubrir adecuadamente tanto a las partículas de arena como a las fibras de PET.



*Figura 3.3. Módulo de ruptura de concretos poliméricos con PET de desecho.*

En la figura 3.4. se muestra un ejemplo de la propagación de las fracturas producidas durante el ensayo de flexión de los concretos con hojuelas de PET. Se observa una fractura más curvada que la obtenida para el concreto control, así como la presencia de pedazos pequeños de PET. Es decir, la adición del 3% y 6% de hojuelas de PET actúa como obstáculo, provocando que la grieta se propague en forma curvilínea.



*Figura 3.4. Fractura del concreto con 3% de hojuelas de PET, después del ensayo de flexión.*

La disminución del módulo de ruptura se debe a la superficie lisa de las hojuelas de PET, la cual debilita la adherencia entre la resina y las partículas de arena sílice. Además, se generan espacios vacíos. En la figura 3.5 se presenta la zona de fractura de concretos con hojuelas de PET. Se pueden observar los espacios vacíos y hojuelas de PET incrustadas en el prisma rectangular.

Hameed (2019), señala que la inclusión de hojuelas de PET en el concreto conlleva a una disminución de las propiedades mecánicas, debido a la deficiente adhesión entre la superficie del plástico y el material que lo contiene. No obstante, hace énfasis en la capacidad de este material para obstaculizar el crecimiento y la propagación de las grietas generadas durante la fractura de dichos materiales.



*Figura 3.5. Superficie de fractura del concreto con 3% de hojuelas de PET, después del ensayo de flexión.*

En el caso de los concretos con fibras de PET, el módulo de ruptura disminuyó drásticamente conforme se añadió mayor cantidad de fibras. En la figura 3.6 se muestran las fracturas obtenidas en este tipo de concretos (indicada en el recuadro rojo). Se observan fisuras muy sutiles, lo cual indica que el concreto es eficaz ante la propagación de las fisuras, cuando se somete a la prueba de flexión.

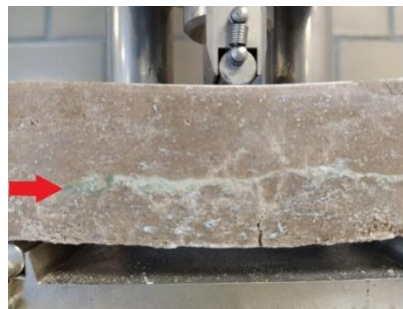


*Figura 3.6. Fractura del concreto con 5% de fibras de PET, después del ensayo de flexión.*

Debido a los muy bajos valores de módulo de ruptura de concretos con fibras de PET, se decidió elaborar concretos con una capa de fibras de PET al 1%. Esta se colocó en la parte central de la probeta y fue previamente impregnada

con resina poliéster. El objetivo fue evaluar y comparar los valores de concretos con fibras dispersas al azar y concretos con una capa de fibras alineadas.

De acuerdo con los datos de módulo de ruptura (figura 3.3), el valor para el concreto con una capa del 1% fibras fue de 19.5 MPa; este valor es 20% menor que el del concreto control. Pero es muy superior al del concreto con fibras. Por otra parte, este valor es igual al de concretos con 3% de hojuelas de PET, es decir las fibras colocadas en una capa equiparan a las hojuelas. La capa de fibras de PET se observa en la figura 3.7 (indicada por la flecha).



*Figura 3.7. Concreto con una capa de fibras de PET, después del ensayo de flexión.*

### **3.1.2. Desplazamiento en flexión**

Para el caso del desplazamiento a la fractura, los resultados se muestran en la figura 3.8. Se observa que el valor del concreto control fue de 1.3 mm. Como se puede observar, la adición de fibras resultó en un aumento significativo en la ductilidad de los concretos poliméricos, generando un incremento de hasta el 89% en su desplazamiento, cuando se utiliza una concentración del 3%. Por otro lado, la incorporación de hojuelas de PET incrementó ligeramente la ductilidad de los concretos, obteniéndose un aumento en el desplazamiento del 18% al emplear una concentración del 1% de hojuelas. Sin embargo, los concretos con una capa del 1% de fibra de PET presentan un desplazamiento a la fractura 10% menor a la del concreto control. Es decir, cuando los concretos tienen una capa de fibras de PET, se vuelven más frágiles.

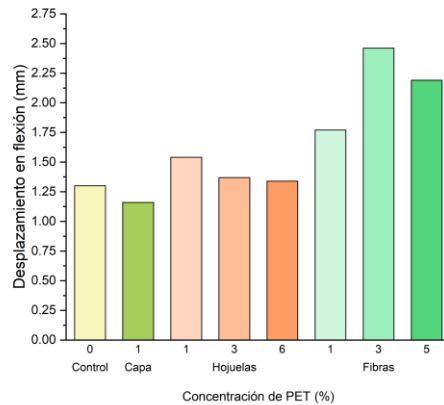


Figura 3. 8. Desplazamiento en flexión de concretos con PET de desecho.

El incremento en los valores de desplazamiento a la fractura en los concretos con fibras de PET permite vislumbrar menor propagación de fisuras generadas durante el ensayo, como se muestra en el rectángulo rojo de la figura 3.9.



Figura 3.9. Concreto con 5% de fibras de PET, después del ensayo de flexión.

### 3.1.3. Módulo de elasticidad en flexión

Para el caso del módulo de elasticidad en flexión, los resultados se presentan en la figura 3.10. Se puede apreciar un comportamiento diferente para cada tipo de concreto. El valor del concreto de control fue de 1.07 GPa. En el caso de concreto con hojuelas de PET, los valores disminuyeron un 45% cuando se añadió un 1% de hojuelas y se notó un decremento ligeramente mayor tras emplear un 3% de hojuelas. Por otro lado, los concretos con un 6% de hojuelas de PET mostraron valores ligeramente superiores al resto de las muestras con hojuelas de PET.

Para los concretos con fibras de PET, el módulo de flexión disminuye gradualmente a medida que se incrementa la cantidad de PET añadido. Los valores disminuyeron hasta 94%, respecto al obtenido para el concreto control.

Finalmente, el valor para los concretos con una capa de fibras de PET disminuyo un 34%, pero este valor fue mayor al de los concretos con hojuelas o fibras. La disminución del módulo de elasticidad puede atribuirse a que el PET (en forma de hojuela o fibra) no se distribuye uniformemente en las mezclas preparadas, lo que resulta en la presencia de puntos débiles dentro de los especímenes que interfieren en la distribución de los esfuerzos aplicados en el concreto polimérico. (Taherkhani, 2014).

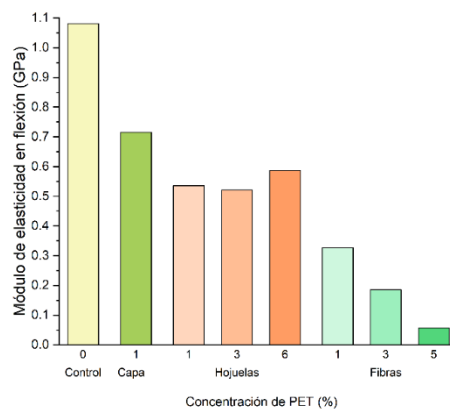


Figura 3.10. Módulos de elasticidad en flexión de concretos con PET de recicló.

### 3.1.4. Resistencia a la compresión

En la figura 3.11 se muestran las curvas carga-desplazamiento de los ensayos de compresión de concretos poliméricos con PET de desecho.

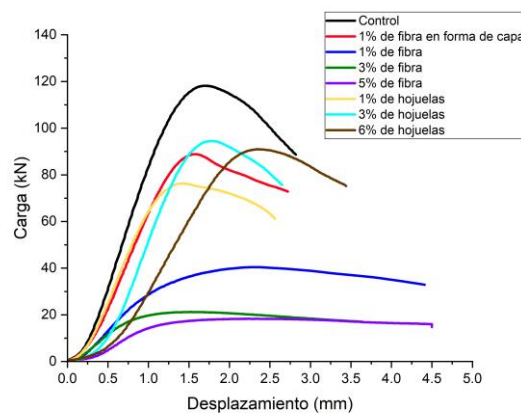


Figura 3.11. Curvas carga-desplazamiento de concretos con PET de desecho, ensayados en compresión.



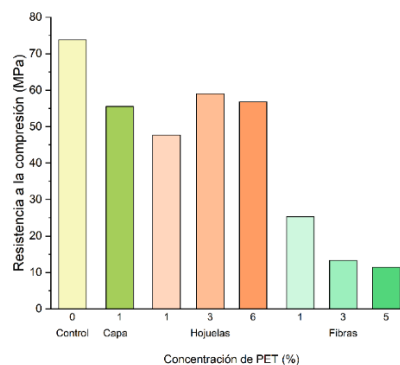
A partir de los datos de figura 3.11, se elaboró la figura 3.13 que muestra los valores de resistencia a la compresión de cada tipo de concreto. Para el concreto control se obtuvo una resistencia de 73.8 MPa, que fue la máxima de todas los concretos ensayados.

En el caso de concretos con hojuelas de PET, los valores son mayores que los logrados con fibras de PET, pero se mantienen por debajo del valor del concreto control. Los valores varían entre 49.8 MPa y 60 MPa, que son hasta 35% menores a los del concreto control. Esta disminución se puede deber a las superficies lisas de las hojuelas (mostradas en la figura 3.12), las cuales dificultan las interacciones con la resina poliéster.



*Figura 3.12. Microscopia óptica de las hojuelas de PET.*

La resistencia para los concretos con fibras de PET va disminuyendo conforme se incrementa la cantidad de fibras; hasta llegar a una resistencia de 11.4 MPa para concreto con 5% de fibras, este valor es 84% menor que el del concreto control. Tal disminución es provocada por las fibras, las cuales obstaculizan las transferencias de esfuerzos en la matriz del concreto. De acuerdo con Haseebuddin (2021), la disminución se debe a que la incorporación de altas cantidades de fibras de PET en los concretos impide que estas interactúen adecuadamente con la resina poliéster, ocasionando una reducción en las propiedades mecánicas de estos materiales.



*Figura 3.13. Resistencia a la compresión de los concretos con PET de reciclado.*

Finalmente, para el concreto con una capa de fibras de PET, se observa un valor de 55.5 MPa, el cual es un 24% menor que el del concreto control y comparable al obtenido para el concreto con un 6% de hojuelas de PET. Es decir, al parecer un mayor contenido de hojuelas actúa como si se tuviera una capa de fibras. Más aun, las hojuelas tienen mayor área de contacto con la resina, lo que produce mayor resistencia. Finalmente, es evidente que la adición de hojuelas de PET resulta en una mayor resistencia a la compresión en comparación con la adición de fibras de PET en los concretos poliméricos.

### **3.1.5. Desplazamiento en compresión**

En la figura 3.14 se muestran los valores del desplazamiento en compresión de los concretos con PET. Para el concreto control el desplazamiento es de 2.82 mm. En el caso de los concretos con hojuelas se presentan valores similares al del concreto control (2.65 mm), esto para 1 y 3% de hojuelas. Sin embargo, cuando se agrega un 6% de hojuelas, el desplazamiento en el concreto aumenta un 22%. Es decir, mayor cantidad de hojuelas pueden prevenir la propagación de las grietas generadas durante la compresión.

Para los concretos con fibras, los valores son mayores a los del concreto control, siendo de hasta un 60% para concretos con 5% de fibras. Este aumento, se debe a las características de estiramiento que poseen las fibras y su propiedad de postergar la propagación de las grietas, que pudieran generarse durante el ensayo de compresión.

Finalmente, los concretos con una capa de fibras de PET, obtuvieron el mismo valor que el del concreto control. Es decir, de nueva cuenta el poner una capa de fibras equivaldría a poner hojuelas, ya que los valores son muy similares.

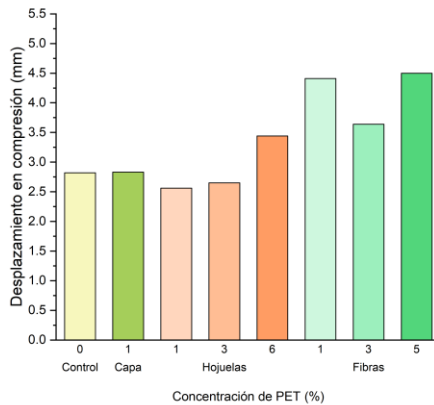


Figura 3.14. Desplazamiento en compresión de concretos con PET de recicló.

### 3.1.6. Módulo de elasticidad en compresión

En lo que respecta al módulo de elasticidad en compresión, se observa que el concreto control tiene un valor de 2.6 GPa (Figura 3.15). Los valores para concretos con hojuelas de PET son mayores que los del concreto con fibras, teniendo valores entre 1.5 y 2.2 GPa; los cuales son menores hasta en un 43% que los del concreto control.

Mientras que para los concretos con fibras de PET, los valores disminuyen drásticamente hasta un 80%; es decir, la rigidez de los concretos disminuye. En el caso concreto con una capa de fibras de PET, su valor de 2.05 GPa es similar al del concreto con 1% de hojuelas, pero es menor en 21% que el del concreto control.

En terminos generales, la adición de hojuelas o fibras de PET, disminuyen el módulo de elasticidad, lo cual se manifiesta en tener un concreto menos rígido.

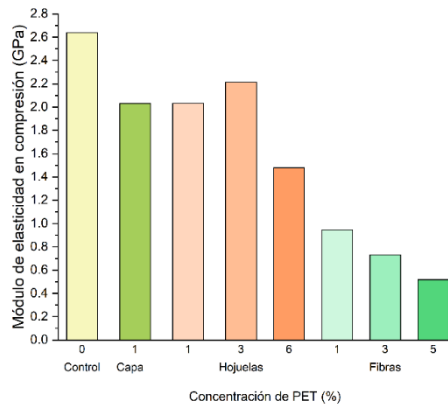


Figura 3.15. Módulos de elasticidad en compresión de concretos con PET de recicló.

## 3.2. CONCRETO CON NANOSÍLICE

Con el objetivo de incrementar la resistencia mecánica, se adicionó nano-sílice a los concretos poliméricos de control, sustituyendo parcialmente la arena sílice por la cantidad de nano-sílice. Se utilizaron dos tamaños de nano-sílice (7 nm y 200 nm), en cantidades de 0.3% y 0.9% en peso.

### 3.2.1 Módulo de ruptura

Las curvas de carga-desplazamiento de los concretos con nanosílice ensayados en flexión, muestran valores muy similares que los del control (figura 3.16).

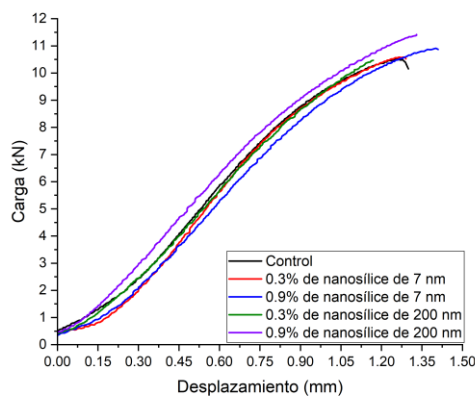


Figura 3.16. Curvas carga-desplazamiento de concretos con nanosílice, ensayados en flexión.

Con los datos de la figura 3.16, se elaboró la figura 3.17, que muestra los resultados del módulo de ruptura.

En lo que respecta al módulo de ruptura, los concretos de control tuvieron un valor de 24.5 MPa. Se observa mayor valor para los concretos con 0.9% de nano-sílice de 200 nm, siendo 8.8% mayor que el del concreto control. Es decir, las nanopartículas de sílice actúan como refuerzo, permitiendo mayor distribución de los esfuerzos de carga y en consecuencia mayor módulo de ruptura. De acuerdo con Anggaravidya (2012), al reforzar la resina poliéster con nano-sílice en concentraciones inferiores al 1%; la nano-sílice tiende a dispersarse de manera uniforme en la matriz polimérica, lo que facilita su interacción con la resina poliéster y produce incremento en sus propiedades mecánicas.

Por otro lado, el incremento en el módulo de ruptura también puede atribuirse a que las nanopartículas tienden a ocupar los espacios vacíos entre las partículas más grandes, mejorando su compactación, lo cual produce mayor resistencia y menor propagación de grietas; lo cual ha sido descrito por Idrees (2021).

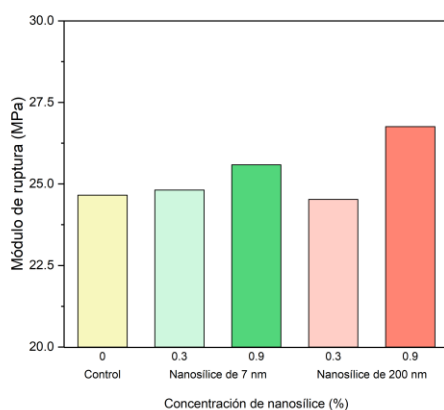


Figura 3.17. Módulo de ruptura de concretos con nanosilice.

### 3.2.2. Desplazamiento en flexión

Para el caso del desplazamiento a la fractura, se muestran los resultados en la figura 3.18. En primer lugar, el desplazamiento del concreto control fue de 1.3 mm. Se puede observar un comportamiento muy similar al del módulo de

ruptura. Es decir, los valores aumentan para mayor cantidad de nano-sílice, teniendo máximos valores cuando se adiciona nano-sílice de 7 nm.

Para concreto con nano-sílice de 7 nm, se observó un aumento del 8.4% con la adición de 0.9% de nano-sílice. Es decir, el desplazamiento en flexión es mayor cuando se agregan nanopartículas de menor tamaño (7 nm), estas reducen el grado de porosidad y permiten mayor flexibilidad al concreto antes de la fractura.

En el caso de concreto con nanopartículas de 200 nm, primero se tiene una disminución en el desplazamiento, al agregar un 0.3% de nano-sílice, que llega a ser del 10%. Es decir, al tener poca cantidad de nanopartículas, estas no logran actuar como refuerzos, lo que ocasiona el aumento de la rigidez y la reducción del desplazamiento. Sin embargo, cuando se incorpora 0.9% de nanopartículas, se incrementa el desplazamiento en 2.3%.

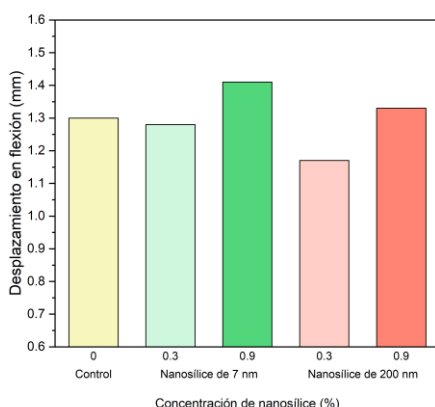


Figura 3.18. Desplazamiento en flexión de concretos con nanosílice.

### 3.2.3. Módulos de Elasticidad en flexión

Para el caso del módulo de elasticidad en flexión, el concreto control presentó un valor de 1.08 GPa. (Figura 3.19). En general, el valor de los módulos es muy similar para todos los concretos. Solo el concreto con 0.3% de nano-sílice de 7 nm, tuvo un incremento del 14% con respecto al del concreto control. Este aumento en la rigidez de los concretos puede atribuirse el incremento del grado de compactación que producen las nanopartículas de sílice.

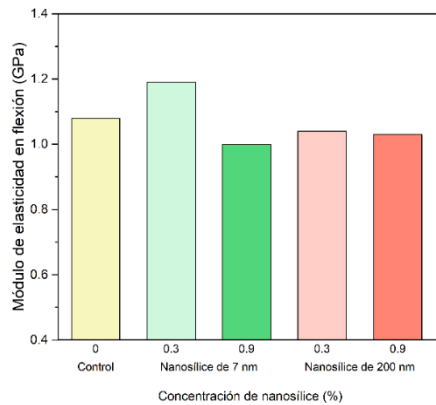


Figura 3.19. Módulos de elasticidad en flexión de concretos con nanosilice.

### 3.2.4 Resistencia en compresión

Las curvas de carga-desplazamiento de los concretos con nano-sílice ensayados en compresión, muestran valores muy similares que las del concreto control (figura 3.20).

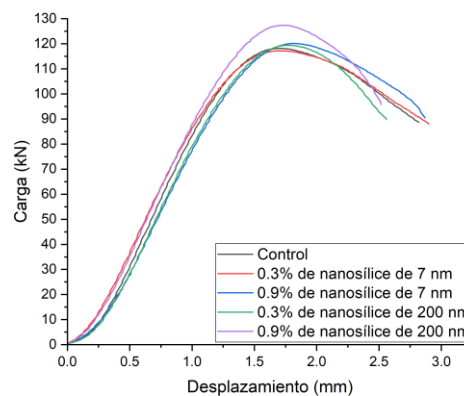


Figura 3.20. Curvas carga-desplazamiento de concretos con nanosilice, ensayados en compresión.

Con los datos de la figura 3.20, se elaboró la figura 3.21, que muestra los resultados de la resistencia a la compresión.

Para el concreto control se obtuvo una resistencia de 73.8 MPa. En general, el valor de los módulos es muy similar para todos los concretos. Solo el concreto con 0.9% de nano-sílice de 200 nm, tuvo un incremento del 7.8% con respecto al del concreto control. Es decir, las nanopartículas de sílice refuerzan al

concreto polimérico facilitando la distribución de los esfuerzos de compresión, lo que, a su vez, mejora su resistencia mecánica.

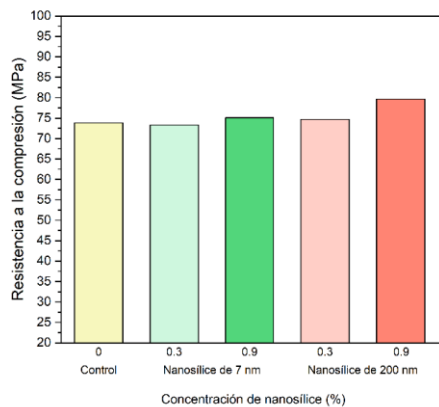


Figura 3.21. Resistencia a la compresión de concretos con nanosílice.

### 3.2.5. Desplazamiento en Compresión

Para el caso del desplazamiento a la fractura, los resultados se muestran en la figura 3.22. En primer lugar, el desplazamiento del concreto control fue de 2.82 mm. Se puede observar que los valores aumentan ligeramente (2.8%), para los concretos con nano-sílice de 7 nm; pero disminuyen para los concretos con nano-sílice de 200 nm. El desplazamiento en flexión es mayor cuando se agregan nanopartículas de menor tamaño (7 nm), concediendo un mayor grado de ductilidad al concreto antes de la fractura.

En cambio, en el caso del concreto con nanopartículas de 200 nm, se observó una disminución drástica en el desplazamiento antes de la fractura, alcanzando una reducción máxima del 10.6% al agregar un 0.9% de nano-sílice. Esta disminución se puede atribuir al hecho de que las nanopartículas de 200 nm confieren un carácter más frágil a los concretos, lo que provoca una reducción en su capacidad para deformarse cuando se someten a esfuerzos de compresión.



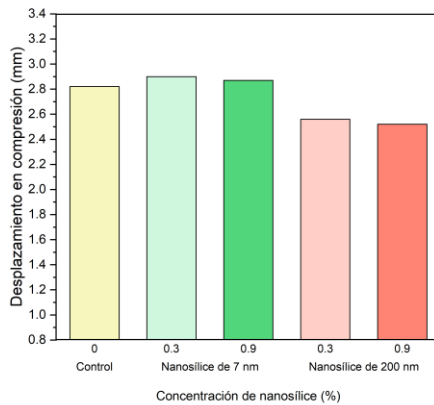


Figura 3.22. Desplazamiento en compresión de concretos con nanosílice.

### 3.2.6. Módulos de Elasticidad en compresión

Para el caso del módulo de elasticidad en compresión, el concreto control presentó un valor de 2.6 GPa. (Figura 3.23). Solo el concreto con 0.9% de nano-sílice de 200 nm, tuvo un incremento del 3.1% con respecto al del concreto control. Este aumento en la rigidez de los concretos puede atribuirse al incremento del grado de compactación que producen las nanopartículas de sílice.

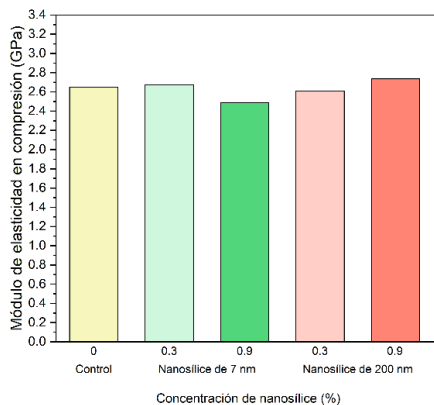


Figura 3. 23. Módulos de elasticidad en compresión de concretos con nanosílice.

## 3.3 CONCRETO CON UNA CAPA DE FIBRAS DE PET Y NANOSÍLICE DE 200 nm

Se elaboraron dos tipos de concretos: I) con una capa de fibras de PET, y II) con una capa de fibras de PET y nano-sílice de 200 nm.

### 3.3.1. Módulo de ruptura

Las curvas de carga-desplazamiento de los concretos con fibras de PET y nano-sílice de 200 nm, se muestran en la Figura 3.24. Se observa que los valores del concreto control son los mayores de todos, mientras que los otros concretos presentan diferencias entre ellos.

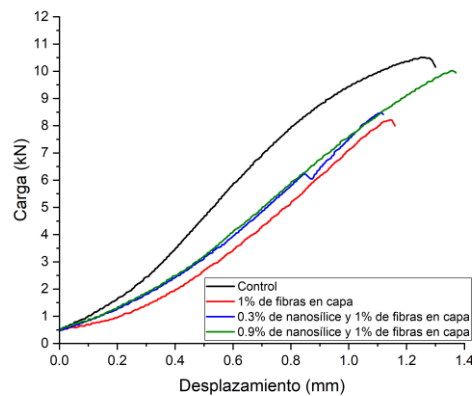


Figura 3.24. Curvas carga-desplazamiento de concretos con fibras de PET y nanosílice de 200 nm, ensayados en flexión.

Con los datos de la figura 3.24, se elaboró la figura 3.25 que muestra los módulos de ruptura de los concretos. El concreto control tuvo un módulo de ruptura de 24.6 MPa.

En el caso de concretos con una capa de fibras de PET, el módulo de ruptura fue de 19.5 MPa, lo cual significa una disminución del 20% con respecto a la del concreto control. Mientras que los concretos, con una capa de fibras de PET y nano-sílice de 200 nm, disminuyeron 4.8%. Es decir, la adición del 0.9% de nano-sílice casi mantiene los valores del concreto control.

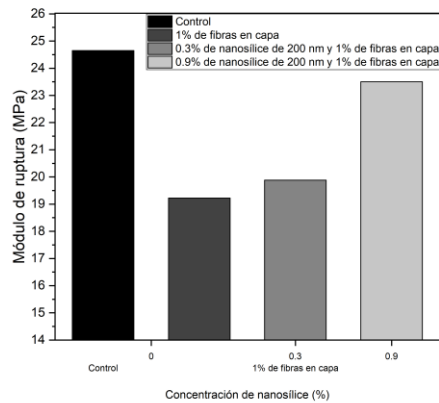


Figura 3.25. Módulo de ruptura de concretos con nanosilice de 200 nm y una capa de fibras de PET.

### 3.3.2 Desplazamiento en flexión

En el caso del desplazamiento en flexión, el concreto control presentó un valor de 1.3 mm. El cual disminuyó 9% para el concreto con una capa de fibras de PET. Mientras que los valores del concreto con nano-silice, y una capa de fibras, aumentaron hasta 6%, cuando se añadió 0.9% de nano-silice.

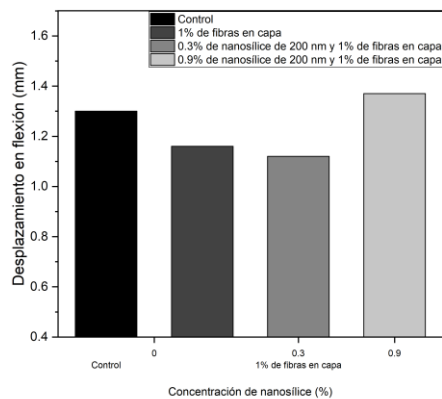


Figura 3.26. Desplazamiento en flexión de concretos con nanosilice de 200 nm y una capa de fibras de PET.

### 3.3.3 Módulo de Elasticidad en flexión

Los resultados del módulo de elasticidad en flexión se presentan en la Figura 3.27. El concreto control tuvo un módulo de elasticidad de 1.08 GPa. Sin embargo, el concreto con una capa de fibras PET disminuyó en 33% el valor, es decir, la capa de fibras reduce la rigidez del concreto. Una situación similar

sucedió para concretos con una capa de fibras y nano-sílice, los módulos disminuyeron hasta 29%, con respecto al concreto control.

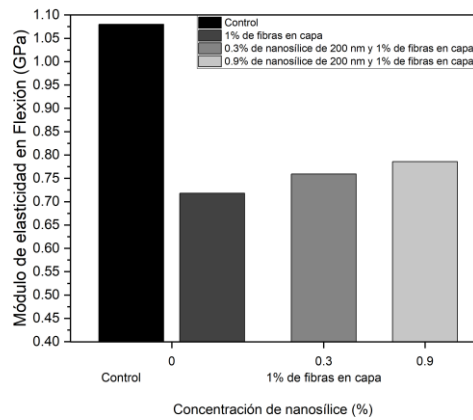


Figura 3.27. Módulos de elasticidad de concretos con nanosílice de 200 nm y una capa de fibras de PET.

### 3.3.4 Resistencia a la compresión

Las curvas de **carga-desplazamiento** de la resistencia a la compresión de concretos con una capa de fibras de PET y nano-sílice de 200 nm, muestran diferencias notables (figura 3.28).

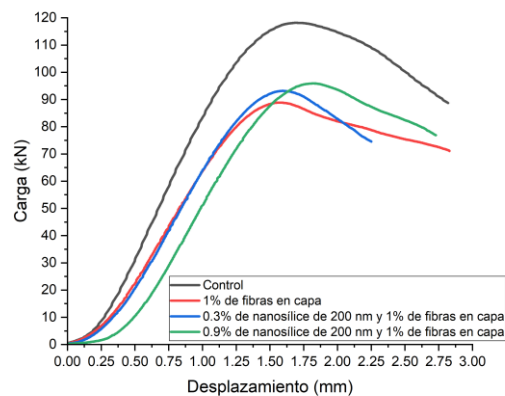
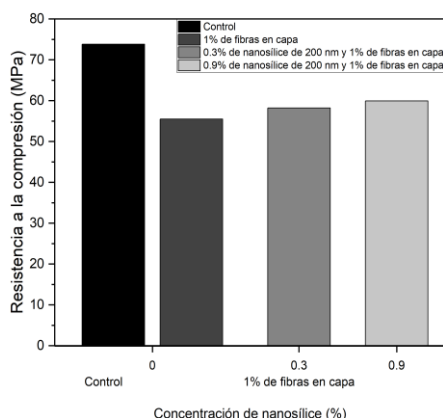


Figura 3.28. Curvas carga-desplazamiento de concretos con una capa de fibras de PET y nanosílice, ensayados en compresión.

De los datos presentados en la figura 3.28, se elaboró la figura 3.29 que muestra los valores de la resistencia a la compresión de concretos. Se observa un valor de resistencia de 73.8 MPa para el concreto control.

En el caso de los concretos reforzados con una capa de fibras de PET, se observó una reducción significativa del 24% en su resistencia a la compresión, en comparación con los valores obtenidos en los concretos de control. Esto sugiere que la inclusión de fibras de PET obstaculiza la transferencia efectiva de esfuerzos entre los componentes del concreto polimérico, lo que resulta en una disminución de su capacidad para resistir esfuerzos de compresión.

Sin embargo, en el caso de los concretos reforzados con una capa de fibras y nano-sílice, solo se observó una disminución del 21% en su resistencia a la compresión. Esto confirma que la presencia de nano-sílice permite al concreto mantener una mayor capacidad para tolerar los esfuerzos que se le aplican.



*Figura 3.29. Resistencia a la compresión de concretos con una capa de fibras de PET y nanosílice de 200 nm.*

### 3.3.5. Desplazamiento en compresión

Los concretos de control tuvieron un desplazamiento de 2.8 mm; el mismo que presentó el concreto con una capa de fibras, es decir, la presencia de esta capa no influye en el desplazamiento. Sin embargo, cuando se agregó 0.3% de nano-sílice, los valores disminuyeron hasta 20 % menos; pero al agregar 0.9% de nano-sílice, los valores disminuyeron solo 2.8 %. En estos concretos se obtuvo una adecuada dispersión de la nano-sílice en la matriz polimérica.

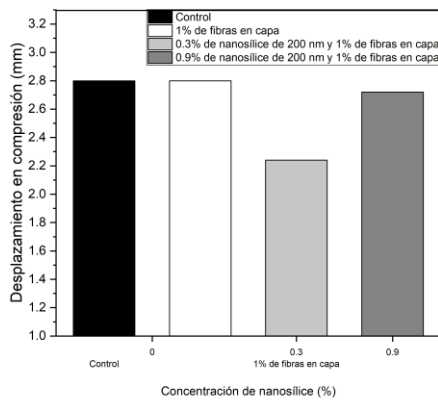


Figura 3.30. Desplazamiento en compresión de concretos con una capa de fibras de PET y nanosilice de 200 nm.

### 3.3.6 Módulo de Elasticidad en compresión

El concreto control tuvo un módulo de elasticidad de 2.63 GPa, el cual disminuyó notablemente hasta en un 22 %, cuando se colocó la capa de fibras de PET, es decir, la capa reduce drásticamente la rigidez de los concretos. Sin embargo, cuando se añade la nano-silice a los concretos, se tiene una menor disminución, de hasta un 15 %, lo que indica que la nano-silice aumenta un poco la rigidez de los concretos.

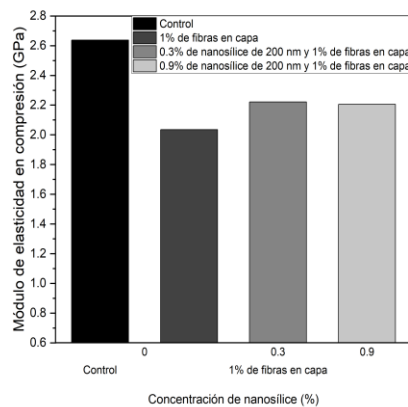


Figura 3.31. Módulos de elasticidad de concretos con una capa de fibras de PET y nanosilice de 200 nm, ensayados en compresión.

## 3.4 CONCRETOS CON UNA CAPA DE FIBRAS DE PET Y NANO-SÍLICE DE 200 nm IRRADIADOS

### 3.4.1. Módulo de ruptura

Las curvas de carga-desplazamiento de los concretos con una capa de fibras de PET y nano-sílice de 200 nm, irradiados a dosis de 100, 200 y 500 kGy, se muestran en la figura 3.32.

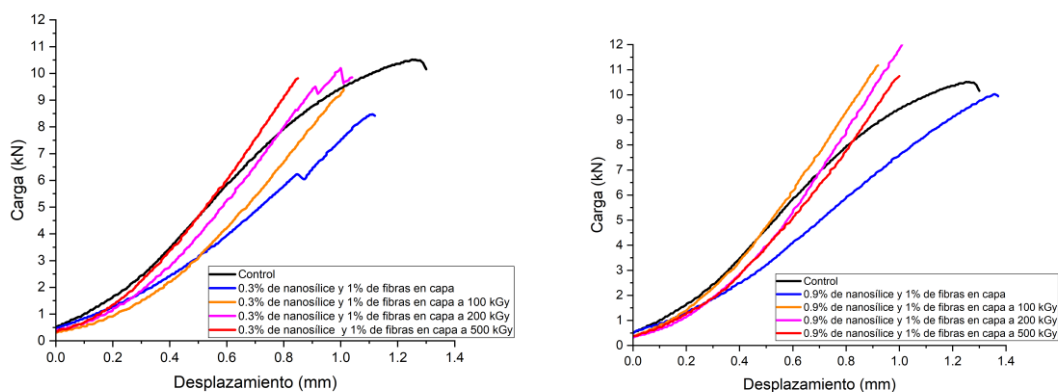


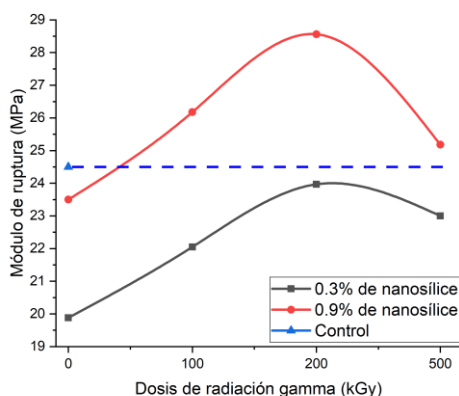
Figura 3.32. Curvas carga-desplazamiento de concretos con 0.3% y 0.9% de nanosílice, irradiados con rayos gamma, y ensayados en flexión.

De las curvas de la figura 3.32 se calcularon los módulos de ruptura, los cuales se muestran en la figura 3.33. Se realizó el análisis de acuerdo: a) a la cantidad de nano-sílice y b) la dosis de radiación. Adicionalmente, para observar las variaciones respecto al valor del concreto control, se colocó una línea punteada a partir del valor del concreto control.

Se observó que, en el caso de los concretos con nano-sílice y fibras de PET, aquellos que contenían un 0.3 % de nano-sílice mostraron un módulo de ruptura de 19.8 MPa, lo que supone una disminución del 19 % en comparación con el concreto de control, que alcanzó los 24.6 MPa. Por otro lado, el concreto con un 0.9 % de nano-sílice exhibió un módulo de ruptura mayor (23.5 MPa), siendo muy similar a la del concreto de control.

Con respecto a la exposición a radiación gamma, se observan los mayores valores para los concretos con 0.9 % de nanosílice, localizados arriba de la

línea punteada. Mientras que los concretos con 0.3 % se localizan por debajo de la línea punteada. El mayor valor de 28.5 MPa se obtuvo para concreto con 0.9 % de nano-sílice expuesto a 200 kGy, el cual es 15 % mayor que el del concreto control. Este aumento indica que la radiación gamma permite que las sustancias residuales que no participaron en el proceso de curado inicial (monómero de estireno y enlaces insaturados del poliéster), se involucren en procesos de copolimerización estireno-poliéster y homo polimerización del poliéster, los cuales incrementan la densidad de entrecruzamiento de los compuestos y restringen la movilidad de las cadenas poliméricas, mejorando así su resistencia. De acuerdo con Jurkin (2006), el monómero de estireno residual también puede difundirse a través de la matriz polimérica y reaccionar con otra molécula de estireno para formar oligómeros que se unen a la red polimérica tridimensional ya existente o permanecen solubles.



*Figura 3.33. Módulo de ruptura de concretos con una capa de fibras de PET y nanosílice (0.3% y 0.9%), irradiados a diferentes dosis.*

### 3.4.2. Desplazamiento en flexión

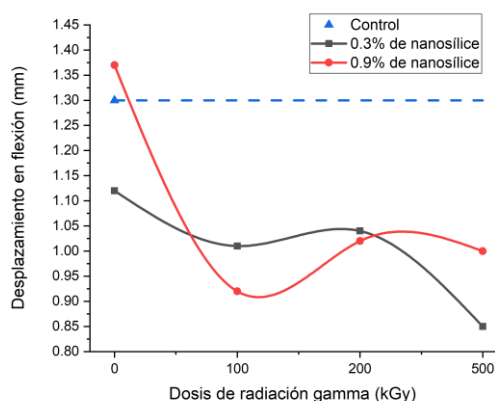
Los datos del máximo desplazamiento, obtenido de las curvas de la figura 3.32, se muestran en la figura 3.34. Se realizó un análisis basado en dos aspectos: a) la cantidad de nano-sílice y b) la dosis de radiación. Para el concreto control, inicialmente se registró un máximo desplazamiento de 1.3 mm.

El valor del concreto con 0.3 % de nano-sílice fue de 1.12 mm, es decir, menor que el del concreto control, pero el concreto con 0.9 % de nano sílice, fue 6 %



mayor, teniendo un valor de 1.37 mm. En este sentido, Jumahat (2010), señala que la inclusión de nanopartículas de sílice en una matriz polimérica introduce mecanismos adicionales de absorción de energía que incrementan su ductilidad y, a su vez, mejoran sus propiedades mecánicas. Adicionalmente, indica que la dispersión homogénea de las partículas de nano-sílice aumenta la tenacidad en este tipo de compuestos.

Con respecto a la exposición a la radiación, para los concretos con 0.3 % de nano-sílice el desplazamiento disminuye conforme se incrementa la dosis (de 1.12 mm a 0.85 mm), siendo hasta 34 % menores. Mientras que para los concretos con 0.9 % de nano-sílice, los valores primero disminuyen a 0.92 mm para 100 kGy, y luego se incrementan ligeramente a 1.02 mm para 200 y 500 kGy. Sin embargo, estos valores de desplazamiento son menores que los del concreto control.



*Figura 3.34. Desplazamiento en flexión de concretos con una capa de fibras de PET y nanosílice (0.3% y 0.9%), irradiados a diferentes dosis.*

La disminución en el desplazamiento máximo puede ser atribuida al incremento del grado de curado de la resina poliéster, provocado por la radiación gamma; es decir se disminuye la movilidad de las cadenas poliméricas, lo cual reduce la capacidad del concreto a presentar deformaciones cuando es sometido a un esfuerzo. En segundo lugar, la alta área superficial de las nanopartículas de sílice, y el incremento en su energía superficial provocada por la radiación ionizante, mejoran las interacciones entre la nano-sílice y la resina poliéster (Singh, 2020). De acuerdo con Rahman (2019), la radiación gamma incrementa el grado de curado de la resina poliéster, y tiende a mejorar la interacción entre

los refuerzos nano métricos y la resina, dando como resultado una disminución en su deformación a la fractura, en comparación con los compuestos no sometidos a radiación ionizante.

### **3.4.3. Módulo de Elasticidad en flexión**

Los módulos de elasticidad en flexión calculados a partir de los datos mostrados en la figura 3.32 se presentan en la figura 3.35. Al igual que en el caso anterior, los parámetros considerados fueron a) la cantidad de nano-sílice y b) la dosis de radiación.

Tomando como referencia que el módulo de elasticidad para el concreto de control fue de 1.07 GPa, se observó que el valor disminuyó hasta 0.8 GPa para concretos con 0.3 % de nano-sílice y hasta 0.79 GPa para los que contienen 0.9 % de nano-sílice. Es decir, se tuvo una disminución en el módulo de elasticidad del 26 % con respecto al concreto de referencia.

Sin embargo, los cambios fueron notables en el caso de los concretos irradiados, ya que:

- Para concretos con 0.3 % de nano-sílice, los valores aumentan conforme se incrementa la dosis de radiación, siendo hasta 20 % mayores a 500 kGy, que los del concreto control. Este aumento en el módulo de elasticidad se atribuye a la baja concentración de nano-sílice, lo que resulta en una menor restricción en la movilidad de las cadenas poliméricas de la resina poliéster. Por lo cual, se requiere mayor dosis de radiación gamma para lograr un mayor grado de rigidez en el concreto.
- Los concretos con 0.9 % tienen un valor máximo a 100 kGy, que es 20 % mayor que el del concreto control. A dosis mayores, los valores disminuyen; sin embargo, continúan siendo hasta un 6 % superiores que los del concreto control.

- Se tiene el mismo incremento del módulo de elasticidad, 20 %, para dos situaciones diferentes: a) con baja cantidad de nano-sílice (0.3 %), y alta dosis de radiación (500 kGy), o bien, b) con alta cantidad de nano-sílice (0.9 %) y baja dosis de radiación (100 kGy). Es decir, con alta dosis de radiación se incrementa el grado de entrecruzamiento de los enlaces moleculares en la resina. Esto limita la movilidad de las cadenas del polímero, ocasionando que la estructura tenga un mayor grado de rigidez.

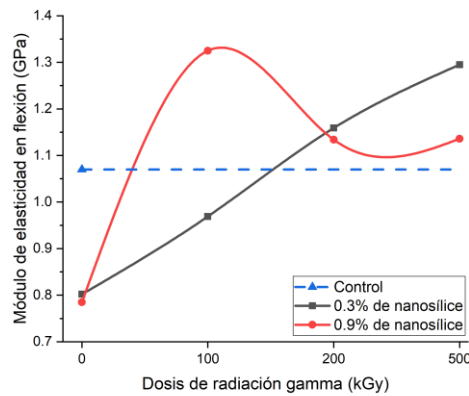


Figura 3.35. Módulos de elasticidad en flexión de concretos con 0.3% y 0.9% de nanosílice, irradiados con rayos gamma.

### 3.4.4. Resistencia en compresión

Las curvas de carga-desplazamiento de la resistencia a la compresión de concretos con una capa de fibras de PET y nanosílice de 200 nm, irradiados a diferentes dosis, se muestran en la figura 3.36.

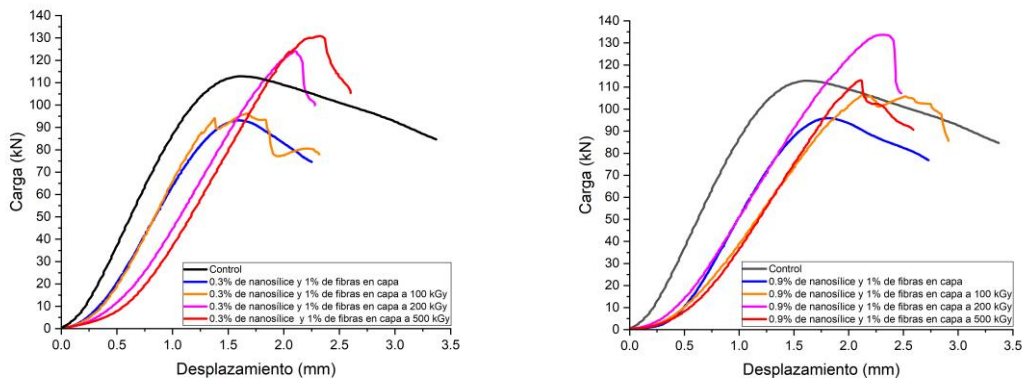


Figura 3.36. Curvas carga-desplazamiento de concretos con 0.3% y 0.9% de nanosílice, irradiados y ensayados en compresión.

Se calculó la máxima resistencia a la compresión de las curvas representadas en la figura 3.36 para luego crear la figura 3.37. Al igual que en los casos anteriores, los parámetros considerados fueron: a) la cantidad de nano-sílice y b) la dosis de radiación.

Tomando en cuenta que la máxima resistencia a la compresión del concreto control fue de 73.8 MPa, se observó que el valor del módulo disminuyó a 58.2 MPa para concretos con 0.3 % de nano-sílice y a 59.9 MPa para 0.9% de nano-sílice. Es decir, la resistencia a la compresión disminuyó hasta un 21% en comparación con el concreto control.

Sin embargo, en el caso de los concretos expuestos a radiación gamma, los valores de resistencia a la compresión se incrementaron hasta 81.7 MPa para concretos con 0.3 % de nano-sílice e irradiados a 500 kGy. Mientras que para concretos con 0.9 % de nano-sílice, el máximo valor fue de 83.5 MPa, logrado a 200 kGy. Este valor fue 13 % mayor que el obtenido para el concreto control.

En este sentido, la mayor resistencia a la compresión se logra: a) con poca cantidad de nano-sílice (0.03%) y alta dosis de radiación (500 kGy), o bien, b) con alta cantidad de nano-sílice (0.9%) y moderada dosis (200 kGy). Al parecer, se sigue una relación entre la cantidad de nano-sílice y la dosis de radiación, para obtener los mayores valores de resistencia a la compresión.

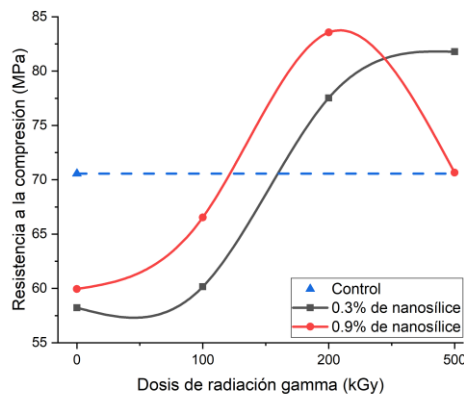


Figura 3.37. Resistencia a la compresión de concretos con nanosílice e irradiados a diferentes dosis.

### 3.4.5. Desplazamiento en compresión

Los datos representados en la figura 3.36 se tomaron en consideración para la elaboración de la figura 3.38, para la cual se contemplaron el máximo desplazamiento en compresión, la cantidad de nano-sílice y la dosis de radiación empleada.

Partiendo de que los concretos de control tuvieron un máximo desplazamiento en compresión de 3.37 mm, se observó que los concretos con 0.3 % de nano-sílice tuvieron un valor de 2.25 mm, mientras que aquellos que contenían 0.9 % de nano-sílice mostraron un valor de 2.73 mm. En otras palabras, los compuestos con un bajo contenido de nano-sílice experimentaron una reducción del 20 % en su desplazamiento a la fractura, mientras que los concretos con 0.9 % de nanopartículas mostraron un valor 2.8 % superior al de referencia. Esto se debe a que una mayor cantidad de nano-sílice en los concretos poliméricos, mejora su capacidad para soportar las tensiones y dificulta la propagación de las fisuras durante el ensayo, lo que resulta en un aumento de la deformación que experimentan antes de manifestar una falla.

Sin embargo, para los concretos irradiados, los valores de desplazamiento en compresión son menores hasta en 7% que los del concreto control. En los cuales el mayor desplazamiento se logró:

- Para concretos con 0.3% de nanosílice e irradiados a 500 kGy, siendo de 2.6 mm.
- Para concretos con 0.9% e irradiados a 100 kGy, siendo de 2.91 mm.

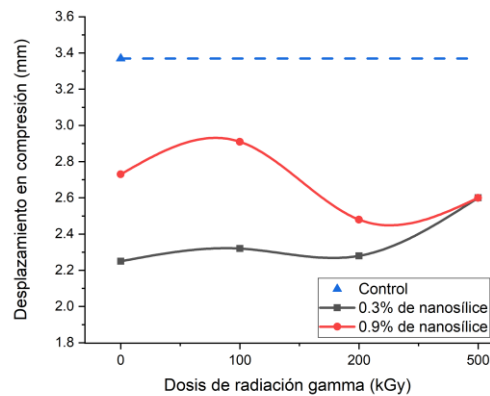


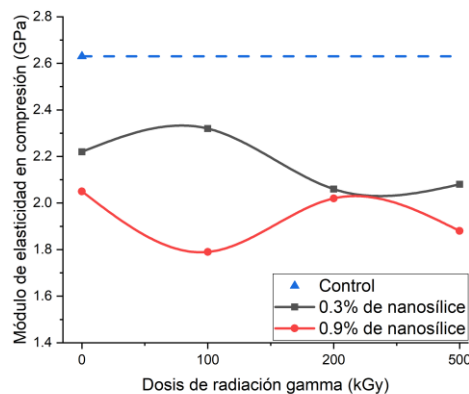
Figura 3.38. Desplazamiento en compresión de concretos con 0.3% y 0.9% de nanosílice, e irradiados a diferentes dosis.

### 3.4.6. Módulo de Elasticidad en compresión

Basándonos en los datos proporcionados en la figura 3.36, se determinaron los módulos de elasticidad en compresión, los cuales están representados en la figura 3.39, en la cuál, también se tomó en consideración la cantidad de nanosílice y la dosis de radiación utilizada.

Considerando que el valor de referencia observado en los concretos de control fue de 2.6 GPa, se observó que los concretos con 0.3 % de nano-sílice tuvieron un módulo de 2.23 GPa, y los concretos con 0.9 % de nano-sílice de 2.05 GPa, es decir el módulo disminuyó hasta 21 % conforme se incrementó la cantidad de nano-sílice.

Con respecto a los concretos irradiados, se observa que los módulos de elasticidad en compresión de los concretos con 0.3% de nano-sílice, son mayores que los de concretos con 0.9% de nano-sílice. Además de que todos los valores están por debajo de la línea punteada, es decir, debajo de los del concreto control. En términos generales, existe una relación entre: a) los máximos valores de módulo de elasticidad, b) el grado de entrecruzamiento de las cadenas poliméricas en la resina poliéster debida a la radiación, c) la movilidad de las mismas, y d) la rigidez al concreto.



*Figura 3.39. Módulos de elasticidad en compresión de concretos con 0.3% y 0.9% de nanosilíce, irradiados a diferentes dosis.*

En la Tabla 3.1, se resumen los cambios en las propiedades mecánicas de los concretos en función de los refuerzos y las dosis de radiación gamma empleadas.

Al examinar los valores observados, se constata que la incorporación de fibras PET en los concretos causa una reducción drástica en sus propiedades mecánicas en comparación con otros refuerzos, sin embargo, su inclusión también incrementa su capacidad para soportar mayores deformaciones antes de la ruptura en los ensayos de flexión y compresión.

Por otra parte, también es posible observar que los concretos con hojuelas de PET mostraron un mejor desempeño mecánico que aquellos que contenían fibras de PET. Esto se atribuyó a que las hojuelas se dispersaron de manera más efectiva en el concreto en comparación con las fibras de PET, permitiendo que este agregado contribuya en mayor medida a la distribución de los esfuerzos aplicados a los compuestos. No obstante, las hojuelas de PET demostraron una menor efectividad para evitar la propagación de las grietas generadas tras la fractura de las muestras.

Asimismo, los concretos con una capa de fibras de PET exhibieron propiedades mecánicas superiores en comparación con aquellos que contenían fibras de PET sin orientar, evidenciando que al orientar las fibras de PET en forma de capa se obtiene un mejor desempeño, conservando la capacidad de

este refuerzo para evitar la propagación de las grietas generadas durante la fractura de las muestras.

En cuanto al uso de nano-sílice, los valores reflejados en las muestras con y sin fibras de PET respaldan que este refuerzo mejora las propiedades mecánicas de los concretos, lo cual puede atribuirse a la buena interacción entre este refuerzo y la resina poliéster.

Finalmente, en los concretos sometidos a radiación gamma, se observa un incremento en las propiedades mecánicas que depende de la dosis empleada. Esto puede atribuirse a que la radiación ionizante incrementa el grado de entrecruzamiento de la resina poliéster y, a su vez, modifica la superficie de los refuerzos empleados, permitiendo que interactúen de manera más efectiva con la matriz usada.

*Tabla 3. 1. Porcentajes de aumento (+) o disminución (-) de cada propiedad mecánica, con respecto al valor del concreto control.*

Propiedad	Concreto Polimérico						
	Control (referencia)	Con fibras de PET de desecho	Con hojuelas de PET de desecho	Con una capa de fibras de PET	Con nanosílice	Con una capa de fibras de PET de desecho y nanosílice	
						Sin irradiar	Irradiado
Módulo de ruptura	24.6 MPa	-89	-28	-20	<b>+8.8</b>	-19	<b>+15</b>
Resistencia a la compresión	73.8 MPa	-84	-35	-24	<b>+7.8</b>	-21	<b>+13</b>
Módulo de elasticidad en flexión	1.07 GPa	-94	-45	-34	<b>+14</b>	-26	<b>+20</b>
Módulo de elasticidad en compresión	2.6 GPa	-80	-43	-21	<b>+3.1</b>	-21	<b>+5</b>
Desplazamiento máximo en flexión	1.3 mm	<b>+89</b>	<b>+18</b>	<b>+10</b>	<b>+8.4</b>	<b>+6</b>	-34
Desplazamiento máximo en compresión	3.37 mm	<b>+60</b>	<b>+22</b>	0	<b>+2.8</b>	<b>+2</b>	-7



## 3.4. Propiedades térmicas

### 3.4.1. Resina Poliéster

En la figura 3.40, se muestran los termogramas de la resina poliéster sin irradiar e irradiada. Para la resina sin irradiar se observa un pico exotérmico a 86 °C, que corresponde al proceso de entrecruzamiento de las cadenas poliméricas en la resina poliéster. En el caso de las resinas irradiadas, el pico exotérmico se observa a una temperatura ligeramente mayor, 87.3 °C.

Por otro lado, se observó que el flujo de calor de la resina sin irradiar fue de 23.9 W/g. Sin embargo, dicho valor tendía a disminuir conforme la resina se exponía a mayores dosis de radiación, alcanzando un mínimo de 19.9 W/g para una dosis de 500 kGy, lo cual representa una reducción del 16 % con respecto al calor de referencia. Es decir, la radiación gamma disminuye la cantidad de calor liberado durante el proceso de curado de la resina poliéster, el cual ocurre entre 35 °C y 150 °C. En este sentido, Jurkin (2006), señala que el calor liberado por la resina, medido en la prueba de DSC, es una medida de la cantidad de reactante que va reaccionando durante el proceso de entrecruzamiento de la resina.

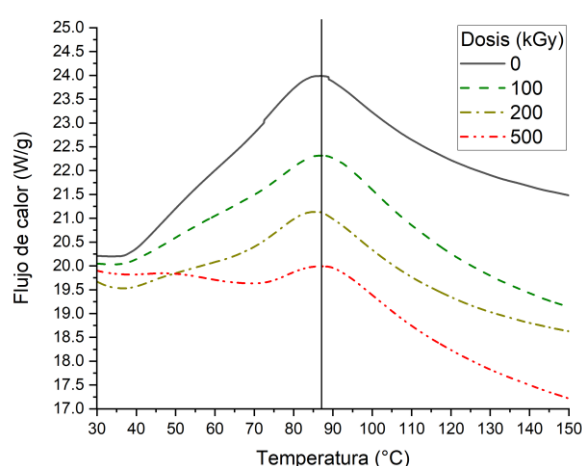
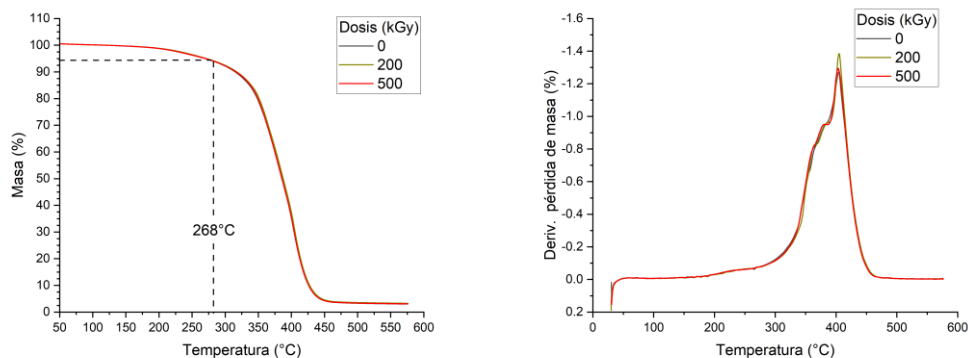


Figura 3.40. Termogramas de resina poliéster expuesta a radiación gamma.

En la figura 3.41 se presentan los termogramas de masa vs. temperatura (TGA) y de la termogravimetría derivada (DTG), de la resina poliéster envejecida expuesta a dosis de 200 y 500 kGy. Se observan las mismas curvas de TGA y DTG, para la resina sin irradiar o irradiada, es decir, los rayos gamma no ocasionan variaciones significativas en las etapas de descomposición de la resina.



*Figura 3.41. Curvas TGA y DTG de resina poliéster envejecida, expuesta a 200 y 500 kGy.*

Siguiendo los cambios conforme se incrementa la temperatura, se observa un patrón de descomposición que consiste en tres etapas.

- La primera se localiza entre 120 °C y 268 °C, en la cual existe una pérdida de masa de menos del 5 %, la cual se debe a la eliminación de la humedad por acción del calor, así como a los remanentes de material sin curar presentes en la superficie de la resina.
- La segunda se localiza entre 275 °C y 460 °C, en donde se observa una pérdida de masa significativa, con un pico máximo a los 404 °C (en la curva DTG). A esta temperatura la pérdida de masa es del 90 %, la cual se relaciona con el rompimiento de las cadenas poliméricas de la resina poliéster. Kandare (2008) y Halim (2020), añaden que también se produce la formación de productos de descomposición como carbono primario, anhídrido ftálico, monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

- La tercera ocurre a temperaturas superiores a los 460 °C, donde se tiene un residuo del 3 % en peso, compuesto en su mayoría por partículas de hollín.

### 3.4.2. Concreto Polimérico

En la figura 3.42 se muestran las curvas TGA del concreto polimérico (CP) y de concretos con nano-sílice de 200 nm. El concreto polimérico (30 % de resina y 70 % de arena sílice), presenta una pérdida de masa del 5 % a los 359 °C, mientras que los concretos con nano-sílice la presentan a una temperatura 0.5 % menor (357 °C). A temperaturas mayores, se va perdiendo masa.

De acuerdo con la curva DTG, a una temperatura de 406 °C ocurre la mayor pérdida de peso para el concreto polimérico. Esta pérdida incrementa 3 °C para el concreto con 0.3 % de nano-sílice y 9 °C para el concreto con 0.9 % de nano-sílice. Es decir, la presencia de una mayor cantidad de nano-sílice produce una mayor estabilidad térmica, ya que el concreto se descompone más lentamente.

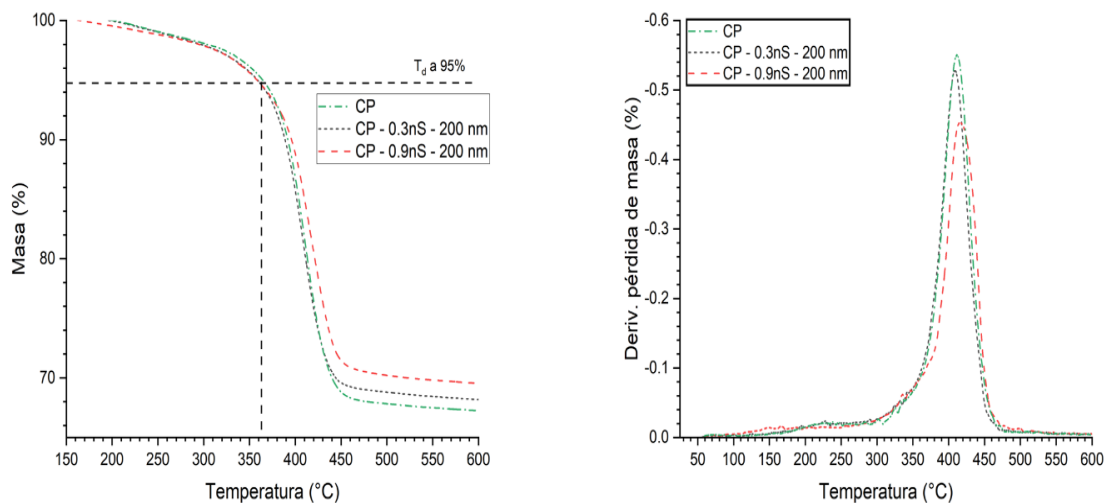


Figura 3.42. Curvas TGA y DTG de los concretos poliméricos.

## 3.5. Propiedades reológicas: efecto de la radiación gamma

### 3.5.1. Resina poliéster

En la figura 3.43, se muestra el efecto de la radiación gamma en el comportamiento térmico de la resina poliéster. Los resultados indican que la temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ), incrementa conforme aumenta la dosis de radiación aplicada, desde 87.21 °C a 94.72 °C, de modo que, se tiene una variación de 7.5 °C, como se muestra en la Tabla 3.2. Es decir, la radiación hace que se requiera mayor temperatura para promover la movilidad de las cadenas poliméricas y se logre la transición vítrea de la resina poliéster. Esto se debe al aumento en el grado de entrecruzamiento de las cadenas poliméricas en la resina envejecida.

En el caso de la  $\text{Tan } \delta$ , el valor varió muy poco para la resina sin irradiar e irradiada (0.793-0.812), indicando que el entrecruzamiento generado por la radiación gamma no modifica significativamente la capacidad de la resina poliéster para almacenar energía.

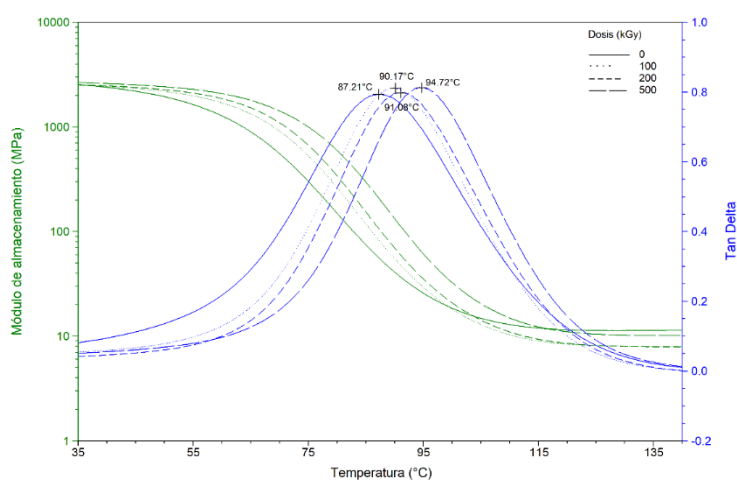


Figura 3.43. Curvas del Módulo de almacenamiento y la  $\text{tan } \delta$ , de la resina poliéster sin irradiar e irradiada.

Tabla 3.2. Temperatura de transición vítrea de la resina poliéster sin irradiar e irradiada.

Dosis (kGy)	T <sub>g</sub> (°C)	Tan δ	Módulo de almacenamiento
0	87.21	0.793	2303
100	90.17	0.810	2391
200	91.08	0.798	2434
500	94.72	0.812	2564

Por otra parte, en la figura 3.43, también es posible visualizar que el módulo de almacenamiento ( $\epsilon'$ ) de todas las muestras tiende a disminuir a medida que se someten a temperaturas superiores a 60 °C. Esto se debe a que la rigidez de la resina poliéster cambia dependiendo de si se expone a temperaturas por encima o por debajo de su temperatura de transición vítrea (87.21 °C), lo que se puede explicar de la siguiente forma:

- A temperaturas inferiores a la T<sub>g</sub> de la resina poliéster, las fuerzas intermoleculares mantienen las cadenas poliméricas en una disposición más ordenada, limitando su movimiento y, consecuentemente, incrementando el grado de rigidez de este material (Cristea, 2020).
- A medida que la resina poliéster se calienta y se acerca a su T<sub>g</sub>, la energía térmica aumenta lo suficiente para superar las fuerzas intermoleculares que mantienen las cadenas poliméricas en una disposición ordenada, otorgándole una mayor flexibilidad a la estructura y disminuyendo la rigidez del material (Cristea, 2020).

Además, se observó que las curvas asociadas a los módulos de almacenamiento de las muestras tienden a desplazarse hacia la derecha tras ser sometidas a radiación gamma. Esto es más evidente en el intervalo situado entre 60 °C y 105 °C e indica que, a mayores dosis, la densidad de entrecruzamiento de la resina poliéster suele incrementar (Silva, 2020).

### 3.5.2. Concreto con hojuelas o fibras de PET de desecho

En la figura 3.44 y la Tabla 3.3, se muestra el efecto de la radiación gamma en el comportamiento térmico del concreto con hojuelas o fibras de PET de desecho.

Con respecto a la temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ), los compuestos con menor temperatura son los de resina con hojuelas, seguidos por los que contienen fibras largas y finalmente los de fibras cortas. Es decir, las fibras de PET se adhieren mejor a la resina que las hojuelas de PET, esto debido a que tienen una superficie más rugosa, que permite mayor interacción con la resina poliéster y al interior del compuesto dificulta la movilidad de las cadenas moleculares. La menor  $T_g$  de todos estos compuestos es de 88.26 °C y la mayor de 93.44 °C, es decir, se tiene una diferencia de 5.18 °C. Cabe mencionar que la  $T_g$  de la resina poliéster es de 87.21 °C.

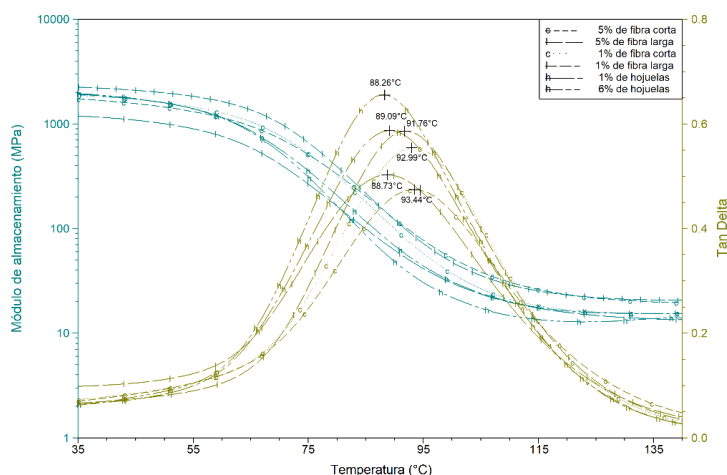


Figura 3.44. Curvas del Módulo de almacenamiento y de la  $\tan \delta$ , de la resina poliéster con hojuelas o fibras de PET de desecho.

Tabla 3.3.  $T_g$  y  $Tan \delta$  de la resina poliéster con hojuelas o fibras de PET de desecho.

Concreto	$T_g$ (°C)	$Tan \delta$	Módulo de almacenamiento ( $\epsilon'$ )
Con 1% de hojuelas	89.09	0.587	1912
Con 6% de hojuelas	88.26	0.655	1948
Con 1% de fibras largas	91.76	0.586	2243
Con 5% de fibras largas	88.73	0.502	1186
Con 1% de fibras cortas	92.99	0.554	1871
Con 5% de fibras cortas	93.44	0.474	1727

En el caso de la  $Tan \delta$ , el comportamiento de los compuestos es en el sentido opuesto al obtenido para la  $T_g$ , es decir, se tienen menores valores de  $Tan \delta$ , para los compuestos con fibras cortas, y mayores valores para los que contienen hojuelas. El uso de fibras cortas (de menor longitud) permite una mejor adherencia entre estas y la resina poliéster. Pothan (2003), señala que un aumento en la unión entre interfaces en materiales compuestos, y la restricción del movimiento de las cadenas poliméricas, hacen disminuir los valores de la  $Tan \delta$ . Más aún, conforme aumenta el amortiguamiento en las interfaces, la unión entre los componentes del compuesto empeora. Los valores de todos los compuestos van de 0.48 a 0.66; los cuales son menores que el obtenido para la resina poliéster, de 0.79.

La baja adherencia entre la resina poliéster y las hojuelas de PET se pudo corroborar tras observar la facilidad con la que las hojuelas podían ser separadas de la superficie de las muestras preparadas, como se ejemplifica en la Figura 3.45.

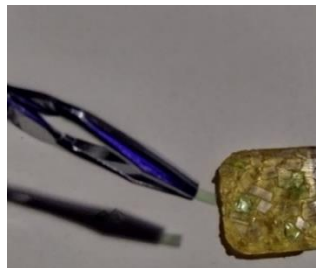


Figura 3.45. Desprendimiento de hojuela en el compuesto de resina poliéster con 6% de hojuelas de PET.

En cuanto al módulo de almacenamiento ( $\epsilon'$ ), se aprecia que los valores fluctúan según el tipo y cantidad de refuerzo utilizado. En los compuestos con 1% de fibras se obtiene un módulo superior, si se emplean fibras largas en lugar de fibras cortas. Sin embargo, en los compuestos con 5% de fibras, sucede lo contrario, los valores son mayores con fibras cortas. Esto puede deberse a que las fibras largas tienden a aglomerarse con mayor facilidad que las fibras cortas al ser empleadas en altas cantidades.

En el caso de las muestras con hojuelas de PET, no se observó una diferencia significativa en el módulo de almacenamiento al variar la cantidad de hojuelas.

### **3.5.3. Concreto con nanosílice**

La figura 4.46 y la Tabla 3.4, muestran las curvas de la  $\tan \delta$  y el módulo de almacenamiento ( $\epsilon'$ ), del concreto con nano-sílice. Con respecto a las temperaturas de transición vítrea ( $T_g$ ), el concreto con nano-sílice de 200 nm muestran mayores temperaturas de transición vítrea ( $T_g$ ), que los concretos con nano-sílice de 7 nm. La presencia de nano-sílice de 200 nm en la resina poliéster dificulta la movilidad de sus cadenas poliméricas, lo cual genera aumento en la temperatura de transición vítrea. En este contexto, Panwar (2017), reporta en un artículo que la presencia de nanopartículas en una matriz polimérica puede dificultar la movilidad de las cadenas poliméricas, lo cual es más notable cuando aumenta la cantidad de nanopartículas.

Por otro lado, es evidente que la inclusión de mayor cantidad de nano-sílice resulta en una reducción de la  $\tan \delta$ , con respecto al valor de la resina poliéster. Es decir, con la adición de la nano-sílice se mantiene una sólida interacción con la resina poliéster. En este sentido, Panwar (2017), enfatiza que la inclusión de un nano-refuerzo siempre conlleva una disminución de la  $\tan \delta$ .



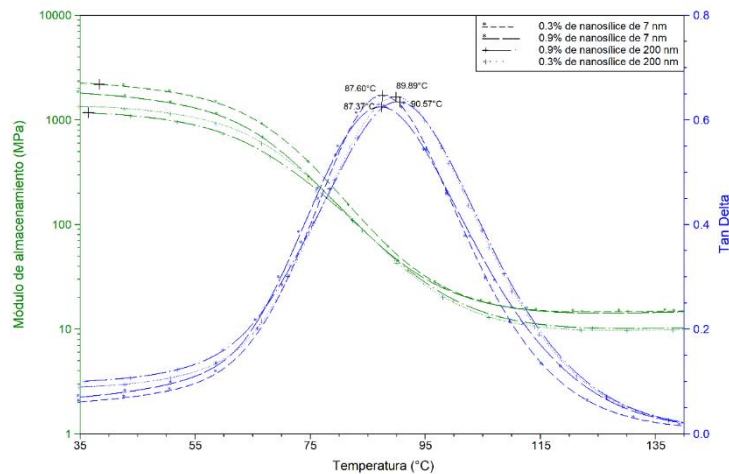


Figura 3.46. Curvas del Módulo de almacenamiento y Tan  $\delta$ , de la resina poliéster con nanosílice.

Tabla 3.4. Tg, Tan  $\delta$  y  $\epsilon'$ , del concreto con nanosílice.

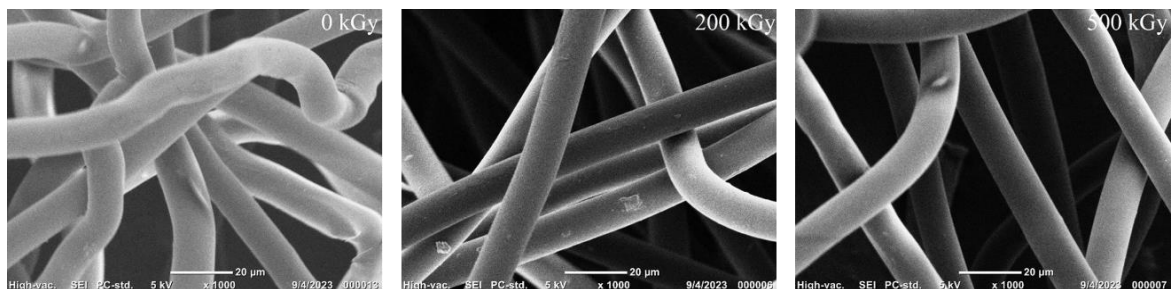
Concreto	Tg (°C)	Tan $\delta$	Módulo de almacenamiento ( $\epsilon'$ )
Con 0.3% de nanosílice de 7 nm	87.60	0.646	2249
Con 0.9% de nanosílice de 7 nm	87.37	0.622	1793
Con 0.3% de nanosílice de 200 nm	89.89	0.644	1351
Con 0.9% de nanosílice de 200 nm	90.57	0.634	1175

En el caso del módulo de almacenamiento ( $\epsilon'$ ), los concretos con nano-sílice de 200 nm presentan mayores valores que los concretos con nano-sílice de 7 nm. Es decir, con nanopartículas más grandes se logra mayor rigidez, ya que estas tienden a agruparse. Más aún, el módulo de almacenamiento disminuye cuando se adiciona 0.9% de nano-sílice (ya sea de 7 nm o 200 nm), ya que mayor cantidad de esta produce mayor aglomeración.

## 3.6. Propiedades morfológicas: efecto de la radiación gamma

### 3.6.1. Fibras de PET

En la figura 3.47, se muestran las fibras de PET expuestas a diferentes dosis de radiación gamma. En primer lugar, las fibras de PET sin irradiar cuentan con una superficie homogénea y lisa. Sin embargo, cuando son expuestas a dosis de 200 kGy, aparecen partículas desprendidas sobre la superficie. A mayores dosis de radiación (500 kGy), se observan pequeñas cavidades. La radiación gamma produce rompimiento de cadena, que modifica la superficie. Se genera una mayor cantidad de puntos de contacto, permitiendo que interactúen con mayor efectividad con la resina poliéster. En este sentido, El-Zahhar (2020), enfatiza que la aparición de las partículas y arrugas puede ser controlada al seleccionar las dosis de radiación gamma idóneas.



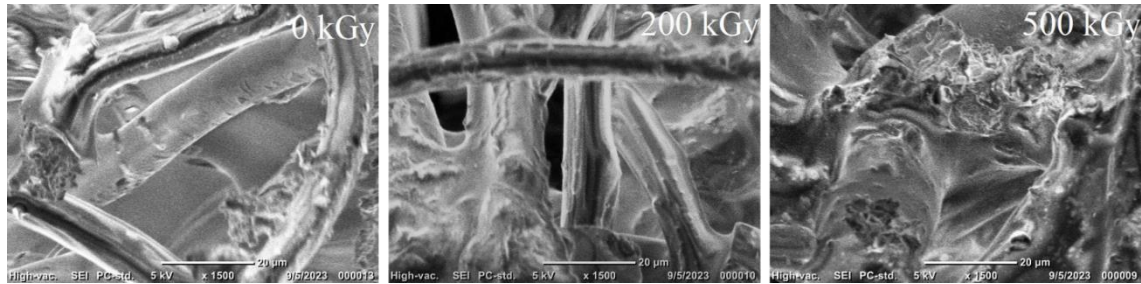
*Figura 3.47. Fibras de PET sin irradiar e irradiadas.*

### 3.6.2. Concretos con fibra de PET y nanosílice

En la figura 3.48, es posible observar la superficie de los concretos poliméricos con una capa de fibras de PET y nano-sílice de 200 nm, después de su exposición a la radiación gamma.

En primer lugar, es posible observar que las fibras de PET se cubren casi en su totalidad por resina poliéster insaturada, lo cual indica que existe una buena adherencia entre ambos componentes. Por otro lado, también es posible observar que la rugosidad de los concretos cambia según la dosis de radiación

gamma a la que son expuestos. Es decir, cuando los concretos son sometidos a altas dosis de radiación gamma, la densidad de entrecruzamiento de la resina se incrementa, produciendo una superficie más rugosa. En este contexto, Hoque (2020), señala que la radiación gamma aumenta la densidad de entrecruzamiento de las matrices poliméricas, lo que favorece una mayor compactación y aumenta la rugosidad de sus superficies.



*Figura 3.48. Concretos poliméricos sin irradiar e irradiados.*

## CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos, se concluye que, efectivamente, el uso de la radiación gamma y la nano-sílice, permite mejorar las propiedades mecánicas, térmicas y reológicas de concretos poliméricos elaborados con resina poliéster y arena sílice.

En particular, el mayor porcentaje de mejoramiento se obtuvo en la propiedad de desplazamiento de los concretos poliméricos, mediante la adición de fibras de PET de desecho en 5% en peso, ya que actúan como refuerzos. Sin embargo, el desplazamiento disminuye notablemente para la mayoría de los concretos irradiados a dosis mayores a 200 kGy, lo cual podría atribuirse al incremento del grado de curado de la resina poliéster, que permite mayor interacción con las nanopartículas de sílice, produciendo un concreto más frágil.

Dado que el desplazamiento se relaciona con el módulo de elasticidad, la adición de 1, 3 Y 5 wt. % de PET (en fibra, hojuela o capa), reduce la rigidez del concreto. No obstante, el módulo de las muestras incrementa cuando se agrega nano-sílice en 0.9 wt. %, y aumenta aún más cuando se irradian los concretos a dosis de 100 y 200 kGy.

Los valores de módulo de ruptura y resistencia a la compresión aumentan para concreto con nano-sílice o bien para concreto con fibras de PET tras exponerlos a 200 y 500 kGy. Esto sucede debido a que la radiación gamma incrementa el grado de entrecruzamiento de la resina poliéster, restringiendo la movilidad de las cadenas poliméricas. Además, modifica la superficie del PET de desecho y la nano-sílice, de tal modo que mejora su interacción con la resina poliéster insaturada, facilitando una distribución más eficiente de los esfuerzos aplicados al concreto polimérico.

La exposición de las fibras de PET a diferentes dosis de radiación gamma provoca la generación de una mayor cantidad de puntos de contacto, lo que les

permite mayor interacción con la resina poliéster. Por otro lado, la exposición de los concretos poliméricos a radiación gamma ocasiona un aumento progresivo en su rugosidad a medida que se incrementa la dosis. Esto indica la generación de una mayor densidad de entrecruzamiento en la resina poliéster insaturada.

En lo que respecta a las propiedades térmicas, la exposición de la resina poliéster a dosis de 100, 200 y 500 kGy disminuye progresivamente la cantidad de calor que se libera durante el proceso de curado conforme aumenta la dosis empleada. Esto se debe a la disminución de reactante sin entrecruzar durante el curado. Además, la temperatura de transición vítrea de la resina poliéster aumenta conforme se expone a dosis más elevadas de radiación gamma. Este aumento se relaciona con el aumento en la densidad de entrecruzamiento de la resina poliéster (mayor grado de reticulación), y con la menor movilidad molecular de la resina.

Además, la adición de 0.9 wt % de nano-sílice en los concretos poliméricos mejora su estabilidad térmica, ya que la degradación se vuelve más lenta. Sumado a eso, se incrementa la temperatura de transición vítrea y provoca una disminución en la  $\text{Tan } \delta$ , lo cual se debe a la baja movilidad de las cadenas moleculares. Adicionalmente, las nanopartículas de 200 nm tienden a aglomerarse con mayor facilidad que las de 7 nm, lo que permite obtener módulos de almacenamiento menores.

De igual manera, la mayor temperatura de transición vítrea se obtuvo con la adición de fibras de PET cortas, las cuales tienen una superficie rugosa y tamaño reducido, que les permite mayor adherencia a la resina poliéster.

## Referencias

Abdel-Rahman, H.A., Younes, M.M., &Yassene, A.A. (2018). Physico-mechanical properties of gamma-irradiated clay/polyester nanocomposites. *Polymer Composites*, 39(10), 3666-3675.

<https://doi.org/10.1002/pc.24395>

AEPW, Alliance to End Plastic Waste.

<https://endplasticwaste.org/es/request-for-proposal>

Aarya, S., Dev, K., Raghuvanshi, S.K., Krishna, J.B.M., & Wahab, M.A. (2012). Effect of gamma radiation on the structural and optical properties of Polyethylene terephthalate (PET) polymer. *Radiation Physics and Chemistry*, 81(4), 458-462.

<https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2011.12.023>

Anggaravidya, M., Budianto, E., & Gunawan, I. (2012). Synthesis and characterization of polyester-based nanocomposite. *Procedia chemistry*, 4, 107-113.

<https://doi.org/10.1016/j.proche.2012.06.016>

Ashfaq, A., Clochard, M.C., Coqueret, X., Dispenza, C., Driscoll, M.S., Ulański, P., & Al-Sheikhly, M. (2020). Polymerization reactions and modifications of polymers by ionizing radiation. *Polymers*, 12(12), 2877.

<https://doi.org/10.3390/polym12122877>

Athawale, A. A., & Pandit, J. A. (2019). Unsaturated polyester resins, blends, interpenetrating polymer networks, composites, and nanocomposites: State of the art and new challenges. *Unsaturated Polyester Resins*, 1-42.

<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816129-6.00001-6>

Babaremu, K.O., Okoya, S.A., Hughes, E., Tijani, B., Teidi, D., Akpan, A., & Akinlabi, E.T. (2022). Sustainable plastic waste management in a circular economy. *Heliyon*, e09984.

<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09984>

Bedi, R., Chandra, R., & Singh, S.P. (2013). Mechanical properties of polymer concrete. *Journal of Composites*, 2013, 1-12.

<https://doi.org/10.1155/2013/948745>

Chanteauminois, A. (2000). Fatigue and Tribological Properties of Plastics and Elastomers: PDL Handbook Series, 33(2), 146–147.

[https://doi.org/10.1016/s0301-679x\(00\)00018-9](https://doi.org/10.1016/s0301-679x(00)00018-9)

Chen, X., You, B., Zhou, S., & Wu, L. (2003). Surface and interface characterization of polyester-based polyurethane/nano-silica composites. *Surface and Interface Analysis: An International Journal devoted to the development and application of techniques for the analysis of surfaces, interfaces and thin films*, 35(4), 369-374.

<https://doi.org/10.1002/sia.1544>

Cristea, M., Ionita, D., & Iftime, M. M. (2020). Dynamic mechanical analysis investigations of PLA-based renewable materials: How are they useful?. *Materials*, 13 (22), 5302.

<https://doi.org/10.3390/ma13225302>

El-Zahhar, A.A., Yassien, K.M., & El-Bakary, M.A. (2020). Study on the thermal and structural properties of gamma-irradiated polyethylene terephthalate fibers. *Journal of Polymer Engineering*, 40(2), 129-135.

<https://doi.org/10.1515/polyeng-2019-0234>

Evode, N. (2021). Plastic waste and its management strategies for environmental sustainability. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 4, 100142.

<https://doi.org/10.1016/j.cscee.2021.100142>

Eyssa, H.M., Abulyazied, D.E., Abdulrahman, M., & Youssef, H.A. (2018). Mechanical and physical properties of nanosilica/nitrile butadiene rubber composites cured by gamma irradiation. *Egyptian journal of petroleum*, 27(3), 383-392.

<https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2017.06.004>

Figovsky, O., & Beilin, D. (2013). *Advanced polymer concretes and compounds*. CRC Press. pp. 1-21.

<https://doi.org/10.1201/b16237>

Gao, Y., Zhang, H., Huang, M., & Lai, F. (2019). Unsaturated polyester resin concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 228, 116709.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116709>

Halim, Z.A.A., Yajid, M.A.M., Nurhadi, F.A., Ahmad, N., & Hamdan, H. (2020). Effect of silica aerogel–aluminium trihydroxide hybrid filler on the physio-mechanical and thermal decomposition behavior of unsaturated polyester resin composite. *Polymer Degradation and Stability*, 182: 109377.

<https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2020.109377>

Hameed, A.M., & Ahmed, B.A.F. (2019). Employment the plastic waste to produce the lightweight concrete. *Energy Procedia* 157: 30-38.

<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.11.160>

Haseebuddin, M.R., Santhosh, S., & Shandilya, A.B. (2021). Development and characterization of PET flakes reinforced polyester resin composites. *Materials Today: Proceedings*, 46, 6075-6082.

<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.462>

Hossain, M. T., Hossain, M. S., Kabir, M. S., Ahmed, S., Khan, R. A., & Chowdhury, A. S. (2023). Improvement of mechanical properties of jute-nano cellulose-reinforced unsaturated polyester resin-based composite: Effects of gamma radiation. *Hybrid Advances*, 3, 100068.

<https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2023.100068>

Hoque, M.A., Bhuiya, M.A.K., Saiduzzaman, M., Islam, M.A., & Khan, M.A. (2017). Effect of  $\gamma$  (gamma)-radiation on mechanical properties of raw and polyethylene glycol-modified bleached jute reinforced polyester composite. *World Journal of Engineering*, 14(2), 108-113.

<https://doi.org/10.1108/WJE-06-2016-0005>

Idrees, M., Saeed, F., Amin, A., & Hussain, T. (2021). Improvement in compressive strength of Styrene-Butadiene-Rubber (SBR) modified mortars by using powder form and nanoparticles. *Journal of Building Engineering* 44: 102651.

<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102651>

Jurkin, T., & Pucić, I. (2006). Post-irradiation crosslinking of partially cured unsaturated polyester resin. *Radiation Physics and Chemistry*, 75(9): 1060-1068.

<https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2006.04.001>

Jumahat, A., Soutis, C., Jones, F. R., & Hodzic, A. (2010). Effect of silica nanoparticles on compressive properties of an epoxy polymer. *Journal of Materials Science*, 45, 5973-5983.

<https://doi.org/110.1007/s10853-010-4683-1>

Kaka, D., Fatah, R.A., Gharib, P., & Mustafa, A. (2021). Mechanical Properties of Polyester Toughened with Nano-Silica. *Iraqi Journal of Industrial Research*, 8(3), 61-68.



<https://doi.org/10.53523/ijoirVol8I3ID67>

Kandare, E., Kandola, B.K., Price, D., Nazaré, S., & Horrocks, R.A. (2008). Study of the thermal decomposition of flame-retarded unsaturated polyester resins by thermogravimetric analysis and Py-GC/MS. *Polymer Degradation and Stability*, 93(11): 1996-2006.

<https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2008.03.032>

Kaza S. (2018), *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*, World Bank Group

<https://www.worldbank.org/en/news/infographic/2018/09/20/what-a-waste-20-a-global-snapshot-of-solid-waste-management-to-2050>

Kumar, V., Ali, Y., Sonkawade, R.G., & Dhaliwal, A.S. (2012). Effect of gamma irradiation on the properties of plastic bottle sheet. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 287, 10-14.

<https://doi.org/10.1016/j.nimb.2012.07.007>

Lim, Henry C.A. (2017). *Brydson's Plastics Materials, Thermoplastic Polyesters*, 527–543.

<https://doi.org/10.1016/B978-0-323-35824-8.00020-7>

Malik, N., Kumar, P., Shrivastava, S., & Ghosh, S.B. (2017). An overview on PET waste recycling for application in packaging. *International Journal of Plastics Technology*, 21, 1-24.

<https://doi.org/10.1007/s12588-016-9164-1>

Martínez-López, M. (2018). Polymer waste materials as fillers in polymer mortars: experimental and finite elements simulation. *Case Studies in Construction Materials*, 9, e00178.

<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2018.e00178>

Miskolczi, N. (2013). *Advanced Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Composites for Structural Applications, Polyester resins as a matrix material in advanced fiber-reinforced polymer (FRP) composites*, 44–68.

<https://doi.org/10.1533/9780857098641.1.44>

Motaleb, K. A., Milašius, R., & Ahad, A. (2020). Influence of gamma radiation on mechanical properties of jute fabric-reinforced polymer composites. *Fibers*, 8(9), 58.

<https://doi.org/10.3390/fib8090058>

- Panwar, V., & Pal, K. (2017). Dynamic mechanical analysis of clay–polymer nanocomposites. In *Clay-polymer nanocomposites*, Elsevier. pp. 413-441.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-323-46153-5.00012-4>
- Parkyn, B. (1972). Chemistry of polyester resins. *Composites*, 3(1), 29–33.  
[https://doi.org/10.1016/0010-4361\(72\)90468-5](https://doi.org/10.1016/0010-4361(72)90468-5)
- Pothan, L.A., Oommen, Z., & Thomas, S. (2003). Dynamic mechanical analysis of banana fiber reinforced polyester composites. *Composites Science and Technology*, 63(2): 283-293.  
[https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(02\)00254-3](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(02)00254-3)
- Rahman, M. T. (2019). Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles dispersed unsaturated polyester resin-based nanocomposites: effect of gamma radiation on mechanical properties. *Radiation Effects and Defects in Solids*, 174 (5-6), 480-493.  
<https://doi.org/10.1080/10420150.2019.1606809>
- Rahmani, E. (2013). On the mechanical properties of concrete containing waste PET particles. *Construction and Building Materials*, 47, 1302-1308.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.041>
- Rajaei, P., Ghasemi, F.A., Fasihi, M., & Saberian, M. (2019). Effect of styrene-butadiene rubber and fumed silica nano-filler on the microstructure and mechanical properties of glass fiber reinforced unsaturated polyester resin. *Composites Part B: Engineering*, 173, 106803.  
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.05.014>
- Raheem, A. (2019). Current developments in chemical recycling of post-consumer polyethylene terephthalate wastes for new materials production: A review. *Journal of cleaner production*, 225, 1052-1064.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.019>
- Razek, T.M, (2010). Effect of gamma irradiation on the thermal and dyeing properties of blends based on waste poly (ethylene terephthalate) blends. *Journal of Applied Polymer Science*, 117(6), 3482-3490.  
<https://doi.org/10.1002/app.32217>
- Shen, L (2014). *Handbook of Recycling. Plastic Recycling*, pp. 179–190.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-396459-5.00013-1>
- Shokrieh, M. (2015). A novel polymer concrete made from fine silica sand and polyester. *Mechanics of Composite Materials*, 51, 571-580.  
<https://doi.org/10.1007/s11029-015-9528-1>

Sikora, A. (2015). A systematic comparison of different techniques to determine the zeta potential of silica nanoparticles in biological medium. *Analytical methods*, 7(23), 9835-9843.

<https://doi.org/10.1039/C5AY02014J>

Silva, M. P., Santos, P., Parente, J. M., Valvez, S., Reis, P. N., & Piedade, A. P. (2020). Effect of post-cure on the static and viscoelastic properties of a polyester resin. *Polymers*, 12 (9), 1927.

<https://doi.org/10.3390/polym12091927>

Singh, A. K., Adhikari, R., & Susan, M. A. B. H. (2022). Modification of polymers with gamma radiation for various high-performance applications. *Frontiers in Chemistry*, 10, 1042056.

<https://doi.org/10.3389/fchem.2022.1042056>

Soong, Y.(2022). Recent advances in biological recycling of polyethylene terephthalate (PET) plastic wastes. *Bioengineering*, 9(3), 98.

<https://doi.org/10.3390/bioengineering9030098>

Reis, J.M.L., & Carneiro, E.P. (2012). Evaluation of PET waste aggregates in polymer mortars. *Construction and Building Materials*, 27(1), 107-111.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.020>

Thachnatharen, N. (2021). The waste management of polyethylene terephthalate (PET) plastic waste: A review. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1127, No. 1, p. 012002). IOP Publishing.

<https://doi.org/10.1088/1757-899X/1127/1/012002>

Zhou, S. (2003). Effect of nanosilica on the properties of polyester-based polyurethane. *Journal of Applied Polymer Science*, 88(1), 189-193.

<https://doi.org/10.1002/app.11624>