

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA

COLEGIO DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

Facultad de Ingeniería Mochis

Programa de Maestría en Ciencias de la Ingeniería



“Determinación de propiedades en estado fresco y endurecido de morteros modificados con bis(2-hidroxipropil) tereftalato y agregado fino reciclado de losetas cerámicas residuales”

TESIS

Que como requisito para obtener el grado de
MAESTRIA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

Presenta

Ing. Clara Esthela Cerón Valenzuela

Director de tesis

Dr. Ramón Álvaro Vargas Ortíz

Codirector de tesis

Dr. José Miguel Mendivil Escalante

Los Mochis, Sinaloa, agosto de 2026



Universidad Autónoma de Sinaloa

Dirección General de Bibliotecas

Repositorio Institucional Buelna

Restricciones de uso

Todo el material contenido en la presente tesis está protegido por la Ley Federal de Derechos de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

Queda prohibido la reproducción parcial o total de esta tesis. El uso de imágenes, tablas, gráficas, texto y demás material que sea objeto de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente correctamente mencionando al o los autores del presente estudio empírico. Cualquier uso distinto, como el lucro, reproducción, edición o modificación sin autorización expresa de quienes gozan de la propiedad intelectual, será perseguido y sancionado por el Instituto Nacional de Derechos de Autor.

Esta obra está bajo una Licencia [Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)



Dirección General de Bibliotecas
Ciudad Universitaria
Av. de las Américas y Blvd.
Universitarios
C.P. 80010 Culiacán Sin. Méx.
Tel (667) 713 78 32 y
(667) 712 50 57
dgbuas@uas.edu.mx

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Facultad de Ingeniería Mochis, Universidad Autónoma de Sinaloa por permitirme ser parte del programa de Maestría en Ciencias de la Ingeniería de la generación 2024-2026, fue una gran experiencia en mi formación educativa y sin duda será de gran utilidad para mi vida profesional.

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por otorgarme una beca con No. CVU: 2052413, para poder solventar mis estudios de posgrado.

A mi director, el Dr. Ramón Álvaro Vargas Ortiz, y mi co-director, el Dr. José Miguel Mendivil Escalante, por ser parte fundamental en este proceso. Especialmente el Dr. José Miguel, quien mostró su apoyo en toda esta etapa de maestría, gracias por sus atenciones, conocimientos y consejos.

Agradecer también a mi comité de tesis: la Dra. Blanca Alicia García Grajeda, la Dra. Francisca Guadalupe Cabrera Covarrubias, el Dr. Joaquín Flores Valenzuela y el Dr. Jesús Eduardo Leal Pérez, por estar presente en el desarrollo de esta investigación, por sus consejos y observaciones en cada etapa, las cuales fueron de utilidad para mejorar.

A mis compañeros y amigos de maestría, en especial a Laura, Carolina, Patricia y Basópoli, su amistad fue muy importante en este proceso, gracias por cada uno de los momentos vividos en esta etapa.

A mis compañeros del laboratorio, gracias por brindarme su ayuda cuando la necesité, así como los momentos de risas que eran muy necesarias en ciertos momentos de este proceso.

A cada persona que estuvo involucrada en la realización de este proyecto.

Agradezco a Dios por permitirme tener una familia incondicional y por brindarme fortaleza cada uno de mis días.

DEDICATORIA

A mis papás; que siempre me han apoyado en cada una de mis metas y propósitos, cada uno de mis logros son por ustedes y para ustedes. Gracias por todo su esfuerzo, apoyo y amor hacia mí y mis hermanos.

A mi compañero de vida, quien ha estado de manera incondicional a mi lado, celebrando mis logros y siempre con un abrazo de consuelo en mis días tristes, por entenderme cada día en este proceso, por muchas razones más, gracias.

RESUMEN

La presente investigación determinó las propiedades en estado fresco y endurecido de morteros modificados mediante la incorporación de bis(2-hidroxipropil) tereftalato (BHPT) obtenido por el reciclaje químico del tereftalato de polietileno (PET, por sus siglas en inglés) vía glicólisis, y la sustitución de agregado fino natural (AFN) por agregado fino reciclado de losetas cerámicas residuales (AFR-C). Se dosificaron 20 mezclas de mortero variando el porcentaje de adición de BHPT (0.5%, 1.0% y 1.5% respecto al peso del cemento) y de sustitución de AFR-C (0%, 25%, 50%, 75% y 100%), elaboradas según la norma ASTM C305-06. El PET y el BHPT se caracterizaron mediante espectroscopía de infrarrojo por transformada de fourier (FT-IR, por sus siglas en inglés) y análisis termogravimétrico (TGA, por sus siglas en inglés). Por su parte, los morteros se evaluaron en términos de fluidez, porosidad, densidad, absorción y resistencia mecánica a compresión y flexión; complementando el análisis microestructural mediante microscopía electrónica de barrido (SEM, por sus siglas en inglés) y difracción de rayos X (DRX). Los resultados indican que, en determinadas combinaciones, la fluidez incrementó de manera proporcional con el contenido de AFR-C. En ausencia de BHPT, los morteros con AFR-C mostraron un descenso en el desempeño mecánico en comparación con el mortero de referencia, con excepción de la mezcla con 75% de reemplazo (MB0-C75), la cual alcanzó una resistencia a la compresión de 25.79 MPa a los 28 días de curado. Con adiciones de 0.5% y 1.0% de BHPT, el mortero con 100% de AFR-C obtuvo los mayores valores de resistencia mecánica a los 28 días; mientras que, a un nivel del 1.5% de BHPT, la dosificación con 75% de AFR-C presentó el óptimo desempeño mecánico. Este comportamiento superior se corroboró mediante micrografías SEM, revelando matrices cementicias densas con predominio de gel de silicato de calcio hidratado (C-S-H) y una zona de transición interfacial (ZTI) con una adecuada adherencia mecánica entre la pasta y el agregado. Aunque la porosidad, la densidad y la absorción aumentaron simultáneamente con la incorporación de BHPT y AFR-C, este incremento no comprometió la resistencia mecánica, lo que sugiere que la porosidad generada consiste en poros no interconectados. Finalmente, el análisis de DRX confirmó que la presencia de BHPT favoreció el desarrollo de ciertos productos de hidratación del cemento, así como el proceso de carbonatación.

Palabras Clave: mortero, PET, bis(2-hidroxipropil) tereftalato, agregado reciclado, losetas cerámicas residuales.

ABSTRACT

The present research determined the fresh and hardened properties of modified mortars produced by incorporating bis(2-hydroxypropyl) terephthalate (BHPT), obtained from the chemical recycling of polyethylene terephthalate (PET) via glycolysis, and by replacing natural fine aggregate (NFA) with recycled fine aggregate from waste ceramic tiles (RFA-C). Twenty mortar mixtures were proportioned by varying the addition percentage of BHPT addition (0.5%, 1.0% and 1.5% by weight of cement) and RFA-C substitution (0%, 25%, 50%, 75% and 100%), according to ASTM C305-06 standard. PET and BHPT were characterized using fourier-transform infrared spectroscopy (FT-IR) and thermogravimetric analysis (TGA). Furthermore, the mortars were evaluated in terms of fluidity, porosity, density, absorption, and mechanical strength (compressive and flexural), complementing the microstructural analysis through scanning electron microscopy (SEM) and x-ray diffraction (XRD). The results indicate that, in certain combinations, fluidity increased proportionally with RFA-C content. In the absence of BHPT, mortars with RFA-C showed a decrease in mechanical performance compared to the reference mortar, with the exception of the mixture with 75% replacement (MB0-C75), which reached a compressive strength of 25.79 MPa after 28 days of curing. With additions of 0.5% and 1.0% BHPT, the mortar with 100% RFA-C obtained the highest mechanical resistance values at 28 days; while, at a level of 1.5% BHPT, the dosage with 75% RFA-C presented the optimal mechanical performance. This superior Behavior was corroborated by SEM micrographs, revealing dense cementitious matrices with a predominance of hydrated calcium silicate gel (C-S-H) and an interfacial transition zone (ITZ) with adequate mechanical adhesion between the paste and the aggregate. Although porosity, density, and absorption increased simultaneously with the incorporation of BHPT and RFA-C, this increase did not compromise mechanical strength, suggesting that the porosity generated consists of non-interconnected pores. Finally, XRD analysis confirmed that the presence of BHPT favored the development of certain cement hydration products, as well as the carbonation process.

Keywords: mortar, PET, bis(2-hydroxypropyl) terephthalate, recycled aggregate, residual ceramic tiles.

OBJETIVOS

Objetivo General

Evaluar las propiedades en estado fresco y las propiedades mecánicas en estado endurecido de morteros modificados con bis(2-hidroxipropil) tereftalato y sustitución de agregado fino natural por agregado fino reciclado procedente de losetas cerámicas residuales.

Objetivos Específicos

1. Llevar a cabo el acopio, selección, limpieza y trituración de cerámico residual para producir agregado fino de cerámico reciclado.
2. Determinar la granulometría, densidad y absorción de los agregados finos naturales y reciclados.
3. Realizar el reciclaje mecánico (recolección, limpieza y trituración) de botellas de PET postconsumo.
4. Efectuar el reciclaje químico (despolimerización por glicólisis) de las hojuelas de PET obtenidas.
5. Caracterizar por Espectroscopía de Infrarrojo (FT-IR) y por Análisis Termogravimétrico (TGA) el producto obtenido por despolimerización de PET (BHPT).
6. Fabricar morteros modificados con bis(2-hidroxipropil) tereftalato y agregado fino reciclado proveniente de cerámicos residuales.
7. Estudiar la fluidez de las mezclas de morteros modificados con con bis(2-hidroxipropil) tereftalato y agregado fino reciclado proveniente de cerámicos residuales.
8. Evaluar la resistencia mecánica a la compresión y flexión de morteros modificados con bis(2-hidroxipropil) tereftalato y agregado fino reciclado proveniente de cerámicos residuales.

9. Determinar la porosidad, densidad y absorción de los morteros modificados con bis(2-hidroxipropil) tereftalato y agregado fino reciclado proveniente de cerámicos residuales.
10. Caracterizar de forma cualitativa la morfología de morteros modificados con bis(2-hidroxipropil) tereftalato y agregado fino reciclado proveniente de cerámicos residuales por Microscopía Electrónica de Barrido (SEM).
11. Determinar la presencia de los productos de hidratación de morteros modificados con bis(2-hidroxipropil) tereftalato y agregado fino reciclado proveniente de cerámicos residuales por Difracción de Rayos X (DRX).

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	Generalidades.....	1
1.1.1	Mortero.....	1
1.1.2	Tereftalato de Polietileno (PET).....	1
1.1.3	Tipos de reciclaje de PET.....	2
1.1.4	Bis(2-hidroxipropil) tereftalato (BHPT)	2
1.1.5	Residuos de Construcción y Demolición (RCD).....	3
1.1.6	Agregados cerámicos reciclados	4
1.1.7	Materiales sostenibles	4
1.2	Antecedentes y estado del arte.....	5
2	ASPECTOS TEÓRICOS.....	9
2.1	Componentes del mortero.....	9
2.1.1	Cemento	9
2.1.2	Agua.....	9
2.1.3	Agregado fino	9
2.2	Composición mineral del cemento portland	9
2.3	Hidratación del cemento.....	10
2.3.1	Principales productos de hidratación del cemento.....	12
2.4	Propiedades del mortero en estado fresco	14
2.5	Propiedades mecánicas del mortero en estado endurecido.....	15
2.6	Zona de Transición Interfacial (ZTI)	16
2.7	Polímeros	17
2.7.1	Clasificación de los polímeros.....	17

2.8	Síntesis del PET	18
2.8.1	Esterificación directa	18
2.8.2	Transesterificación.....	19
2.9	Tipos de reciclaje de PET	19
2.9.1	Reciclaje primario	19
2.9.2	Reciclaje secundario	20
2.9.3	Reciclaje terciario	21
2.9.4	Reciclaje cuaternario.....	24
2.10	Losetas cerámicas residuales	24
2.11	Empaquetamiento de partículas	25
3	METODOLOGÍA	27
3.1	Material requerido	27
3.2	Infraestructura	28
3.3	Laboratorios y equipos	28
3.4	Experimento29	
3.4.1	Reciclaje del cerámico residual y obtención del AFR-C	30
3.4.2	Reciclaje de PET.....	32
3.4.3	Fabricación de especímenes de mortero	35
3.5	Técnicas de caracterización	38
3.5.1	Granulometría de los agregados	38
3.5.2	Densidad y absorción de los agregados	38
3.5.3	Espectroscopía de Infrarrojo por Transformada de Fourier (FT-IR) de BHPT y PET	40
3.5.4	Análisis Termogravimétrico (TGA) de BHPT y PET	40
3.5.5	Fluidez de los morteros	40

3.5.6	Resistencia mecánica a la compresión.....	41
3.5.7	Resistencia mecánica a la flexión.....	42
3.5.8	Porosidad, densidad y absorción de los morteros.....	43
3.5.9	Microscopía Electrónica de Barrido (SEM).....	43
3.5.10	Difracción de Rayos X (DRX)	43
4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	44
4.1	Granulometría de los agregados.....	44
4.2	Densidad y absorción de los agregados.....	45
4.3	Espectroscopía de Infrarrojo por Transformada de Fourier (FT-IR) de PET y BHPT	45
4.4	Análisis Termogravimétrico (TGA) de PET y BHPT.....	46
4.5	Fluidez de los morteros	47
4.6	Resistencia mecánica a la compresión	49
4.7	Resistencia mecánica a la flexión	54
4.8	Porosidad, densidad y absorción de los morteros	59
4.9	Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)	61
4.10	Difracción de Rayos X (DRX).....	71
4.11	Relación de resultados.....	81
5	CONCLUSIONES.....	87
6	BIBLIOGRAFÍA.....	89
7	ANEXOS	108

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Compuestos principales del cemento portland.	10
Tabla 2. Materiales requeridos para la experimentación.	27
Tabla 3. Infraestructura necesaria para la experimentación.	28
Tabla 4. Nomenclatura y porcentajes de adición de BHPT y sustitución de AFR-C.	35
Tabla 5. Densidad y absorción del AFN y del AFR-C.	45
Tabla 6. Resultado de fluidez de morteros modificados con BHPT y AFR-C.	48
Tabla 7. Resultados de las pruebas de porosidad, densidad y absorción de los morteros modificados.	60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Molécula del Tereftalato de Polietileno (PET).	2
Figura 2. Esquema de la reacción de glicólisis del PET para obtener su monómero BHPT.	3
Figura 3. Micrografías de SEM a 10,000x de una pasta de cemento; se observan los principales productos de hidratación del cemento [15].	14
Figura 4. Estructura de polímeros: lineales, ramificados y reticulados [6].	17
Figura 5. Síntesis del PET por esterificación directa.	18
Figura 6. Síntesis del PET por transesterificación.	19
Figura 7. Reciclaje químico de botellas de PET.	22
Figura 8. Esquema de la despolimerización del PET mediante glicólisis.	24
Figura 9. Esquema general del proceso experimental.	29
Figura 10. Proceso de reciclaje del cerámico residual: a) acopio del material, b) selección y limpieza, c) trituración con marro, d) trituración con molino, e) lavado del material triturado, f) tamizado del material triturado y g) almacenamiento del material cerámico.	31
Figura 11. Reciclaje mecánico del PET: a) recolección y clasificación de botellas de PET, b) retiro del cuello y fondo de las botellas, c) recorte del cuerpo restante en cuadrados de 1 cm aprox., d) lavado de las hojuelas con NaOH, e) enjuague de las hojuelas con agua potable y f) secado en horno a 35 °C.	32
Figura 12. Proceso de despolimerización del PET: a) mezclar hojuelas de PET con PG y AZn, b) calentar la mezcla en un baño de termofluido contenido en un vaso de precipitado de 2 L dentro de una campana de extracción de gases hasta que alcance una temperatura de 180 °C.	33
Figura 13. Proceso para la eliminación de residuos e impurezas del BHPT: a) agitar una mezcla de THF y etanol, b) incorporar el BHPT obtenido previamente, c) lavar	

3 veces el producto con agua destilada, d) filtrar al vacío con un embudo Büchner y e) secar en horno por 24 h y reposar hasta temperatura ambiente.	34
Figura 14. Agregado compuesto por 25% de AFN y 75% de AFR-C.	36
Figura 15. Proceso de la fabricación de especímenes de mortero: a) incorporar el AFN, AFR-C y cemento en la mezcladora y mezclar por 30 s, b) adicionar agua, BHPT y mezclar durante 30 s, c) raspar el interior del recipiente para integrar los componentes y mezclar por 60 s más, d) colocar la mezcla en los moldes correspondientes.	37
Figura 16. Proceso de tamizado de los agregados para determinar su distribución granulométrica: a) verter el agregado en el juego de tamices, b) agitar manualmente los tamices, c) pesar el material retenido en cada malla.	38
Figura 17. Proceso para obtener valores de densidad y absorción de los agregados basado en la norma ASTM C128.	39
Figura 18. Toma de lectura de los 4 diámetros de la mezcla para calcular el valor promedio.	41
Figura 19. Proceso de prueba de resistencia a compresión de muestras de mortero modificado: a) secar las muestras con un paño, b-c) realizar el ensayo en la prensa.	42
Figura 20. Proceso de prueba de resistencia a flexión de muestras de mortero modificado: a) secar las muestras con un paño, b-c) realizar el ensayo en la prensa.	42
Figura 21. Distribuciones de tamaño de partícula de los agregados.	44
Figura 22. Espectro de FT-IR de PET Y BHPT.	46
Figura 23. Termograma de PET y BHPT.	47
Figura 24. Resistencia a la compresión de morteros sin adición de BHPT y diferentes porcentajes de sustitución de AFR-C a 7, 14 y 28 días de curado.	50

Figura 25. Resistencia a la compresión de morteros con 0.5% de adición de BHPT y diferentes porcentajes de sustitución de AFR-C a 7, 14 y 28 días de curado.....	51
Figura 26. Resistencia a la compresión de morteros con 0.5% de adición de BHPT y diferentes porcentajes de sustitución de AFR-C a 7, 14 y 28 días de curado.....	52
Figura 27. Resistencia a la compresión de morteros con 1.5% de adición de BHPT y diferentes porcentajes de sustitución de AFR-C a 7, 14 y 28 días de curado.....	54
Figura 28. Resistencia a la flexión de morteros con 0% de adición de BHPT y diferentes porcentajes de sustitución de AFR-C a 28 días de curado.	55
Figura 29. Resistencia a la flexión de morteros con 0.5% de adición de BHPT y diferentes porcentajes de sustitución de AFR-C a 28 días de curado.	56
Figura 30. Resistencia a la flexión de morteros con 1.0% de adición de BHPT y diferentes porcentajes de sustitución de AFR- a 28 días de curado.....	57
Figura 31. Resistencia a la flexión de morteros con 1.5% de adición de BHPT y diferentes porcentajes de sustitución de AFR- a 28 días de curado.....	58
Figura 32. Micrografías de SEM del mortero MB0-C0, a) 30x aumentos, b) 500x aumentos y c) 1000x aumentos.....	61
Figura 33. Micrografías de SEM del mortero MB0-C25: a) 30x aumentos, b) 100x aumentos, c) 500x aumentos y d) 1000x aumentos.	62
Figura 34. Micrografía de SEM del mortero MB0-C50: a) 5,000x aumentos y b) 10,000x aumentos.....	63
Figura 35. Micrografías de SEM de la muestra MB0-C75 y análisis elemental por EDS: a) 30x aumentos, b) 500x aumentos, c) espectro elemental y d) tabla con porcentajes de masa de los elementos de la muestra.....	64
Figura 36. Micrografías de SEM del mortero MB0-C100: a) 30x aumentos, b) 100x aumentos, c) 1,000x aumentos y d) 5,000x aumentos.....	65
Figura 37. Micrografías del mortero MB0.5-C0: a) 500x aumentos, b) 1,000x aumentos y c) 5,000x aumentos.....	66

Figura 38. Análisis EDS del mortero MB0.5-C0: a) espectro elemental y tabla con porcentajes de masa de los elementos de CH, b) espectro elemental y tabla con porcentajes de masa de los elementos de C-S-H.....	67
Figura 39. Micrografías del mortero MB1.0-C0: a) 30x aumentos, b) 500x aumentos y c) 5,000x aumentos.....	68
Figura 40. Micrografías del mortero MB1.0-C100: a) 30x aumentos, b) 100x aumentos, c) 500x aumentos y d) 1,000x aumentos.	69
Figura 41. Micrografías del mortero MB1.5-C75: a) 30x aumentos, b) 100x aumentos y c) 500x aumentos.....	70
Figura 42. Difractograma de rayos X de los morteros MB0-C0, MB0.5-C0, MB1.0-C0 y MB1.5-C0 a 28 días de hidratación.	71
Figura 43. Ampliación del pico más intenso de la portlandita, $2\theta = 54.6^\circ$	72
Figura 44. Ampliación del pico más intenso de la calcita, $2\theta = 29.3^\circ$	73
Figura 45. Ampliación del pico más intenso del cuarzo, $2\theta = 26.5^\circ$	74
Figura 46. Ampliación de una señal de C-S-H, $2\theta = 48.3^\circ$	75
Figura 47. Difractograma de rayos X de los morteros MB0-C0, MB0-C25, MB0-C50, MB0-C75 y MB0-C100 a 28 días de hidratación.	76
Figura 48. Ampliación de un pico de portlandita $2\theta = 54.6^\circ$	77
Figura 49. Ampliación del pico más intenso de la calcita, $2\theta = 29.3^\circ$	78
Figura 50. Ampliación del pico más intenso del cuarzo, $2\theta = 26.5^\circ$	79
Figura 51. Ampliación de una señal de gel C-S-H, $2\theta = 30.5^\circ$	80
Figura 52. Relación de resistencia a la compresión y porosidad de los morteros sin adición de BHPT y diferentes porcentajes de sustitución de AFR-C, a 28 días de curado.	82

Figura 53. Relación de resistencia a la compresión y porosidad de los morteros con 0.5% de adición de BHPT y diferentes porcentajes de sustitución de AFR-C, a 28 días de curado.....	84
Figura 54. Relación de resistencia a la compresión y porosidad de los morteros con 1.0% de adición de BHPT y diferentes porcentajes de sustitución de AFR-C, a 28 días de curado.....	84
Figura 55. Relación de resistencia a la compresión y porosidad de los morteros con 1.5% de adición de BHPT y diferentes porcentajes de sustitución de AFR-C, a 28 días de curado.....	86
Figura 56. Participación como asistente en la XLVIII semana nacional de energía solar.	108
Figura 57. Participación en la demostración de experimentos de química en el Colegio Montferrant.	108
Figura 58. Participación en la demostración de laboratorio "Magia en el agua: revelando figuras ocultas".	109
Figura 59. Participación como expositor del cartel "Desarrollo de un sensor colorimétrico a partir de nanopartículas de plata para la detección de iones metálicos en medio acuoso".	109
Figura 60. Participación como expositor del cartel "Síntesis y funcionalización de nanopartículas de plata para la detección de cromo (III) en medio acuoso".	110
Figura 61. Participación como miembro del Capítulo Estudiantil Sinaloa de la Sociedad Mexicana de Materiales.	110
Figura 62. Participación como asistente del taller "Modelado computacional de nanomateriales de baja dimensionalidad para aplicaciones en almacenamiento de energía.	111
Figura 63. Participación como organizador del 1er Congreso Estatal de Ciencias e Ingeniería de los Materiales.	111

Figura 64. Participación como asistente al curso teórico-práctico “Fundamentos de la Microscopía Electrónica de Barrido”.	112
Figura 65. Participación como expositor del cartel "Síntesis y funcionalización de nanopartículas de plata aplicadas en la detección de iones metálicos en medio acuoso”.	112
Figura 66. Participación como asistente en el 1er Congreso Estatal de Ciencias e Ingeniería de los Materiales".	113
Figura 67. Asistencia al curso “Buenas prácticas para el control de calidad del concreto y principales materiales de construcción”.	113
Figura 68. Participación como expositor del cartel “Determinación de propiedades en estado fresco y endurecido de morteros modificados con bis(2-hidroxipropil) tereftalato y agregado fino reciclado de cerámicos”.	114
Figura 69. Participación como expositor del cartel “Determinación de propiedades en estado fresco y endurecido de morteros modificados con bis(2-hidroxipropil) tereftalato y agregado fino reciclado proveniente de cerámicos residuales”.	114
Figura 70. Participación con el video “Laboratorio en acción: elaboración de morteros con agregado fino reciclado”.	115
Figura 71. Participación con el video “Morteros con agregado fino natural vs agregado fino reciclado de cerámico, ¿puedes notar la diferencia?”.	115
Figura 72. Participación como instructor del taller “De residuo a recurso: fabricación de morteros con agregado fino reciclado”.	116
Figura 73. Participación como expositor de cartel en el “44 Congreso Internacional de Metalurgia y Materiales” con el trabajo titulado: “Caracterización física de un agregado fino reciclado a partir de losetas cerámicas para uso en morteros”.	116
Figura 74. Participación como expositor de cartel en el “44 Congreso Internacional de Metalurgia y Materiales” con el trabajo titulado: “Evaluación de características	

físicas de un nuevo agregado fino con agregado proveniente de tereftalato de polietileno”.....	117
Figura 75. Participación como ponente con el proyecto titulado “Análisis de propiedades mecánicas en morteros con agregado fino reciclado de cerámico”.....	117
Figura 76. Participación como ponente con el proyecto titulado “Propiedades mecánicas de morteros con agregado fino reciclado de PET”.....	118
Figura 77. Participación en el curso "Reglas de la IA: cómo usarla sin correr riesgos legales.	118
Figura 78. Asistencia al taller “Evaluación de revistas científicas: Latindex, DOAJ y otros índices Open Access”.	119
Figura 79. Realización del curso “SanaMente LibreMente: jóvenes por la paz y contra las adicciones”.....	119
Figura 80. Asistencia al curso “Microscopía Electrónica de Barrido” impartido por la Escuela Virtual de Caracterización de Materiales.....	120
Figura 81. Participación como expositor del cartel “Fabricación y determinación de las características físicas y distribución granulométrica de un agregado fino reciclado procedente de RCD’s”.....	120
Figura 82. Participación como asistente del taller “Del electrón a la pantalla, descubriendo lo grandioso de lo pequeño”.....	121
Figura 83. Participación como asistente del taller “Manejo de imágenes y gráficas para documentos científicos”.....	121
Figura 84. Participación como asistente del 2° Congreso Estatal de Ciencia e Ingeniería de los Materiales.	122
Figura 85. Participación como expositor de póster en el 2° Congreso Estatal de Ciencia e Ingeniería de los Materiales.....	122

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Generalidades

1.1.1 Mortero

El mortero, es en esencia concreto sin agregado grueso [1], es decir, es una mezcla homogénea formada principalmente por material cementante (cemento), agua y agregado fino; en algunas ocasiones se le añade aditivos [2]. Al endurecerse, muestra propiedades químicas, físicas y mecánicas semejantes a las del concreto, y es utilizado ampliamente para pegar piezas de mampostería en la construcción de muros, o para recubrirlos, en cuyo caso se le conoce como pañete, repello o revoque [3]. Es un material indispensable en la ingeniería de la construcción, ya que ofrece numerosas ventajas, como buena trabajabilidad, facilidad de construcción, alta resistencia y buena adherencia con bloques [4].

Los morteros se clasifican de manera general en dos categorías principales según su mecanismo de endurecimiento: aéreos e hidráulicos. Los morteros aéreos endurecen mediante la pérdida de agua por evaporación y un posterior proceso paulatino de carbonatación en contacto con la atmósfera. Por el contrario, los morteros hidráulicos poseen la capacidad de fraguar y endurecer en ambientes saturados o bajo el agua; esto se debe a la presencia de compuestos derivados de la calcinación de calizas con contenidos de sílice y alúmina, los cuales favorecen el desarrollo de resistencias mecánicas iniciales elevadas. Dependiendo de sus componentes aglomerantes, estos materiales se subdividen en morteros calcáreos, caracterizados por una excelente plasticidad y manejabilidad pero con un desarrollo de resistencia limitado; morteros mixtos de cal y cemento portland, los cuales brindan una óptima trabajabilidad, adecuada retención de agua y altas resistencias a edades tempranas; y morteros de cemento, los cuales proveen un desempeño mecánico superior debido a la formación de una matriz homogénea y densa donde la pasta de cemento recubre eficazmente el esqueleto granular de la arena [3].

1.1.2 Tereftalato de Polietileno (PET)

El PET es un polímero termoplástico lineal que pertenece a los poliésteres [5]. Está formado por la condensación de un diol y un ácido carboxílico [6]. Es un material fuerte y duradero con alta resistencia a la tracción, alta estabilidad dimensional y excelente resistencia química

[7]. Es un plástico muy común utilizado en la fabricación de productos como botellas de agua, envases de alimentos y textiles. Gracias a su ligereza, durabilidad y versatilidad, el PET se ha convertido en un material esencial en la sociedad actual [8].

En la **Figura 1** se muestra la molécula del PET, en la que se puede observar el grupo éster (-COO-) a cada lado, un anillo bencénico del grupo tereftálico y un segmento de etilenglicol (-CH₂-CH₂) enlazado a través del oxígeno al grupo éster.

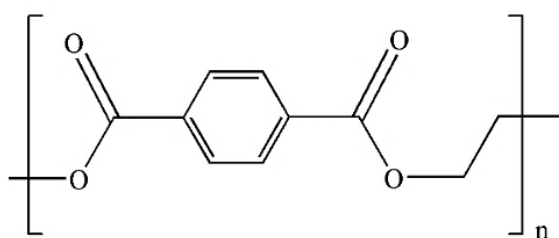


Figura 1. Molécula del Tereftalato de Polietileno (PET).

1.1.3 Tipos de reciclaje de PET

Existen generalmente cuatro tipos de reciclaje: el primario consiste en un reprocesamiento mecánico de un material para obtener un producto con características similares al original; el secundario también implica reprocesamiento mecánico, pero el resultado presenta propiedades menores; el terciario (reciclaje químico) se utiliza para recuperar el componente químico y se aplica una vez que el polímero se despolimeriza a su composición química (este tipo de reciclaje se puede llevar a cabo por medio de glicólisis, la cual es un tipo de reacción de solvólisis), y por último, el cuaternario se enfoca en aprovechar la energía contenida en el residuo [9–12].

1.1.4 Bis(2-hidroxipropil) tereftalato (BHPT)

En la **Figura 2** se presenta la reacción química que origina al monómero bis(2-hidroxipropil) tereftalato (BHPT) (C₁₄H₁₈O₆), al despolimerizar el PET por glicólisis para obtener su monómero, utilizando acetato de zinc (AZn) como catalizador y a una temperatura de 180°C. Consiste en la ruptura de los enlaces éster por el oxígeno proveniente del propilenglicol (PG), al agregar los grupos hidroxilos como terminales funcionales, lo que produce alcoholes como residuo. El BHPT se compone por un 1,4-benzenodicarboxilato en el centro de la molécula, con un grupo hidroxipropilo en cada lado, característica que le otorga el prefijo bis [13–15].

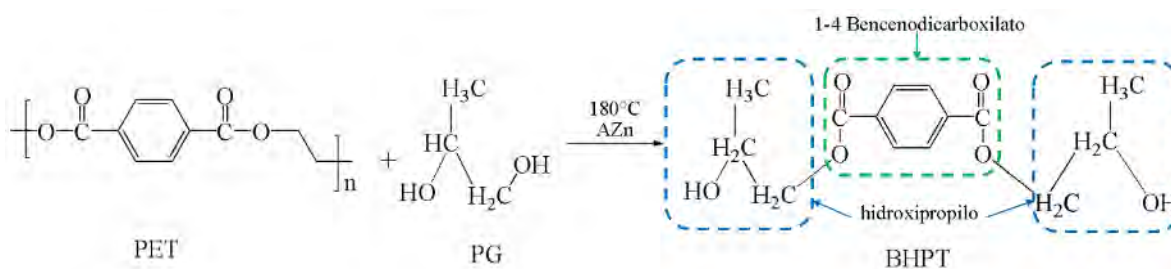


Figura 2. Esquema de la reacción de glicólisis del PET para obtener su monómero BHPT.

1.1.5 Residuos de Construcción y Demolición (RCD)

Las actividades de construcción y demolición se realizan a nivel mundial y representan más del 75% de la generación total de residuos. La cantidad y composición de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD) varían entre regiones y dependen de factores como el crecimiento demográfico, la legislación, la planificación regional y la industria de la construcción del país [16]. En general, una serie de factores internos (por ejemplo, edad, tipo, materiales de construcción, tecnologías de construcción) y externos (por ejemplo, tecnologías de demolición, capacidades de gestión de RCD de los constructores, crecimiento demográfico, etc.) influyen en la cantidad y calidad de los RCD [16–18], los cuales pueden estar compuestos de fragmentos de losetas cerámicas, acero, madera, yeso, vidrio, concreto y mortero. La reutilización de estos residuos puede minimizar el consumo de recursos naturales y energía en la industria de la construcción [19].

Se estima que la cantidad de residuos sólidos generados por la industria de la construcción incrementará de 12.7 millones de toneladas métricas en el año 2000 a 27 mil millones de toneladas métricas en 2050. Se ha proyectado un incremento de 1.7 veces en 1980 a 2.2 veces en 2050 en la cantidad de RCD generados por los países de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) [20]. Esta gran cantidad de material inerte en forma de residuos sólidos ha provocado problemas de relevancia ambiental, ya sea por la enorme cantidad de emisiones de dióxido de carbono, o por la falta de espacio en los vertederos. La solución a este problema es el reciclaje y la reutilización de los RCD en la industria de la construcción [21].

La gestión de los RCD ha evolucionado de un modelo lineal de eliminación hacia uno de economía circular, donde materiales como el concreto y la cerámica son reincorporados al ciclo productivo [22].

1.1.6 Agregados cerámicos reciclados

Los materiales cerámicos constituyen aproximadamente el 54% de los residuos derivados de obras de construcción y demolición [23]. Debido a su fragilidad y facilidad de rotura durante la producción, el transporte y la instalación, su uso en la edificación y la construcción estructural está en aumento [24].

Los agregados de residuos cerámicos son materiales granulares que se obtienen a partir del reciclaje de desechos cerámicos como ladrillos rotos, tejas, azulejos, elementos cerámicos sanitarios, aisladores eléctricos, etc. Estos residuos, una vez triturados y procesados, se utilizan como sustitutos parciales o totales de los agregados naturales (grava y arena) en la fabricación de concreto o mortero [25].

Además, los agregados cerámicos reciclados proporcionan una mayor adherencia entre ellos y la pasta de cemento, que los agregados naturales. Principalmente debido a que presentan una forma más irregular, producto del proceso utilizado para su obtención [26].

Asimismo, los agregados cerámicos muestran poca actividad puzolánica en la superficie debido a su composición química y tamaño de grano, aun así, la actividad puzolánica aumenta con el incremento de la superficie [27].

1.1.7 Materiales sostenibles

La ciencia de los materiales ha mostrado un notable desarrollo en diversas categorías de materiales, entre ellas los metales y aleaciones, los polímeros, las cerámicas, los vidrios y materiales naturales como la madera y la piedra. Este progreso ha sido impulsado por avances en estrategias de síntesis basadas en química verde [28], procesos de polimerización controlada [29], innovaciones en el diseño metalúrgico y la ingeniería de aleaciones [30], así como por el desarrollo de mezclas y compuestos avanzados [31]. En este contexto, los llamados “materiales sostenibles” han surgido como un enfoque conceptual orientado a disminuir el impacto ambiental, fomentar el uso circular de los recursos y contribuir a la transición hacia sistemas de materiales con bajas emisiones de carbono [9]. Por tales motivos,

la recuperación y utilización de residuos ha recibido gran atención en los últimos años. Los investigadores han descubierto que diversos tipos de residuos sólidos pueden incluirse en los materiales cementicios para formar nuevos materiales de construcción compuestos [32]. Es por ello, que los morteros son considerados como una gran alternativa para incluir agregados reciclados dentro de su matriz, debido a su uso habitual como material no estructural [33].

1.2 Antecedentes y estado del arte

Durante los últimos 70 años la producción mundial de plástico ha aumentado de manera ininterrumpida, pasando de 2 millones de toneladas en 1950 a 400.3 millones de toneladas métricas en 2022. Resulta especialmente preocupante que más de la mitad de la producción mundial de plástico se ha comercializado en los últimos 20 años y se prevé que esta cifra aumente a casi 600 millones de toneladas métricas en 2050 [34,35].

Los plásticos se utilizan ampliamente en diversas industrias, siendo su principal aplicación el envasado de alimentos y bebidas debido a su bajo costo de producción y a la mayor vida útil que proporcionan a los productos. Además, presentan diversas propiedades favorables, como resistencia, durabilidad, ligereza, aislamiento eléctrico y térmico, estabilidad química y resistencia a la corrosión. Asimismo, estos materiales se emplean en sectores como la electrónica, bienes de consumo, transporte, embalaje, equipos médicos, construcción, entre otros [36–40].

En la actualidad, las botellas fabricadas con PET se han convertido en uno de los materiales más valiosos y ampliamente reciclables [41]. Para la producción de artículos plásticos se emplean diversos métodos de procesamiento orientados a reducir los costos de fabricación. En el caso específico del PET, las estrategias de recuperación más comunes se encuentran la incineración y el reciclaje [10]. Dentro de las alternativas de reciclaje, el reciclaje terciario o químico ha despertado un creciente interés, ya que permite la despolimerización del material para obtener compuestos de menor peso molecular que pueden ser reutilizados en distintos procesos industriales [42–44]. En este sentido, diversos estudios han demostrado el potencial de los productos obtenidos a partir del reciclaje químico del PET para modificar materiales de construcción, particularmente concreto y mortero [45–47].

Bajo este enfoque, se ha reportado la síntesis de resinas de poliéster insaturado a partir de residuos de PET, las cuales han sido incorporadas en concreto polimérico (CP). Los resultados mostraron un rápido tiempo de curado, así como excelentes propiedades mecánicas y de durabilidad [48,49]. De manera similar, se ha investigado la despolimerización de residuos de PET de grado fibra utilizando diferentes cantidades de propilenglicol para obtener resinas de poliéster insaturado [50]. Asimismo, se ha estudiado la despolimerización de botellas de PET posconsumo mediante glicólisis, obteniéndose tereftalato de bis(2-hidroxietilo) (BHET), el cual fue transformado en poliésteres insaturados para producir resina utilizada en mortero polimérico. La formación del material fue confirmada por FT-IR, donde se identificaron los principales grupos funcionales, y por TGA-DTA, que evidenció la estabilidad térmica del material hasta 800 °C [51]. De manera similar, botellas de PET fueron despolimerizadas mediante glicólisis con propilenglicol (PG) para sintetizar bis(2-hidroxipropil) tereftalato (BHPT) y obtener PPT, el cual fue utilizado como recubrimiento en concretos. La formación de estos productos fue corroborada mediante Espectroscopía de Infrarrojo por Transformada de Fourier (FT-IR), permitiendo identificar los grupos funcionales característicos. Asimismo, el PET y PPT fueron analizados mediante Análisis Termogravimétrico (TGA) con el fin de evaluar su estabilidad térmica [52]. También se ha reportado la síntesis de poliésteres insaturados a partir de la despolimerización por glicólisis de botellas de PET para la producción de resinas empleadas en concretos. La formación del poliéster fue confirmada mediante FT-IR, identificándose las bandas características del material, mientras que el análisis por SEM permitió evaluar la microestructura de los concretos [53]. De igual manera, otros investigadores reportaron el uso de botellas de PET posconsumo recicladas mediante procesos mecánicos y químicos, específicamente glicólisis, para obtener bis(2-hidroxipropil) tereftalato (BHPT). Este compuesto fue empleado en la producción de una resina híbrida de poliéster insaturado, la cual fue posteriormente modificada y utilizada en la fabricación de morteros poliméricos. La formación del materia fue confirmada por medio de FT-IR, permitiendo identificar los grupos funcionales característicos de estos materiales [54].

Además de la incorporación de compuestos derivados del PET como modificadores en materiales cementantes, otra estrategia ampliamente investigada sobre la utilización de

desechos consiste en el uso de agregados reciclados provenientes de residuos de construcción y demolición (RCD). Uno de los residuos que ha generado mayor interés es el material cerámico, el cual puede provenir de escombros de mampostería (diversos tipos de ladrillos de arcilla) [55,56], tejas de cubierta [57], tabiques de escombros [58], tejas, productos de la industria cerámica que no cumplen con los estándares de calidad [56], elementos cerámicos sanitarios [59,60] y losetas [19,61–64].

Actualmente, se han desarrollado múltiples estudios sobre morteros con contenido cerámico reciclado que analizan distintas variables de desempeño. En general, uno de los enfoques principales ha sido comprender la función que desempeña el agregado fino reciclado de cerámico (AFR-C) dentro de la matriz del mortero, ya sea reemplazando de forma parcial o total el agregado fino natural (AFN) [65], utilizándolo como sustituto parcial del cemento [66–69], o bien, incluyéndolo como sustituto de ambas variables, lo cual ha demostrado mejorar significativamente la resistencia a compresión del mortero [63].

Diversos estudios han analizado el efecto de los agregados finos reciclados de cerámicos (AFR-C) sobre las propiedades en estado fresco de los morteros. En algunos casos, se ha reportado que la trabajabilidad tiende a disminuir a medida que aumenta el contenido de agregado reciclado de cerámico [19,70]. De manera similar, se han evaluado parámetros como la consistencia y el contenido de aire, observándose en algunos casos una disminución de estas propiedades al incrementar la cantidad de AFR-C en la mezcla [71].

Por otra parte, también se han evaluado las propiedades mecánicas de los morteros, particularmente en términos de resistencia a compresión y resistencia a la flexión. Se ha evidenciado que el reemplazo entre el 10 y 15% del agregado fino natural (AFN) por AFR-C puede mejorar las resistencias a la flexión y compresión, mostrando un aumento casi lineal con la proporción de incorporación de finos [72,73]. En concordancia con estos resultados, otros estudios indican que sustituir AFN por AFR-C en un 20% mejora significativamente tanto la resistencia a la compresión como la resistencia a la flexión, además de presentar una menor absorción de agua, lo que sugiere que estos morteros pueden comportarse de manera similar a los morteros con agregados naturales [74–77]. Asimismo, se reportó que los morteros fabricados con AFR-C presentaron un incremento en la resistencia a la compresión a los 28 días, con excepción de aquellos que contienen 30% de reemplazo [68].

En contraste, otras investigaciones señalan que es posible sustituir un 40% del AFN sin afectar significativamente la resistencia a la compresión y a la flexión, la retracción, ni la fuerza adhesiva del mortero endurecido; sin embargo, esta sustitución si afecta a la trabajabilidad y la densidad [58]. De igual forma, un estudio reportó que la sustitución de un 50% de AFR-C presentó el mejor desempeño respecto a otras sustituciones; particularmente en términos de mayor resistencia a compresión y flexión y menor absorción de agua [62]. Adicionalmente, la literatura reporta que es posible alcanzar tasas de sustitución de hasta 50% de AFR-C en morteros, observándose un incremento gradual en la resistencia mecánica con el tiempo [19,78]. No obstante, según los resultados de un estudio previo, los morteros con agregado reciclado pueden presentar un comportamiento mecánico inferior en comparación con los morteros elaborados con AFN, aunque cumplen con los límites establecidos por las normas y los fabricantes [79]. Por otro lado, algunos autores sugieren incluso la posibilidad de sustituir el 100% del AFN por agregados reciclados [80], mientras que otros plantean que el uso de AFR-C podría ser una alternativa viable principalmente en aplicaciones donde los requisitos mecánicos sean menores [81].

Además de las propiedades mecánicas, se ha evidenciado el análisis del efecto de los AFR-C sobre propiedades físicas como la porosidad, la densidad y la absorción de agua. En general, se ha observado que los morteros elaborados con AFR-C presentan un mayor número de poros, lo que se traduce en una menor densidad del material. En consecuencia, estos morteros suelen requerir una mayor cantidad de agua durante su preparación en estado fresco o bien, la incorporación de aditivos para mejorar su desempeño [64,82–84].

2 ASPECTOS TEÓRICOS

2.1 Componentes del mortero

2.1.1 Cemento

El mortero, es en esencia concreto sin agregado grueso [1], es decir, es una mezcla homogénea de material cementante (cemento), agua y agregado fino: en algunas ocasiones se le añade aditivos [2]. Los morteros son considerados como una gran alternativa para incluir agregados reciclados dentro de su matriz, debido a su uso habitual como material no estructural [33].

2.1.2 Agua

El agua permite que el cemento desarrolle su capacidad ligante, por lo que es un componente fundamental en las mezclas de mortero y concreto [2]. Cuando entra en contacto con el cemento hidrata sus partículas y hace que desarrollen sus propiedades aglutinantes, dependiendo de la cantidad de líquido que se agregue [3]. El agua que se utiliza en la fabricación del mortero debe ser apta para el consumo humano, no contener sustancias como ácidos, sustancias alcalinas, aceites y materia orgánica [2].

2.1.3 Agregado fino

Se les considera como agregado fino a las partículas que son menores de 4.75 mm y mayores a 75 μm (malla No. 200). Siendo la arena comúnmente utilizada como agregado fino, la cual es el resultado de la degradación natural y de la abrasión de la roca o del procesamiento de piedra caliza frágil [1].

2.2 Composición mineral del cemento portland

En la fabricación del cemento se utilizan diversas materias primas, las cuales consisten principalmente en cal, sílice, alúmina y óxido de fierro. Durante ese proceso, estos compuestos interaccionan para formar una serie de productos más complejos, hasta que alcanzan un estado de equilibrio químico [85].

Comúnmente se consideran cuatro compuestos como los componentes principales del cemento. Estos se presentan en la **Tabla 1**, junto con sus símbolos de abreviación. Esta notación abreviada, describe cada óxido con una letra, es decir: $\text{CaO} = \text{C}$; $\text{SiO}_2 = \text{S}$; $\text{Al}_2\text{O}_3 =$

A, y $\text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{F}$. Análogamente, el H_2O del cemento hidratado, se indica con una H, y SO_3 por S [85].

Tabla 1. Compuestos principales del cemento portland [85].

Nombre del compuesto	Composición de óxido	Abreviatura	Nombre comercial
Silicato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S	Alita
Silicato dicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S	Belita
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{AlO}_3$	C_3A	Celita
Aluminoferrita tetracálcica	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	Felita

Además de los compuestos que presenta la **Tabla 1**, existen otros compuestos menores tales como MgO , TiO_2 , Mn_2O_3 , K_2O y Na_2O , que por lo general no exceden de un porcentaje poco considerable del peso de cemento [85].

2.3 Hidratación del cemento

La hidratación se refiere a las reacciones químicas que ocurren entre compuestos anhidros y moléculas de agua, lo que da lugar a una amplia variedad de compuestos hidratados. En otras palabras, los silicatos y aluminatos mencionados en la Tabla 1, en presencia de agua forman productos de hidratación, que, con el transcurso del tiempo, generan a la pasta de cemento hidratada, la cual es una masa firme y dura [85,86].

Los compuestos de los distintos tipos de cemento pueden reaccionar con el agua de dos formas diferentes. La primera es llamada hidratación real, donde se produce una adición directa de algunas moléculas de agua. El segundo tipo de reacción con agua es la hidrólisis. Sin embargo, para fines prácticos, se aplica el término hidratación a todas las reacciones de cemento con agua, es decir, a ambos tipos: la hidratación real y la hidrólisis [85].

Durante el proceso de hidratación ocurren una serie de reacciones separadas/independientes (paralelas y/o secuenciales) que involucran moléculas de agua y las principales fases minerales que forman el cemento. En general, el proceso de hidratación está impulsado en

gran manera por la composición química inicial, las dimensiones (por ejemplo, áreas superficiales específicas, rugosidad y distribución del tamaño de partícula), la cantidad de agua añadida, la relación agua/cemento (a/c), la temperatura de curado y la presencia de aditivos [87].

Para comprender el proceso, a continuación, se presentan por separado las reacciones de hidratación considerando los minerales de forma individual.

- Reacción que involucra C_3S o alita.

Es el principal componente del cemento portland ordinario e influye de manera considerable en las propiedades mecánicas (resistencia) del cemento, y en el proceso de endurecimiento. Durante la hidratación de la alita es posible distinguir cuatro etapas. La primera es el periodo de preinducción, la cual dura unos pocos minutos, esta ocurre justo después de la exposición al agua, y es aquí donde se produce la rápida hidratación del C_3S . La consecuencia directa del fenómeno que ocurre es la formación de una primera capa de silicato de calcio hidratado (C-S-H) cerca de la superficie. En esta primera etapa de la reacción se produce un alto calor de hidratación. Inmediatamente, la velocidad de hidratación decrece y luego aumenta, con una segunda liberación de calor. Por último, el proceso de hidratación disminuye nuevamente y entra en la etapa de desaceleración. El C-S-H es la fase aglutinante principal y se define químicamente como $CaO.SiO_2.H_2O$. Además, se produce un producto secundario, el hidróxido de calcio o portlandita (CH) [88–90].

- Reacción que involucra C_2S o belita.

De manera semejante a la alita, la hidratación del silicato dicálcico de igual modo requiere distintas etapas de reacción. En general, el tiempo de inducción es relevante y presenta una baja velocidad de hidratación. Después, se produce un segundo incremento pequeño en la velocidad de hidratación. Finalmente, la velocidad de este proceso se reduce nuevamente en la tercera etapa. La belita evoluciona tanto a C-S-H como a CH [91].

- Reacción que involucra C_3A o celita.

El aluminato tricálcico o celita, es el componente más reactivo del cemento, y es el tercer compuesto involucrado en el proceso de hidratación. En la primera etapa de este proceso

desarrolla un papel de suma importancia, ya que influye tanto en las propiedades mecánicas como reológicas. Para evitar el fraguado rápido de la pasta y extender el tiempo de trabajabilidad, se acostumbra a agregar yeso al clinker. Con el yeso, la fase de hidratación principal es la etringita (AFt) [92,93].

- Reacción que involucra C_4AF o felita.

La aluminoferrita tetracálcica es el último componente que participa en la reacción de hidratación del cemento. Este se hidrata rápidamente y no contribuye en gran medida a la resistencia, este componente es el responsable del color gris del cemento [94,95].

2.3.1 Principales productos de hidratación del cemento

- Silicato de calcio hidratado (C-S-H).

Los silicatos de calcio hidratados (C-S-H, por sus siglas en inglés) constituyen el principal producto generado durante la hidratación del cemento portland, ocupa el 50-60% de volumen en la pasta de cemento. El gel C-S-H es el responsable de la mayor parte de la resistencia mecánica y cohesión en la matriz cementicia de morteros y concretos [96]. Estos compuestos pueden formarse mediante la hidratación de C_3S y C_2S , así como por precipitación a partir de soluciones acuosas que contienen sales de calcio y iones silicato. Se compone principalmente por calcio, silicio, oxígeno e hidrógeno, aunque puede incorporar otros elementos como aluminio, sodio o magnesio [97]. Su relación molar Ca/Si puede variar aproximadamente entre 0.7 y 2 o incluso valores superiores, en la mayoría de los casos es cerca de 1.7 [98]. Además, existe evidencia indirecta de que el C-S-H obtenido por reacción entre el CaO y sílice tiene una estructura laminar similar a la de la tobermorita y/o jennita naturales [99].

El gel C-S-H posee una estructura amorfa o semicristalina, por lo que en análisis de difracción de rayos x (DRX) no presenta picos intensos y definidos como en otras fases cristalinas. En cambio, aparece como una señal ancha y difusa [100]. Microestructuralmente, el gel C-S-H se presenta como una masa densa y de apariencia fibrosa o laminar bajo microscopía electrónica de barrido (SEM). Esta fase llena espacios capilares y une las partículas sólidas del sistema cementante, lo que contribuye en gran manera a la densificación de la matriz y a la reducción de la porosidad [1]. En sistemas con materiales puzolánicos o

residuos cerámicos reciclados, puede generarse gel C-S-H secundario debido a la reacción entre la sílice amorfa reactiva y la portlandita liberada durante la hidratación del cemento. Esta reacción puzolánica favorece la densificación de la matriz y puede mejorar propiedades mecánicas y de durabilidad [100].

- Portlandita (CH).

La portlandita, también conocida como hidróxido de calcio ($\text{Ca(OH}_2\text{)}$) constituye el segundo producto de hidratación más abundante en el cemento hidratado, representando aproximadamente entre el 15 y el 25% de su peso, y se caracteriza por presentar una estructura en forma de placas hexagonales. Se forma principalmente durante la hidratación de los silicatos tricálcico (C_3S) y dicálcico (C_2S), junto con el gel C-S-H [96,101].

Este compuesto desempeña un papel importante en la durabilidad del material, particularmente por su capacidad para mantener y amortiguar el pH del sistema. Además, puede reaccionar con materiales silíceos mediante reacciones puzolánicas, generando C-S-H secundario y modificando la estructura de poros. No obstante, cuando la portlandita es lixiviada, la matriz cementante puede desarrollar una estructura de poros menos compacta. Asimismo, funciona como una barrera protectora frente a la carbonatación y al ataque de ácidos y sulfatos, ya que, en ausencia de este compuesto, dichas sustancias reaccionan directamente con el gel C-S-H, deteriorando su capacidad aglutinante [101].

- Etringita (AFt).

La etringita es uno de los principales productos de hidratación que se forman durante las primeras etapas de reacción del cemento portland. Pertenecce al grupo de los sulfoaluminatos de calcio hidratados y se origina principalmente por la reacción entre el aluminio tricálcico (C_3A) del cemento y el yeso añadido durante la molienda del clínker, en presencia de agua [96].

La formación de etringita es importante porque regula la velocidad de hidratación del C_3A , evitando el fraguado instantáneo del cemento. Durante las primeras horas de hidratación, la etringita precipita en forma de cristales de aguja o prismáticos, que llenan parcialmente los poros de la pasta cementicia, contribuyendo al desarrollo inicial de resistencia mecánica [100].

En microestructura, la etringita suele observarse mediante microscopía electrónica de barrido (SEM), como agujas alargadas agrupadas radialmente [98]. La presencia de etringita puede ser beneficiosa o perjudicial dependiendo del momento y lugar donde se forme. La etringita primaria, formada durante la hidratación normal del cemento, es deseable porque contribuye al refinamiento de la microestructura y al control del fraguado. Sin embargo, la formación de etringita tardía (una vez que el concreto o mortero se haya fraguado), puede ocasionar tensiones expansivas y fisuras [102,103].

En la **Figura 3** se muestran micrografías a 10,000 aumentos de una pasta de cemento, en las cuales se presentan los productos de hidratación mencionados anteriormente. Se observa al gel C-S-H como una masa densa, los cristales o placas de la portlandita (CH) y los cristales con forma de agujas alargadas correspondientes a la etringita [15].



Figura 3. Micrografías de SEM a 10,000x de una pasta de cemento; se observan los principales productos de hidratación del cemento [15].

2.4 Propiedades del mortero en estado fresco

Las propiedades en estado fresco del mortero corresponden al conjunto de características que describen el comportamiento de la mezcla cementante antes de endurecer. Estas propiedades determinan la trabajabilidad de mezclado, colocación, compactación y acabado del mortero, además de que influyen en el desempeño mecánico y en la durabilidad en estado endurecido [85,93].

Entre las propiedades más importantes se encuentra la trabajabilidad, la cual se define como la facilidad con la que el mortero puede manipularse y colocarse sin presentar segregación o pérdida de homogeneidad [85]. Relacionada con esta propiedad se encuentra la consistencia o fluidez, esta describe la capacidad de deformación o expansión de la mezcla fresca y generalmente se evalúa mediante la mesa de flujo conforme al procedimiento de la norma ASTM C1437 [104].

Otra propiedad relevante es la retención de agua, que representa la capacidad del mortero para conservar el agua de mezclado frente a la absorción del sustrato o la evaporación. Esta propiedad es fundamental porque favorece una adecuada hidratación del cemento y mejora la adherencia del material. Asimismo, el contenido de aire influye directamente en la trabajabilidad, la densidad y la durabilidad del mortero endurecido [93].

El tiempo de fraguado corresponde al periodo durante el cual el mortero mantiene su plasticidad antes de endurecer, mientras que la densidad en estado fresco permite evaluar el grado de compactación y la presencia de vacíos en la mezcla [85]. Por otra parte, fenómenos como la segregación y la exudación afectan negativamente la uniformidad del mortero, debido a la separación de partículas sólidas o a la migración de agua hacia la superficie [105].

En conjunto, las propiedades en estado fresco son fundamentales debido a que condicionan la microestructura y el comportamiento posterior del mortero endurecido, ya que una mezcla con adecuada estabilidad y trabajabilidad favorece una distribución homogénea de los componentes y un mejor desarrollo de los productos de hidratación [85,93].

2.5 Propiedades mecánicas del mortero en estado endurecido

Las propiedades mecánicas en estado endurecido del mortero son un conjunto de características que define la capacidad del material para resistir esfuerzos y deformaciones, una vez que el proceso de hidratación del cemento ha avanzado y la mezcla ha adquirido rigidez y resistencia [1,85]. Estas propiedades permiten evaluar el desempeño estructural y la durabilidad del mortero frente a diferentes condiciones de carga y servicio.

Entre las propiedades mecánicas más importantes se encuentra la resistencia a la compresión, considerada uno de los parámetros más representativos del desempeño del mortero endurecido. Esta propiedad indica la capacidad del material para soportar cargas de

compresión antes de fallar, y depende de factores como la relación a/c, el grado de hidratación y la microestructura de la matriz cementante. Generalmente, esta propiedad se determina mediante ensayos normalizados como ASTM C109 [85,106].

Otra propiedad relevante es la resistencia a flexión, la cual evalúa la capacidad del mortero para resistir esfuerzos de tensión inducidos por flexión. Este parámetro está estrechamente relacionado con la presencia de microgrietas, la adherencia entre pasta y agregados, así como con la calidad de la ZTI. En morteros, esta prueba suele realizarse conforme a la norma ASTM C348 [1,107].

Otra propiedad importante es el módulo de elasticidad, que representa la relación entre el esfuerzo aplicado y la deformación producida dentro del rango elástico del material. Esta propiedad refleja la rigidez del mortero y depende de la composición de la mezcla y de la densidad de la matriz endurecida [85].

El comportamiento mecánico del mortero endurecido está fuertemente influenciado por la porosidad y la distribución de los productos de hidratación, especialmente del gel C-S-H, debido a que una matriz más densa favorece mayores resistencias mecánicas [1].

2.6 Zona de Transición Interfacial (ZTI)

La Zona de Transición Interfacial (ZTI) es la región entre la pasta de cemento y el agregado, es conocida como una de las zonas más débiles en la interfaz del concreto o mortero. La formación de la ZTI ocurre durante las primeras etapas de hidratación del cemento, debido al efecto de “pared” causado por el empaquetamiento más suelto de los gránulos de cemento contra la superficie del agregado, los cuales no puede unirse íntimamente, o debido a la acumulación de agua libre alrededor de la superficie del agregado [100,108]. En consecuencia, la ZTI tiene una porosidad mucho mayor (de 2 a 3 veces) que la pasta de cemento endurecida más alejada de las partículas del agregado, y favorece el crecimiento de cristales de CH y etringita, en comparación con la matriz cementante circundante [85,109].

Microestructuralmente, la ZTI suele tener un espesor aproximado de 10 a 50 μ m, aunque este valor puede variar dependiendo del tipo de agregado, relación a/c y grado de hidratación [85]. Tiene una influencia de suma importancia en las propiedades mecánicas del material cementicio, debido a su mayor porosidad y menor densidad, favoreciendo el inicio y

propagación de microgrietas bajo esfuerzos mecánicos, además, la conectividad de poros y microfisuras facilita el transporte de agua, cloruros, sulfatos y otros agentes agresivos hacia el interior de la matriz [1,98].

2.7 Polímeros

Los polímeros son moléculas de alto peso molecular (macromoléculas) formadas por la unión de pequeñas unidades repetidas llamadas monómeros. Se clasifican según su estructura molecular como polímeros lineales, ramificados y reticulados; y por su respuesta al calor en polímeros termoplásticos y termoestables [6,110].

2.7.1 Clasificación de los polímeros

2.7.1.1 Por su estructura molecular

Los polímeros se pueden clasificar según su estructura molecular como polímeros lineales, ramificados y reticulados, la forma de cada uno de ellos se muestra en la **Figura 4**. Los polímeros *lineales* consisten en moléculas de cadena recta con poca o ninguna ramificación, lo que les confiere flexibilidad y procesabilidad. Los polímeros *ramificados* contienen cadenas laterales o ramificaciones unidas a la estructura principal del polímero, que pueden influir en propiedades como la viscosidad y la resistencia de la masa fundida. Los polímeros *reticulados* son estructuras densamente interconectadas donde las cadenas de polímeros están interconectadas a través de enlaces covalentes, lo que da como resultado materiales con alta resistencia, rigidez y estabilidad térmica [110].

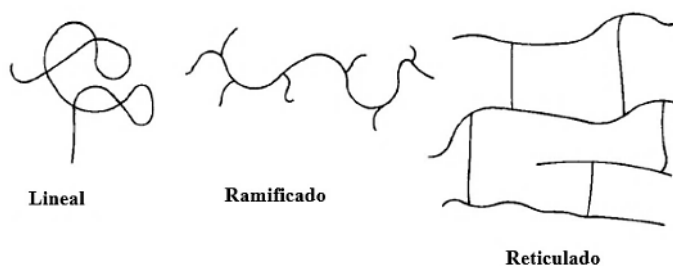


Figura 4. Estructura de polímeros: lineales, ramificados y reticulados [6].

2.7.1.2 Por su respuesta al calor

Es considerada en ingeniería como la clasificación más útil de los polímeros. Ésta se basa en su respuesta térmica (termomecánica). Bajo este esquema, los polímeros se clasifican como termoplásticos o termoestables. Los polímeros *termoplásticos* son aquellos que pueden

ablandarse por calentamiento y endurecerse por enfriamiento en un proceso físico reversible [4]. Además, adoptan la forma del molde (recipiente) que los contiene y, al combinarse con los disolventes adecuados, suelen soportar varios de estos ciclos de calentamiento y enfriamiento sin sufrir deterioro estructural. Ejemplos de polímeros termoplásticos son el polietileno, el poliestireno y el nailon [6].

Por otra parte, los polímeros *termoestables* son estables a la temperatura; por ejemplo, mantienen su forma y estado físico inalterados, es decir, no se funden ni siquiera a altas temperaturas. Al ser sometidos a altas temperaturas, sufren una degradación directa y no pueden reciclarse ni reutilizarse. Estos polímeros se someten a un proceso de curado durante el calentamiento y el conformado, lo que provoca la reticulación de su estructura molecular. Los ejemplos más comunes de termoestables incluyen resinas fenólicas, resinas de urea-formaldehído, poliésteres insaturados y resinas epoxi, etc., [112].

2.8 Síntesis del PET

2.8.1 Esterificación directa

La síntesis del PET por esterificación directa ocurre en dos etapas. Como se observa en la **Figura 5**, en la primera etapa, se lleva a cabo la reacción del etilenglicol (EG) con el ácido tereftálico (TPA), lo que genera como producto BHET y agua como subproducto. En la segunda etapa el BHET obtenido experimenta su polimerización para producir PET [113].

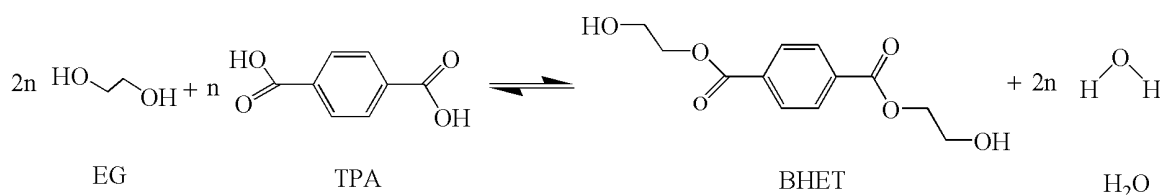


Figura 5. Síntesis del PET por esterificación directa.

2.8.2 Transesterificación

La síntesis del PET por transesterificación se lleva a cabo en dos fases. En la **Figura 6** se muestra que, en la primera etapa, el etilenglicol (EG) reacciona con el tereftalato de dimetilo (DMT), lo que produce BHET como producto y metanol como subproducto. Posteriormente, en la segunda etapa, el BHET obtenido se somete a un proceso de polimerización en el que se tiene PET como resultado [113].

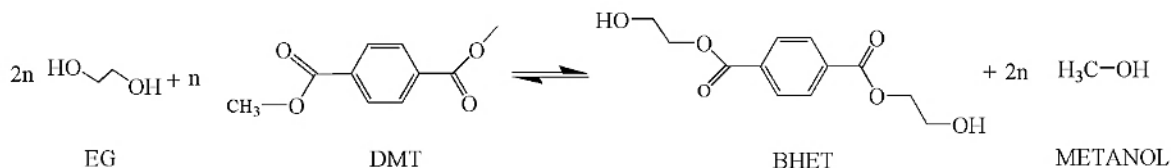


Figura 6. Síntesis del PET por transesterificación.

2.9 Tipos de reciclaje de PET

Debido a las excelentes propiedades del PET, incluida la resistencia a la corrosión, baja densidad, resistencia superior y también la facilidad de uso y de diseño, las aplicaciones del PET lo han sido considerablemente mayores que las aplicaciones del aluminio u otros metales. El PET es procesado por un número de técnicas que dan como resultado una variedad de artículos plásticos [53].

El reciclaje de PET es una solución crucial para reducir los residuos plásticos y mitigar la crisis. Algunas de las técnicas de reciclaje más importantes para el PET son el reciclaje secundario (reciclaje mecánico) y el reciclaje terciario (reciclaje químico) [7].

2.9.1 Reciclaje primario

El reciclaje primario es el método más común debido a su facilidad de uso y bajo costo. Este método se refiere a la reutilización de bienes en su estructura inicial. La desventaja de este proceso se caracteriza por la restricción en el número de ciclos para cada uno [114]. Este tipo de reciclaje es el más antiguo y también se conoce como reciclaje de circuito cerrado, e implica un reprocesamiento mecánico en productos que requieren propiedades inferiores. Es un proceso sencillo y económico, adecuado para un solo tipo de desechos no contaminados, pero no es una opción popular entre las empresas de reciclaje [115,116].

En teoría, es posible reciclar la mayoría de los termoplásticos en circuito cerrado; sin embargo, los envases de plástico suelen utilizar una amplia variedad de polímeros y otros

materiales, como metales, papel, pigmentos, tintas y adhesivos, lo que aumenta la dificultad. El reciclaje en circuito cerrado resulta más práctico cuando el polímero constituyente puede: i) separarse eficazmente de las fuentes de contaminación y ii) estabilizarse frente a la degradación durante el reprocesamiento y el uso posterior [117].

2.9.2 Reciclaje secundario

El reciclaje secundario o reciclaje mecánico es el método más común para el reciclaje de PET, que consiste en recolectar y triturar los productos de PET residuales en pequeños trozos, luego lavarlos y separarlos de contaminantes, para después fundirlos y crear resina de PET. [118]. Los trozos o escamas de PET limpias se funden y moldean para crear nuevos productos, como botellas, fibras o películas. El reciclaje mecánico es un método viable y energéticamente eficiente que puede reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y conservar los recursos naturales [119].

El proceso de reciclaje mecánico consta de varias etapas, incluye la recolección y clasificación, trituración y molienda, lavado y separación, por último, secado y fusión [120].

El primer paso en el proceso de recolección y clasificación es la separación de productos de PET de otros materiales, que puede hacerse a través de tecnologías de clasificación manual o automatizada. La clasificación por color es importante para mantener la calidad y consistencia del material reciclado, ya que los productos de PET de diferentes colores pueden tener diferentes composiciones químicas y propiedades [121].

La clasificación de los productos de PET por tipo puede mejorar la calidad y la consistencia del material reciclado, ya que los distintos tipos de polímeros de PET pueden tener diferentes propiedades de fusión y moldeo. El proceso de recolección y clasificación es de suma importancia para garantizar un reciclaje eficiente y reducir la cantidad de residuos [122].

Seguido de la recolección y clasificación de PET se lleva a cabo la trituración y molienda, para convertir los residuos de PET postconsumo en materiales reutilizables. Este proceso descompone los residuos en piezas manejables, eliminando contaminantes de mayor tamaño como etiquetas y tapas, optimizando los pasos posteriores y reduciendo la necesidad de costosos métodos de eliminación [123]. Tras la trituración, la molienda refina aún más el material de PET en partículas finas o polvo, mejorando su área superficial y homogeneidad.

Este paso puede requerir equipos adicionales como molinos o pulverizadores para lograr la distribución de tamaño de partícula y la consistencia deseadas. En conjunto, la trituración y la molienda son cruciales para preparar los residuos de PET para las etapas posteriores como el lavado, la separación y el reciclaje, asegurando una recuperación eficiente del material y la utilización de recursos [124].

Posterior a la trituración y molienda, el reciclaje de PET implica procesos de lavado y separación, que incluyen fragmentación, inmersión, agitación mecánica y fregado para eliminar contaminantes como etiquetas, adhesivos, suciedad y residuos de alimentos. El enjuague elimina el detergente residual y los contaminantes disueltos, lo que da como resultado un PET limpio y purificado listo para un tratamiento posterior [125].

Por último, la etapa de secado y fusión del proceso implica el uso de aire caliente para evaporar el agua restante y calor para fundir los residuos de plástico PET, hasta convertirlos en líquido fundido. El proceso de fusión puede realizarse mediante diferentes métodos, como calentamiento directo e indirecto [126]. Se eliminan los contaminantes o impurezas que no se hayan eliminado durante la etapa de lavado y separación. El plástico PET fundido puede extruirse en diversas formas o moldearse para obtener productos específicos, garantizando así la alta calidad del plástico reciclado [127].

2.9.3 Reciclaje terciario

El reciclaje terciario o reciclaje químico es una tecnología emergente que consiste en descomponer las largas cadenas de moléculas de PET en sus monómeros individuales, que luego pueden emplearse para nuevas polimerizaciones con el fin de recrear el producto polimérico original o uno similar (fabricar nuevo PET u otros productos). El proceso se divide en varias etapas, que incluyen despolimerización, purificación, repolimerización y formación [42,128,129].

La despolimerización es un método químico que descompone las cadenas de polímeros de PET en monómeros u oligómeros. Este proceso revierte las reacciones de polimerización para producir monómeros individuales de PET, como bis 2-hidroxietil tereftalato (BHET) y mono 2-hidroxietil tereftalato (MHET) [122]. La purificación implica la eliminación de impurezas o contaminantes, mientras que la repolimerización se realiza utilizando calor y un

catalizador. Por último, se revisa el control de calidad para verificar que el producto cumpla con los estándares necesarios de resistencia, durabilidad y apariencia [130].

Los métodos clave para realizar este tipo de reciclaje incluyen metanólisis, glicólisis, hidrólisis y aminólisis. Los tereftalatos de polietileno se rompen por medio de ciertos reactivos, como el agua en el caso de la hidrólisis, los ácidos en el caso de la acidólisis, los glicoles en el caso de la glicólisis, o alternativamente, los alcoholes en el caso de la alcoholólisis [131]. Donde la glicólisis y la metanólisis son los que han logrado un crecimiento industrial hasta la actualidad. Siendo la glicólisis, el método más viable comercialmente, el cual utiliza etilenglicol (EG) para romper los enlaces éster y producir tereftalato de bis 2-hidroxietilo (BHET) para la fabricación de PET [42].

El reciclaje terciario puede producir PET reciclado de alta calidad con propiedades similares al PET virgen, lo que lo hace adecuado para su uso en aplicaciones exigentes como envases de alimentos y componentes automotrices [132].

En la **Figura 7** se presentan diversos tipos de reciclaje químico del PET.

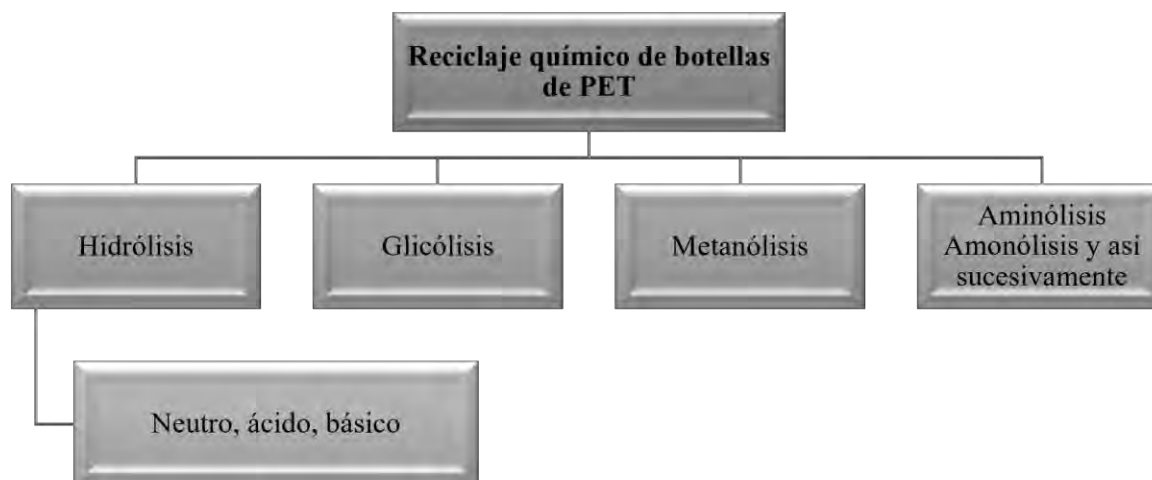


Figura 7. Reciclaje químico de botellas de PET.

2.9.3.1 Glicólisis

La glicólisis es un tipo de reacción de solvólisis que utiliza glicol o sus derivados como disolvente reactivo. Es un método importante para la despolimerización química del PET. Químicamente, la reacción de glicólisis es la “degradación molecular del polímero de PET

por glicoles, en presencia de catalizadores de transesterificación, donde los enlaces éster se rompen y se reemplazan por grupos hidroxilos terminales” [42]. Estas reacciones se llevan a cabo a temperaturas relativamente altas (180-240 °C), lo que rompe las cadenas poliméricas del PET. A partir de EG [133], dietilenglicol [134], propilenglicol y dipropilenglicol [135] se obtienen productos principales como tereftalato de bis 2-hidroxietilo (BHET) y otros oligómeros (glicolizados de PET). Se ha demostrado que el PG tiene una mayor actividad en la glicólisis para degradar los residuos de PET en oligómeros con grupos terminales -OH libres [136]. Posteriormente, estos productos pueden utilizarse para la fabricación de artículos como espumas de poliuretano, resinas insaturadas, colorantes hidrofóbicos, copoliésteres y recubrimientos acrílicos [113].

La glicólisis del poliéster se lleva a cabo comúnmente en una solución de glicol o sus derivados, como disolvente reactivo, hirviendo a presión atmosférica, y utiliza diferentes tipos de catalizadores metálicos, siendo el más común el acetato de zinc (AZn), por su eficiencia y costo [134]. Durante la producción de PET por esterificación directa o transesterificación, se produce BHET, que luego se policondensa para obtener PET. La policondensación es un proceso reversible y, en presencia de un exceso de EG o PG, se efectúa la glicólisis del PET para potenciar la reacción inversa y obtener BHET o BHPT, respectivamente, el cual se supone que es un verdadero monómero del PET [137].

La **Figura 8** muestra el proceso de despolimerización química del PET, la cual se llevó a cabo mediante una reacción de glicólisis por transesterificación. La glicólisis inicia con un ataque nucleofílico, donde el oxígeno del grupo hidroxilo (-OH) ataca al carbono del grupo carbonilo (C=O). Esta interacción rompe el doble enlace del carbonilo para formar un enlace simple con el PG, derivando en una estructura de geometría tetraédrica intermedia. Posteriormente, se fragmenta el enlace C-O del grupo saliente (-O-CH₂-CH₂-O), permitiendo que el doble enlace del grupo carbonilo se restablezca. A su vez, el grupo entrante pierde un protón (H⁺), el cual reacciona con el grupo saliente. Esta secuencia da lugar al bis(2-hidroxipropil) tereftalato (BHPT) y genera un diol como subproducto. Este ciclo de reacciones se repite hasta que la cadena se descompone hasta producir solamente monómeros [15,42,113,137].

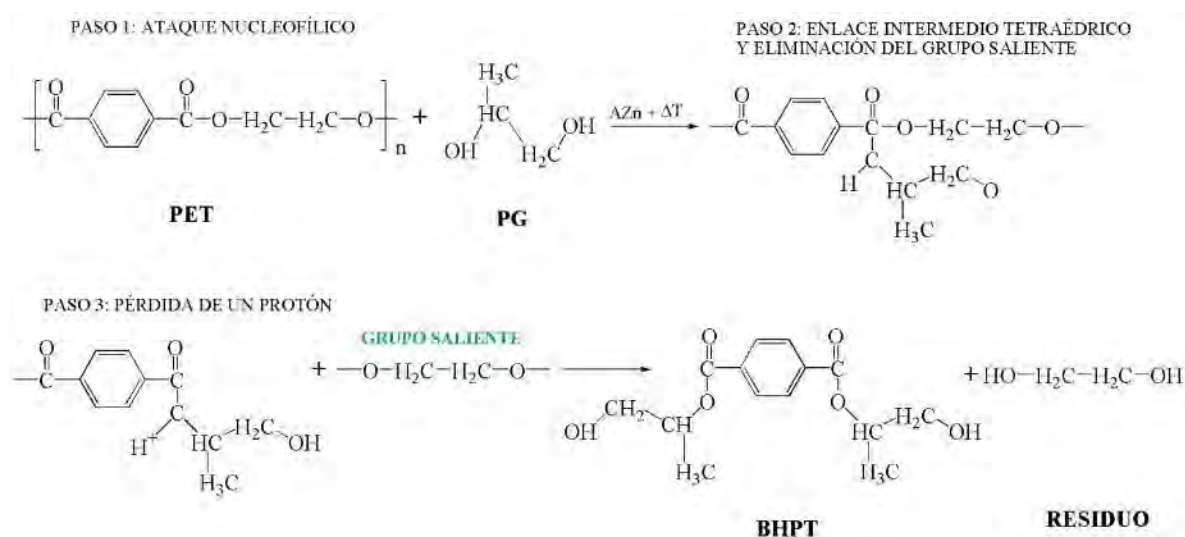


Figura 8. Esquema de la despolimerización del PET mediante glicólisis.

2.9.4 Reciclaje cuaternario

El reciclaje cuaternario consiste en un proceso de recuperación de energía de los residuos plásticos mediante la incineración. Dado que el poder calorífico de los termoplásticos es excelente, se utilizan como alternativa a otros materiales para la producción de energía. Cuando la recolección, la separación y el reciclaje de residuos plásticos resultan difíciles debido a factores económicos, su toxicidad o peligrosidad, la recuperación de energía es la mejor opción de gestión. El principal problema de la incineración es que genera gran cantidad de residuos y contaminación, ya que la quema de plástico libera sustancias tóxicas al aire, lo que representa una amenaza para el medio ambiente [113,138,139].

2.10 Losetas cerámicas residuales

Los residuos de losetas cerámicas, producidos principalmente durante las actividades de fabricación, construcción, renovación y demolición, incluyen losetas rotas, lotes rechazados y recortes no utilizados [140,141]. Estos residuos no son químicamente estables ni biodegradables, por lo que a largo plazo se acumulan en vertederos. Su eliminación plantea grandes problemas ambientales, como la degradación del suelo, acumulación en los vertederos y el consumo innecesario de recursos naturales debido a la falta de prácticas de reciclaje [142]. La producción de losetas cerámicas requiere mucha energía, contribuye a las emisiones de carbono, y una eliminación inadecuada puede generar polvo y la lixiviación de oligoelementos, afectando aún más la calidad del agua y suelo [143]. Por lo tanto, abordar

los residuos de losetas cerámicas mediante una gestión sostenible y el reciclaje es esencial para reducir los impactos ambientales y promover la eficiencia de los recursos en la industria de la construcción [144].

Por otro lado, la industria cerámica produce cantidades significativas de residuos que, cuando se procesan adecuadamente, pueden ser utilizados como un valioso material puzolánico. Particularmente, los residuos de losetas cerámicas son ricos en sílice y alúmina, capaces de participar en reacciones puzolánicas que contribuyen a la formación de fases C-S-H secundarias. Además, se ha reportado que los residuos de losetas cerámicas podrían mejorar la trabajabilidad y las propiedades mecánicas del concreto cuando se utilizan como reemplazo parcial del Cemento Portland Ordinario (OPC) [145].

2.11 Empaquetamiento de partículas

En las últimas décadas, el estudio del empaquetamiento de partículas ha adquirido gran relevancia en sectores como la ingeniería civil, la cerámica y la industria farmacéutica [146]. Dado que la mayoría de los materiales que empleamos a diario están compuestos por elementos granulares de geometrías y dimensiones diversas (como agregados, polvos o minerales), el comportamiento global de estos sistemas está determinado tanto por las características individuales de sus componentes como por los fenómenos de interacción que ocurren entre ellos [147].

En el caso de suspensiones de alta concentración, como el concreto en estado fresco, las propiedades de fluidez inicial se ven afectadas por factores físicos como la textura superficial, el índice de tamaño y la distribución granulométrica de las partículas. Configurar una distribución óptima de los tamaños no solo favorece un mejor acomodo espacial, sino que, en combinación con la fase líquida, define las propiedades reológicas del material durante el proceso de mezclado y su estado fresco [148,149].

El análisis del empaquetamiento consiste esencialmente en seleccionar y dosificar los materiales particulados para que los espacios vacíos que dejan los fragmentos mayores sean ocupados progresivamente por partículas de menor escala, repitiendo este principio de forma sucesiva [150]. Esta selección granulométrica maximiza la densidad de compactación y, al

mismo tiempo, permite obtener mezclas con una mayor fluidez para una fracción volumétrica de sólidos determinada [146].

Dentro de la tecnología del concreto, la granulometría de los agregados es un parámetro crítico para el desarrollo de la resistencia mecánica en estado endurecido [1,85]. La incorporación de agregados en la matriz cementante no solo optimiza los costos frente al uso exclusivo de cemento, sino que aporta mayor resistencia y durabilidad. Aunque generalmente se considera que maximizar el volumen de agregado mejora las prestaciones mecánicas del concreto, se debe tener en cuenta que variables reológicas clave, como la viscosidad y el límite elástico, los cuales incrementan exponencialmente a medida que aumenta la fracción volumétrica ocupada por las partículas [151–153].

3 METODOLOGÍA

3.1 Material requerido

Tabla 2. Materiales requeridos para la experimentación.

Materiales requeridos				
Obtención del AFR-C	Reciclaje mecánico del PET	Reciclaje químico del PET (despolimerización)	Eliminación de residuos e impurezas del BHPT	Fabricación de especímenes de mortero modificado
• Residuos de losetas cerámicas para piso. • Marro para triturar. • Agua potable.	• Botellas de PET postconsumo. • Agua destilada. • Hidróxido de sodio (NaOH).	• Propilenglicol (PG), pureza $\geq 99\%$, marca Sigma-Aldrich. • Acetato de zinc (AZn), pureza $\geq 99\%$, marca Sigma-Aldrich. • Hojuelas de PET obtenidas por reciclaje mecánico. • Termofluido, marca Dermiquim.	• Tetrahidrofurano (THF) marca Sigma-Aldrich. • Etanol. • Agua destilada.	• Cemento CPC 30R. • AFN. • Agua potable. • AFR-C. • BHPT. • Lubricante para los moldes.

3.2 Infraestructura

3.3 Laboratorios y equipos

Tabla 3. Infraestructura necesaria para la experimentación.

Infraestructura: laboratorios y equipos.		
Lugar	Laboratorio	Equipo
Facultad de Ingeniería Mochis	Área de triturado	• Molino triturador de bolas, marca Falcon.
	Laboratorio de corrosión	• Parrilla de agitación magnética con calentamiento, marca CIMAREC. • Vaso de precipitado de 2 L. • Vaso de precipitado de 600 ml. • Campana de extracción de gases. • Sistema de filtrado al vacío (bomba de vacío marca Pittsburgh (2.5, CFM), embudo Büchner, matraz Kitasato de 1 L). • Termómetro.
	Laboratorio de cerámicos y compósitos reciclados	• Moldes cúbicos de 50 mm. • Moldes tipo prisma de 40 x 40 x 160 mm. • Moldes cilíndricos de PVC de 50.8 mm de diámetro. • Mezcladora. • Juego de tamices para agregado fino. • Horno de secado, marca Shel Lab. • Balanza analítica (0.0001 gr de sensibilidad), marca Ohaus. • Mesa de flujo marca Controls, modelo 63-L0040/A.
	Laboratorio de pruebas mecánicas	• Prensa semiautomática, marca Alcon. • Molino de alta energía, marca Spex 8000.
Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías	Laboratorio de procesamiento de polímeros	• Espectrómetro FT-IR, marca PekinElmer L280. • Analizador termogravimétrico, marca TA Instruments TGA5000 Discovery.
	Laboratorio de caracterización de materiales	• Microscopio Electrónico de Barrido marca JEOL, JSM-IT710HR. • Difractómetro de Rayos X, marca Malvern PANalytical Empyrean. • Centro Internacional de Datos de Difracción (ICDD, por sus siglas en inglés).

3.4 Experimento

En la **Figura 9** se presenta el esquema general del experimento, el cual consta de tres etapas: la etapa uno conformada por el reciclaje del cerámico residual y la obtención de AFR-C, la etapa dos la conforman el reciclaje mecánico y químico de PET, y, por último, la etapa tres está conformada por la fabricación de especímenes de mortero.

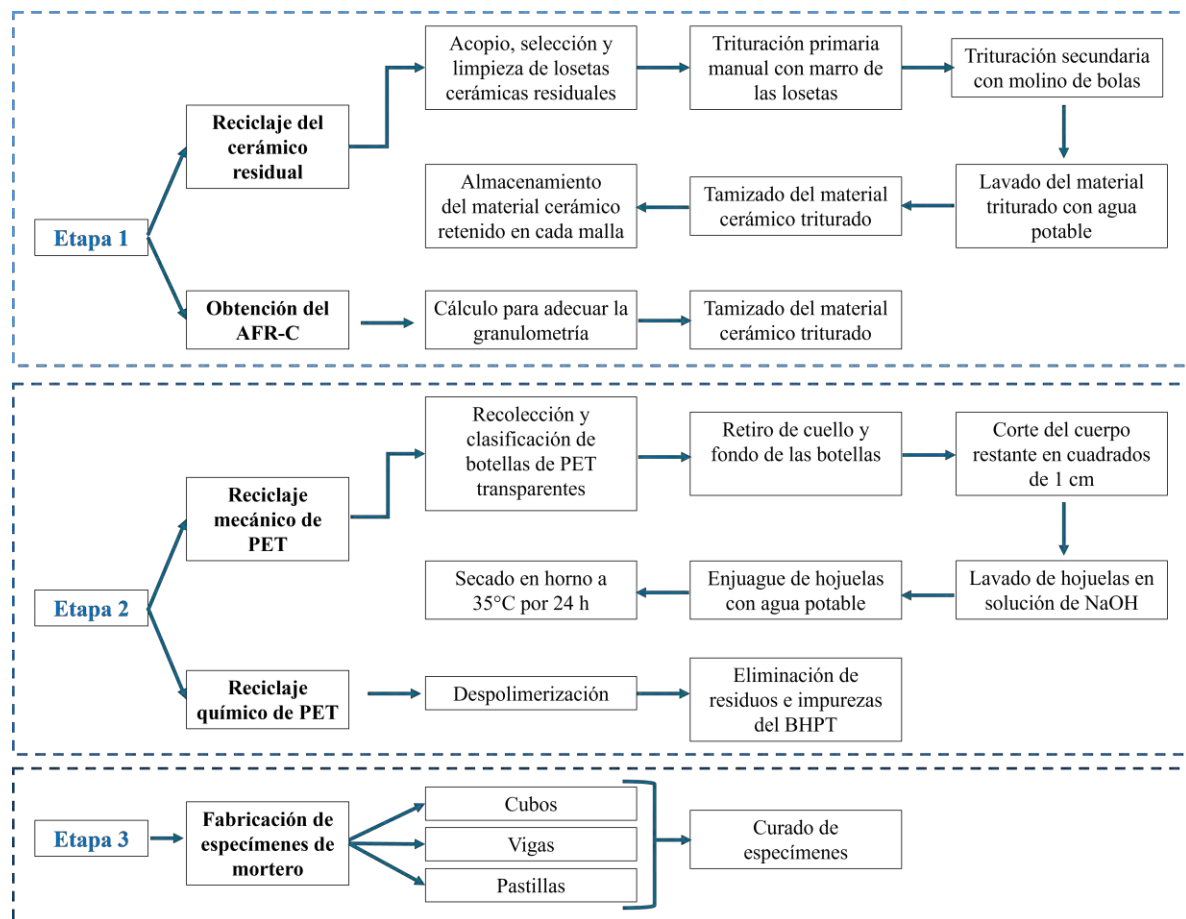


Figura 9. Esquema general del proceso experimental.

3.4.1 Reciclaje del cerámico residual y obtención del AFR-C

En la **Figura 10** se muestra el proceso de reciclaje del cerámico residual y la obtención del AFR-C. Dicho proceso se llevó a cabo mediante las siguientes etapas: a) acopio de los residuos de losetas cerámicas, b) selección y limpieza de las losetas residuales para eliminar restos de material adherido, c) trituración primaria manual con marro de las losetas residuales para reducir su tamaño, d) trituración secundaria mediante un molino de bolas, e) lavado del material triturado con agua potable, f) tamizado del material triturado con un juego de tamices para agregado fino y g) almacenamiento del material cerámico retenido en cada malla en contenedores etiquetados con el número de tamiz correspondiente. El procedimiento anterior es similar al reportado en trabajos previos [19,71,74,77].

Con base en la norma ASTM C144 [154], se realizó un cálculo para determinar la cantidad de AFN que debe retenerse en cada malla con el fin de obtener una granulometría adecuada, es decir, dentro de los límites inferior y superior establecidos. Estos mismos valores se tomaron como referencia para el material cerámico triturado. Sin embargo, al realizar el tamizado del material cerámico con estas cantidades, se obtuvieron valores diferentes de material retenido en cada malla, atribuido al tamizado manual que se realizó. No obstante, dichas cantidades resultaron adecuadas según el análisis granulométrico realizado conforme a la norma ASTM C136 [155]. Debido a lo anterior, el AFN y el AFR-C presentan diferencias en su distribución granulométrica. Finalmente, tanto el AFN como el AFR-C se sometieron a pruebas de densidad y absorción, de acuerdo con lo establecido en la norma ASTM C128 [156].



Figura 10. Proceso de reciclaje del cerámico residual: a) acopio del material, b) selección y limpieza, c) trituración con marro, d) trituración con molino, e) lavado del material triturado, f) tamizado del material triturado y g) almacenamiento del material cerámico.

3.4.2 Reciclaje de PET

3.4.2.1 Reciclaje mecánico

El proceso de reciclaje mecánico de PET se muestra en la **Figura 11**, donde se indican las diferentes etapas del procedimiento, basado en investigaciones previas [15,157,158]. Este proceso inició con: a) la recolección y clasificación de botellas transparentes de PET, b) el retiro del cuello y fondo de las botellas, c) el corte del cuerpo restante en cuadrados de aproximadamente 1 cm para obtener hojuelas de PET, d) el lavado de las hojuelas con una solución al 10% de NaOH en agua destilada, dejándolas reposar durante 24 horas, e) el enjuague con agua potable para eliminar residuos de la solución alcalina y, finalmente f) el secado en horno a 50°C durante 24 horas.

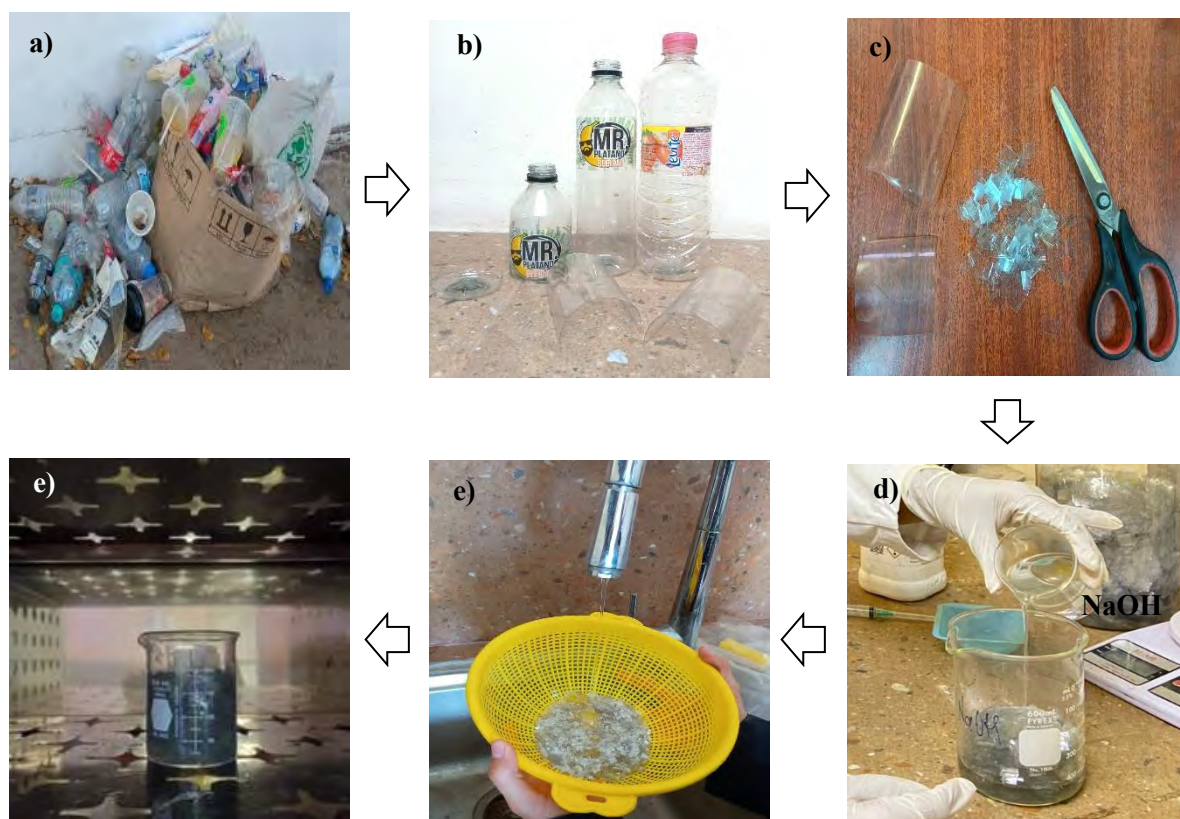


Figura 11. Reciclaje mecánico del PET: a) recolección y clasificación de botellas de PET, b) retiro del cuello y fondo de las botellas, c) recorte del cuerpo restante en cuadrados de 1 cm aprox., d) lavado de las hojuelas con NaOH, e) enjuague de las hojuelas con agua potable y f) secado en horno a 35 °C.

3.4.2.2 Reciclaje químico (despolimerización)

La **Figura 12** presenta el proceso de reciclaje químico del PET, el cual se llevó a cabo mediante despolimerización por glicólisis posterior al secado de las hojuelas, de acuerdo con el procedimiento reportado [15]. El proceso consistió en: a) mezclar 60 g de hojuelas de PET con PG como disolvente (100% del peso del PET) y AZn como catalizador de transesterificación (0.5% del peso del PET) en un vaso de precipitado de 600 ml, b) calentar la mezcla en un baño de termofluido contenido en un vaso de precipitado de 2 L, colocado sobre una parrilla de agitación magnética con calentamiento, hasta que alcanzó una temperatura de 180 °C, se mantuvo en estas condiciones hasta la fusión completa de las hojuelas. Todo el procedimiento se llevó a cabo dentro de una campana de extracción de gases. Finalmente, el producto obtenido se dejó enfriar a temperatura ambiente para su uso posterior en las etapas subsecuentes del experimento.

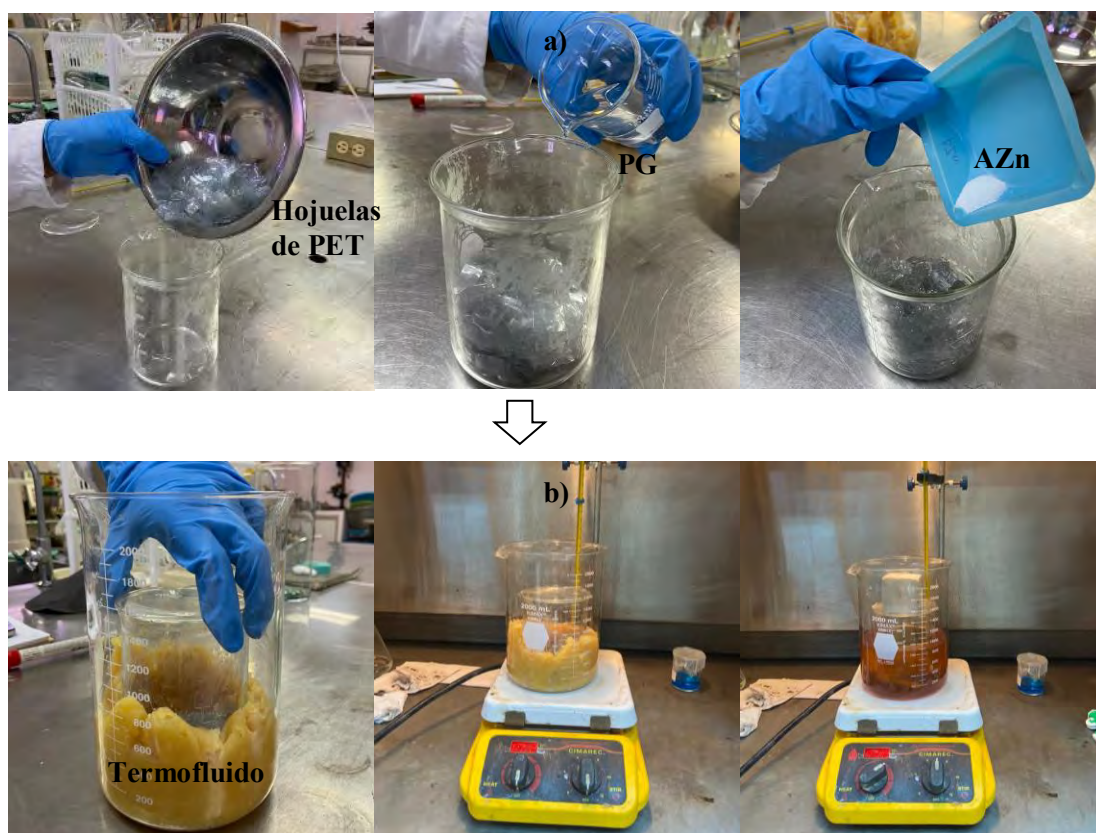


Figura 12. Proceso de despolimerización del PET: a) mezclar hojuelas de PET con PG y AZn, b) calentar la mezcla en un baño de termofluido contenido en un vaso de precipitado de 2 L dentro de una campana de extracción de gases hasta que alcance una temperatura de 180 °C.

3.4.2.3 Eliminación de residuos e impurezas del BHPT

La **Figura 13** muestra el procedimiento que se realizó para la eliminación de residuos e impurezas del BHPT obtenido en la sección anterior. El proceso consistió en: a) agitar en un vaso de precipitado una mezcla compuesta por THF (20% en peso respecto a la mezcla de BHPT obtenida) y etanol (100% del peso de la mezcla) durante 15 minutos, b) incorporar el BHPT obtenido previamente y agitar la mezcla durante 20 minutos a temperatura ambiente, c) lavar el producto tres veces con agua destilada (30% en peso del BHPT) para eliminar el exceso de alcohol, d) filtrar al vacío utilizando un embudo Büchner y, por último, e) secar el material en un horno a 60 °C durante 24 h y dejarlo reposar hasta temperatura ambiente [52].

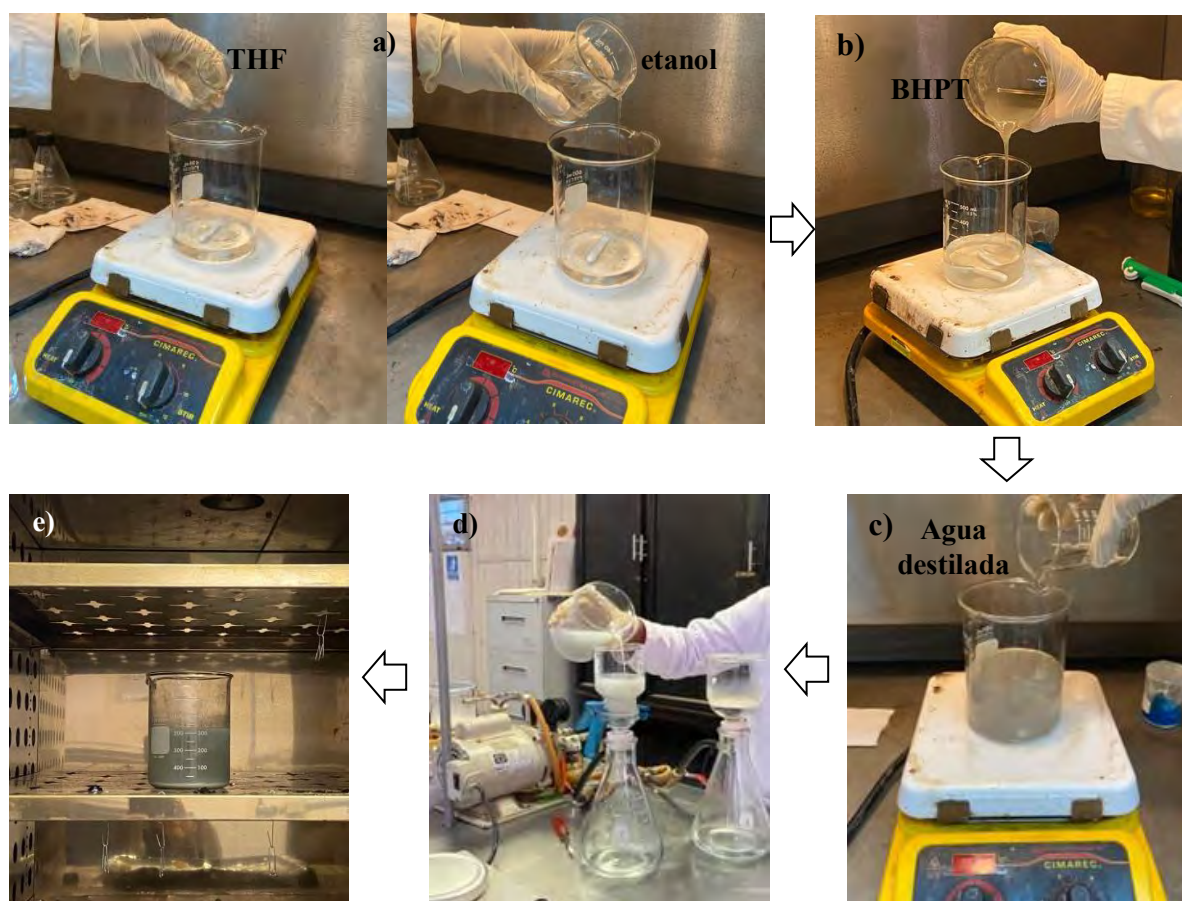


Figura 13. Proceso para la eliminación de residuos e impurezas del BHPT: a) agitar una mezcla de THF y etanol, b) incorporar el BHPT obtenido previamente, c) lavar 3 veces el producto con agua destilada, d) filtrar al vacío con un embudo Büchner y e) secar en horno por 24 h y reposar hasta temperatura ambiente.

3.4.3 Fabricación de especímenes de mortero

Para la fabricación de los especímenes de mortero, primero se prepararon los agregados correspondientes de cada una de las mezclas. Estas arenas se elaboraron mediante diferentes combinaciones de porcentaje de AFN y AFR-C. En la **Tabla 4** se presentan los porcentajes de sustitución de AFR-C utilizados, así como las adiciones de BHPT y la nomenclatura asignada a cada mezcla.

Tabla 4. Nomenclatura y porcentajes de adición de BHPT y sustitución de AFR-C.

Nomenclatura	BHPT (%)	AFN (%)	AFR-C (%)
MB0-C0	0	100	0
MB0-C25	0	75	25
MB0-C50	0	50	50
MB0-C75	0	25	75
MB0-C100	0	0	100
MB0.5-C0	0.5	100	0
MB0.5-C25	0.5	75	25
MB0.5-C50	0.5	50	50
MB0.5-C75	0.5	25	75
MB0.5-C100	0.5	0	100
MB1.0-C0	1.0	100	0
MB1.0-C25	1.0	75	25
MB1.0-C50	1.0	50	50
MB1.0-C75	1.0	25	75
MB1.0-C100	1.0	0	100
MB1.5-C0	1.5	100	0
MB1.5-C25	1.5	75	25
MB1.5-C50	1.5	50	50
MB1.5-C75	1.5	25	75
MB1.5-C100	1.5	0	100

Donde:

M corresponde a mortero.

B corresponde a BHPT y el número a su lado derecho indica el porcentaje de adición.

C corresponde a AFR-C y el número a su lado derecho indica el porcentaje de sustitución.

En la **Figura 14** se muestra un ejemplo de una arena compuesta por 25% de AFN y 75% de AFR-C, donde se pueden observar las fracciones correspondientes a los diferentes números de malla del juego de tamices.



Figura 14. Agregado compuesto por 25% de AFN y 75% de AFR-C.

Para todas las mezclas se utilizó una relación agua/cemento (a/c) de 0.55, manteniéndose constante en todas las mezclas de mortero.

La fabricación de los especímenes de mortero modificado se realizó tomando como referencia la norma ASTM C305 [159]. En la **Figura 15** se presenta el procedimiento seguido, el cual consistió en: a) incorporar el AFN, el AFR-C y el cemento en la mezcladora, mezclando durante 30 s a baja velocidad, b) adicionar el agua, el BHPT y continuar el mezclado durante otros 30 s a baja velocidad, c) detener la mezcladora durante 90 s para realizar el raspado manual del recipiente y continuar el mezclado durante 60 s adicionales, y d) colocar la mezcla en moldes cúbicos de 50 mm, moldes prismáticos de 40 x 40 x 160 mm y moldes cilíndricos de 50.8 mm de diámetro y 25.4 mm de espesor. Después de 24 horas se realizó el desmolde de los especímenes y su curado de acuerdo con la norma ASTM C511 [160].

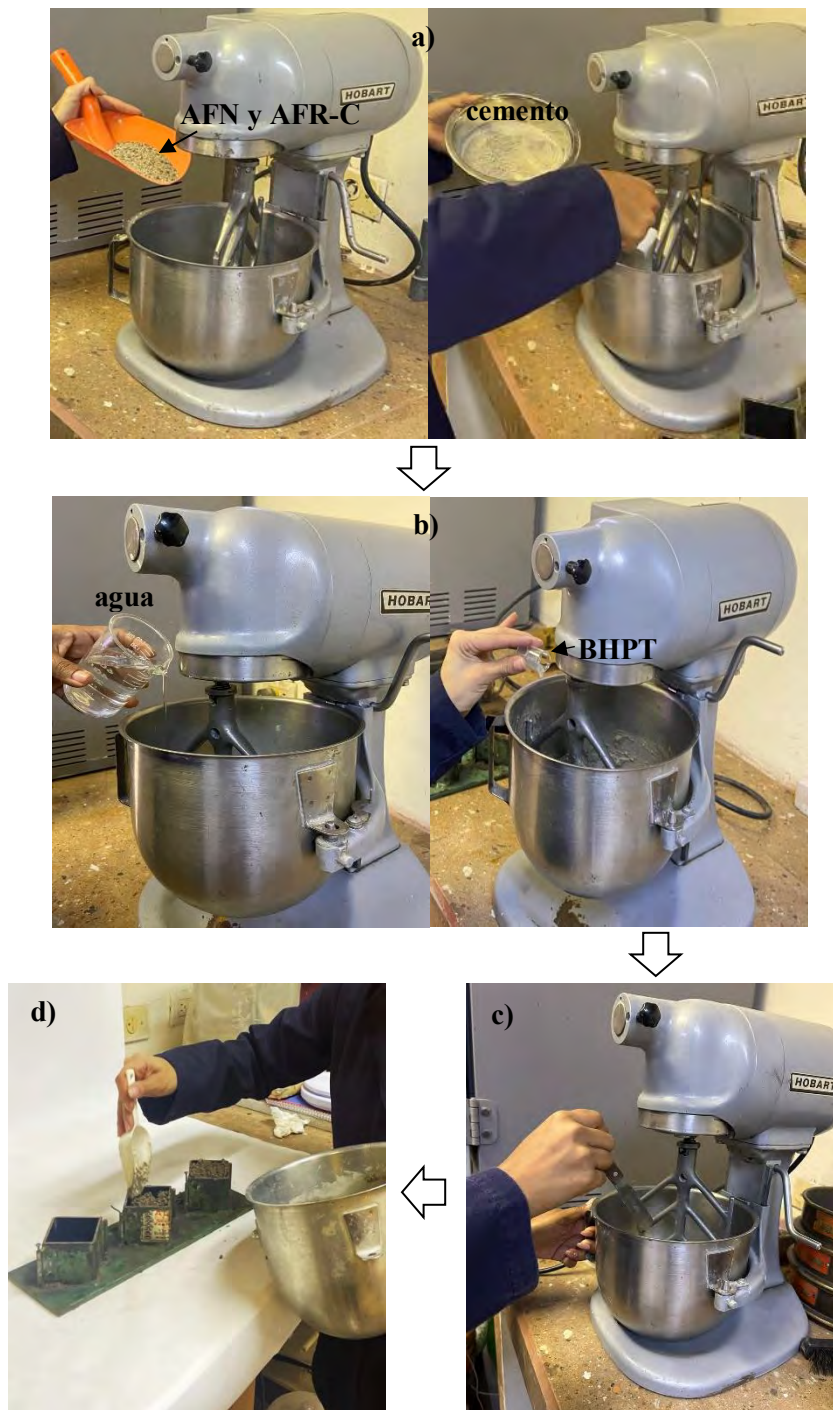


Figura 15. Proceso de la fabricación de especímenes de mortero: a) incorporar el AFN, AFR-C y cemento en la mezcladora y mezclar por 30 s, b) adicionar agua, BHPT y mezclar durante 30 s, c) raspar el interior del recipiente para integrar los componentes y mezclar por 60 s más, d) colocar la mezcla en los moldes correspondientes.

3.5 Técnicas de caracterización

3.5.1 Granulometría de los agregados

La distribución granulométrica del AFN y del AFR-C se determinó conforme a lo establecido en la norma ASTM C136 [155], con el propósito de evaluar la distribución de tamaños de partícula y verificar su adecuación para su uso en la fabricación de morteros.

A partir de este análisis se obtuvieron las curvas granulométricas de ambos agregados, las cuales permitieron comparar su distribución de tamaños y evaluar su correspondencia con los límites establecidos para agregados finos. En la **Figura 16** se muestra el proceso de tamizado de los agregados: a) verter el agregado en los tamices, b) agitar de forma manual el juego de mallas y c) pesaje del material retenido en cada malla.

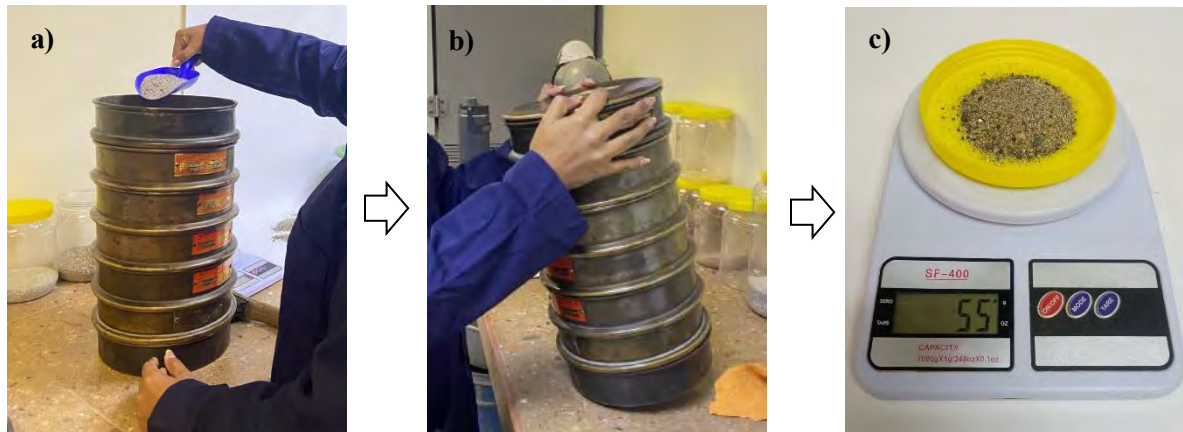


Figura 16. Proceso de tamizado de los agregados para determinar su distribución granulométrica: a) verter el agregado en el juego de tamices, b) agitar manualmente los tamices, c) pesar el material retenido en cada malla.

3.5.2 Densidad y absorción de los agregados

En la **Figura 17** se muestra el proceso realizado para obtener la densidad y absorción del AFN y AFR-C, las cuales se realizaron conforme al procedimiento estandarizado de la norma ASTM C128 [156], con el fin de analizar sus propiedades físicas y porcentaje de absorción de agua. A partir de este ensayo se obtuvieron los valores de densidad y porcentaje de absorción de ambos materiales, los cuales permiten identificar diferencias entre ellos y su comportamiento frente al agua, aspectos que influyen en las propiedades del mortero en estado fresco y endurecido.



Figura 17. Proceso para obtener valores de densidad y absorción de los agregados basado en la norma ASTM C128.

3.5.3 Espectroscopía de Infrarrojo por Transformada de Fourier (FT-IR) de BHPT y PET

El producto obtenido por la despolimerización del PET, es decir, el BHPT, así como el PET original se analizaron por medio de FT-IR, con el propósito de identificar los principales grupos funcionales y los cambios estructurales derivados del proceso de glicólisis.

Esta técnica se realizó utilizando un espectrómetro FT-IR, marca PekinElmer L280, perteneciente al CUCEI. Para el análisis del PET, se tomó una muestra directamente de una botella y se redujo de tamaño mediante raspado hasta obtener partículas finas, las cuales se colocaron sobre la superficie del accesorio de reflectancia total atenuada (ATR).

En el caso del BHPT, se tomó una muestra del producto obtenido y se depositó en un vial, el cual se colocó en el soporte correspondiente del equipo para su análisis. Los espectros se obtuvieron en un rango de número de onda de $4000\text{-}400\text{ cm}^{-1}$.

3.5.4 Análisis Termogravimétrico (TGA) de BHPT y PET

El análisis termogravimétrico (TGA) del BHPT y del PET se realizó con la finalidad de evaluar su estabilidad térmica y los cambios en su comportamiento de degradación derivados del proceso de glicólisis. La técnica se llevó a cabo utilizando un analizador termogravimétrico marca TA Instruments, modelo TGA5000 Discovery.

Para el análisis, se tomaron muestras representativas de PET y BHPT, las cuales se sometieron a un programa de calentamiento desde temperatura ambiente hasta $800\text{ }^{\circ}\text{C}$, en una atmósfera de oxígeno a una velocidad de calentamiento de $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$.

Durante el análisis se reportó la pérdida de masa en función de la temperatura, lo que permitió identificar las etapas de degradación térmica del BHPT y PET.

3.5.5 Fluidez de los morteros

La fluidez de las mezclas de mortero se determinó conforme a lo establecido en la norma ASTM C1437 [104], la cual permite evaluar la consistencia y trabajabilidad del material mediante el ensayo de la mesa de flujo. El parámetro de interés es el porcentaje de fluidez, el cual se obtiene a partir del incremento del diámetro de la mezcla después de someterla a una serie de caídas controladas en la mesa de flujo. Este valor está directamente relacionado con factores como la relación agua/cemento, la granulometría y naturaleza del agregado fino.

La medición del diámetro final se realizó en direcciones perpendiculares para obtener un valor promedio representativo del comportamiento del mortero, como se ilustra en la **Figura 18**.



Figura 18. Toma de lectura de los 4 diámetros de la mezcla para calcular el valor promedio.

3.5.6 Resistencia mecánica a la compresión

La resistencia a compresión de los especímenes de mortero modificado se determinó de acuerdo con lo indicado en la norma ASTM C109 [106]. Los ensayos se realizaron a edades de 7, 14 y 28 días, utilizando tres especímenes por mezcla. En la **Figura 19** se muestra el procedimiento del ensayo, para el cual se emplearon especímenes cúbicos de 50 mm. El proceso consistió en: a) retirar del curado los especímenes a ensayar y eliminar el exceso de agua superficial con un paño, b-c) realizar el ensayo de compresión conforme a lo establecido en la norma ASTM C109, utilizando una prensa semiautomática marca Alcon, aplicando una velocidad de carga de aproximadamente 320 N/s hasta llegar a la falla.

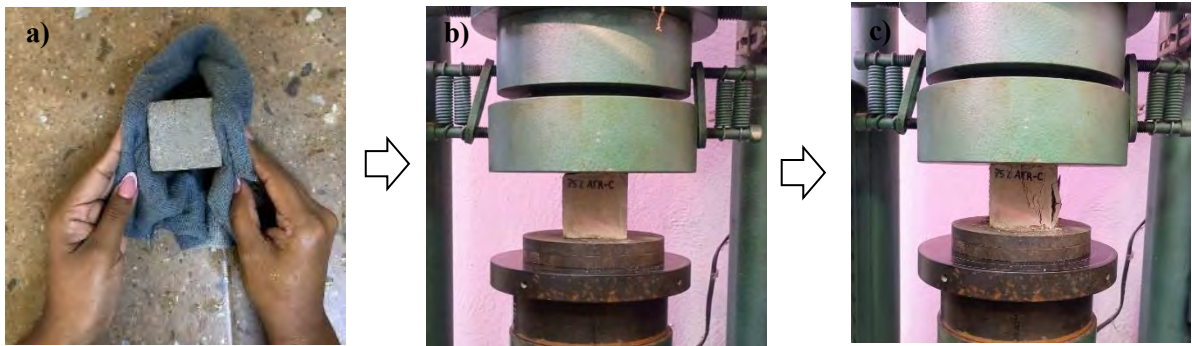


Figura 19. Proceso de prueba de resistencia a compresión de muestras de mortero modificado: a) secar las muestras con un paño, b-c) realizar el ensayo en la prensa.

3.5.7 Resistencia mecánica a la flexión

La resistencia a la flexión de los especímenes de mortero modificado se obtuvo de acuerdo con lo establecido en la norma ASTM C348 [107]. Los ensayos se realizaron a la edad de 28 días y se utilizaron tres especímenes por mezcla. La **Figura 20** presenta el procedimiento del ensayo, para el cual se emplearon especímenes prismáticos de 40 x 40 x 160 mm.

El proceso se realizó conforme a lo establecido en la norma ASTM C348 en las siguientes etapas: a) retirar del curado los especímenes a ensayar y eliminar el exceso de agua superficial con un paño, b-c) colocar el espécimen en el dispositivo de carga del equipo de ensayos, asegurando su correcta alineación y aplicar una velocidad de carga de aproximadamente 2640 N/min hasta la falla,

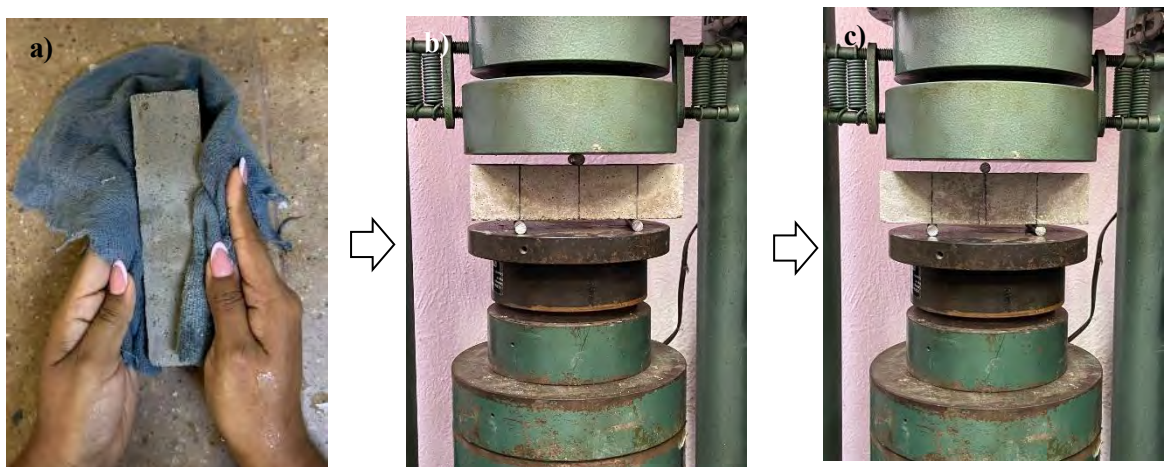


Figura 20. Proceso de prueba de resistencia a flexión de muestras de mortero modificado: a) secar las muestras con un paño, b-c) realizar el ensayo en la prensa.

3.5.8 Porosidad, densidad y absorción de los morteros

La porosidad, densidad y absorción de los especímenes de mortero se determinaron conforme a lo establecido en la norma ASTM C642 [161], con el propósito de evaluar la influencia de la adición de BHPT y la sustitución de AFN por AFR-C en la estructura porosa del material.

Para el ensayo se emplearon fragmentos de especímenes de mortero con 28 días de hidratación. Las muestras se sometieron a diferentes condiciones de secado y saturación, obteniéndose las masas correspondientes para cada condición. A partir de estas mediciones se determinaron la absorción de agua, la densidad y la porosidad de los morteros, de acuerdo con las expresiones establecidas en la norma ASTM C642.

3.5.9 Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)

Para el análisis cualitativo de la morfología de los morteros modificados se utilizó un microscopio electrónico de barrido marca JEOL, modelo JSM-IT710HR en condiciones de alto vacío. Las muestras de mortero se fracturaron para obtener fragmentos de tamaño reducido, los cuales se fijaron sobre el portamuestras mediante cinta conductora de carbono de doble cara. Posteriormente, las muestras fueron recubiertas con una capa de oro durante 40 s para su análisis. Las micrografías se obtuvieron a un voltaje de aceleración de 3-15 kV, utilizando electrones secundarios (SED) y electrones retrodispersados (BED-C).

3.5.10 Difracción de Rayos X (DRX)

Para identificar las fases mineralógicas presentes en las muestras de mortero y analizar su relación con los productos de hidratación, se empleó la técnica de Difracción de Rayos X (DRX). El análisis se realizó en un difractómetro marca Malvern PANalytical, modelo Empyrean. Previamente, las muestras fueron pulverizadas en un molino de alta energía marca Spex 8000. El material obtenido se colocó en un portamuestras y se compactó manualmente para su análisis. Las mediciones se realizaron utilizando radiación Cu K α , con un voltaje de 40 kV y una corriente de 30 mA, en un rango de 5-70° (2 θ), con un paso de 0.02° y un tiempo de 100 s.

Para identificar los productos de hidratación, así como otros compuestos presentes en los difractogramas de rayos X, se realizó revisión literaria y el uso de la base de datos del Centro Internacional de Datos de Difracción (ICDD, por sus siglas en inglés).

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Granulometría de los agregados

En la **Figura 21** se muestra la distribución granulométrica de los agregados, y se observa que tanto el AFN como el AFR-C presentan una tendencia continua dentro del rango de tamaños analizados, lo que indica una adecuada gradación de partículas. Al comparar ambas curvas con los límites establecidos por la norma se puede ver que los materiales se encuentran mayormente dentro del intervalo permisible, lo cual sugiere su viabilidad para su uso en la fabricación de morteros.

Sin embargo, se identifican diferencias entre ambos materiales, principalmente que el AFR-C presenta una ligera variación en la fracción de partículas más finas respecto al AFN, lo que puede atribuirse al proceso de trituración de las losetas cerámicas residuales. No obstante, los resultados indican que, aunque existen variaciones entre estos agregados, ambos presentan una distribución granulométrica adecuada, además de un módulo de finura similar, siendo de 2.46 para el AFN y 2.44 para el AFR-C.

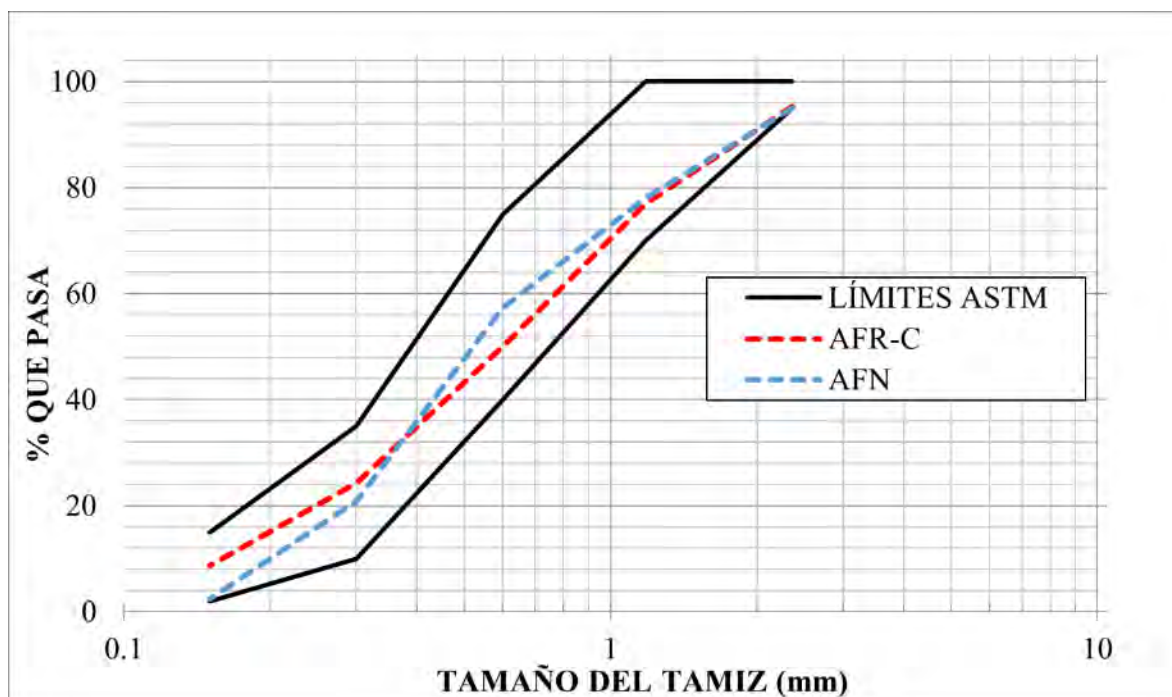


Figura 21. Distribuciones de tamaño de partícula de los agregados.

4.2 Densidad y absorción de los agregados

Las propiedades físicas de densidad y absorción de los agregados evaluados por la norma ASTM C128 se presentan en la **Tabla 5**. Los resultados obtenidos muestran diferencias significativas entre el AFN y el AFR-C, en términos de densidad, el AFR-C presenta valores menores en todas las condiciones evaluadas, con una densidad relativa aparente saturada y superficialmente seca de 2.62, en comparación con 2.83 para el AFN. De manera similar, la densidad relativa aparente seca del AFR-C (2.49) es inferior a la del AFN (2.75), lo que indica una menor compacidad del material reciclado. Esta disminución en la densidad del AFR-C puede atribuirse a su origen cerámico y al proceso de trituración. Asimismo, la densidad relativa aparente (2.87) del AFR-C también es ligeramente menor que la del AFN (2.98), lo que confirma esta tendencia.

Por otro lado, la absorción de agua del AFR-C (5.26%) es considerablemente mayor que la del AFN (2.88%), lo cual está directamente relacionado con la mayor porosidad del material cerámico. Este comportamiento es característico de los agregados reciclados, ya que su estructura más permeable favorece la retención de agua [162].

Tabla 5. Densidad y absorción del AFN y del AFR-C.

Propiedad	AFN	AFR-C
Densidad relativa aparente saturada y superficialmente seca (Dr_{ss})	2.83	2.62
Densidad relativa aparente seca (Dr_s)	2.75	2.49
Densidad relativa aparente (Dr)	2.98	2.87
Absorción (%)	2.88	5.26

4.3 Espectroscopía de Infrarrojo por Transformada de Fourier (FT-IR) de PET y BHPT

La **Figura 22** muestra el espectro de FT-IR de PET y BHPT. Para el PET se observaron las bandas de estiramiento del grupo carbonilo (C=O) alrededor de $1750-1720\text{ cm}^{-1}$ y de C-O entre $1300-1000\text{ cm}^{-1}$ pertenecientes al grupo éster, además de las bandas de estiramiento de C-H asimétricas y simétricas (grupo CH_2) en frecuencias entre $2960-2950\text{ cm}^{-1}$ y $2900-2880\text{ cm}^{-1}$ respectivamente, y bandas de estiramiento C=C entre $1620-1600\text{ cm}^{-1}$, así como la banda C-H entre $1275-1000\text{ cm}^{-1}$ correspondientes al anillo aromático [163]. Para el caso del

BHPT se observan las mismas bandas que en el PET y la adición de una nueva banda ancha entre 3600 y 3200 cm^{-1} debida al estiramiento del grupo hidroxilo ($-\text{OH}$) y una banda alrededor de 2980 cm^{-1} relacionada con la presencia de grupos CH_3 [52,164].

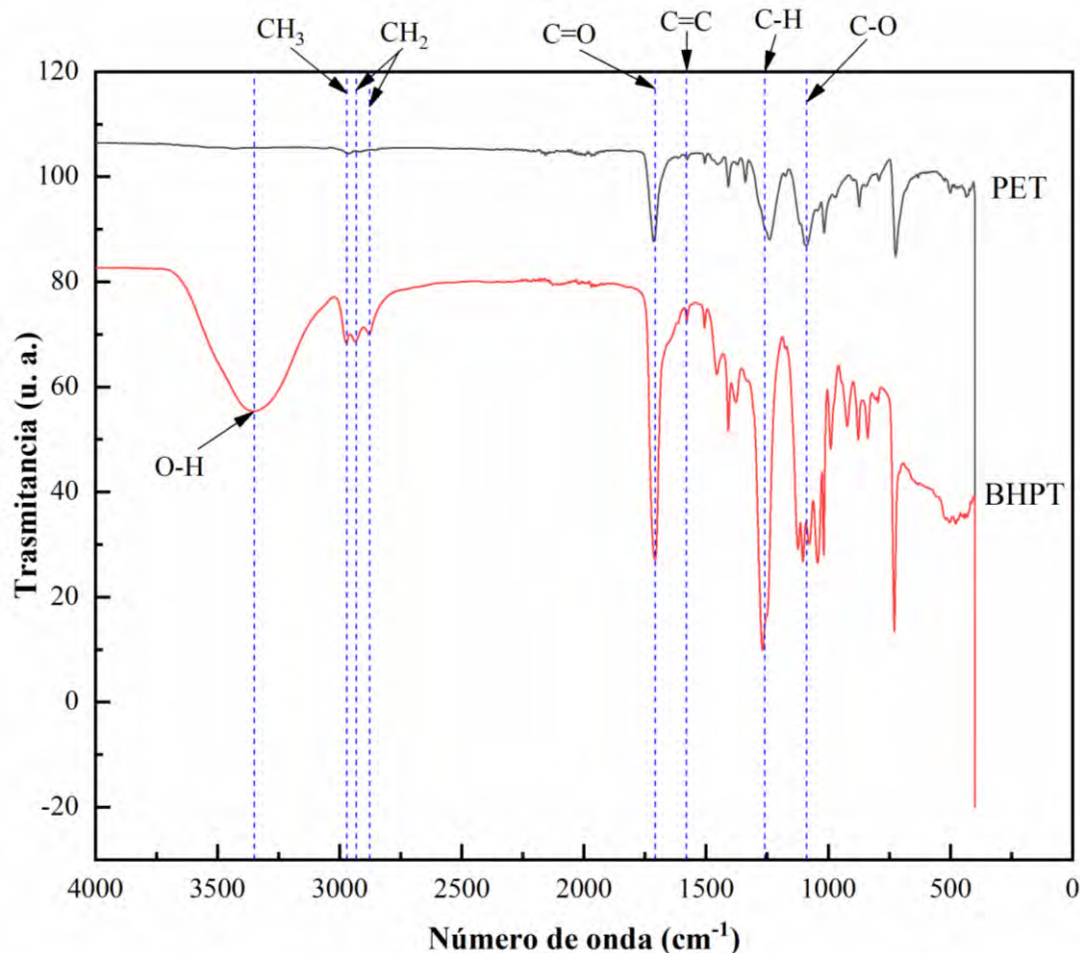


Figura 22. Espectro de FT-IR de PET Y BHPT.

4.4 Análisis Termogravimétrico (TGA) de PET y BHPT

La **Figura 23** presenta el termograma de PET y BHPT. En el caso del PET, se observó una degradación en dos fases: la primera pérdida de masa fue del 93% en un rango de temperatura de $340\text{--}450^\circ\text{C}$ relacionada con la ruptura del enlace éster, y la segunda pérdida de masa fue del 7% en un rango de temperatura de $450\text{--}518^\circ\text{C}$ atribuida a la descomposición del grupo carbonilo.

Para el BHPT, la primera pérdida de masa fue en un rango de temperatura de 30-200°C con un porcentaje de pérdida del 30% relacionado con grupos -OH residuales, una segunda pérdida de masa del 18% en un rango de temperatura de 200-330°C atribuida a la descomposición del grupo CH. Y una tercera pérdida de masa del 50% (330-445°C) que puede relacionarse con la presencia de un enlace carbono-carbono que generó la ruptura del enlace éster [52].

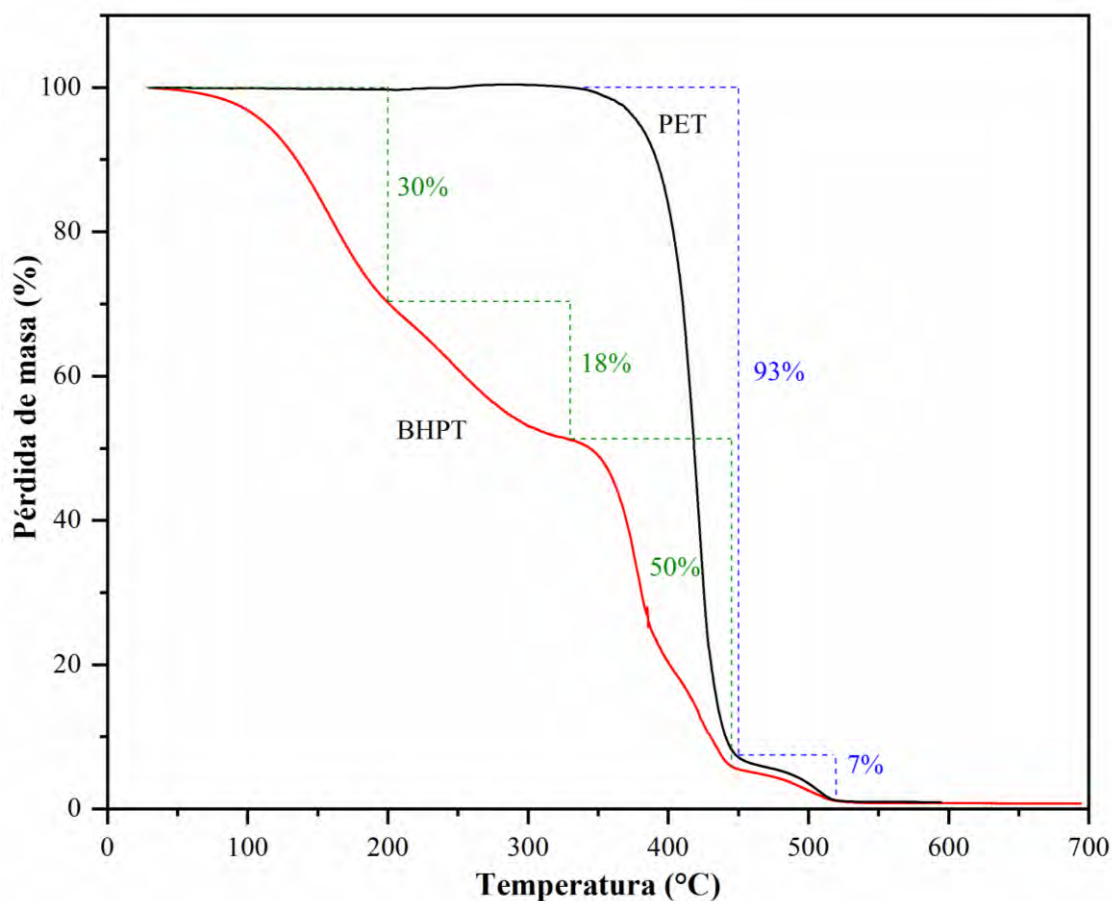


Figura 23. Termograma de PET y BHPT.

4.5 Fluidez de los morteros

En la **Tabla 6** se presentan los resultados de la prueba de fluidez de las mezclas de los diferentes morteros modificados. Esta prueba para los morteros en estado fresco muestra la relación directa del AFR-C en la trabajabilidad del mortero. Para el grupo de morteros sin BHPT (MB0) se observa que con un incremento de hasta 50% de AFR-C la fluidez se reduce, mientras que con 75 y 100% la fluidez aumenta en comparación del mortero de referencia (MB0-C0). Asimismo, los morteros con 0.5% de BHPT presentaron un aumento en el

porcentaje de fluidez conforme incrementa el reemplazo de AFR-C, a excepción del MB0.5-C25. Mientras que, los morteros pertenecientes al grupo con 1.0% de BHPT también presentaron este comportamiento, en el cual los morteros con reemplazo de AFR-C mostraron resultados inferiores al mortero de referencia de ese grupo (MB1-0-C0), y de igual manera, los valores de fluidez van aumentando conforme aumenta el porcentaje de sustitución de AFR-C.

Por último, los morteros con 1.5% de BHPT también presentaron un incremento proporcional con la sustitución de AFR-C. Siendo en todos los casos el mayor porcentaje de fluidez el de los morteros con 100% de AFR-C, esto se puede atribuir principalmente al estado de humedad del agregado, que reduce su capacidad de absorción durante el mezclado, así como la posible liberación de agua retenida. Adicionalmente, la presencia de finos en el AFR-C y su efecto de relleno contribuyen a disminuir la fricción interna del sistema, favoreciendo la trabajabilidad incluso bajo una relación a/c constante [165].

Tabla 6. Resultado de fluidez de morteros modificados con BHPT y AFR-C.

Mortero	Fluidez (%)
MB0-C0	65
MB0-C25	35.75
MB0-C50	55.75
MB0-C75	82.75
MB0-C100	91.5
MB0.5-C0	55.25
MB0.5-C25	44.25
MB0.5-C50	54.5
MB0.5-C75	79.75
MB0.5-C100	85.25
MB1.0-C0	57.5
MB1.0-C25	55
MB1.0-C50	56
MB1.0-C75	57
MB1.0-C100	57.75
MB1.5-C0	33.5
MB1.5-C25	51.75
MB1.5-C50	75
MB1.5-C75	79
MB1.5-C100	117.5

4.6 Resistencia mecánica a la compresión

La gráfica que se muestra en la **Figura 24** presenta los resultados de resistencia a la compresión de los morteros modificados sin adición de BHPT, a edades de 7, 14 y 28 días de curado. Los resultados muestran que, a los 7 días, los morteros con reemplazo de hasta el 75% de AFR-C superaron al de referencia (MB0-C0). Este incremento inicial se puede atribuir a la rugosidad superficial y la porosidad del AFR-C, que mejoran el anclaje mecánico con la pasta de cemento y permiten una curación interna debido al agua retenida en sus poros, acelerando la hidratación temprana [166,167]. Sin embargo, el MB0-C100 presentó el desempeño más bajo (15.66 MPa), lo que sugiere que el reemplazo total de AFR-C debilita la matriz.

A los 14 días, las resistencias de los morteros modificados se nivelaron al mortero de referencia, mostrando resultados más estabilizados. No obstante, a los 28 días, la tendencia cambió, ya que la mayoría de los morteros con contenido de AFR-C quedaron por debajo de MB0-C0, con excepción de MB0-C75, que alcanzó la mayor resistencia de todo el estudio (25.79 MPa). Este comportamiento sobresaliente del 75% de reemplazo puede explicarse por un empaquetamiento granular óptimo, donde la distribución de tamaños del AFR-C compensa los vacíos de la mezcla o el efecto relleno, superando incluso al mortero de referencia [168]. Por el contrario, la caída del resto de las mezclas a los 28 días se debe a que la menor resistencia intrínseca del material cerámico y su mayor demanda de agua terminan por incrementar la porosidad total, limitando el crecimiento de la resistencia a largo plazo en comparación con el AFN [58].

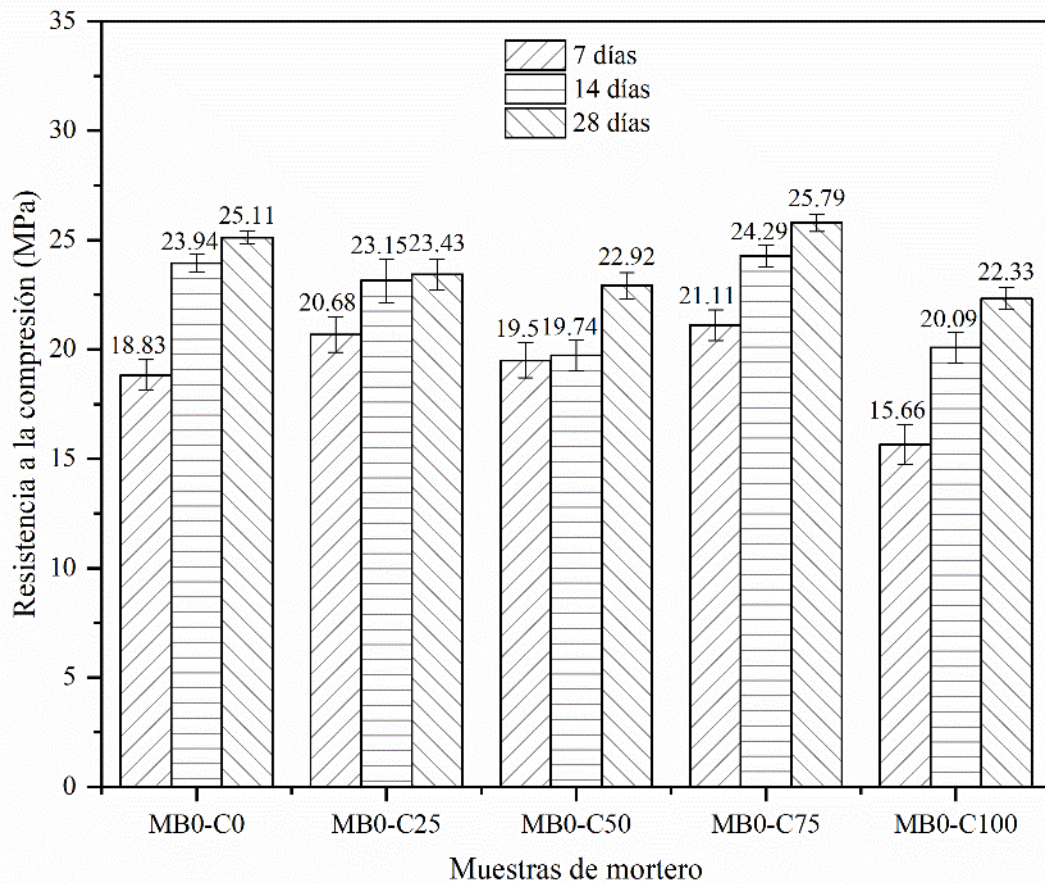


Figura 24. Resistencia a la compresión de morteros sin adición de BHPT y diferentes porcentajes de sustitución de AFR-C a 7, 14 y 28 días de curado.

En la **Figura 25** se visualizan los resultados de resistencia a la compresión de los morteros con 0.5% de adición de BHPT y diferentes porcentajes de sustitución de AFR-C. Se infiere que el uso de 0.5% de BHPT modificó considerablemente el desempeño de las mezclas. A los 7 días, todos los morteros con AFR-C superaron al de referencia, que para este grupo es MB0.5-C0, destacando el MB0.5-C100 con 17.89 MPa. Este incremento inicial sugiere que el BHPT mejora la dispersión de la pasta alrededor de las partículas de AFR-C y optimiza la hidratación temprana [49].

A los 28 días, se puede notar un aumento progresivo de la resistencia conforme aumenta el porcentaje de reemplazo de AFR-C. A diferencia de las mezclas sin adición de BHPT que se muestran en la figura anterior, todos los morteros modificados superaron los 21.03 MPa de la muestra de referencia (MB0.5-C0). El desempeño máximo se alcanzó con el MB0.5-C100, registrando 30.1 MPa, lo cual representa un incremento del 43% respecto a MB0.5-C0. Este fenómeno indica una interacción positiva entre el BHPT y el AFR-C, y se atribuye a que el BHPT puede reducir la porosidad formando una matriz cementicia más densa impregnada por una red polimérica, lo que lleva a fortalecer la ZTI [169].

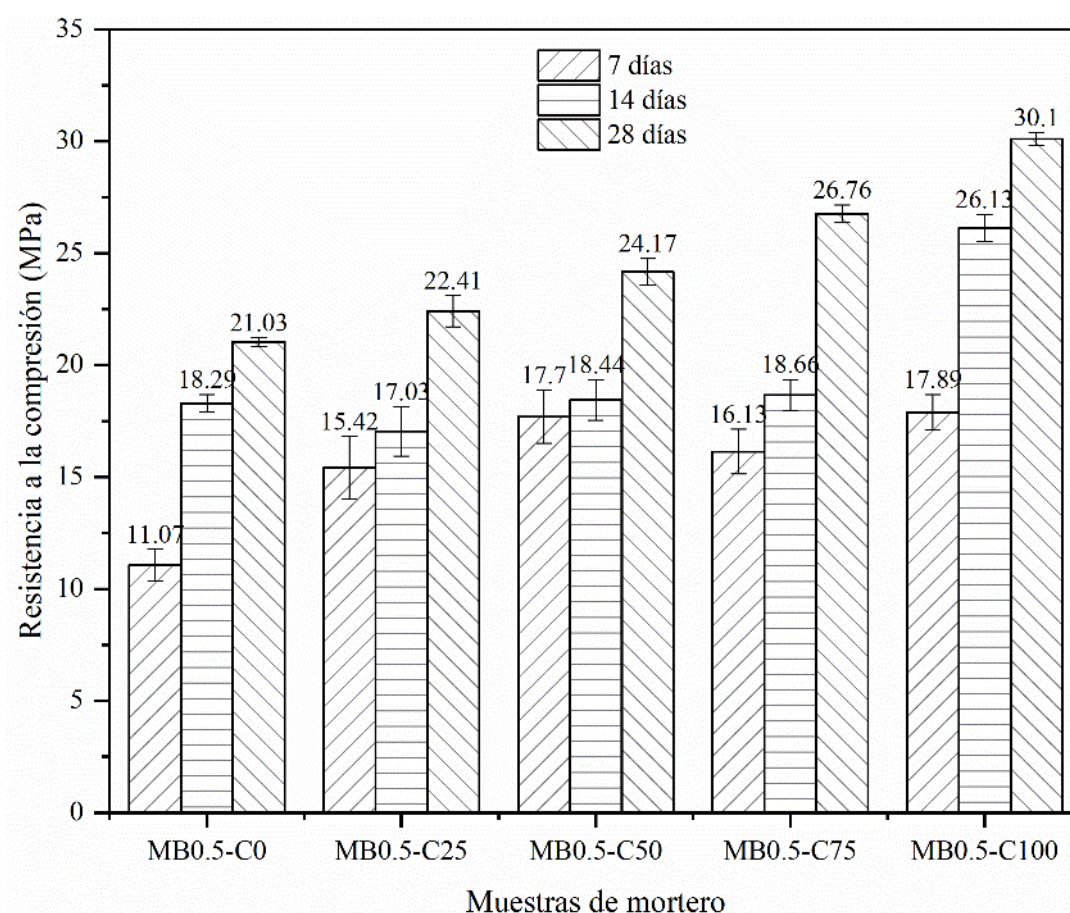


Figura 25. Resistencia a la compresión de morteros con 0.5% de adición de BHPT y diferentes porcentajes de sustitución de AFR-C a 7, 14 y 28 días de curado.

La **Figura 26** presenta los resultados de resistencia a la compresión de los morteros modificados con 1.0% de adición de BHPT y diferentes porcentajes de AFR-C. El incremento de BHPT al 1.0% presentó una tendencia de mejora directamente proporcional al contenido de AFR-C. A los 7 días, todas las mezclas con AFR-C superaron significativamente la

resistencia de la muestra de referencia (MB1.0-C0 con 9.69 MPa), destacando el MB1.0-C100 con 21.66 MPa. Este comportamiento refuerza la idea de que el BHPT optimiza la interacción en la ZTI, actuando como un mecanismo de unión entre la matriz cementicia y la superficie porosa del AFR-C [169]. A los 14 días, de nuevo todos los morteros con AFR-C superaron al mortero de referencia y, es importante destacar al mortero MB1.0-C100, el cual a esta edad alcanzó una resistencia de 32.53 MPa. A los 28 días, los resultados alcanzaron los valores máximos del estudio. Mientras que el MB1.0-C0 registró 18.91 MPa, todas los morteros modificados mostraron un desempeño superior, siendo el mayor MB1.0-C100 con 32.73 MPa. Este valor representa un incremento del 73% respecto a la muestra de referencia. Este fenómeno sugiere que el mayor porcentaje de BHPT favorece la producción de los productos de hidratación y densifica la microestructura [170].

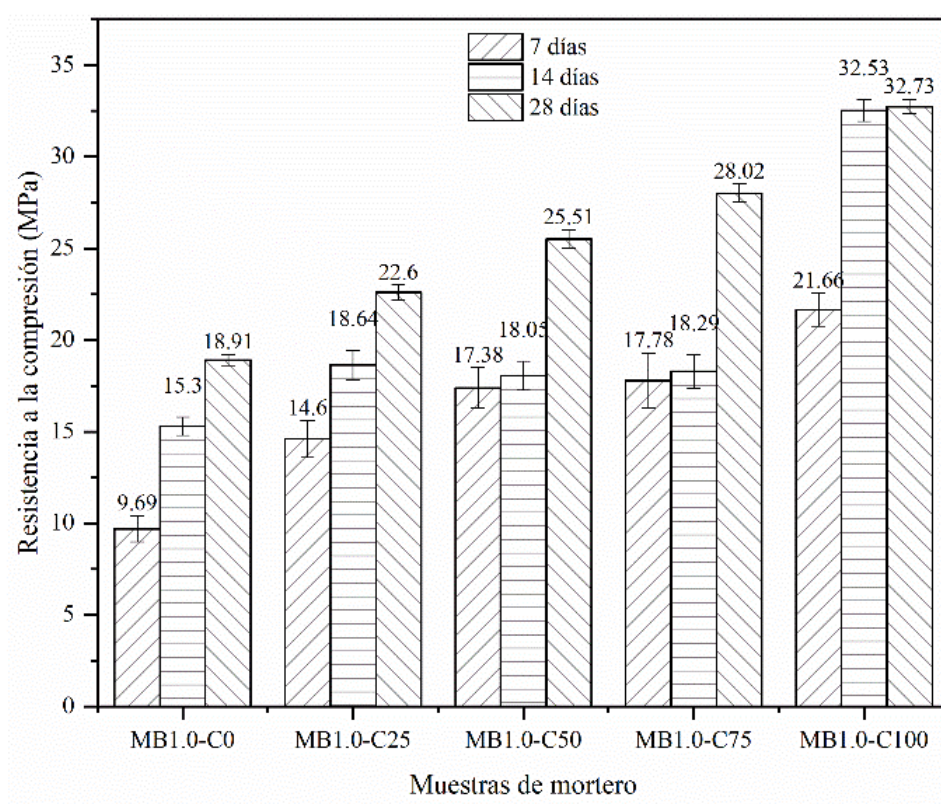


Figura 26. Resistencia a la compresión de morteros con 0.5% de adición de BHPT y diferentes porcentajes de sustitución de AFR-C a 7, 14 y 28 días de curado.

La **Figura 27** presenta los resultados de resistencia a la compresión de los morteros modificados con 1.5% de adición de BHPT y diferentes porcentajes de reemplazo de AFR-C. Se observa que con una dosificación de 1.5% de BHPT, la resistencia a la compresión mantiene valores superiores al mortero de referencia (MB1.5-C0) en todos los porcentajes de reemplazo de AFR-C a los 28 días. Sin embargo, a diferencia del grupo anterior, el desempeño óptimo se desplazó hacia el mortero MB1.5-C75, el cual alcanzó la resistencia a la compresión máxima de este grupo con 28.41 MPa.

La disminución en el desempeño del mortero con 100% de AFR-C (22.41 MPa) en comparación con la serie del 1.0% de BHPT, indica que un exceso de BHPT puede resultar contraproducente. Este fenómeno se atribuye a que una concentración elevada de BHPT, sumada a la alta porosidad del AFR-C al 100% de reemplazo, puede generar una película polimérica demasiado gruesa que interfiere con el proceso de hidratación del cemento, aumentando la porosidad y reduciendo la densidad del mortero [171]. A pesar de esto, el mortero MB1.5-C75 demuestra que la adición de BHPT sigue siendo efectiva para mejorar la microestructura y el anclaje en la ZTI, siempre que se mantenga un equilibrio con el volumen de vacíos del AFR-C. El incremento de resistencia respecto al mortero de referencia sigue siendo significativa (47% superior), lo que confirma que el BHPT potencia las propiedades mecánicas de los AFR-C frente a los AFN bajo un diseño de mezcla controlado [172].

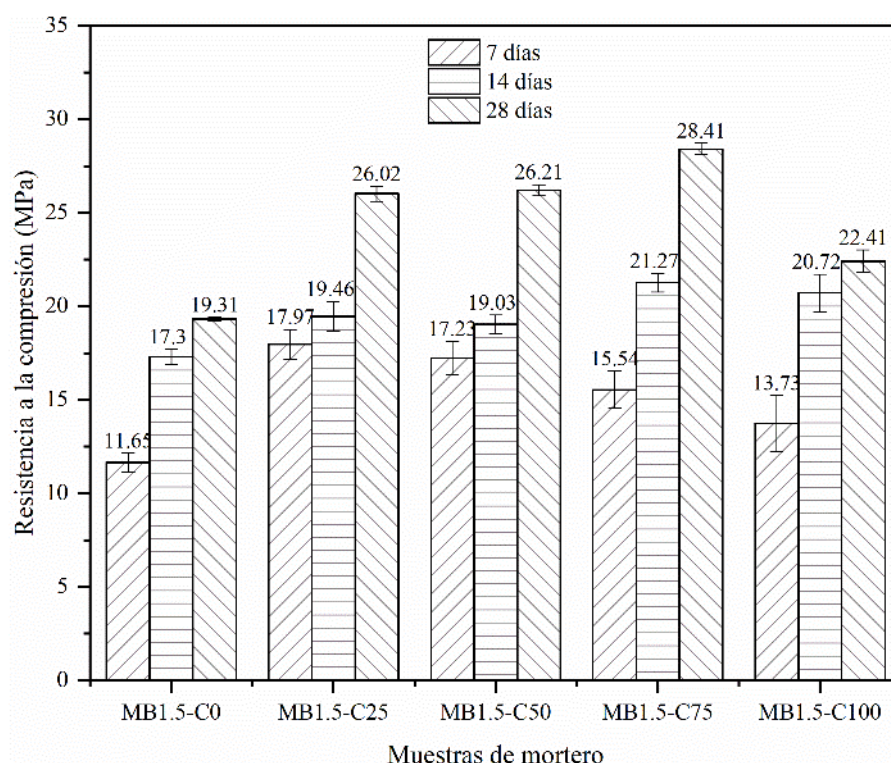


Figura 27. Resistencia a la compresión de morteros con 1.5% de adición de BHPT y diferentes porcentajes de sustitución de AFR-C a 7, 14 y 28 días de curado.

4.7 Resistencia mecánica a la flexión

La **Figura 28** presenta los resultados de resistencia a la flexión de los morteros sin adición de BHPT, evaluados a 28 días de curado. Se observa un comportamiento similar al de resistencia a la compresión, donde el incremento de AFR-C mejora el desempeño mecánico hasta un límite del 75%. El mortero MB0-C75 alcanzó el valor más alto del grupo (9.66 MPa), con un incremento del 44.8% respecto al mortero de referencia (MB0-C0, con 6.67 MPa). Este aumento puede atribuirse a la morfología irregular y rugosa del AFR-C, que favorece el anclaje mecánico del agregado con la pasta de cemento. Este anclaje físico limita la propagación de microfisuras bajo esfuerzos de flexión [26].

En cambio, el mortero MB0-C100 presentó una ligera disminución en su resistencia (6.44 MPa), incluso por debajo de la muestra de referencia. Este comportamiento sugiere que, en ausencia de un aditivo modificador como el BHPT, el exceso de material cerámico no presenta buenos resultados frente a resistencia a la flexión.

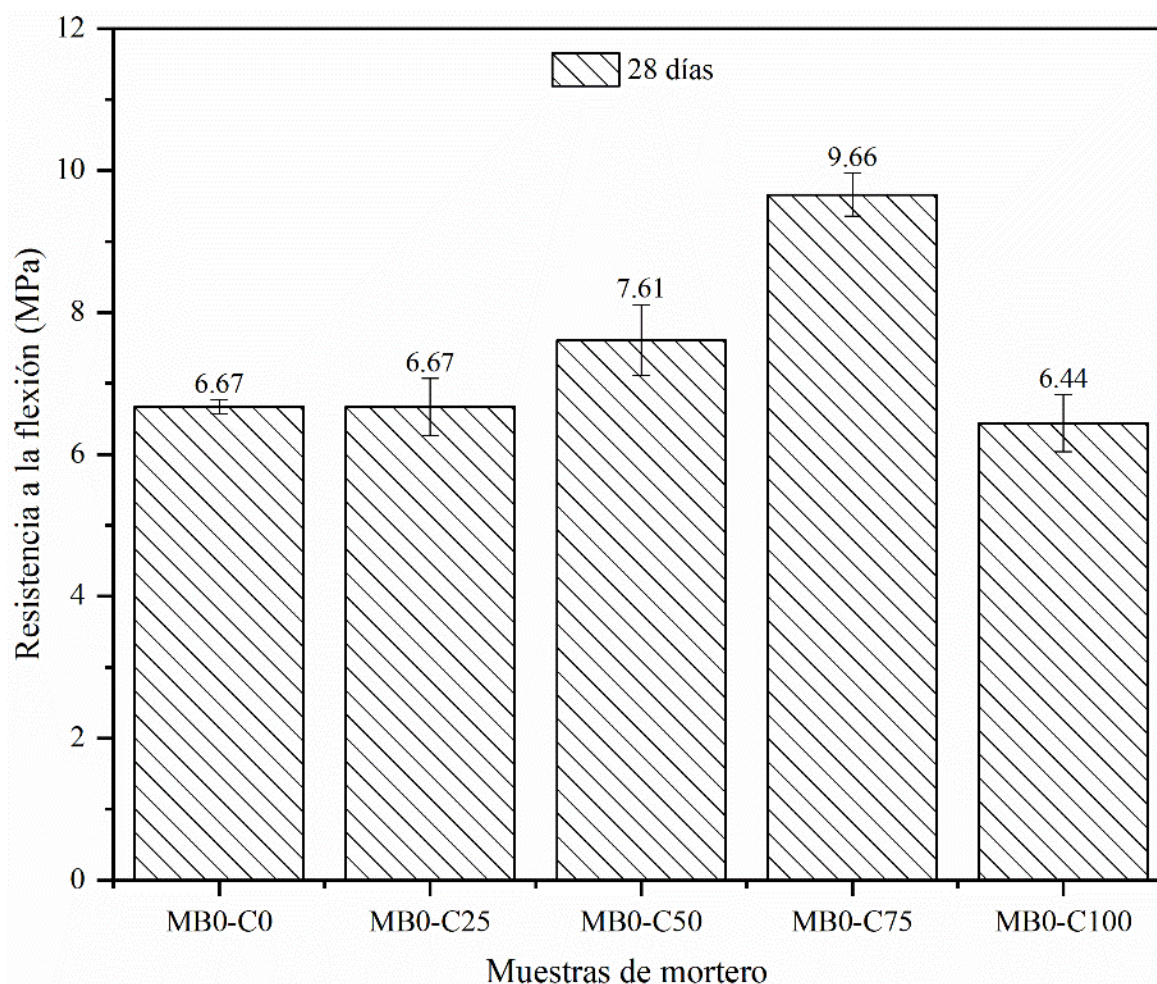


Figura 28. Resistencia a la flexión de morteros con 0% de adición de BHPT y diferentes porcentajes de sustitución de AFR-C a 28 días de curado.

La **Figura 29** muestra los resultados de resistencia a la flexión de los morteros con 0.5% de BHPT a 28 días de curado. Se observa una tendencia creciente conforme aumenta el contenido de AFR-C, a diferencia del comportamiento sin BHPT. Este incremento es progresivo desde MB0.5-C0 (5.29 MPa) hasta MB0.5-C100 (8.28 MPa), siendo este último el de mejor desempeño. Este comportamiento sugiere que la presencia de BHPT favorece la

interacción entre la pasta de cemento y el AFR-C, lo que permite aprovechar de manera más eficiente la rugosidad y morfología irregular del AFR-C, lo cual mejora el anclaje mecánico y limita la propagación de microfisuras bajo esfuerzos de flexión [26,173]. Asimismo, el aumento continuo de la resistencia indica que el BHPT contribuye a mitigar efectos negativos asociados a altos contenidos de AFR-C, como la mayor porosidad y absorción de agua, promoviendo una matriz más densa incluso al 100% de sustitución [169,174].

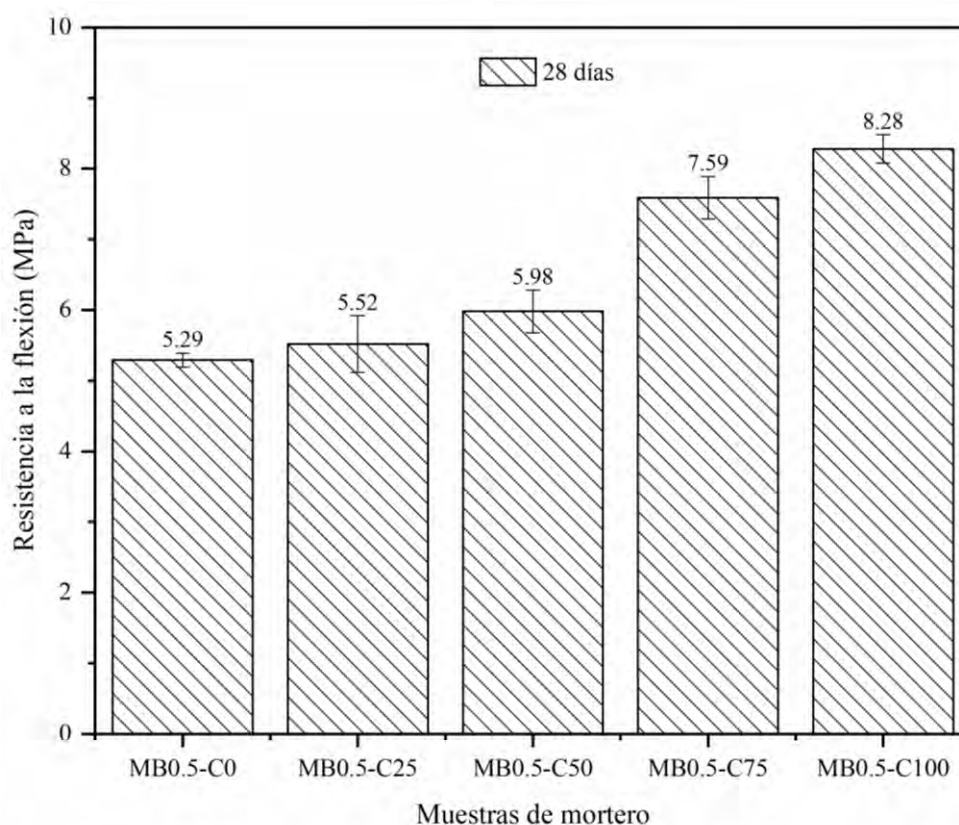


Figura 29. Resistencia a la flexión de morteros con 0.5% de adición de BHPT y diferentes porcentajes de sustitución de AFR-C a 28 días de curado.

La **Figura 30** presenta la resistencia a flexión de los morteros con 1.0% de BHPT a 28 días de curado. En concordancia con la tendencia observada para 0.5% de BHPT, el incremento de AFR-C mantiene un efecto positivo; sin embargo, en este caso el comportamiento es más estable, con variaciones menos pronunciadas entre las mezclas. A diferencia del sistema con menor contenido de BHPT, donde el aumento fue progresivo, aquí se observa una respuesta más uniforme, lo que indica que el sistema alcanza un nivel en el que la interacción entre la matriz y el AFR-C está optimizada. Este efecto puede asociarse a una mejora en la ZTI, favoreciendo una distribución más uniforme de esfuerzos y reduciendo el efecto de cambios en el porcentaje de sustitución [26,171]. En este sentido, el comportamiento observado indica que incrementos adicionales en el contenido de AFR-C no generan variaciones significativas en la resistencia, lo que evidencia una condición de estabilidad mecánica del sistema con 1.0% de BHPT, en comparación con los casos anteriores.

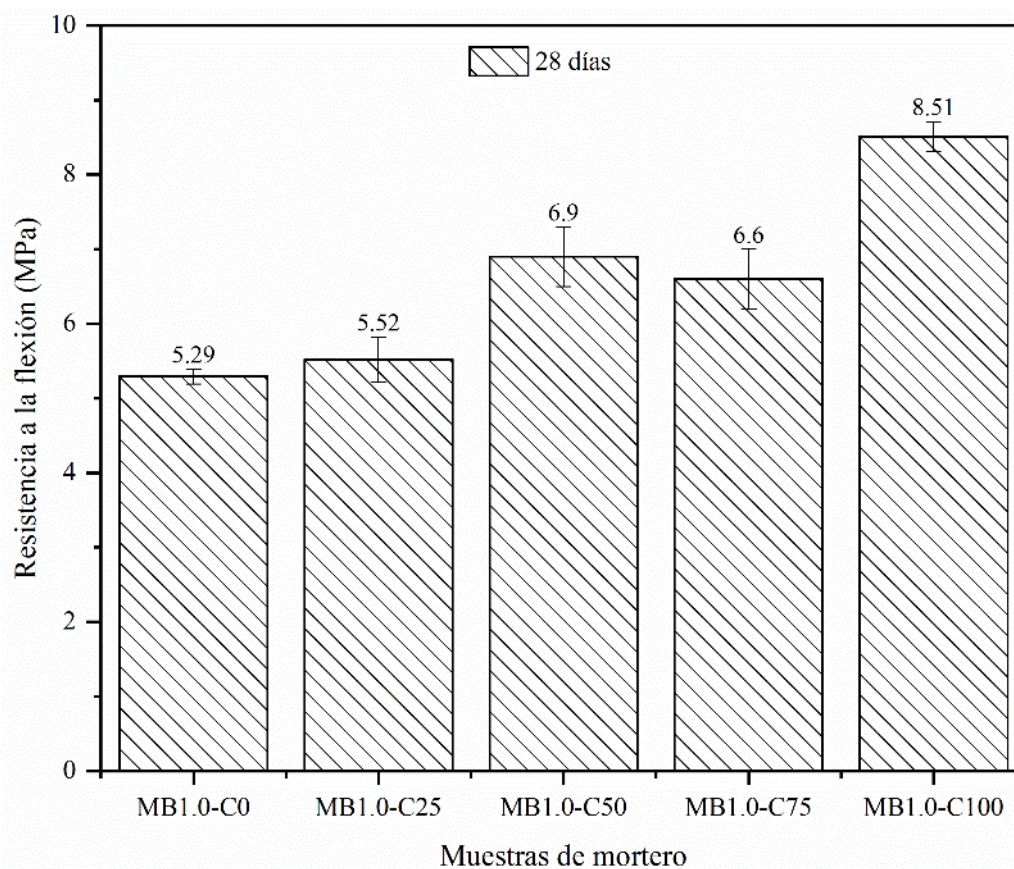


Figura 30. Resistencia a la flexión de morteros con 1.0% de adición de BHPT y diferentes porcentajes de sustitución de AFR- a 28 días de curado.

La **Figura 31** muestra la resistencia a flexión de los morteros modificados con 1.5% de BHPT a 28 días de curado. A diferencia de los morteros con menor contenido de BHPT, en este caso no se observa una tendencia creciente clara con el incremento de AFR-C, sino un comportamiento más uniforme, con variaciones poco significativas entre las mezclas. El valor máximo se presenta en MB1.5-C75 (6.15 MPa), aunque sin una diferencia marcada respecto al resto. Este comportamiento sugiere que el sistema ha alcanzado un punto de saturación, donde el incremento adicional de BHPT no se traduce en mejoras proporcionales en la resistencia. En este sentido, aunque se mantiene una adecuada interacción entre la matriz y el AFR-C, el exceso de BHPT podría estar limitando la eficiencia del sistema, posiblemente al modificar la microestructura o generar zonas menos densificadas [171,174]. En comparación con los contenidos de 0.5% y 1.0%, donde el efecto del BHPT favorecía el aprovechamiento del AFR-C, en este caso se muestra que el sistema presenta una respuesta menos dependiente del porcentaje de sustitución, lo que indica que el beneficio del BHPT en las mezclas alcanza un límite a partir del cual no se obtienen mejoras adicionales en la resistencia a la flexión.

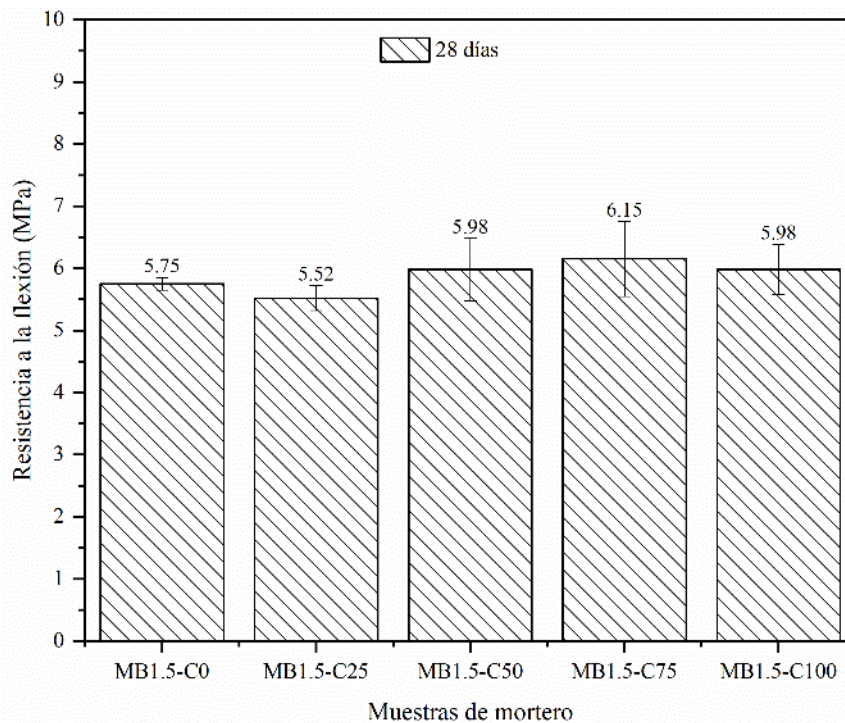


Figura 31. Resistencia a la flexión de morteros con 1.5% de adición de BHPT y diferentes porcentajes de sustitución de AFR- a 28 días de curado.

4.8 Porosidad, densidad y absorción de los morteros

La **Tabla 7** presenta los resultados del análisis físico de los morteros, el cual indica que la incorporación de AFR-C y BHPT altera la estructura interna de la matriz de forma no lineal. En los morteros sin BHPT (MB0), el incremento de AFR-C hasta el 100% elevó la porosidad al 24.26% y la absorción al 16.09%, lo que confirma la naturaleza altamente porosa del AFR-C en comparación con el AFN [162].

Por un lado, con la adición de 0.5% y 1.0% de BHPT, se observa un fenómeno particular: a pesar de que la porosidad tiende a ser mayor que en la serie de referencia (MB0), la densidad se mantiene en niveles competitivos (alcanzando hasta 2.28 g/cm³). Esto se ve reflejado en la resistencia a la compresión, donde los morteros con 50, 75 y 100% de AFR-C presentaron resultados mayores que en la serie de referencia. Lo que sugiere que el BHPT induce la formación de microporos ocluidos que, si bien aumentan el porcentaje de vacíos, no necesariamente forman una red capilar conectada, lo que se refleja en valores de absorción controlados [175].

Por otro lado, se encuentran los morteros MB0.5-C100 y MB1.0-C100, los cuales presentan resultados inversos que los morteros restantes de los grupos con 0.5 y 1.0% de BHPT. Estos morteros muestran valores de porosidad y absorción significativamente menores que su contraparte sin aditivo (MB0-C100), además de una densidad elevada, 2.18 y 2.24 g/cm³, respectivamente. Esta combinación indica que, en esas dosificaciones específicas, el BHPT puede estar actuando como una película densa y uniforme que rodea los granos de cemento y sus productos de hidratación, refinando la estructura de poros [176], lo que lleva a mejorar los microporos o microfisuras en el sistema y densificando la ZTI [177–179].

Finalmente, en la serie con 1.5% de BHPT, los resultados físicos explican el desplazamiento del punto óptimo hacia el mortero MB1.5-C75. Esta muestra logró un equilibrio entre una densidad elevada (2.26 g/cm³) y una porosidad controlada (24.73%) en comparación con el resto de su grupo, lo que justifica que haya alcanzado la máxima resistencia mecánica de esta serie (28.41 MPa). Por el contrario, al llegar al nivel de reemplazo total en el mortero MB1.5-C100, se registró la porosidad más alta de todo el estudio (26.79%) y la mayor absorción (16.55%). Este comportamiento físico confirma que el exceso de BHPT, sumado a la

saturación de AFR.C, genera una estructura excesivamente abierta que debilita la cohesión interna y el desempeño estructural [162].

Tabla 7. Resultados de las pruebas de porosidad, densidad y absorción de los morteros modificados.

Mortero	Porosidad (%)	Densidad (g/cm³)	Absorción (%)
MB0-C0	20.63	1.85	14.05
MB0-C25	18.84	2.09	11.09
MB0-C50	22.34	2.09	12.66
MB0-C75	20.93	2.25	12.79
MB0-C100	24.26	1.99	16.09
MB0.5-C0	21.82	2.22	12.58
MB0.5-C25	21.31	2.06	13.17
MB0.5-C50	23.87	2.28	13.78
MB0.5-C75	25.59	2.26	15.24
MB0.5-C100	22.82	2.18	13.58
MB1.0-C0	21.26	2.07	13.04
MB1.0-C25	21.67	2.07	13.37
MB1.0-C50	22.54	2.27	12.81
MB1.0-C75	24.99	2.28	14.61
MB1.0-C100	22.87	2.24	13.26
MB1.5-C0	19.78	1.98	12.43
MB1.5-C25	24.03	2.33	13.60
MB1.5-C50	22.71	2.12	13.83
MB1.5-C75	24.73	2.26	14.53
MB1.5-C100	26.79	2.21	16.55

4.9 Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)

En la **Figura 32** se presentan las micrografías obtenidas mediante SEM para el mortero de referencia (MB0-C0) tras 28 días de curado. A bajos aumentos (30x), se observa una distribución heterogénea de los AFN embebidos en una matriz cementante consolidada. Al incrementar la resolución (500x y 1000x), se presenta una matriz dominada por gel C-S-H con morfología amorfa, compacta y una distribución relativamente homogénea. Además, se identificaron cristales de portlandita (CH) en forma de placas hexagonales interdispersos en esta matriz, así como la presencia de etringita (AFt) en forma de agujas [96]. La porosidad se caracteriza por ser de tipo capilar y se encuentra distribuida de forma aislada dentro de la pasta. También se observa una ZTI característica de los agregados silíceos naturales, en la cual se aprecia una continuidad aceptable entre el agregado y la pasta, indicando una adecuada adherencia pasta-agregado [180].

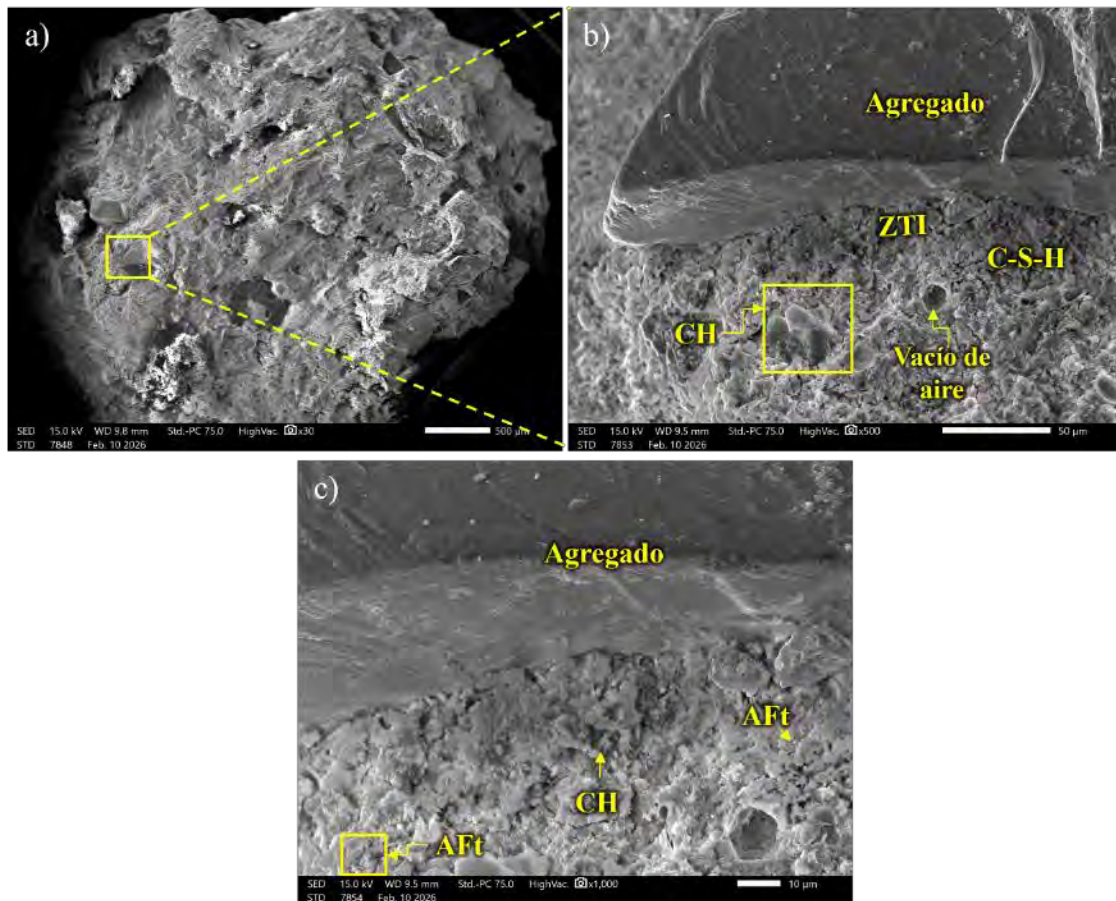


Figura 32. Micrografías de SEM del mortero MB0-C0, a) 30x aumentos, b) 500x aumentos y c) 1000x aumentos.

En la **Figura 33** se observan las micrografías del mortero MB0-C25, con 25% de reemplazo de AFR-C. A 100x y 500x, la matriz cementante se observa consolidada, compuesta en su mayoría por fases densificadas de gel C-S-H, lo cual confirma un curado óptimo a los 28 días [1]. A 500x y 1000x, se presenta una ZTI con buena adherencia mecánica, sin evidencia de brechas o desprendimientos en la zona de contacto entre la pasta y el agregado, lo cual refleja una ZTI de buena calidad [181]. La comparación cualitativa en el mortero de referencia (MB0-C0) indica un refinamiento de la estructura de poros en los contornos de la ZTI en la muestra MB0-C25 [182].

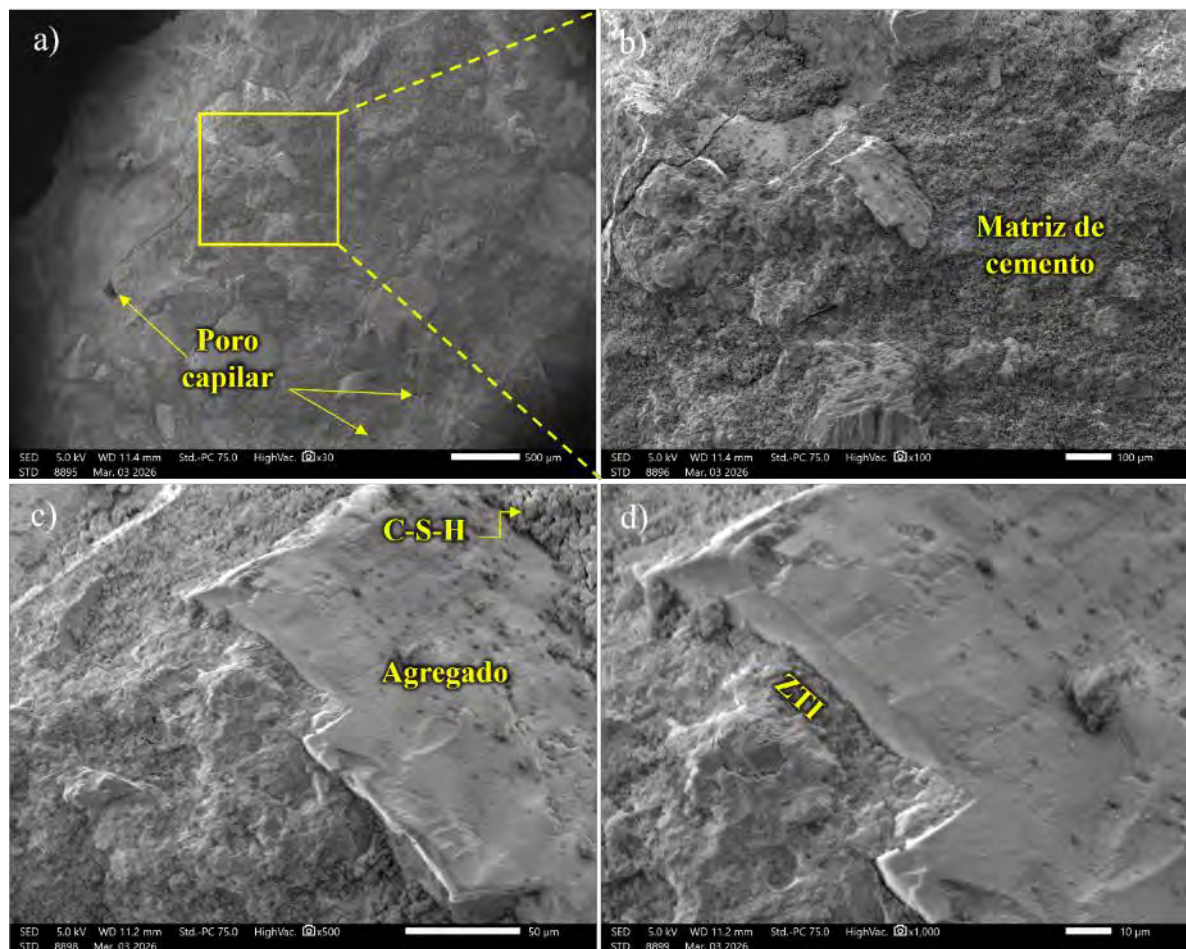


Figura 33. Micrografías de SEM del mortero MB0-C25: a) 30x aumentos, b) 100x aumentos, c) 500x aumentos y d) 1000x aumentos.

En la **Figura 34** se observan las micrografías del mortero MB0-C50 por SEM, en el cual el incremento al 50% de AFR-C no degradó la calidad de la ZTI. Por el contrario, las micrografías a altos aumentos (5,000x y 10,000x) revelan una ZTI notablemente densa. La fase de gel C-S-H exhibe una morfología granular y compacta, integrándose de manera continua con la superficie del agregado sin evidencias de un incremento de la porosidad en la ZTI [183]. La continuidad observada a 10,000x sugiere que el agregado favorece la formación de productos de hidratación, ocurriendo un fenómeno de “empaquetamiento” de la matriz contra el agregado [100]; este es un factor determinante para mantener un buen desempeño mecánico del mortero, a pesar del alto porcentaje de sustitución. También se logran observar microfisuras en la matriz cementante a un aumento de 5,000x, las cuales se pueden atribuir a los esfuerzos internos por retracción; sin embargo, la trayectoria de estas fisuras demuestra una adherencia efectiva en la ZTI, ya que no se observa un desprendimiento del agregado [1].

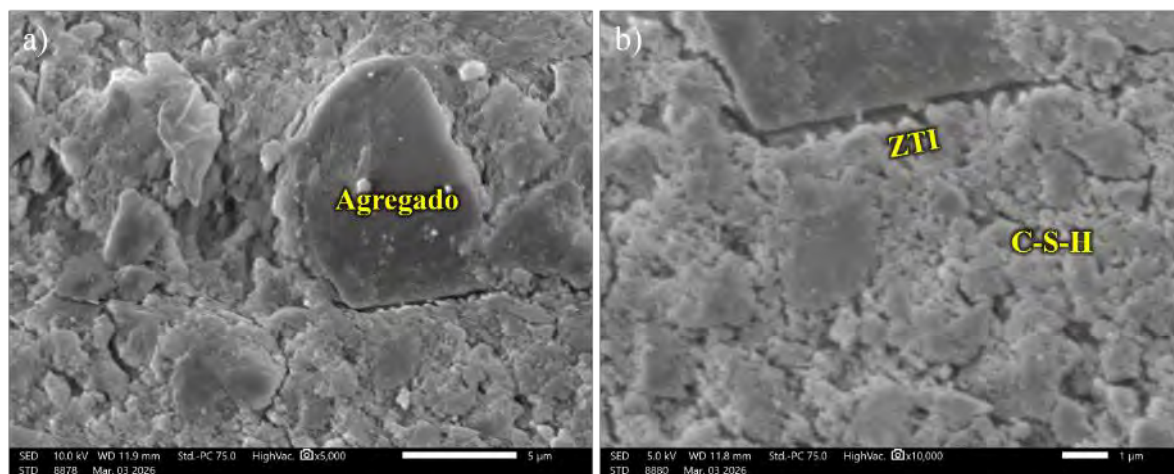


Figura 34. Micrografía de SEM del mortero MB0-C50: a) 5,000x aumentos y b) 10,000x aumentos.

En la **Figura 35** se presentan las micrografías del mortero MB0-C75. Debido a la naturaleza aleatoria del muestreo para SEM, la sección analizada en la figura muestra una morfología con abundantes productos de hidratación, donde distinguir los agregados resulta un poco limitado. No obstante, el análisis mediante Espectroscopía de Energía Dispersiva (EDS) proporciona evidencia cuantitativa fundamental sobre la constitución de esta matriz. El espectro revela una concentración de Ca(19.18%) y Si (11.94%), lo que resulta en una

relación Ca/Si cercana a 1.6. Este valor es de gran relevancia técnica, ya que se sitúa en el rango óptimo para geles de C-S-H de alta densidad [97]. Esto indica que, a pesar de la sustitución del 75% de AFN por AFR-C, el proceso de hidratación del cemento no se vio afectado, logrando la formación de las fases que aportan resistencia mecánica al mortero [184]. Además, se tiene la presencia de Al (3.72%) y trazas de K (0.59%); dado que estos elementos no son constituyentes primarios de la pasta de cemento pura en esas proporciones, su detección confirma la integración de las fases de aluminosilicatos del AFR-C en la matriz analizada. De acuerdo con la literatura, el aluminio proveniente de las losetas cerámicas recicladas puede reaccionar con los productos de hidratación del cemento, mejorando la densidad de la matriz a través de reacciones puzolánicas secundarias [185].

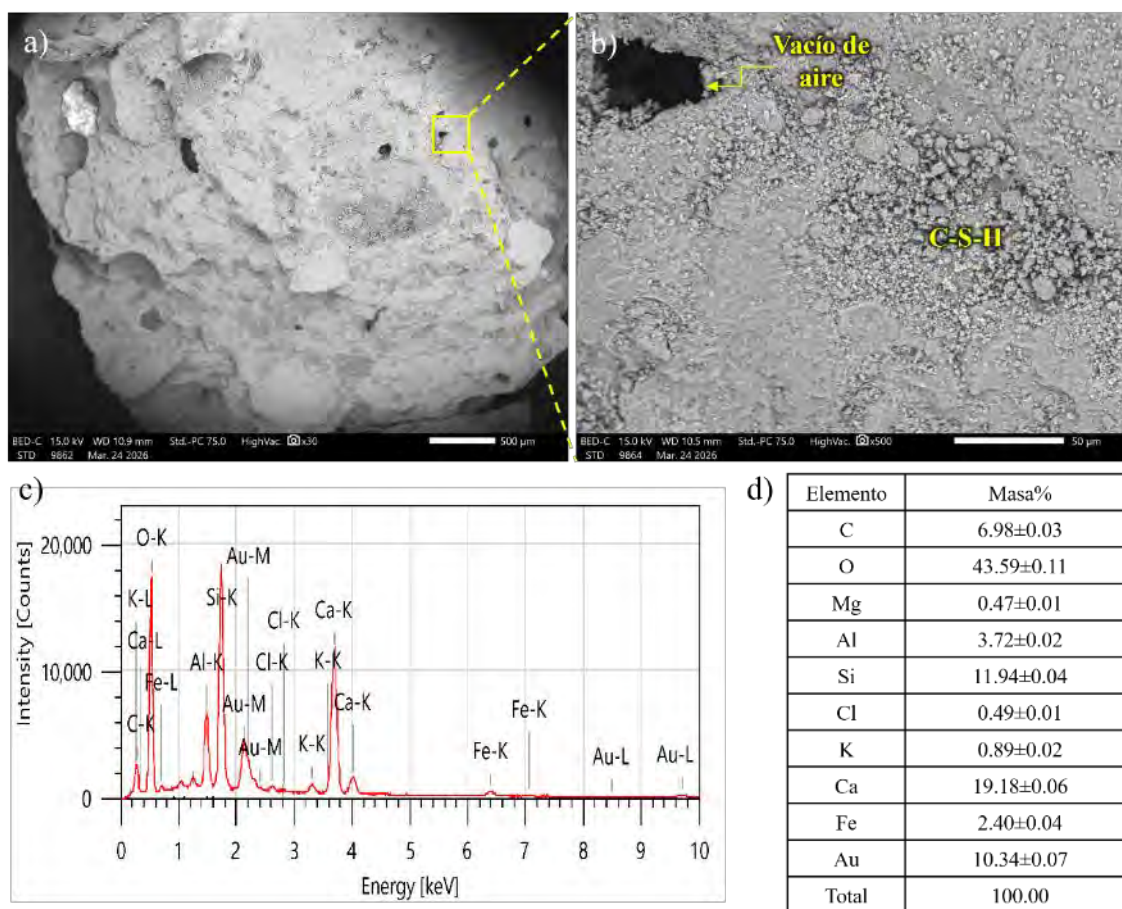


Figura 35. Micrografías de SEM de la muestra MB0-C75 y análisis elemental por EDS: a) 30x aumentos, b) 500x aumentos, c) espectro elemental y d) tabla con porcentajes de masa de los elementos de la muestra.

En la **Figura 36** se muestran las micrografías correspondientes al mortero MB0-C100. Estas presentan una microestructura altamente heterogénea, caracterizada por la presencia predominante de AFR-C y una matriz de gel C-S-H. Se identificaron vacíos de aire de gran tamaño, así como una elevada cantidad de poros capilares distribuidos en la matriz y en la ZTI, la cual se presenta más porosa y discontinua en comparación con mezclas con menor contenido de AFR-C [183]. Asimismo, se observó la presencia de estructuras con forma de aguja, asociadas a la formación de etringita (AFt), localizada de manera puntual [186]. En conjunto, estas características indican una microestructura menos densa y más susceptible a la propagación de grietas, atribuida al uso total de AFR-C [1].

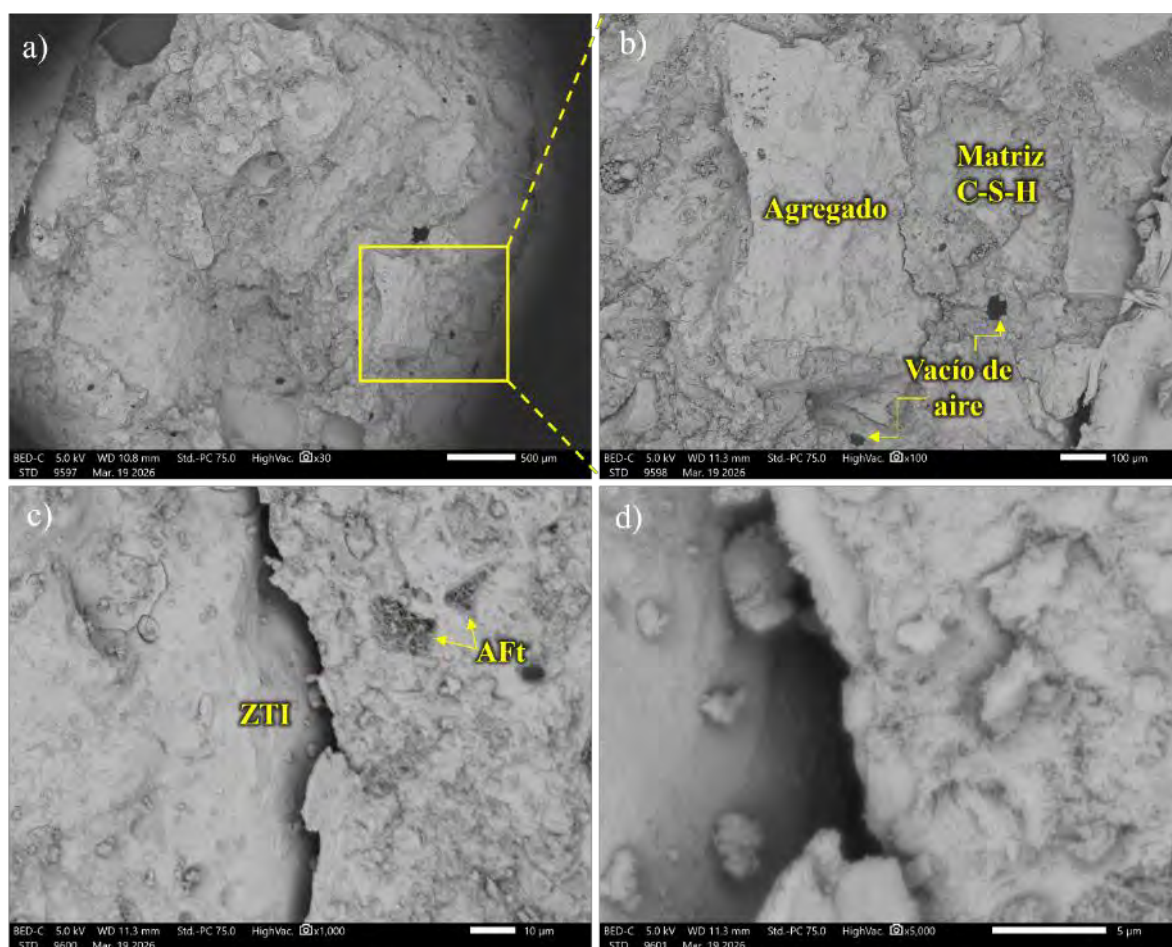


Figura 36. Micrografías de SEM del mortero MB0-C100: a) 30x aumentos, b) 100x aumentos, c) 1,000x aumentos y d) 5,000x aumentos.

En la **Figura 37** se muestran las micrografías de SEM del mortero MB0.5-C0, las cuales revelan una matriz cementante con un desarrollo morfológico distintivo tras la incorporación de un 0.5% de BHPT [176]. A 5,000x (Figura 21c), se observa una ZTI estable y continua [100]. Aunque el AFN presenta una superficie lisa y poco porosa, los productos de hidratación logran una cobertura efectiva, sugiriendo que el BHPT no interfiere negativamente en la adherencia interfacial [1].

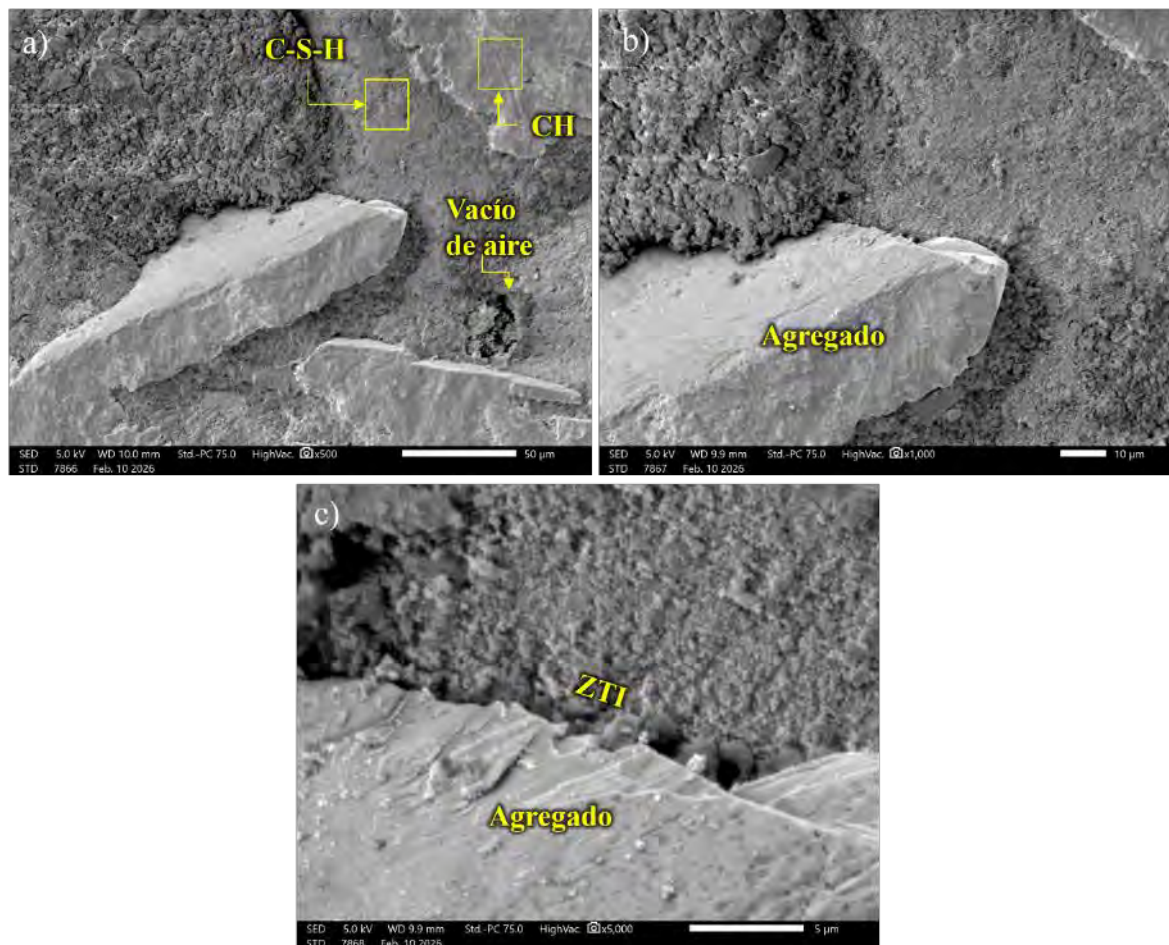


Figura 37. Micrografías del mortero MB0.5-C0: a) 500x aumentos, b) 1,000x aumentos y c) 5,000x aumentos.

El análisis por EDS del mortero evidenció la presencia de distintas fases de hidratación características de sistemas cementantes. En la **Figura 38** se presentan los espectros y porcentajes de masa de los elementos que componen a dichas fases de hidratación, las cuales son CH, ya que se identificó una alta concentración de Ca con ausencia significativa de Si, a

lo que se le atribuyó esta fase (CH) [100]. Por otro lado, se encontró la coexistencia de Ca, Si y O, con una relación Ca/Si de 1.95, típica de un gel de C-S-H en morteros convencionales, siendo este relativamente denso y bien estructurado [97]. En conjunto, estos resultados evidencian una adecuada formación de productos de hidratación en la matriz cementante.

La distribución de fases identificadas mediante EDS sugiere que la adición de 0.5% de BHPT no afecta la hidratación del cemento, sino que favorece la formación de gel de C-S-H con relaciones Ca/Si dentro de rangos asociados a estructuras más densas y estables.

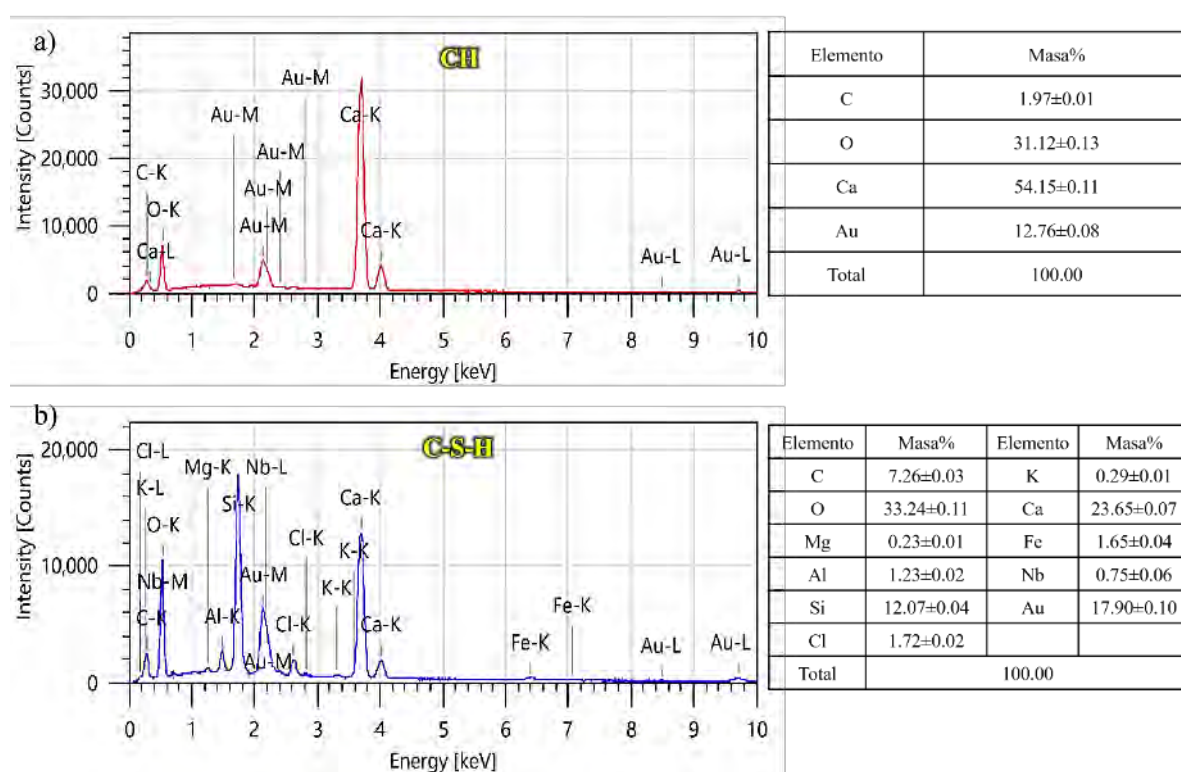


Figura 38. Análisis EDS del mortero MB0.5-C0: a) espectro elemental y tabla con porcentajes de masa de los elementos de CH, b) espectro elemental y tabla con porcentajes de masa de los elementos de C-S-H.

La **Figura 39** muestra las micrografías del mortero MB1.0-C0, donde a 5,000x, el mortero presenta una modificación significativa en su morfología en comparación con mezclas de menor adición de BHPT. Se observa una abundante formación de estructuras de agujas finas alargadas de etringita (AFt), distribuidas de manera generalizada en la matriz cementante, la cual se presenta como un entramado de cristales que rellenan parcialmente la porosidad

capilar y se encuentran en interacción con el gel C-S-H. Esta disposición sugiere una microestructura más densificada a nivel local.

En cuanto a la ZTI, en la micrografía obtenida a 500x se observa una ZTI continua entre el AFN y la pasta cementante, sin evidencia de separaciones perimetrales ni presencia de microfisuras. Este comportamiento indica que la adición de 1.0% de BHPT no afecta negativamente la adherencia pasta-agregado.

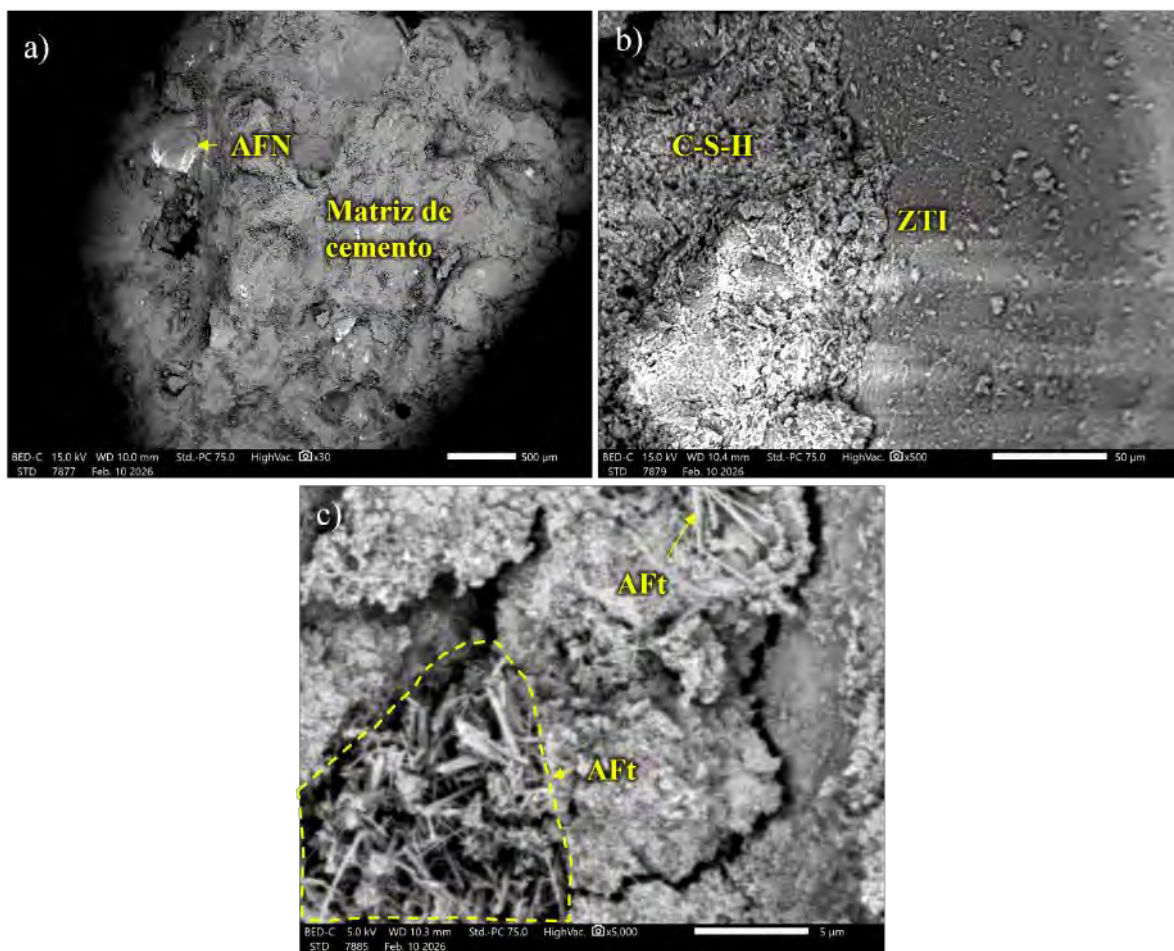


Figura 39. Micrografías del mortero MB1.0-C0: a) 30x aumentos, b) 500x aumentos y c) 5,000x aumentos.

En la **Figura 40** se muestran las micrografías del mortero MB1.0-C100 (a 30x, 100x, 500x y 1,000x), se observa una integración total del AFR-C con la matriz de cemento (C-S-H), facilitada por la adición de 1.0% de BHPT, observándose una transición gradual donde los productos de hidratación han penetrado en la porosidad intrínseca del AFR-C [183]. Este fenómeno de anclaje mecánico, potenciado por la fase polimérica del BHPT, crea una microestructura densa y sin discontinuidades [176]. Esta morfología monolítica es la base que justifica que esta dosificación haya alcanzado la máxima resistencia a compresión del grupo de mezclas con 1.0% de adición de BHPT.

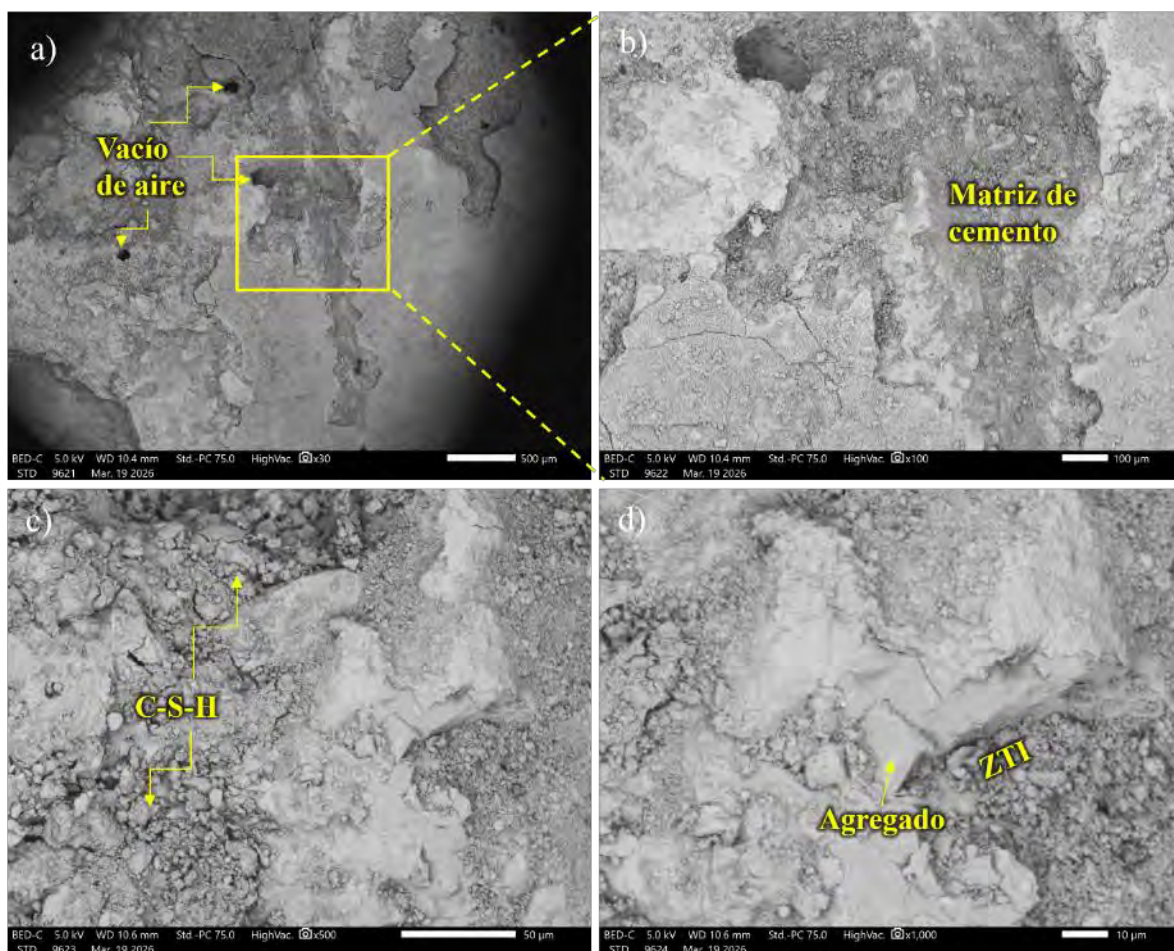


Figura 40. Micrografías del mortero MB1.0-C100: a) 30x aumentos, b) 100x aumentos, c) 500x aumentos y d) 1,000x aumentos.

La **Figura 41** presenta las micrografías que corresponden al mortero MB1.5-C75, las cuales muestran una matriz cementante relativamente continua, sin evidencia clara de discontinuidades en ZTI entre el AFR-C y la pasta. A 500x, se observa una transición gradual entre ambas fases, donde la pasta de cemento logra integrarse adecuadamente con la superficie del agregado [183]. Este comportamiento sugiere que la adición de BHPT favorece una mejor interacción pasta-agregado, contribuyendo al relleno parcial de la porosidad superficial del material reciclado [176]. Como resultado, se genera una ZTI más estable que permite una transferencia de esfuerzos más eficiente, o que se refleja en el incremento de la resistencia mecánica respecto a otras mezclas del mismo grupo (1.5% de BHPT).

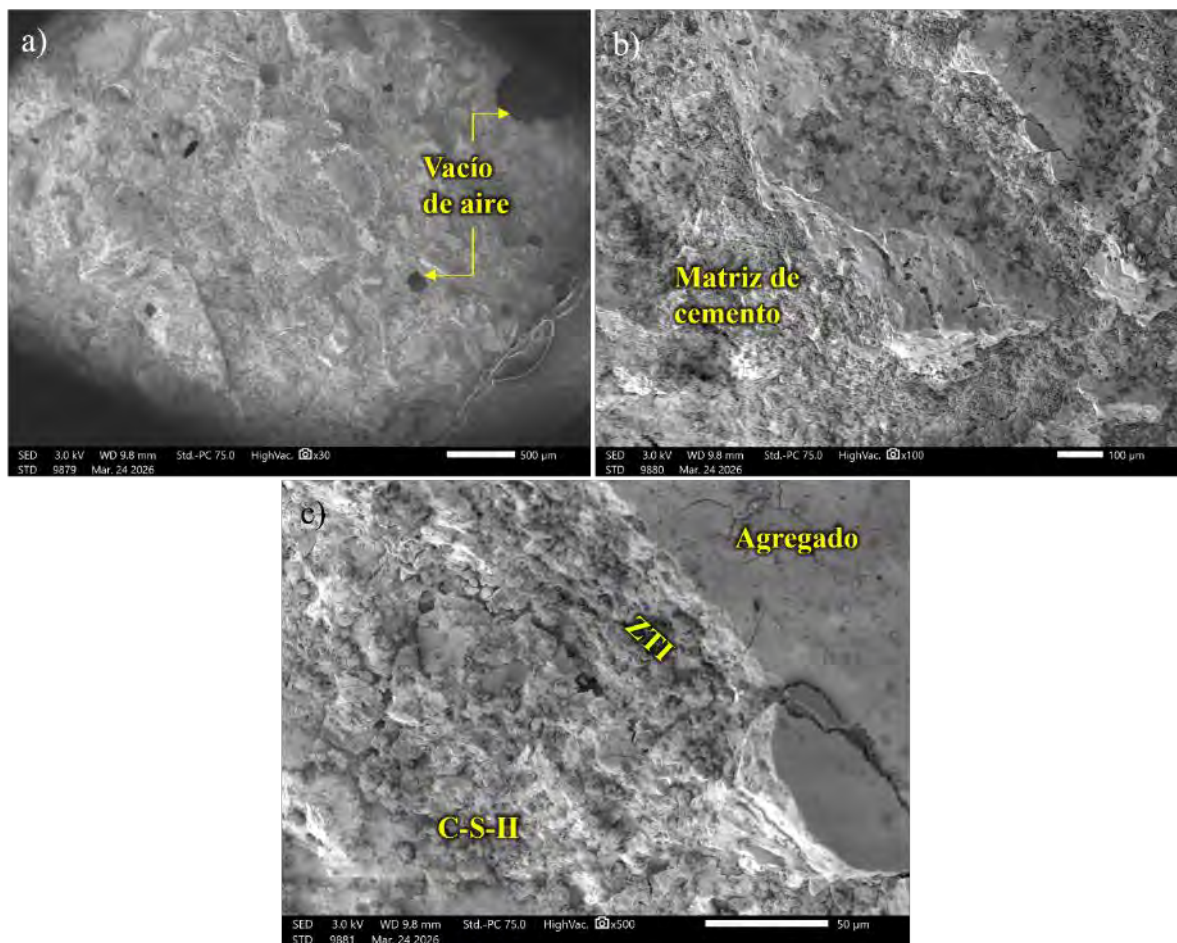


Figura 41. Micrografías del mortero MB1.5-C75: a) 30x aumentos, b) 100x aumentos y c) 500x aumentos.

4.10 Difracción de Rayos X (DRX)

El estudio de DRX se realizó para analizar los productos de hidratación que se forman en las mezclas de mortero, los que se mencionan en este apartado corresponden a calcita, cuarzo, portlandita y gel C-S-H, este último presenta una estructura más bien amorfa, aun así, es de interés localizar esta fase en las muestras de mortero. En la **Figura 42** se muestra el difractograma de rayos X para la serie de los morteros con AFN y BHPT (MB0-C0, MB0.5-C0, MB1.0-C0 y MB1.5-C0) a 28 días de hidratación. Sus compuestos: portlandita [$\text{Ca}(\text{OH})_2$], calcita (CaCO_3), cuarzo (SiO_2) y gel C-S-H, presentan su pico de difracción más intenso en 2θ a 54.6° , 29.3° , 26.5° y 48.3° , respectivamente [58,65,67,69,180,187–190].

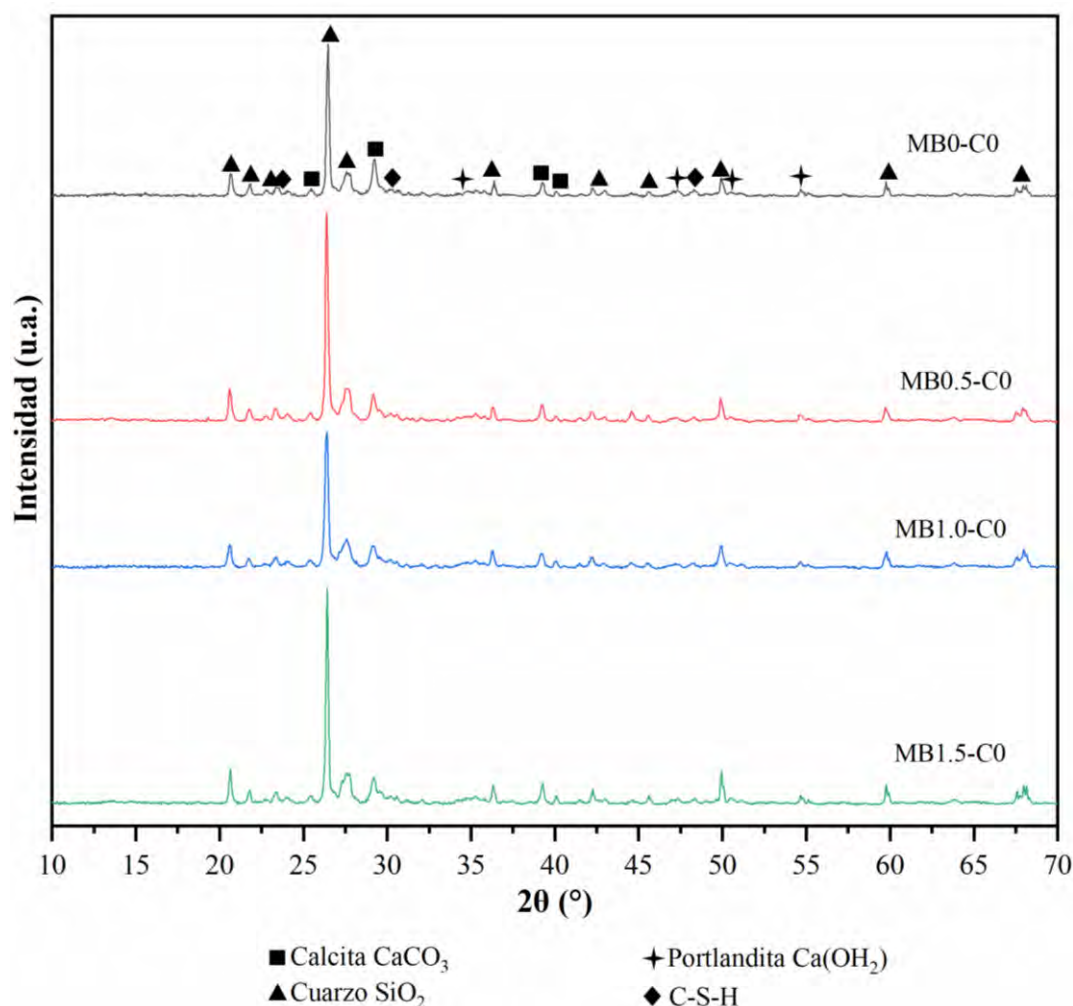


Figura 42. Difractograma de rayos X de los morteros MB0-C0, MB0.5-C0, MB1.0-C0 y MB1.5-C0 a 28 días de hidratación.

En la **Figura 43** se presenta una ampliación de una señal asociada a la portlandita [$\text{Ca}(\text{OH})_2$] (PDF 04-0733) alrededor de 54.6° , en esta zona se observa más definida en comparación con otras regiones del difractograma, en ella se identifican variaciones en la intensidad del pico entre las diferentes mezclas, destacando un incremento en aquellas con mayor contenido de BHPT (MB1.5-C0) [58,65,67,69,180,187–190].

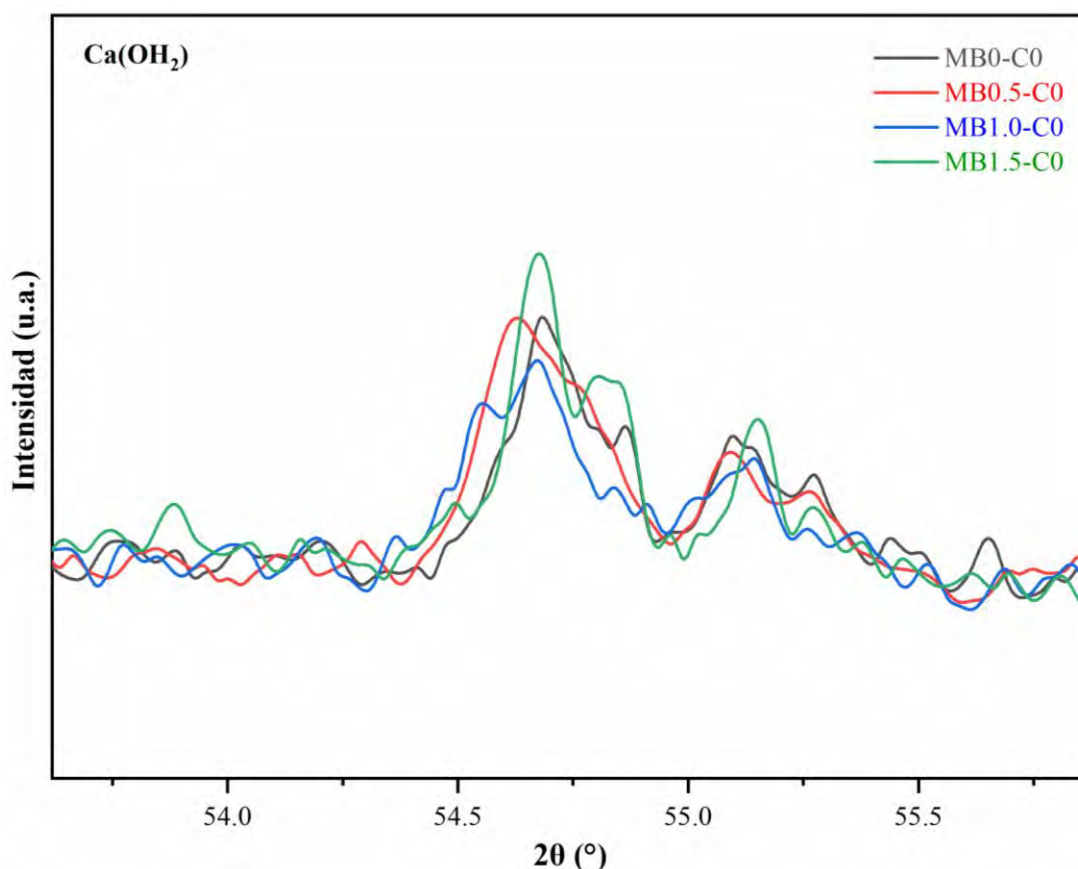


Figura 43. Ampliación del pico más intenso de la portlandita, $2\theta = 54.6^\circ$.

En la **Figura 44** se presenta la ampliación del pico más intenso de la calcita (CaCO_3) (PDF 05-0586) en 29.3° . Se observa una disminución progresiva en la intensidad de este pico, lo que indica una menor formación de carbonato de calcio en el sistema. Asimismo, como se observa en la Figura 27, se identifica un incremento en los niveles de portlandita conforme aumenta el porcentaje de adición de BHPT, lo que permite inferir que dicho aditivo está inhibiendo los procesos de carbonatación. Este efecto puede atribuirse tanto a la modificación de la microestructura como a la interacción del BHPT con el Ca^{2+} disponible, lo que limita

la formación de CaCO_3 y favorece la permanencia de la portlandita [58,65,67,69,180,187–190].

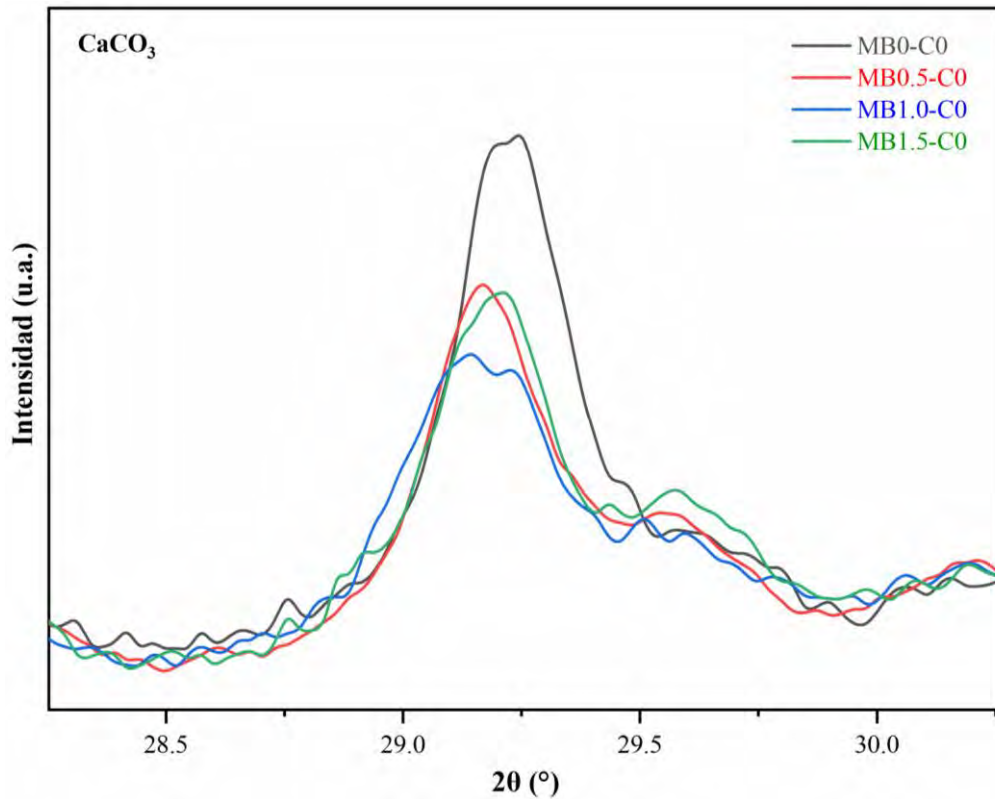


Figura 44. Ampliación del pico más intenso de la calcita, $2\theta = 29.3^\circ$.

En la **Figura 45** se muestra la ampliación del pico característico del cuarzo (SiO_2) (PDF 46-1045) en 26.5° . Se observa las muestras con adición de BHPT presentan, en general, un incremento en la intensidad respecto al mortero de referencia (MB0-C0), con excepción de la mezcla con 1.0% de BHPT. Este comportamiento puede atribuirse a que, al disminuir la cantidad de otras fases presentes en los morteros, el cuarzo destaca más en el difractograma, aumentando la intensidad de sus picos [58,65,67,69,180,187–190].

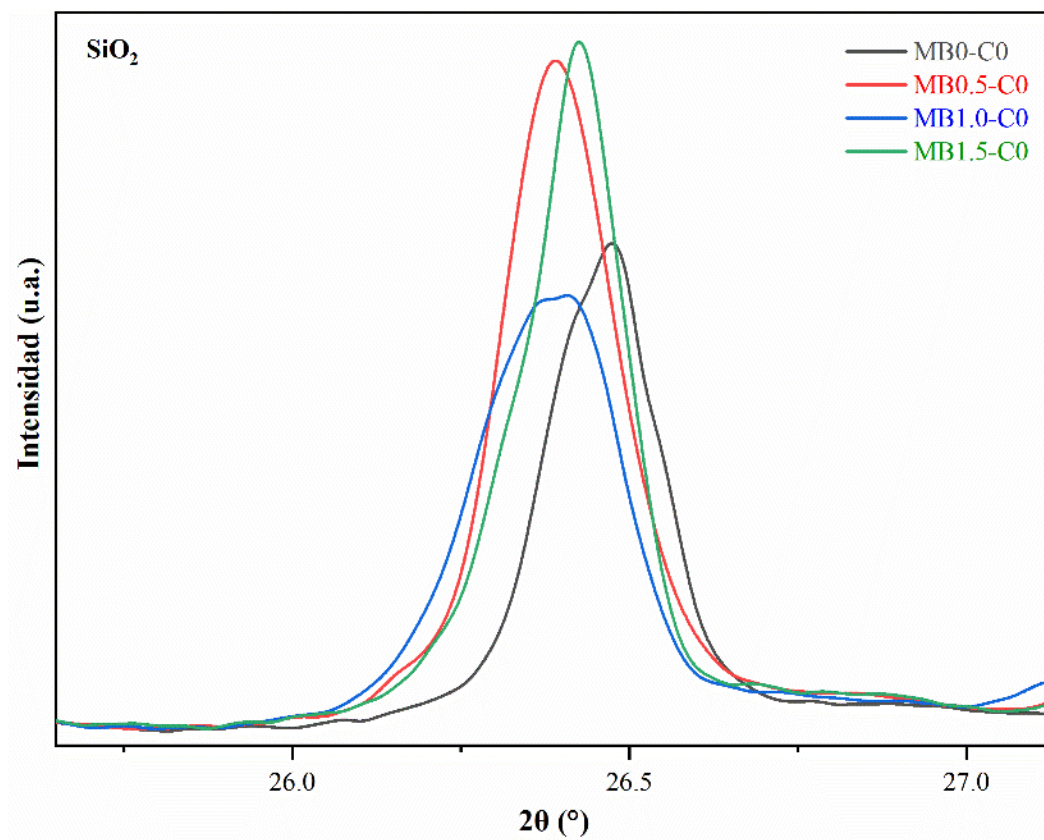


Figura 45. Ampliación del pico más intenso del cuarzo, $2\theta = 26.5^\circ$.

En la **Figura 46** se muestra la ampliación de la señal del gel C-S-H (PDF 12-0475) en 48.3° . Se observa que todos los morteros con adición de BHPT presentan una disminución en la intensidad de la señal respecto al mortero de referencia. Este comportamiento sugiere una menor cantidad o un menor grado de desarrollo de esta fase amorfa en el sistema. Lo anterior puede atribuirse a que la incorporación de BHPT modifica el proceso de hidratación del cemento, interfiriendo en la formación del gel C-S-H [58,65,67,69,180,187–190].

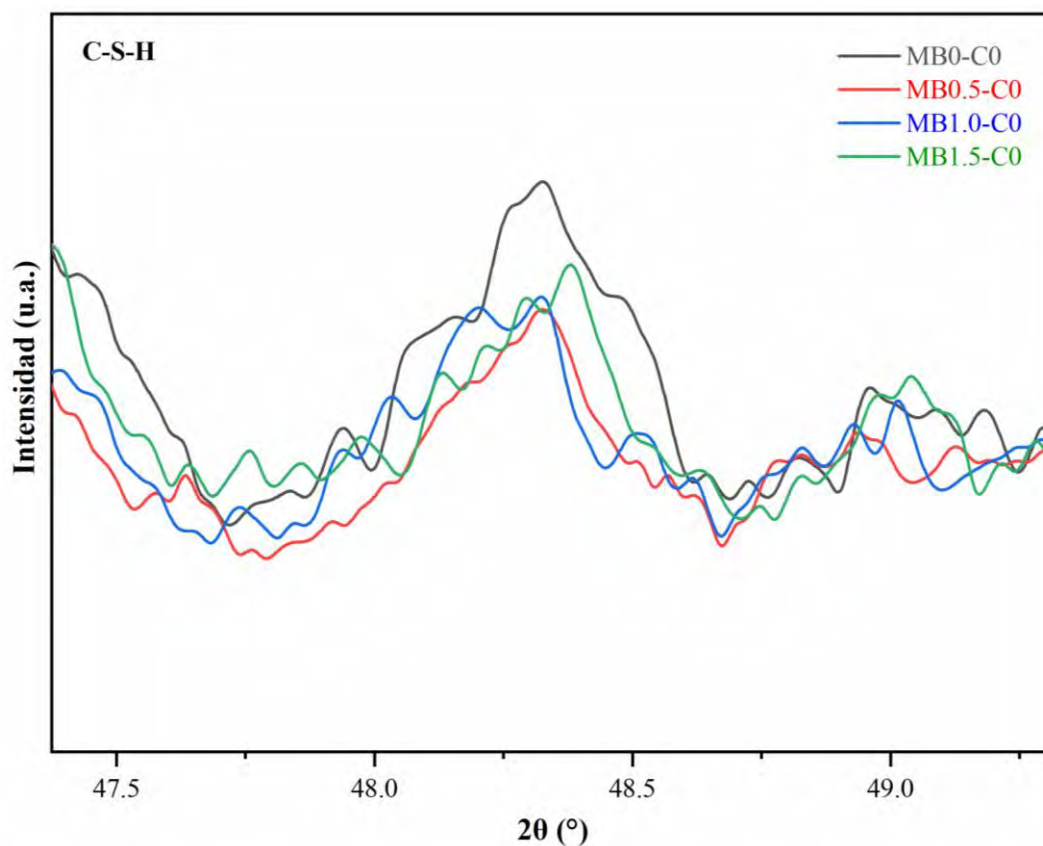


Figura 46. Ampliación de una señal de C-S-H, $2\theta = 48.3^\circ$.

En la **Figura 47** se muestra el difractograma de rayos X para el mortero de referencia (MB0-C0) y para la serie de los morteros con AFR-C sin adición de BHPT (MB0-C25, MB0-C50, MB0-C75 y MB0-C100) a 28 días de hidratación. Sus compuestos: portlandita [$\text{Ca}(\text{OH})_2$], calcita (CaCO_3), cuarzo (SiO_2) y gel C-S-H, presentan su pico de difracción más intenso en 2θ a 54.6° , 29.3° , 26.5° y 30.5° , respectivamente [58,65,67,69,180,187–190].

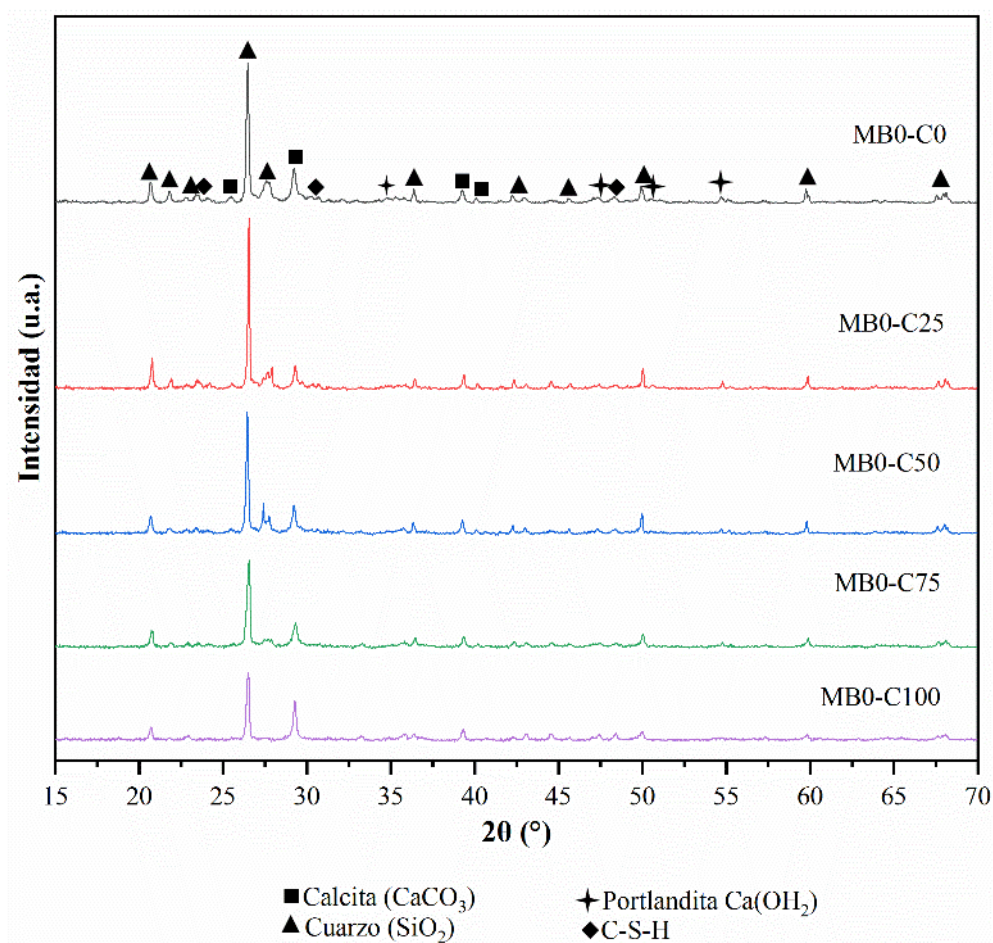


Figura 47. Difractograma de rayos X de los morteros MB0-C0, MB0-C25, MB0-C50, MB0-C75 y MB0-C100 a 28 días de hidratación.

En la **Figura 48** se presenta una ampliación del pico con mayor intensidad de la portlandita $[\text{Ca}(\text{OH}_2)]$ (PDF 04-0733) en 54.6° del mortero de referencia y de los morteros modificados con AFR-C y sin adición de BHPT. Se observa que conforme aumenta el contenido de AFR-C se reduce la intensidad del pico de la portlandita. Siendo el mortero con 100% de sustitución de AFR-C el que presentó una menor intensidad para este producto de hidratación [58,65,67,69,180,187–190].

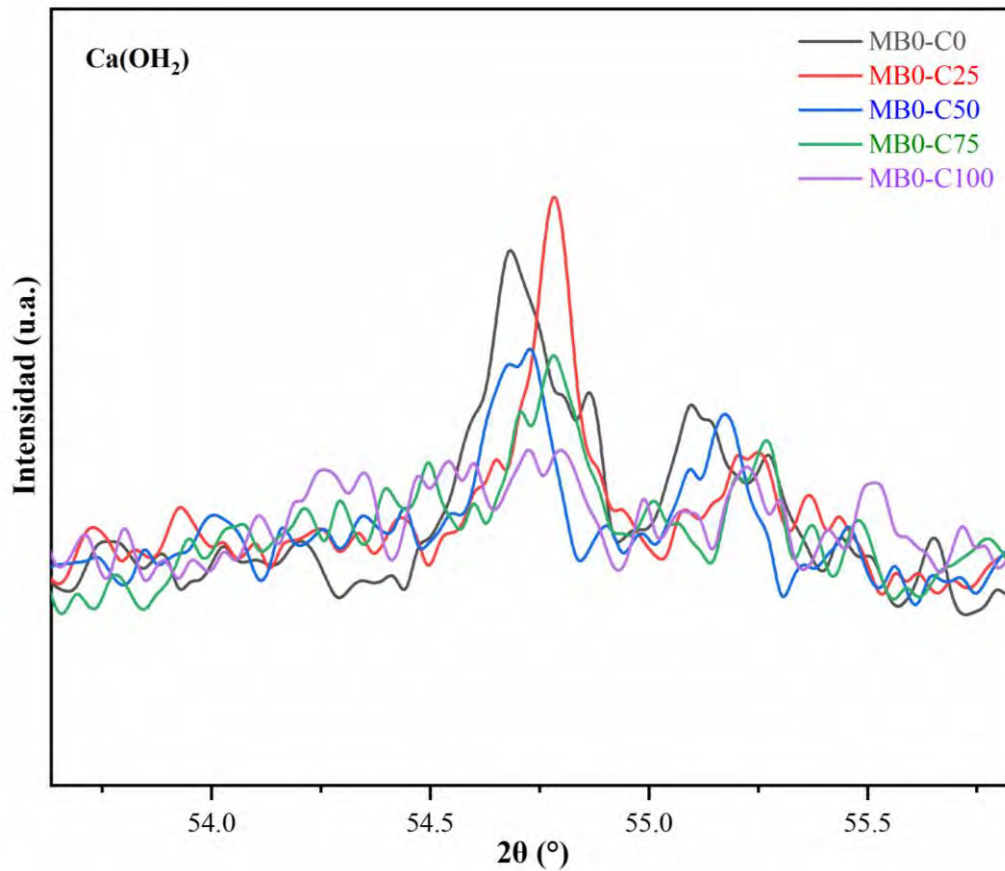


Figura 48. Ampliación de un pico de portlandita $2\theta = 54.6^\circ$.

La **Figura 49** muestra el pico más intenso de la calcita (CaCO_3) (PDF 05-0586), ubicado alrededor de 29.3° , se observa que el mortero MB0-C100 presenta la mayor intensidad. Este comportamiento sugiere una mayor formación de carbonato de calcio en la mezcla con 100% de AFR-C, lo cual puede atribuirse a su mayor porosidad, favoreciendo la difusión de CO_2 y los procesos de carbonatación. Estos resultados son consistentes con el menor desempeño mecánico de este mortero, el cual presentó la menor resistencia a compresión y flexión, lo que evidencia la relación entre una microestructura más porosa, mayor carbonatación y una disminución en las propiedades mecánicas del sistema [58,65,67,69,180,187–190].

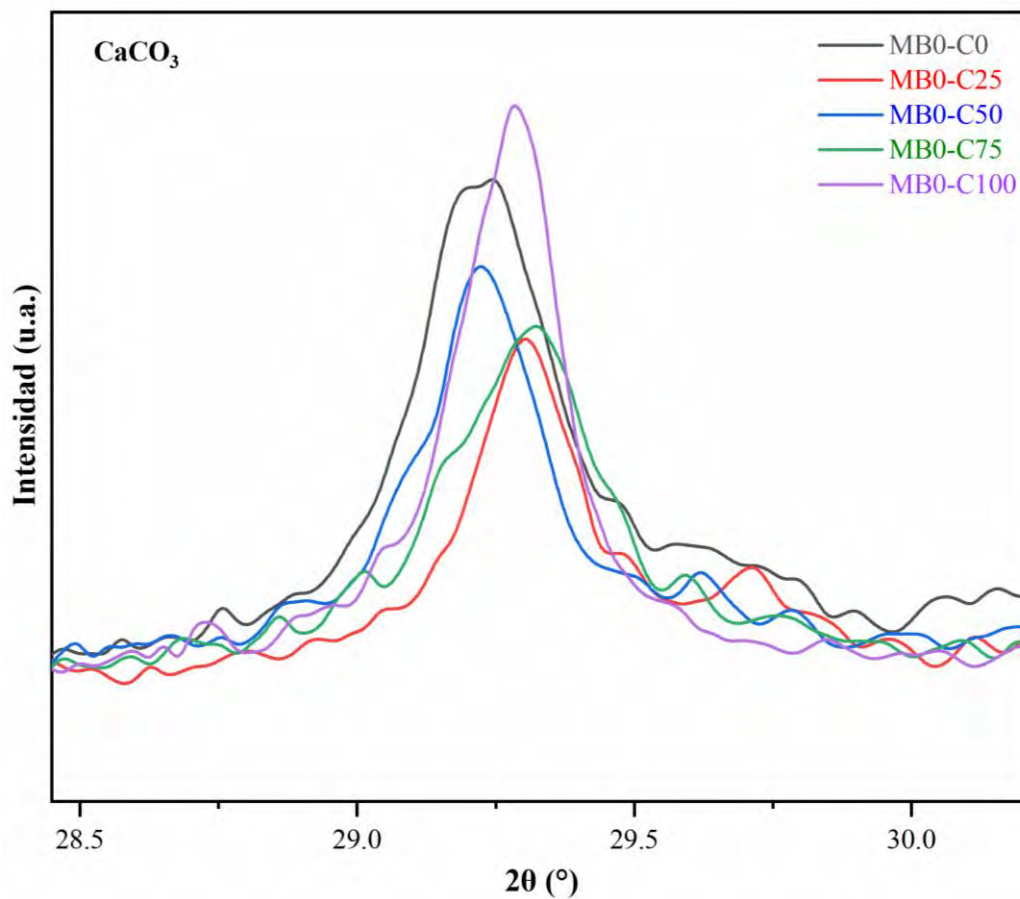


Figura 49. Ampliación del pico más intenso de la calcita, $2\theta = 29.3^\circ$.

En la **Figura 50** se muestra el pico más intenso del cuarzo (SiO_2) (PDF 46-1045) en 26.5° , se puede notar que el mortero con 25% de AFR-C presenta la mayor intensidad, seguido del mortero de referencia, mientras que las mezclas con 50, 75 y 100% de sustitución muestran una disminución progresiva. Esta tendencia indica una reducción del cuarzo conforme aumenta el contenido de AFR-C. Asimismo, este comportamiento se observa de manera consistente en otros picos asociados al cuarzo, donde la intensidad disminuye hasta prácticamente desaparecer con 100% de AFR-C [58,65,67,69,180,187–190].

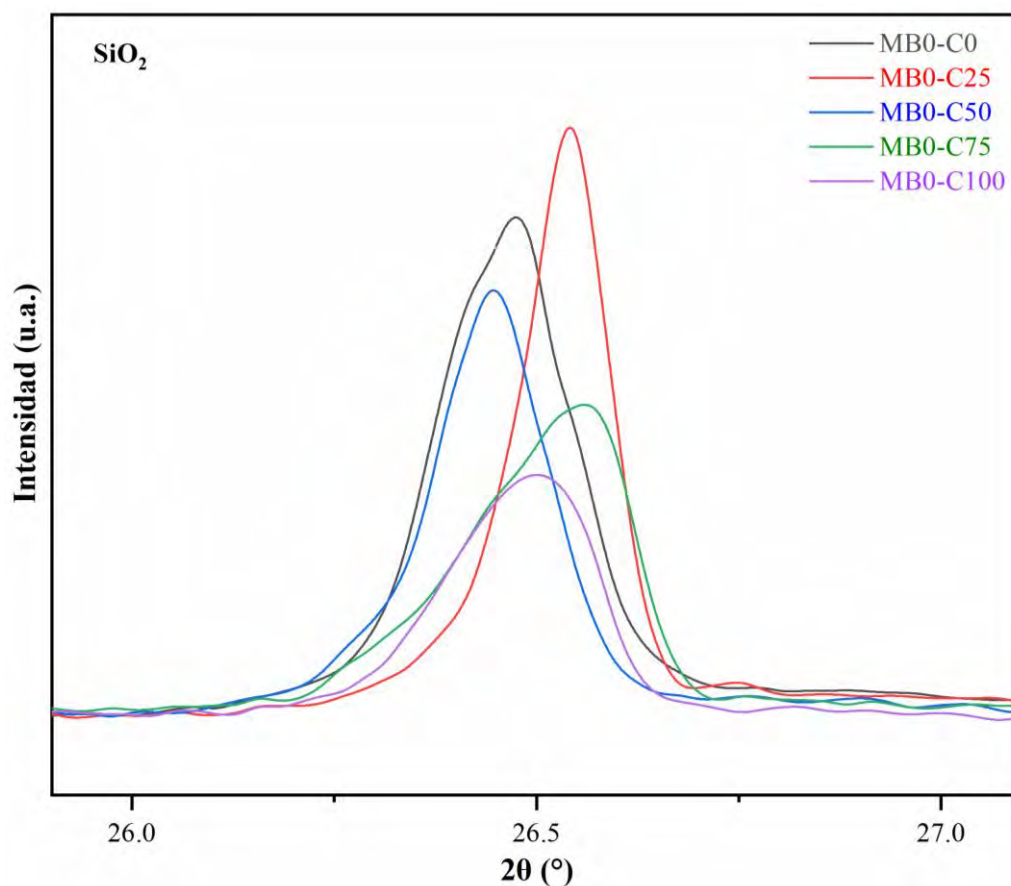


Figura 50. Ampliación del pico más intenso del cuarzo, $2\theta = 26.5^\circ$.

En la región asociada al gel de C-S-H (PDF 12-0475) no se observa un pico definido, sino una señal difusa característica de su naturaleza amorfa. La **Figura 51** muestra que el mortero de referencia presenta la mayor intensidad, seguido de las mezclas con 25%, 50% y 75% de AFR-C, las cuales muestran comportamientos similares entre sí, mientras que el mortero con 100% de AFR-C presenta la menor intensidad. Esta tendencia sugiere una disminución en la cantidad o en el grado de organización del C-S-H conforme aumenta el contenido de AFR-C [58,65,67,69,180,187–190].

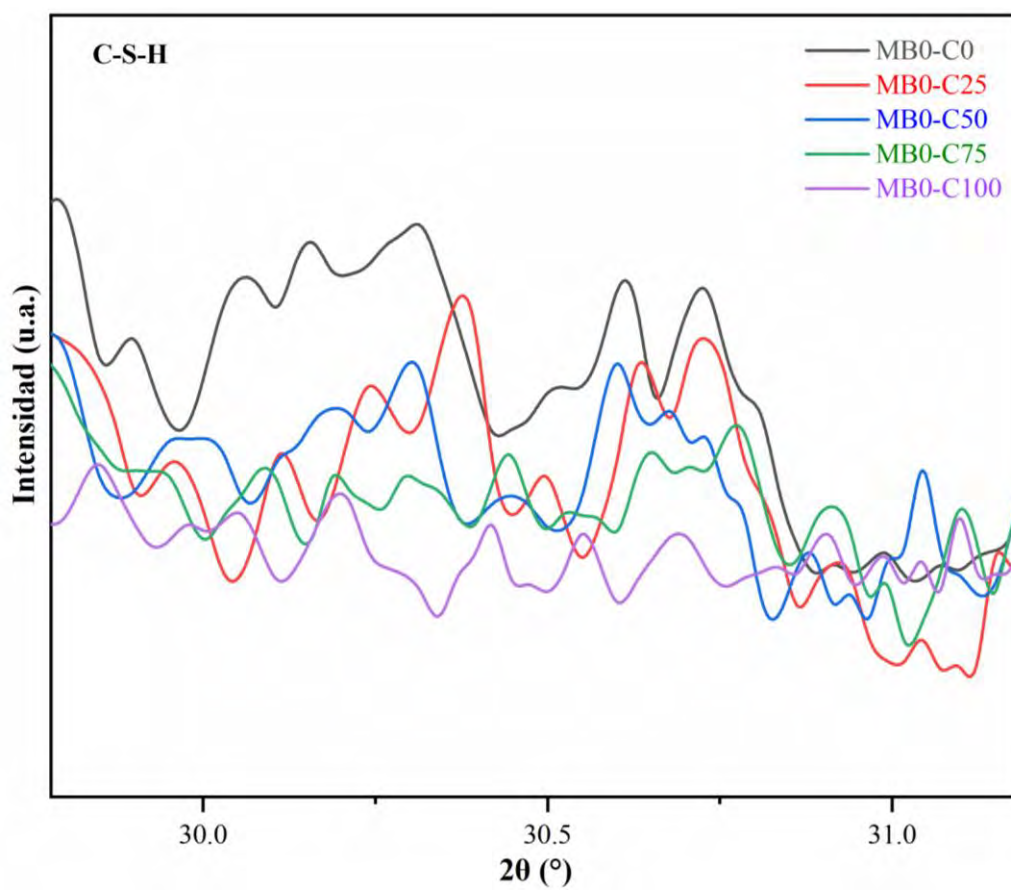


Figura 51. Ampliación de una señal de gel C-S-H, $2\theta = 30.5^\circ$.

4.11 Relación de resultados

En la **Figura 52** se presenta el comportamiento de la resistencia a la compresión (eje “y” izquierdo, en color negro) y el porcentaje de porosidad (eje “y” derecho, en color rojo) para las diferentes muestras de mortero sin adición de BHPT a la edad de 28 días de curado (desde MB0-C0 hasta MB0-C100).

De manera general, se observa un comportamiento inversamente proporcional entre ambas propiedades en la mayoría de las muestras, lo cual es consistente con la teoría de materiales cementicios (a menor porosidad, mayor resistencia mecánica). La muestra de referencia (MB0-C0) inicia con una resistencia de 25.11 MPa y una porosidad de 20.63%. Con un reemplazo del 25% de AFR-C (MB0-C25), se aprecia una disminución notable en la porosidad, cayendo a 18.84%; sin embargo, en este punto específico, la resistencia también experimenta un decremento a 23.43 MPa.

A partir de la muestra MB0-C50, la porosidad se eleva a un 22.34% y una resistencia a la compresión de 22.92%. El comportamiento más destacable ocurre en la muestra MB0-C75, la cual alcanza el valor máximo de resistencia a la compresión de todo el estudio, con 25.79 MPa, logrando mitigar el impacto de la porosidad, la cual desciende ligeramente a un 20.93% en comparación con la muestra anterior. Esta muestra rompe un poco la tendencia, ya que presenta un porcentaje de porosidad similar al mortero de referencia, pero con un aumento del 2.71% en su resistencia a la compresión respecto al MB0-C0. En los morteros esto suele ocurrir por efectos de un empaquetamiento de partículas que produce una mejor distribución granulométrica, o a reacciones puzolánicas secundarias que generan mayor cantidad del gel C-S-H, por lo que se obtienen una matriz más densa [100,168].

Finalmente, la muestra con el total de sustitución de AFR-C (MB0-C100) presenta el desempeño mecánico más bajo del grupo, cayendo drásticamente a 22.33 MPa, lo cual está directamente correlacionado con el incremento máximo de porosidad registrado en el ensayo, el cual se sitúa en 24.26%.

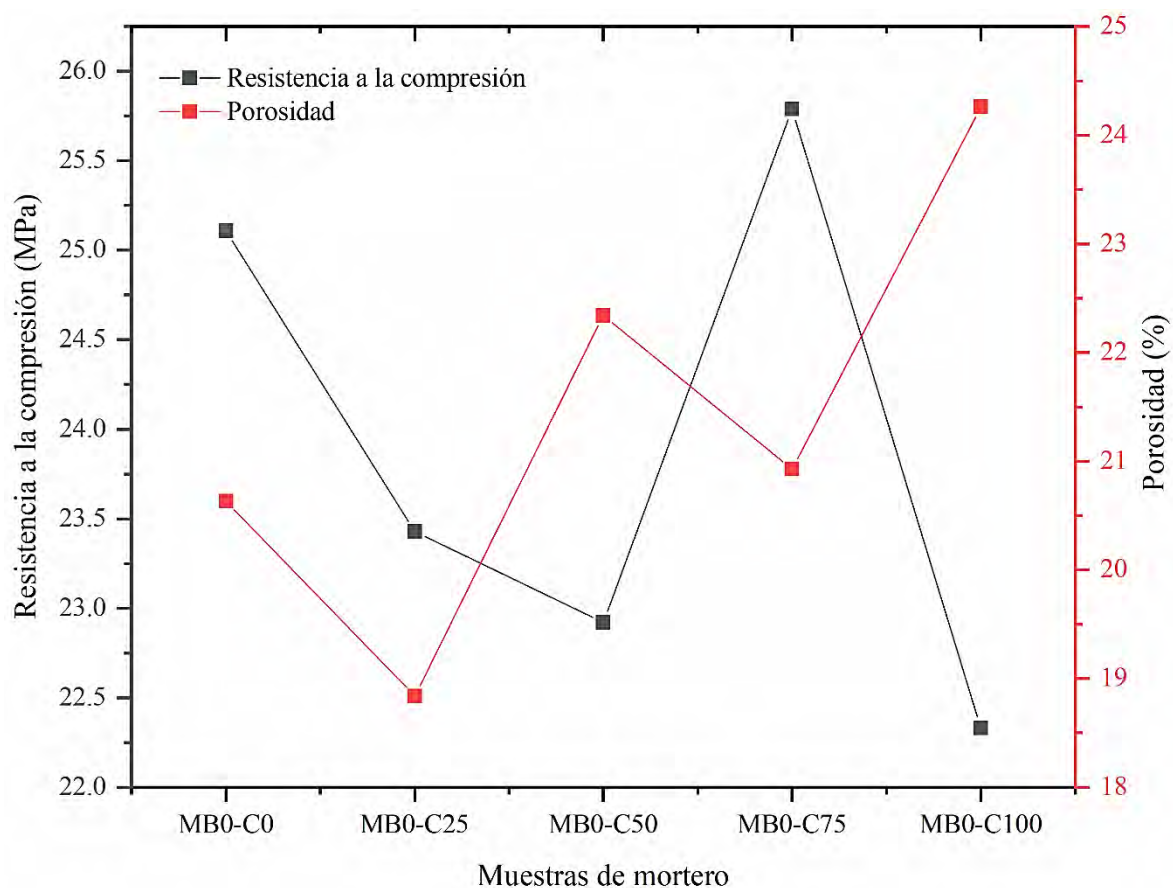


Figura 52. Relación de resistencia a la compresión y porosidad de los morteros sin adición de BHPT y diferentes porcentajes de sustitución de AFR-C, a 28 días de curado.

En la **Figura 53** se presenta el comportamiento de la resistencia a la compresión (eje “y” izquierdo, en color negro) y el porcentaje de porosidad (eje “y” derecho, en color rojo) para las diferentes muestras de mortero con 0.5% de adición de BHPT a la edad de 28 días de curado (desde MB0.5-C0 hasta MB0.5-C100).

Por un lado, se puede observar que conforme aumenta el contenido de sustitución de AFR-C incrementa su porcentaje de porosidad, excepto en la muestra MB0.5-C25, que presentó una porosidad de 21.31%, situándose por debajo del mortero de referencia de este grupo (MB0.5-C0, con 21.82%). Asimismo, el mortero con 100% de sustitución de AFR-C (MB0.5-C100) tampoco forma parte de esta tendencia, ya que su porosidad no es mayor a la del mortero

MB0.5-C75 (25.59%), si no que presentó un decremento, obteniendo una porosidad de 22.82%.

Por otro lado, la resistencia a la compresión sí presenta un comportamiento directamente proporcional con el aumento de sustitución de AFR-C, alcanzando el valor máximo el mortero MB0.5-C100 con 30.1 MPa.

En la **Figura 54** se presentan estos mismos comportamientos de resistencia a la compresión y porosidad. En cuanto a los porcentajes de porosidad obtenidos, se indica que hay un incremento directamente proporcional con el contenido de AFR-C, con excepción del mortero MB1.0-C100 (22.87%), el cual presentó una disminución respecto al mortero MB1.0-C75 (24.99%), por lo que no continúa con esta tendencia de aumento. Caso contrario con los valores obtenidos de resistencia a la compresión, ya que al igual que en la **Figura 53**, sí hay una tendencia de incremento conforme aumenta la sustitución de AFR-C, donde el mortero MB0.5-C100 presentó el máximo valor de este grupo con 32.73 MPa.

Estos comportamientos que se presentan en ambas figuras (**Figura 53** y **Figura 54**) indican una interacción positiva entre el BHPT y altos contenidos de AFR-C, y se atribuye a que el BHPT puede reducir la porosidad formando una matriz cementicia más densa impregnada por una red polimérica y, al igual que las partículas finas del AFR-C, rellenan los espacios vacíos entre partículas más grandes, lo que lleva a fortalecer la ZTI. Además, el BHPT evita la aglomeración de partículas de cemento con grupos hidroxilo en su estructura, proporciona contacto con más moléculas de agua y da como resultado productos más hidratados, densificando la microestructura y rellorando espacios entre partículas [169,170,191].

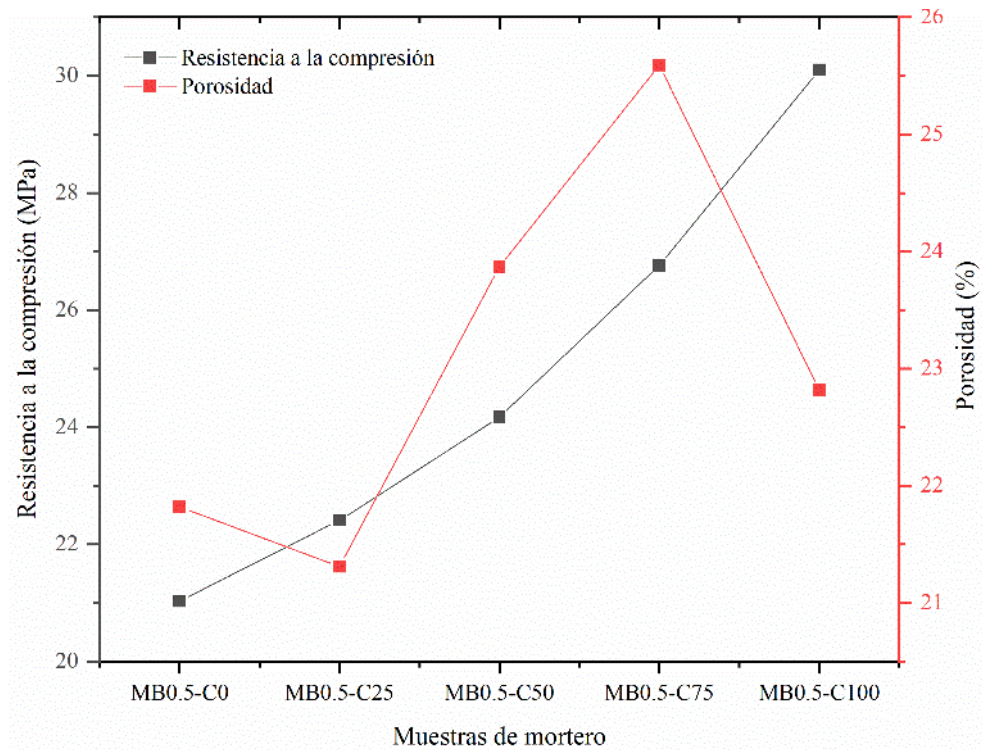


Figura 53. Relación de resistencia a la compresión y porosidad de los morteros con 0.5% de adición de BHPT y diferentes porcentajes de sustitución de AFR-C, a 28 días de curado.

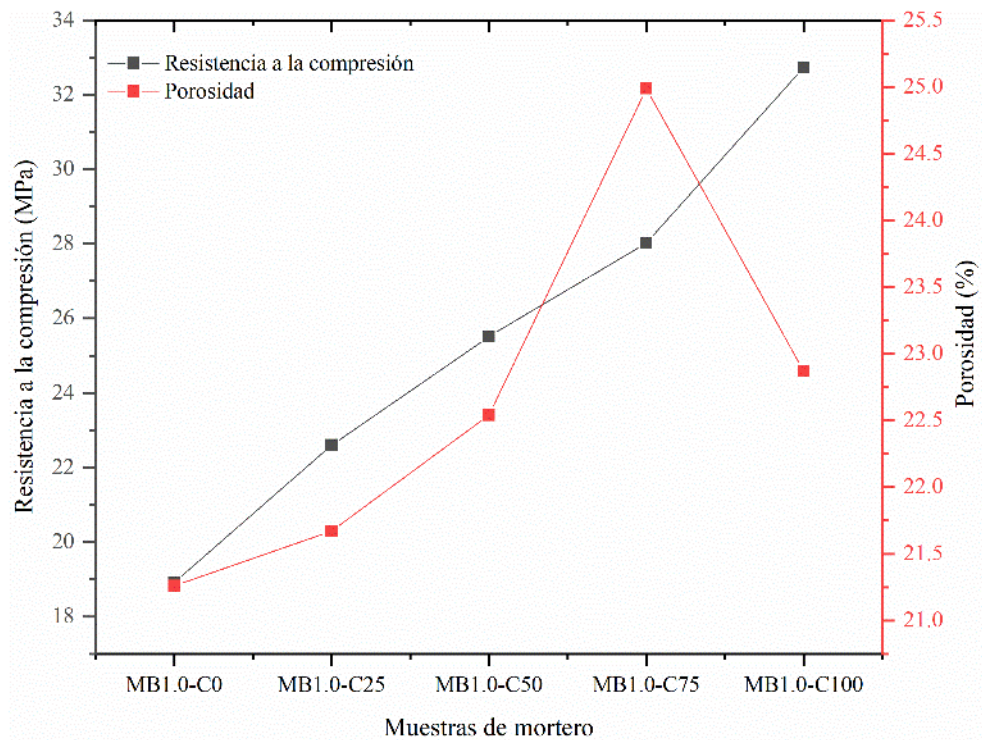


Figura 54. Relación de resistencia a la compresión y porosidad de los morteros con 1.0% de adición de BHPT y diferentes porcentajes de sustitución de AFR-C, a 28 días de curado.

En la **Figura 55** se presenta el comportamiento de la resistencia a la compresión (eje “y” izquierdo, en color negro) y el porcentaje de porosidad (eje “y” derecho, en color rojo) para las diferentes muestras de mortero con 1.5% de adición de BHPT a la edad de 28 días de curado (desde MB1.5-C0 hasta MB1.5-C100).

La muestra de referencia de este grupo (MB1.5-C0) registra los valores más bajos, con una resistencia de 19.31 MPa y una porosidad del 19.78%. Al reemplazar un 25 de AFR-C (MB1.5-C25), se produce un incremento drástico y simultáneo en ambas propiedades: la resistencia se eleva notablemente hasta los 26.02 MPa, a pesar de que la porosidad también aumenta de forma considerable hasta alcanzar el 24.03%. Este fenómeno de incremento de resistencia en presencia de una mayor porosidad total puede atribuirse a un efecto de refinamiento de poro o a la morfología de los vacíos generados. Asimismo, este comportamiento inicial sugiere una marcada actividad puzolánica o un efecto de empaquetamiento (efecto relleno) óptimo que fortalece la ZTI del mortero [68,100]

Al avanzar hacia la muestra MB1.5-C50, se observa una ligera estabilización mecánica (26.21 MPa) acompañada de un descenso en la porosidad al 22.71%, marcando el único punto de comportamiento inversamente proporcional regular. Posteriormente, la muestra MB1.5-C75 alcanza el desempeño mecánico óptimo de la serie con 28.41 MPa, aun cuando la porosidad vuelve a repuntar hasta el 24.73%, reforzando la hipótesis de que la matriz desarrollada tolera un mayor volumen de vacíos debido a una mejor calidad intrínseca del gel C-S-H [172].

Finalmente, se identifica un límite de saturación en la muestra MB1.5-C100. En este punto, la resistencia experimenta un colapso crítico cayendo a 22.41 MPa, coincidiendo con el valor máximo de porosidad registrado en el estudio (26.79%). Este comportamiento final demuestra que, al alcanzar niveles de porosidad cercanos al 27%, el volumen de vacíos se vuelve el factor gobernante, superando cualquier beneficio químico o microestructural del BHPT y provocando la interconexión de poros, lo que debilita severamente la estructura ante esfuerzos de compresión.

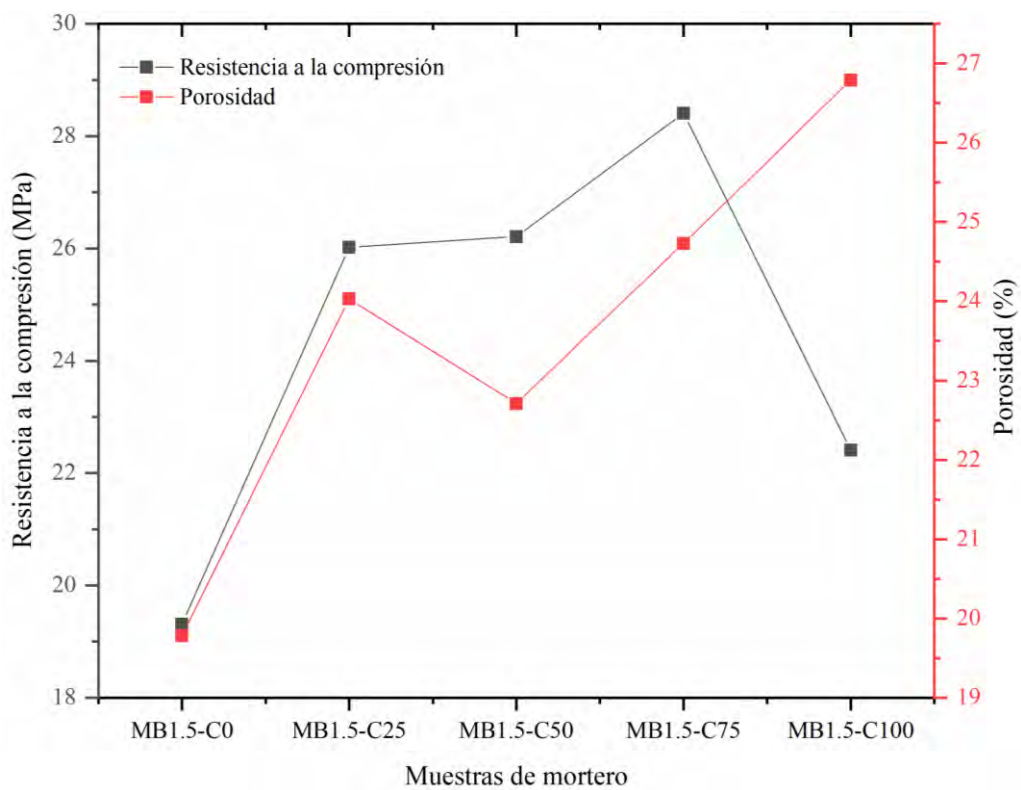


Figura 55. Relación de resistencia a la compresión y porosidad de los morteros con 1.5% de adición de BHPT y diferentes porcentajes de sustitución de AFR-C, a 28 días de curado.

5 CONCLUSIONES

Este estudio evaluó la viabilidad de sustituir AFN por AFR-C proveniente de losetas cerámicas residuales en un 25, 50, 75 y 100%, y la adición de BHPT (producto obtenido de la despolimerización de botellas de PET postconsumo) en 0.5, 1.0 y 1.5%. Se fabricaron 20 morteros con diferentes porcentajes de sustitución de AFR-C y de adición de BHPT. Los resultados obtenidos permitieron llegar a las siguientes conclusiones.

- Se fabricó un agregado fino reciclado de losetas cerámicas residuales, ajustando su granulometría hasta que sea adecuada conforme indica la norma ASTM C136 y cumpliendo con los parámetros de un agregado fino.
- Se realizó el reciclaje secundario y terciario de botellas de PET postconsumo y se obtuvo BHPT. Lo cual se confirmó mediante FT-IR y TGA, obteniendo las frecuencias vibracionales características de este compuesto, así como las degradaciones a diferentes intervalos de temperatura, tal como lo indican otros estudios reportados.
- Los morteros modificados con la incorporación de BHPT y AFR-C alcanzaron un buen desempeño mecánico y microestructural.
- Sin adición de BHPT, los morteros con sustitución de AFR-C presentaron resistencias mecánicas inferiores al mortero de referencia (MB0-C0), excepto el mortero MB0-C75, el cual destacó al alcanzar las máximas resistencias a la compresión y a la flexión. Este comportamiento se atribuye a un empaquetamiento granular óptimo (efecto relleno) del AFR-C, lo cual fue confirmado mediante micrografías que muestran una matriz densificada donde predomina el gel C-S-H. Además, los análisis por EDS sugieren que elementos de las losetas cerámicas residuales reaccionan con los productos de hidratación del cemento mediante reacciones puzolánicas, mejorando la densidad de la matriz.
- La adición de BHPT mejoró el desempeño mecánico en la mayoría de las mezclas, con excepción de aquellas con 100% de AFN. Con dosificaciones de 0.5% y 1.0% de BHPT, las resistencias a la compresión aumentaron en morteros con reemplazos superiores al 25% de AFR-C. Aunque en estas muestras la porosidad y la densidad aumentaron simultáneamente, el desempeño mecánico no se vio afectado

negativamente, lo que sugiere que los vacíos no están interconectados en la matriz. En estas series, el mortero con 100% de AFR-C obtuvo los mejores resultados mecánicos, evidenciando una interacción positiva entre el BHPT y altos contenidos de AFR-C; favoreciendo el efecto relleno. Además, se sugiere que el BHPT evita la aglomeración de cemento con grupos hidroxilos, permitiendo el contacto con más moléculas de agua y favoreciendo los productos de hidratación, lo que densifica la matriz cementicia y fortalece la ZTI. Este comportamiento se confirmó por medio de las micrografías de SEM y de los resultados por DRX, en donde se identificaron diversos productos de hidratación. Así como de los resultados de porosidad, densidad y absorción.

- En general, la combinación de BHPT con contenidos de AFR-C permite obtener morteros con propiedades mecánicas y físicas superiores al mortero convencional.

6 BIBLIOGRAFÍA

1. Mehta, P.K. and P.J.M. Monteiro. Concreto: Estructura, propiedades y materiales. 1985.
2. Gutiérrez de López, L. El concreto y otros materiales para la construcción. Universidad Nacional de Colombia. 2003.
3. Sánchez de Guzmán, D. Tecnología del concreto y del mortero. 5ta Ed. Bhandar Editores Ltda. 2001.
4. Wang, J., J. Xie, Y. Wang, Y. Liu and Y. Ding. “Rheological properties, compressive strength, hydration products and microstructure of seawater-mixed cement pastes.” *Cem. Concr. Compos.* 114 103770 2020.
5. Petrella, A., F. Todaro, P. Yadav, J. Gubitosa and M. Notarnicola. “Physical and Mechanical Properties of Cement Mortars with Recycled Polyethylene Terephthalate: Influence of Grain Size and Composition.” *Materials*. 18(6) 1378 2025.
6. R. O. Ebewele, “*Polymer science and technology*”. CRC Press. 1ra. Ed. Estados Unidos de América. 504, 2000.
7. Benyathiar, P., P. Kumar, G. Carpenter, J. Brace and D.K. Mishra. “Polyethylene Terephthalate (PET) Bottle-to-Bottle Recycling for the Beverage Industry: A Review.” *Polymers (Basel)*. 14(12) 2366 2022.
8. Sarda, P., J.C. Hanan, J.G. Lawrence and M. Allahkarami. “Sustainability performance of polyethylene terephthalate, clarifying challenges and opportunities.” *Journal of Polymer Science*. 60(1) 7–31 2022.
9. Morris, J. “Recycling versus incineration: an energy conservation analysis.” *J. Hazard. Mater.* 47(1–3) 277–293 1996.
10. Sinha, V., M.R. Patel and J. V. Patel. “Pet Waste Management by Chemical Recycling: A Review.” *J. Polym. Environ.* 18(1) 8–25 2010.
11. Schenk, N.J., H.C. Moll and J. Potting. “The Nonlinear Relationship between Paper Recycling and Primary Pulp Requirements.” *J. Ind. Ecol.* 8(3) 141–162 2004.

12. Buekens, A. and J. Yang. "Recycling of WEEE plastics: a review." *J. Mater. Cycles Waste Manag.* 16(3) 415–434 2014.
13. ChemSpider. <https://www.chemspider.com/Chemical-Structure.13538165.html?rid=560fa50e-df07-4e08-b93e-5e76a83884e8>. Accessed May 10, 2026.
14. A, E. Introducción a la Nomenclatura IUPAC de Compuestos Orgánicos, Universidad de Costa Rica, 2000.
15. Meza Apodaca, E.A. Pasta de cemento modificado con tereftalato de bis-2-hidroxipropilo producto del reciclaje de PET, Universidad Autónoma de Sinaloa, 2024.
16. Duan, H., J. Wang and Q. Huang. "Encouraging the environmentally sound management of C&D waste in China: An integrative review and research agenda." *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 43 611–620 2015.
17. Zheng, L., H. Wu, H. Zhang, H. Duan, J. Wang, W. Jiang, B. Dong, G. Liu, J. Zuo and Q. Song. "Characterizing the generation and flows of construction and demolition waste in China." *Constr. Build. Mater.* 136 405–413 2017.
18. Polat, G., A. Damci, H. Turkoglu and A.P. Gurgun. "Identification of Root Causes of Construction and Demolition (C&D) Waste: The Case of Turkey." *Procedia Eng.* 196 948–955 2017.
19. Evangelista, A.C.J., V.W.Y. Tam and J. Santos. "Recycled ceramic fine aggregate for masonry mortar production." *Proceedings of Institution of Civil Engineers: Construction Materials.* 172(5) 225–234 2019.
20. Younsi, A., P. Turcry, E. Rozire, A. Aït-Mokhtar and A. Loukili. "Performance-based design and carbonation of concrete with high fly ash content." *Cem. Concr. Compos.* 33(10) 993–1000 2011.
21. Şahmaran, M., H.A. Christianto and I.Ö. Yaman. "The effect of chemical admixtures and mineral additives on the properties of self-compacting mortars." *Cem. Concr. Compos.* 28(5) 432–440 2006.

22. Mohajan, H.K. "Impacts of Construction and Demolition Waste on Environment: An Overview." *Studies in Social Science & Humanities*. 4(3) 1–5 2025.
23. Fu, S. and J. Lee. "Recycling of ceramic tile waste into construction materials." *Developments in the Built Environment*. 18(5) 100431 2024.
24. Ali, M.S., M.A. Azmah Hanim, S.M. Tahir, C.N.A. Jaafar, M. Norkhairunnisa and K.A. Matori. "Preparation and characterization of porous alumina ceramics using different pore agents." *Journal of the Ceramic Society of Japan*. 125(5) 402–412 2017.
25. Molinari, C., Y. Alaya, L. Pasti, G. Guarini, M. Dondi and C. Zanelli. "Assessing white clays from Tabarka (Tunisia) in the production of porcelain stoneware tiles." *Appl. Clay Sci*. 231 106741 2023.
26. Medina, C., M.I. Sánchez De Rojas and M. Frías. "Reuse of sanitary ceramic wastes as coarse aggregate in eco-efficient concretes." *Cem. Concr. Compos*. 34(1) 48–54 2012.
27. Sánchez De Rojas, M.I., F.P. Marín, M. Frías ' and J. Rivera. Viabilidad de utilización de materiales de desecho procedentes de productos cerámicos en prefabricados de hormigón. 2001.
28. Kar, S., H. Sanderson, K. Roy, E. Benfenati and J. Leszczynski. "Green Chemistry in the Synthesis of Pharmaceuticals." *Chem. Rev*. 122(3) 3637–3710 2022.
29. Jones, G.R., H.S. Wang, K. Parkatzidis, R. Whitfield, N.P. Truong and A. Anastasaki. "Reversed Controlled Polymerization (RCP): Depolymerization from Well-Defined Polymers to Monomers." *J. Am. Chem. Soc*. 145(18) 9898–9915 2023.
30. Liu, C. and M. Pham. "Spatially Programmable Architected Materials Inspired by the Metallurgical Phase Engineering." *Advanced Materials*. 36(8) 2024.
31. Juraij, K., P. Sagitha, A. Sujith and C. Chinglenthoba. "Electrospun nanofibrous membranes based sorbents for oil/water separation: Blends, composites, functionalized, and smart membranes – A mini review." *J. Environ. Chem. Eng*. 13(3) 116262 2025.

32. Xiong, Z., Z. Tang, S. He, Z. Fang, Z. Chen, F. Liu and L. Li. "Analysis of mechanical properties of rubberised mortar and influence of styrene–butadiene latex on interfacial behaviour of rubber–cement matrix." *Constr. Build. Mater.* 300 124027 2021.
33. Rosado, S., J. Costafreda, D. Martín, L. Presa and L. Gullón. "Recycled Aggregates from Ceramic and Concrete in Mortar Mixes: A Study of Their Mechanical Properties." *Materials*. 15(24) 2022.
34. Shanmugam, V., O. Das, R.E. Neisiany, K. Babu, S. Singh, M.S. Hedenqvist, F. Berto and S. Ramakrishna. "Polymer Recycling in Additive Manufacturing: an Opportunity for the Circular Economy." *Materials Circular Economy*. 2(1) 11 2020.
35. Plastics Europe. <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-fast-facts-2023/>. Accessed March 9, 2026.
36. Priya, A.K., M. Muruganandam, M. Imran, R. Gill, M.R. Vasudeva Reddy, M. Shkir, M.A. Sayed, T.H. AlAbdulaal, H. Algarni, M. Arif, N.K. Jha and S.S. Sehgal. "A study on managing plastic waste to tackle the worldwide plastic contamination and environmental remediation." *Chemosphere*. 341 139979 2023.
37. Geyer, R., J.R. Jambeck and K.L. Law. "Production, use, and fate of all plastics ever made." *Sci. Adv.* 3(7) 2017.
38. Filho, W.L., A.L. Salvia, A. Bonoli, U.A. Saari, V. Voronova, M. Klõga, S.S. Kumbhar, K. Olszewski, D.M. De Quevedo and J. Barbir. "An assessment of attitudes towards plastics and bioplastics in Europe." *Science of the Total Environment*. 755 2021.
39. Kawecki, D., Q. Wu, J.S.V. Gonçalves and B. Nowack. "Polymer-specific dynamic probabilistic material flow analysis of seven polymers in Europe from 1950 to 2016." *Resour. Conserv. Recycl.* 173 2021.
40. Novakovic, K., D. Thumbarathy, M. Peeters, M. Geoghegan, J. Go Jefferies, C. Hicks, D. Manika and S. Dai. "Zero-waste circular economy of plastic packaging: The bottlenecks and a way forward." *Sustainable Materials and Technologies*. 38 2023.

41. Kojima, Y., M. Takahara, T. Matsuoka and H. Takahashi. "Studies of glycolysis of poly(ethylene terephthalate) recycled from postconsumer soft-drink bottles. I. Influences of glycolysis conditions." *J. Appl. Polym. Sci.* 80(7) 943–948 2001.
42. Sinha, V., M.R. Patel and J. V. Patel. "Pet waste management by chemical recycling: A review." *J. Polym. Environ.* 18(1) 8–25 2010.
43. Perugini, F., M.L. Mastellone and U. Arena. "A life cycle assessment of mechanical and feedstock recycling options for management of plastic packaging wastes." *Environmental Progress.* 24(2) 137–154 2005.
44. Karayannidis, G.P. and D.S. Achilias. "Chemical Recycling of Poly(ethylene terephthalate)." *Macromol. Mater. Eng.* 292(2) 128–146 2007.
45. Tawfik, M.E., S.B. Eskander and T.A. Bayoumi. "Immobilization of Borate Waste Simulate in Cement-Water Extended Polyester Composite Based on Polyethylene Terephthalate Waste 1-Mechanical Properties of the Final Waste Forms." *Polym. Plast. Technol. Eng.* 44(7) 1355–1368 2005.
46. Jo, B.-W., G.-H. Tae and C.-H. Kim. "Uniaxial creep behavior and prediction of recycled-PET polymer concrete." *Constr. Build. Mater.* 21(7) 1552–1559 2007.
47. Jo, B.-W., S.-K. Park and J.-C. Park. "Mechanical properties of polymer concrete made with recycled PET and recycled concrete aggregates." *Constr. Build. Mater.* 22(12) 2281–2291 2008.
48. Rebeiz, K.S., D.W. Fowler and D.R. Paul. "Recycling Plastics in Polymer Concrete Systems for Engineering Applications." *Polym. Plast. Technol. Eng.* 30(8) 809–825 1991.
49. Rebeiz, K.S. "Precast use of polymer concrete using unsaturated polyester resin based on recycled PET waste." *Constr. Build. Mater.* 10(3) 215–220 1996.
50. Abdel-Azim, A.-A.A. *Unsaturated Polyester Resins From Poly(Ethylene Terephthalate) Waste for Polymer Concrete.* 1996.

51. Mahdi, F., A.A. Khan and H. Abbas. "Physiochemical properties of polymer mortar composites using resins derived from post-consumer PET bottles." *Cem. Concr. Compos.* 29(3) 241–248 2007.
52. Bórquez-Mendivil, A., C.P. Barrios-Durstewitz, R.E. Núñez-Jáquez, A. Hurtado-Macías, J.E. Leal-Pérez, J. Flores-Valenzuela, B.A. García-Grajeda, F.G. Cabrera-Covarrubias, J.M. Mendivil-Escalante and J.L. Almaral-Sánchez. "A New Sustainable PPT Coating Based on Recycled PET to Improve the Durability of Hydraulic Concrete." *Polymers (Basel)*. 16(9) 2024.
53. Ignacio, C., V. Ferraz and R.L. Oréface. "Study of the behavior of polyester concretes containing ionomers as curing agents." *J. Appl. Polym. Sci.* 108(4) 2682–2690 2008.
54. Bórquez-Mendivil, A., J. Verdugo-Sánchez, A. Hurtado-Macías and J. Leal. "Mortero polimérico elaborado con resina híbrida de poliéster insaturado (a partir de reciclaje de botellas de PET post-consumo) con nanoacoplante silano." 2023.
55. Liu, Q., A. Singh, J. Xiao, B. Li and V.W. Tam. "Workability and mechanical properties of mortar containing recycled sand from aerated concrete blocks and sintered clay bricks." *Resour. Conserv. Recycl.* 157 2020.
56. Bektas, F., K. Wang and H. Ceylan. "Effects of crushed clay brick aggregate on mortar durability." *Constr. Build. Mater.* 23(5) 1909–1914 2009.
57. Silva, J., J. de Brito and R. Veiga. "Recycled Red-Clay Ceramic Construction and Demolition Waste for Mortars Production." *Journal of Materials in Civil Engineering*. 22(3) 236–244 2010.
58. Jiménez, J.R., J. Ayuso, M. López, J.M. Fernández and J. De Brito. "Use of fine recycled aggregates from ceramic waste in masonry mortar manufacturing." *Constr. Build. Mater.* 40 679–690 2013.
59. Lu, G., Z. Fan, Z. Sun, P. Liu, Z. Leng, D. Wang and M. Oeser. "Improving the polishing resistance of cement mortar by using recycled ceramic." *Resour. Conserv. Recycl.* 158 2020.

60. Gasik-Kowalska, N. and A. Koper. "Green Concrete Production Technology with the Addition of Recycled Ceramic Aggregate." *Sustainability (Switzerland)*. 17(7) 2025.
61. Tikul, N. and P. Srichandr. "Assessing the environmental impact of ceramic tile production in Thailand." *Journal of the Ceramic Society of Japan*. 118 2010.
62. Abadou, Y., R. Mitiche-Kettab and A. Ghrieb. "Ceramic waste influence on dune sand mortar performance." *Constr. Build. Mater.* 125 703–713 2016.
63. Samadi, M., G.F. Huseien, H. Mohammadhosseini, H.S. Lee, N.H. Abdul Shukor Lim, M.M. Tahir and R. Alyousef. "Waste ceramic as low cost and eco-friendly materials in the production of sustainable mortars." *J. Clean. Prod.* 266 121825 2020.
64. Archana, K. and V. Ponmalar. "Performance evaluation of ceramic tile waste aggregate in nano-silica blended mortar." *Ceram. Int.* 2026.
65. Awoyera, P.O., A.R. Dawson, N.H. Thom and J.O. Akinmusuru. "Suitability of mortars produced using laterite and ceramic wastes: Mechanical and microscale analysis." *Constr. Build. Mater.* 148 195–203 2017.
66. Silva, J., J. De Brito and R. Veiga. "Fine ceramics replacing cement in mortars partial replacement of cement with fine ceramics in rendering mortars." *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*. 41(8) 1333–1344 2008.
67. Naceri, A. and M.C. Hamina. "Use of waste brick as a partial replacement of cement in mortar." *Waste Management*. 29(8) 2378–2384 2009.
68. Higashiyama, H., F. Yagishita, M. Sano and O. Takahashi. "Compressive strength and resistance to chloride penetration of mortars using ceramic waste as fine aggregate." *Constr. Build. Mater.* 26(1) 96–101 2012.
69. Steiner, L.R., A.M. Bernardin and F. Pelisser. "Effectiveness of ceramic tile polishing residues as supplementary cementitious materials for cement mortars." *Sustainable Materials and Technologies*. 4 30–35 2015.
70. Ge, Z., Y. Feng, H. Zhang, J. Xiao, R. Sun and X. Liu. "Use of recycled fine clay brick aggregate as internal curing agent for low water to cement ratio mortar." *Constr. Build. Mater.* 264 2020.

71. Stolarska, A. and T. Rucińska. "Evaluation of physical characteristics and sorption of cement mortars with recycled ceramic aggregate." *Materials*. 14(24) 2021.
72. Silva, J., J. de Brito and R. Veiga. "Incorporation of fine ceramics in mortars." *Constr. Build. Mater.* 23(1) 556–564 2009.
73. A M, N. and R. P. "Strength and durability study on cement mortar with ceramic waste and micro-silica." *Rakesh P/ Materials Today: Proceedings*. 5 24780–24791 2018.
74. Farinha, C., J. de Brito and R. Veiga. "Incorporation of fine sanitary ware aggregates in coating mortars." *Constr. Build. Mater.* 83 194–206 2015.
75. Jackiewicz-Rek, W., K. Załęgowski, A. Garbacz and B. Bissonnette. "Properties of cement mortars modified with ceramic waste fillers." *Procedia Eng.* 108 681–687 2015.
76. Cabrera-Covarrubias, F.G., J.M. Gómez-Soberón, J.L. Almaral-Sánchez, S.P. Arredondo-Rea, M.C. Gómez-Soberón and R. Corral-Higuera. "An experimental study of mortars with recycled ceramic aggregates: Deduction and prediction of the stress-strain." *Materials*. 9(12) 2016.
77. Li, L., Z. Liu, W. Liu, Z. Wang, C. Zhou and Q. Zeng. "Microstructure and transport properties of cement mortar made with recycled fine ceramic aggregates." *Developments in the Built Environment*. 22 2025.
78. Ledesma, E.F., J.R. Jiménez, J. Ayuso, J.M. Fernández and J. De Brito. "Maximum feasible use of recycled sand from construction and demolition waste for eco-mortar production - Part-I: Ceramic masonry waste." *J. Clean. Prod.* 87(1) 692–706 2015.
79. Saiz Martínez, P., D. Ferrández, A. Melane-Lavado and A. Zaragoza-Benzal. "Characterization of Three Types of Recycled Aggregates from Different Construction and Demolition Waste: An Experimental Study for Waste Management." *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 20(4) 2023.
80. Ruano Gutiérrez, E., D. Ferrández, E. Atanes-Sánchez and M. Ruano de Pablo. "Physico-Mechanical Characterization of Masonry Mortars for Sustainable

- Construction: Experimental Study with Four Different Aggregates.” *Sustainability (Switzerland)*. 16(14) 2024.
81. Guadalupe, F., J. Manuel, J. Luis, S. Paola, F. -Gómez, J. -Almaral, J. -Arredondo, F. Guadalupe Cabrera-Covarrubias, J. Manuel Gómez-Soberón, J. Luis Almaral-Sánchez and S. Paola Arredondo-Rea. “Mechanical properties of mortars containing recycled ceramic as a fine aggregate replacement.” *Revista de La Construcción*. 14 22–29 2015.
 82. Cabrera-Covarrubias, F.G., J. Manuel Gómez-Soberón, J.L. Almaral-Sánchez, R. Corral-Higuera, A. Navarro-Ezquerria and M. Tous-Coll. “Characterization of three recycled materials for alternative use of mortars.” *International Journal of Sustainable Materials*. 2014.
 83. López Gayarre, F., Í. López Boadella, C. López-Colina Pérez, M. Serrano López and A. Domingo Cabo. “Influence of the ceramic recycled aggregates in the masonry mortars properties.” *Constr. Build. Mater.* 132 457–461 2017.
 84. Grigorjev, V., M. Azenha and N. De Belie. “Towards Sustainable Masonry Construction Through Natural Aggregate Replacement by Fine Recycled Aggregates in Cement–Lime Mortars.” *Sustainability (Switzerland)*. 17(3) 2025.
 85. A. Neville, “*Tecnología del concreto*”. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. 1ra. Ed. México. 625, 2013.
 86. Lavagna, L. and R. Nisticò. “An Insight into the Chemistry of Cement—A Review.” *Applied Sciences*. 13(1) 203 2022.
 87. Alesiani, M., I. Pirazzoli and B. Maraviglia. “Factors Affecting Early-Age Hydration of Ordinary Portland Cement Studied by NMR: Fineness, Water-to-Cement Ratio and Curing Temperature.” *Appl. Magn. Reson.* 32(3) 385–394 2007.
 88. Wang, L., H.Q. Yang, S.H. Zhou, E. Chen and S.W. Tang. “Hydration, mechanical property and C-S-H structure of early-strength low-heat cement-based materials.” *Mater. Lett.* 217 151–154 2018.
 89. de Jong, J.G.M., H.N. Stein and J.M. Stevels. “Hydration of tricalcium silicate.” *Journal of Applied Chemistry*. 17(9) 246–250 1967.

90. Cuesta, A., J.D. Zea-Garcia, D. Londono-Zuluaga, A.G. De la Torre, I. Santacruz, O. Vallcorba, M. Dapiaggi, S.G. Sanf  lix and M.A.G. Aranda. “Multiscale understanding of tricalcium silicate hydration reactions.” *Sci. Rep.* 8(1) 8544 2018.
91. Thomas, J.J., S. Ghazizadeh and E. Masoero. “Kinetic mechanisms and activation energies for hydration of standard and highly reactive forms of β -dicalcium silicate (C2S).” *Cem. Concr. Res.* 100 322–328 2017.
92. Park, S.M., J.G. Jang, H.M. Son and H.K. Lee. “Stable conversion of metastable hydrates in calcium aluminate cement by early carbonation curing.” *Journal of CO2 Utilization.* 21 224–226 2017.
93. Lea, F.M., P.C. Hewlett and Martin. Liska. Lea’s chemistry of cement and concrete. Butterworth-Heinemann. 2019.
94. Kurdowski, W. Cement and concrete chemistry. Springer Netherlands. 2014.
95. Rose, J., A. Bénard, S. El Mrabet, A. Masion, I. Moulin, V. Briois, L. Olivi and J.Y. Bottero. “Evolution of iron speciation during hydration of C4AF.” *Waste Management.* 26(7) 720–724 2006.
96. Taylor, H.F.W. Cement chemistry. Emerald Publishing Limited. 1997.
97. Richardson, I.G. “The calcium silicate hydrates.” *Cem. Concr. Res.* 38(2) 137–158 2008.
98. Mindess, Sidney., J.Francis. Young and David. Darwin. Concrete. Prentice Hall. 2003.
99. TAYLOR, H.F.W. “Proposed Structure for Calcium Silicate Hydrate Gel.” *Journal of the American Ceramic Society.* 69(6) 464–467 1986.
100. Scrivener, K., R. Snellings and B. Lothenbach. A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials. CRC Press. 2018.
101. Bahraq, A.A., M.A. Al-Osta, O.S. Baghabra Al-Amoudi, I.B. Obot, M. Maslehuddin, H.-R. Ahmed and T.A. Saleh. “Molecular Simulation of Cement-Based Materials and Their Properties.” *Engineering.* 15 165–178 2022.

102. Claisse, P.A. “Durability of concrete structures.” *Civil Engineering Materials*. 259–274 2016.
103. Collepardi, M. “A state-of-the-art review on delayed ettringite attack on concrete.” *Cem. Concr. Compos.* 25(4–5) 401–407 2003.
104. ASTM International. Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar. 2020.
105. Banfill, P. Rheology of Fresh Cement and Concrete. Taylor & Francis. 1991.
106. ASTM International. Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens). 2021.
107. ASTM International. Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars. ASTM International. 2021.
108. Vargas, P., O. Restrepo-Baena and J.I. Tobón. “Microstructural analysis of interfacial transition zone (ITZ) and its impact on the compressive strength of lightweight concretes.” *Constr. Build. Mater.* 137 381–389 2017.
109. Newman, John. and B.S. Choo. Advanced concrete technology : constituent materials. Butterworth-Heinemann. 2003.
110. S. Batra, “*Polymer chemistry essentials*”. Educohack Press. 1ra Ed. India. 247, 2025.
111. Seymour, R.B. and C.E., Jr. Carraher. Introducción a la química de los polímeros . 3ra Ed. Reverté . 2021.
112. Madhav, H., N. Singh and G. Jaiswar. 2019. Thermoset, bioactive, metal–polymer composites for medical applications, In *Materials for Biomedical Engineering*, Elsevier, pp: 105–143.
113. PDL Handbook Series. Recycling of Polyethylene Terephthalate Bottles. Matthew Deans. 2018.
114. Goodship, Vannessa. Management, recycling and reuse of waste composites. Woodhead Pub. ; Published in North America by CRC. 2010.

115. Al-Salem, S.M. "Establishing an integrated databank for plastic manufacturers and converters in Kuwait." *Waste Management*. 29(1) 479–484 2009.
116. A. L.Andrady. *Plastics and the environment*. Wiley-Interscience. 2003.
117. Patel, M., N. von Thienen, E. Jochem and E. Worrell. "Recycling of plastics in Germany." *Resour. Conserv. Recycl.* 29(1–2) 65–90 2000.
118. Frounchi, M. "Studies on degradation of PET in mechanical recycling." *Macromol. Symp.* 144(1) 465–469 1999.
119. Jehanno, C., J.W. Alty, M. Roosen, S. De Meester, A.P. Dove, E.Y.-X. Chen, F.A. Leibfarth and H. Sardon. "Critical advances and future opportunities in upcycling commodity polymers." *Nature*. 603(7903) 803–814 2022.
120. Cui, J. and E. Forssberg. "Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: a review." *J. Hazard. Mater.* 99(3) 243–263 2003.
121. Perugini, F., M.L. Mastellone and U. Arena. "Environmental Aspects of Mechanical Recycling of PE and PET: A Life Cycle Assessment Study." *Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology*. 20(1) 69–84 2004.
122. Muringayil Joseph, T., S. Azat, Z. Ahmadi, O. Moini Jazani, A. Esmaeili, E. Kianfar, J. Haponiuk and S. Thomas. "Polyethylene terephthalate (PET) recycling: A review." *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*. 9 2024.
123. Park, S.H. and S.H. Kim. "Poly (ethylene terephthalate) recycling for high value added textiles." *Fashion and Textiles*. 1(1) 1 2014.
124. Fomina, N., V. Khozin, A. Strakhov and A. Ismagilov. "Shredding of polyethylene terephthalate waste." *E3S Web of Conferences*. 263 01018 2021.
125. Damayanti and H.-S. Wu. "Strategic Possibility Routes of Recycled PET." *Polymers (Basel)*. 13(9) 1475 2021.
126. Gente, Vincenzo. *Study On The Feasibility of Hazardous Waste Recycling*. 2012.
127. Letcher, T.M. *Plastic waste and recycling : environmental impact, societal issues, prevention, and solutions*. Academic Press. 2020.

128. Kim, N.-K., S.-H. Lee and H.-D. Park. "Current biotechnologies on depolymerization of polyethylene terephthalate (PET) and repolymerization of reclaimed monomers from PET for bio-upcycling: A critical review." *Bioresour. Technol.* 363 127931 2022.
129. Perugini, F., M.L. Mastellone and U. Arena. "A life cycle assessment of mechanical and feedstock recycling options for management of plastic packaging wastes." *Environmental Progress.* 24(2) 137–154 2005.
130. Chanda, M. "Chemical aspects of polymer recycling." *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research.* 4(3) 133–150 2021.
131. Wang, Q., X. Yao, S. Tang, X. Lu, X. Zhang and S. Zhang. "Urea as an efficient and reusable catalyst for the glycolysis of poly(ethylene terephthalate) wastes and the role of hydrogen bond in this process." *Green Chemistry.* 14(9) 2559 2012.
132. Vollmer, I., M.J.F. Jenks, M.C.P. Roelands, R.J. White, T. van Harmelen, P. de Wild, G.P. van der Laan, F. Meirer, J.T.F. Keurentjes and B.M. Weckhuysen. "Beyond Mechanical Recycling: Giving New Life to Plastic Waste." *Angew. Chem. Int. Ed.* 59(36) 15402–15423 2020.
133. Pant, D. "Polycarbonate Waste Management using Glycerol." *Process Safety and Environmental Protection.* 100 281–287 2016.
134. Vaidya, U.R. and V.M. Nadkarni. "Polyester polyols from glycolyzed PET waste: Effect of glycol type on kinetics of polyesterification." *J. Appl. Polym. Sci.* 38(6) 1179–1190 1989.
135. Chiu, S.J. and W.H. Cheng. "Thermal degradation and catalytic cracking of poly(ethylene terephthalate)." *Polym. Degrad. Stab.* 63(3) 407–412 1999.
136. Abdelaal, M.Y., T.R. Sobahi and M.S.I. Makki. "Chemical transformation of pet waste through glycolysis." *Constr. Build. Mater.* 25(8) 3267–3271 2011.
137. Shukla, S.R. and A.M. Harad. "Glycolysis of polyethylene terephthalate waste fibers." *J. Appl. Polym. Sci.* 97(2) 513–517 2005.

138. Gurgul, A., W. Szczepaniak and M. Zabłocka-Malicka. “Incineration and pyrolysis vs. steam gasification of electronic waste.” *Science of The Total Environment*. 624 1119–1124 2018.
139. Hwang, K.-L., S.-M. Choi, M.-K. Kim, J.-B. Heo and K.-D. Zoh. “Emission of greenhouse gases from waste incineration in Korea.” *J. Environ. Manage.* 196 710–718 2017.
140. Baylavlı, H. and E. Gödek. “Use of Ceramic Tile Wastes as Raw Substitution Material in the Production of Blended Cement.” *Buildings*. 14(9) 2942 2024.
141. Samadi, M., G.F. Huseien, H. Mohammadhosseini, H.S. Lee, N.H. Abdul Shukor Lim, M.M. Tahir and R. Alyousef. “Waste ceramic as low cost and eco-friendly materials in the production of sustainable mortars.” *J. Clean. Prod.* 266 121825 2020.
142. Shah, K.Wei. and G.Fahim. Huseien. *Recycled ceramics in sustainable concrete : properties and performance*. CRC Press. 2021.
143. Daniyal, M. and S. Ahmad. “Application of Waste Ceramic Tile Aggregates in Concrete.” *Int. J. Innov. Res. Sci. Eng. Technol.* 2012.
144. Joudah, Z.H., N.H.A. Khalid, M.H. Baghban, I. Faridmehr, A.R.A. Talip and G.F. Huseien. “Development sustainable concrete with high-volume wastes tile ceramic: Role of silica nanoparticles amalgamation.” *Case Studies in Construction Materials*. 21 e03733 2024.
145. Alsaif, A. “Utilization of ceramic waste as partially cement substitute – A review.” *Constr. Build. Mater.* 300 124009 2021.
146. Chateau, X. “Particle packing and the rheology of concrete.” *Understanding the Rheology of Concrete*. 117–143 2012.
147. Stroeve, P. and M. Stroeve. “Assessment of packing characteristics by computer simulation.” *Cem. Concr. Res.* 29(8) 1201–1206 1999.
148. de Larrard, F. and T. Sedran. “Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model.” *Cem. Concr. Res.* 24(6) 997–1009 1994.

149. Hu, C. and F. De Larrard. "The rheology of fresh high-performance concrete." *Cem. Concr. Res.* 26(2) 283–294 1996.
150. Castro, A. and F. Ferreira. "Effect of particle packing in the durability of high performance concretes Efecto de empaquetamiento de las partículas en la durabilidad de los hormigones de alto desempeño." *Revista Ingeniería de Construcción*.
151. Chong, J.S., E.B. Christiansen and A.D. Baer. "Rheology of concentrated suspensions." *J. Appl. Polym. Sci.* 15(8) 2007–2021 1971.
152. Coussot, Philippe. *Rheometry of pastes, suspensions, and granular materials : applications in industry and environment*. Wiley. 2005.
153. Stickel, J.J. and R.L. Powell. "FLUID MECHANICS AND RHEOLOGY OF DENSE SUSPENSIONS." *Annu. Rev. Fluid Mech.* 37(1) 129–149 2005.
154. ASTM International. *Standard Specification for Aggregate for Masonry Mortar*. 2004.
155. ASTM International. *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. 2006.
156. ASTM International. *Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate*. 2022.
157. Foti, D. and M. Lerna. "New Mortar Mixes with Chemically Depolymerized Waste PET Aggregates." *Advances in Materials Science and Engineering*. 2020 2020.
158. Abubakar, L., N. Yeasmin and A. Bhattacharjee. "Waste Polyethylene Terephthalate (PET) as a Partial Replacement of Aggregates in Sustainable Concrete." *Construction Materials*. 4(4) 738–747 2024.
159. ASTM International. *Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency*. 2020.
160. ASTM International. *Standard Specification for Mixing Rooms, Moist Cabinets, Moist Rooms, and Water Storage Tanks Used in the Testing of Hydraulic Cements and Concretes*. 2021.

161. ASTM International. Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete. 2021.
162. Cabrera-Covarrubias, F.G., J.M. Gómez-Soberón, C.A. Rosas-Casarez, J.L. Almaral-Sánchez and J.M. Bernal-Camacho. "Recycled mortars with ceramic aggregates. Pore network transmutation and its relationship with physical and mechanical properties." *Materials*. 14(6) 2021.
163. Park, S., S. Thanakkasaranee, H. Shin, Y. Lee, G. Tak and J. Seo. "PET/Bio-Based Terpolyester Blends with High Dimensional Thermal Stability." *Polymers (Basel)*. 13(5) 728 2021.
164. Miguel Mendivil-Escalante, J., J. Manuel Gómez-Soberón, J. Luis Almaral-Sánchez, R. Corral-Higuera, S. Paola Arredondo-Rea, A. Castro-Beltrán and F. Guadalupe Cabrera-Covarrubias. "Synthesis and characterization of PET polymer resin for your application in concrete." *Second Intl. Conf. on Advances In Civil, Structural and Environmental Engineering*. 2014.
165. Poon, C.S., Z.H. Shui, L. Lam, H. Fok and S.C. Kou. "Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete." *Cem. Concr. Res.* 34(1) 31–36 2004.
166. Anderson, D.J., S.T. Smith and F.T.K. Au. "Mechanical properties of concrete utilising waste ceramic as coarse aggregate." *Constr. Build. Mater.* 117 20–28 2016.
167. Dang, J., J. Zhao and Z. Du. "Effect of Superabsorbent Polymer on the Properties of Concrete." *Polymers (Basel)*. 9(12) 672 2017.
168. Higashiyama, H., K. Yamauchi, M. Sappakittipakorn, M. Sano and O. Takahashi. "A visual investigation on chloride ingress into ceramic waste aggregate mortars having different water to cement ratios." *Constr. Build. Mater.* 40 1021–1028 2013.
169. Mendivil-Escalante, J.M., J.M. Gómez-Soberón, J.L. Almaral-Sánchez and F.G. Cabrera-Covarrubias. "Fundamentals of the Behavior of Concrete Recycled with PET Additives through Its Porosity." *Materials*. 2016.

170. Ge, Z., H. Yue and R. Sun. "Properties of mortar produced with recycled clay brick aggregate and PET." *Constr. Build. Mater.* 93 851–856 2015.
171. Silva, R. V., J. De Brito and R.K. Dhir. "Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production." *Constr. Build. Mater.* 65 201–217 2014.
172. Ohemeng, E.A. and S.O. Ekol. "A review on the reactivation of hardened cement paste and treatment of recycled aggregates." *Magazine of Concrete Research.* 72(10) 526–539 2020.
173. Pacheco-Torgal, F. and S. Jalali. "Reusing ceramic wastes in concrete." *Constr. Build. Mater.* 24(5) 832–838 2010.
174. Bravo, M., J. De Brito, J. Pontes and L. Evangelista. "Mechanical performance of concrete made with aggregates from construction and demolition waste recycling plants." *J. Clean. Prod.* 99 59–74 2015.
175. Ye, G. "Percolation of capillary pores in hardening cement pastes." *Cem. Concr. Res.* 35(1) 167–176 2005.
176. Wang, L., Z. Tian, G. Ma and M. Zhang. "Interlayer bonding improvement of 3D printed concrete with polymer modified mortar: Experiments and molecular dynamics studies." *Cem. Concr. Compos.* 110 103571 2020.
177. Aggarwal, L.K., P.C. Thapliyal and S.R. Karade. "Properties of polymer-modified mortars using epoxy and acrylic emulsions." *Constr. Build. Mater.* 21(2) 379–383 2007.
178. Mansur, A.A.P., D.B. Santos and H.S. Mansur. "A microstructural approach to adherence mechanism of poly(vinyl alcohol) modified cement systems to ceramic tiles." *Cem. Concr. Res.* 37(2) 270–282 2007.
179. Xu, F., C. Peng, J. Zhu and J. Chen. "Design and evaluation of polyester fiber and SBR latex compound-modified perlite mortar with rubber powder." *Constr. Build. Mater.* 127 751–761 2016.

180. Zhang, Z., J. Du and M. Shi. "Quantitative Analysis of the Calcium Hydroxide Content of EVA-Modified Cement Paste Based on TG-DSC in a Dual Atmosphere." *Materials*. 15(7) 2660 2022.
181. Duxson, P., A. Fernández-Jiménez, J.L. Provis, G.C. Lukey, A. Palomo and J.S.J. van Deventer. "Geopolymer technology: the current state of the art." *J. Mater. Sci.* 42(9) 2917–2933 2007.
182. Letelier, V., E. Tarela, P. Muñoz and G. Moriconi. "Combined effects of recycled hydrated cement and recycled aggregates on the mechanical properties of concrete." *Constr. Build. Mater.* 132 365–375 2017.
183. Zhou, J., Y. Dong, T. Qiu, J. Lv, P. Guo and X. Liu. "The Microstructure and Modification of the Interfacial Transition Zone in Lightweight Aggregate Concrete: A Review." *Buildings*. 15(15) 2025.
184. Lothenbach, B. and M. Zajac. "Application of thermodynamic modelling to hydrated cements." *Cem. Concr. Res.* 123 105779 2019.
185. Puertas, F., I. García-Díaz, A. Barba, M.F. Gazulla, M. Palacios, M.P. Gómez and S. Martínez-Ramírez. "Ceramic wastes as alternative raw materials for Portland cement clinker production." *Cem. Concr. Compos.* 30(9) 798–805 2008.
186. Suda, Y., T. Saeki and T. Saito. "Relation between Chemical Composition and Physical Properties of C-S-H Generated from Cementitious Materials." *Journal of Advanced Concrete Technology*. 13(5) 275–290 2015.
187. Corinaldesi, V., M. Giuggiolini and G. Moriconi. "Use of rubble from building demolition in mortars." *Waste Management*. 2002.
188. Vega Anticona, A., C. Arévalo Aranda, S. Acevedo Zavaleta, S. Valdiviezo Juarez, G.S. Licapa-Redolfo, G.C. Farfán Chilicaus and D. Chávez Novoa. "Alkaline activation: Cement mortars and recycled brick dust." *Proceedings of the 20th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology: "Education, Research and Leadership in Post-Pandemic Engineering: Resilient, Inclusive and Sustainable Actions."* 2022.

189. Gázquez, M.J., J.P. Bolívar, F. Vaca, R. García-Tenorio and A. Mena-Nieto. “Use of the ‘red gypsum’ industrial waste as substitute of natural gypsum for commercial cements manufacturing.” *Materiales de Construcción*. 62(306) 183–198 2012.
190. Wang, Y. and Q. Liu. “Investigation on fundamental properties and chemical characterization of water-soluble epoxy resin modified cement grout.” *Constr. Build. Mater.* 299 2021.
191. Şimşek, B. “Bis-hydroxyethyl terephthalate cementitious composites properties: A comparative study including hydrogen bonding mechanism with the dioctyl terephthalate.” *Constr. Build. Mater.* 258 2020.

7 ANEXOS



Figura 56. Participación como asistente en la XLVIII semana nacional de energía solar.



Figura 57. Participación en la demostración de experimentos de química en el Colegio Montferrant.



Figura 58. Participación en la demostración de laboratorio "Magia en el agua: revelando figuras ocultas".



Figura 59. Participación como expositor del cartel "Desarrollo de un sensor colorimétrico a partir de nanopartículas de plata para la detección de iones metálicos en medio acuoso".



Figura 62. Participación como asistente del taller "Modelado computacional de nanomateriales de baja dimensionalidad para aplicaciones en almacenamiento de energía.



Figura 63. Participación como organizador del 1er Congreso Estatal de Ciencias e Ingeniería de los Materiales.



Figura 64. Participación como asistente al curso teórico-práctico "Fundamentos de la Microscopía Electrónica de Barrido".



Figura 65. Participación como expositor del cartel "Síntesis y funcionalización de nanopartículas de plata aplicadas en la detección de iones metálicos en medio acuoso".



Figura 66. Participación como asistente en el 1er Congreso Estatal de Ciencias e Ingeniería de los Materiales".



Figura 67. Asistencia al curso "Buenas prácticas para el control de calidad del concreto y principales materiales de construcción".



Figura 68. Participación como expositor del cartel “Determinación de propiedades en estado fresco y endurecido de morteros modificados con bis(2-hidroxipropil) tereftalato y agregado fino reciclado de cerámicos”.



Figura 69. Participación como expositor del cartel “Determinación de propiedades en estado fresco y endurecido de morteros modificados con bis(2-hidroxipropil) tereftalato y agregado fino reciclado proveniente de cerámicos residuales”.



Figura 70. Participación con el video “Laboratorio en acción: elaboración de morteros con agregado fino reciclado”.



Figura 71. Participación con el video “Morteros con agregado fino natural vs agregado fino reciclado de cerámico, ¿puedes notar la diferencia?”.



Figura 72. Participación como instructor del taller “De residuo a recurso: fabricación de morteros con agregado fino reciclado”.



Figura 73. Participación como expositor de cartel en el “44 Congreso Internacional de Metalurgia y Materiales” con el trabajo titulado: “Caracterización física de un agregado fino reciclado a partir de losetas cerámicas para uso en morteros”.



Figura 74. Participación como expositor de cartel en el “44 Congreso Internacional de Metalurgia y Materiales” con el trabajo titulado: “Evaluación de características físicas de un nuevo agregado fino con agregado proveniente de tereftalato de polietileno”



Figura 75. Participación como ponente con el proyecto titulado “Análisis de propiedades mecánicas en morteros con agregado fino reciclado de cerámico”.



Figura 76. Participación como ponente con el proyecto titulado “Propiedades mecánicas de morteros con agregado fino reciclado de PET”.



Figura 77. Participación en el curso "Reglas de la IA: cómo usarla sin correr riesgos legales.



Figura 78. Asistencia al taller “Evaluación de revistas científicas: Latindex, DOAJ y otros índices Open Access”.



Figura 79. Realización del curso “SanaMente LibreMente: jóvenes por la paz y contra las adicciones”.



Figura 80. Asistencia al curso “Microscopía Electrónica de Barrido” impartido por la Escuela Virtual de Caracterización de Materiales.



Figura 81. Participación como expositor del cartel “Fabricación y determinación de las características físicas y distribución granulométrica de un agregado fino reciclado procedente de RCD’s”.



Figura 82. Participación como asistente del taller “Del electrón a la pantalla, descubriendo lo grandioso de lo pequeño”.



Figura 83. Participación como asistente del taller “Manejo de imágenes y gráficas para documentos científicos”.



Figura 84. Participación como asistente del 2º Congreso Estatal de Ciencia e Ingeniería de los Materiales.



Figura 85. Participación como expositor de póster en el 2º Congreso Estatal de Ciencia e Ingeniería de los Materiales.