

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA

COLEGIO DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

Facultad de Ingeniería Mochis

Programa de Maestría en Ciencias de la Ingeniería



***“Pasta de cemento modificado con tereftalato de bis-2-hidroxipropilo
producto del reciclaje de PET”***

TESIS

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

Presenta

Arq. Etzna Alicia Meza Apodaca

Director de tesis

Dr. Jorge Luis Almaral Sánchez

Codirector de tesis

Dra. Francisca Guadalupe Cabrera Covarrubias

Los Mochis, Sinaloa, noviembre de 2024



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

UAS-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 Atribución-No Comercial
Compartir Igual, 4.0 Internacional



AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma de Sinaloa (UAS) por otorgarme acceso a sus instalaciones y equipos para la realización de este trabajo de investigación. A la Facultad de Ingeniería Mochis y al Posgrado en Ciencias de la Ingeniería, por darme la formación en mis estudios de Maestría y las facilidades en utilizar sus laboratorios y equipamiento, para la realización de mi tesis.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCyT) por la beca de manutención otorgada con numero de No. CVU: 1230905, mediante el Programa Nacional de Doctorado.

Al Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C. (CIMAV), en Chihuahua por su disponibilidad y auxiliarnos en los análisis de espectroscopía, termogravimetría, SEM-DSC y de resistencia térmica.

Al Dr. Jorge Luis Almaral Sánchez y mi asesor, compañero y amigo M.C Adrián Bórquez Mendivil por su dedicación y paciencia contribuyeron a mi experiencia en el complejo y gratificante camino de la investigación, sin sus palabras y correcciones precisas no hubiese podido lograr llegar a este logro tan anhelado. Gracias por su guía y sus consejos, los llevaré grabados para siempre en mi memoria. A la Dra. Francisca Guadalupe Cabrera Covarrubias como codirectora, por su gran aportación y dedicación en el desarrollo de este trabajo de investigación.

A mis sinodales Dr. Ramón Álvaro Vargas Ortiz, Dr. Joaquín Flores Valenzuela, Dra. Blanca Alicia García Grajeda y al Dr. Abel Hurtado Macías, por su orientación y dedicación durante el desarrollo de esta investigación.

A mis compañeros de posgrado y profesores en el transcurso de mi maestría, que me ayudaron, enseñaron y apoyaron alguna vez en esta aventura, siempre estarán presentes.

A mi amiga y familia Fabiola Ninnette Avila Guzmán por la traducción del Resumen, siempre apoya a la familia en los proyectos y locuras, gracias prima.

A mis compañeros del grupo de trabajo Aimé, Andrea, Daniel, Mariela y Ricardo, los cuales se han convertido en mis amigos y cómplices. Gracias por las horas compartidas y los

momentos de alegría durante este largo y retador camino. Cada uno de ustedes ha contribuido a mi fortaleza y ánimo de una manera u otra. Su apoyo, confianza, soporte y cariño han sido invaluable. Aparte de la experiencia de la maestría me llevo grandes amigos.

DEDICATORIA

A mi familia

En primer lugar, le agradezco a mi esposo, Jorge Guzmán por su apoyo incondicional para poder cumplir mis objetivos personales, profesionales y académicos. Su fe en mi incluso en los momentos más difíciles ha sido el soporte principal para este logro. Mor has creído más en mí de lo que yo he creído, contigo es mi único lugar seguro y feliz, te amo.

También expreso mi gratitud eterna a mis padres Clara Apodaca y Raymundo Meza, quienes supieron brindarme su tiempo para cuidar de los más preciado para mí, mis hijos, su amor incondicional y paciencia me han ayudado a subir un escalón más. Gracias infinitas a mi familia que estuvo cuando más los necesite, sin ustedes, esto no habría sido posible.

Y, por último, a mis hijos Enrique Alonso y Laura Alicia, los mejores proyectos que he hecho en mi vida y la razón por la que sigo esforzándome cada día. Hijos espero ser un ejemplo a seguir y se sientan orgullosos de mí y mis logros, quiero demostrarles que todo se puede con dedicación, esfuerzo y paciencia. Perdónenme por los momentos que no pude estar a su lado, las cosas olvidadas y los días de cansancio, pero tengan en todo momento presente, que ustedes siempre serán mi prioridad, ante todo, esto es por ustedes mis bebés, los amo inmensamente.

RESUMEN

Esta tesis trata sobre la elaboración de una pasta de cemento modificado con tereftalato de bis-2-hidroxipropilo (BHPT) producto del reciclaje de PET. El experimento consistió en la síntesis del BHPT, a partir del reciclado mecánico y químico del PET (despolimerización por glicólisis). Se elaboraron pastas de cemento, una de referencia (PR) y seis modificadas (PMB), con adición de BHPT (0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 y 3.0 % respecto al peso del cemento, sin ningún agente modificador) de acuerdo con ASTM C 305-19. El PET y el BHPT se caracterizaron por FT-IR. Las pastas se caracterizaron por fluidez, FT-IR, TGA-DSC, conductividad térmica, resistividad eléctrica, absorción de agua, DRX, SEM y EDS y resistencia a compresión. De los resultados obtenidos se encontró que el BHPT modificó molecularmente la pasta de cemento (FT-IR). En las pastas de cemento fue demostrado que la PMB0.5 fue la muestra óptima debido a que su valor de fluidez fue similar a la de PR (ASTM C 230-20), el BHPT influyó en menor medida en conductividad térmica y en el desarrollo de los productos de hidratación, AFm, AFt, CSH y CH (TGA-DSC), las pastas PMB0.5, PMB1.5 y PMB2.0 fueron las de mayor resistividad eléctrica que PR (método de las dos sondas); El BHPT influyó positivamente en la generación e incremento de los productos de hidratación (DRX), para formar una red de entrecruzamiento BHPT-CSH (SEM y EDS) y redujo sustancialmente la absorción de agua (ASTM C1585-20), PMB0.5 y PMB1.5 presentaron mayores incrementos en la resistencia a la compresión (ASTM C109/C-709M -21), con respecto a PR.

La hipótesis se cumplió de manera amplia y la PMB0.5 fue la más aceptable porque sus propiedades fueron similares o superiores a las de PR.

Palabras Clave: Pasta de cemento modificado, PET reciclado, tereftalato de bis-2-hidroxipropilo, despolimerización por glicólisis.

ABSTRACT

This thesis deals with the elaboration of a cement paste modified with bis-2-hydroxypropyl terephthalate (BHPT) from PET recycling. The experiment consisted of the synthesis of BHPT from the mechanical and chemical recycling of PET (depolymerization by glycolysis). Cement pastes, one reference (PR) and six modified (PMB), were produced with the addition of BHPT (0.5, 1.0, 1.5, 1.5, 2.0, 2.5 and 3.0 % by weight of cement, without any modifying agent) according to ASTM C 305-19. PET and BHPT were characterized by FT-IR. The pastes were characterized by fluency, FT-IR, TGA-DSC, thermal conductivity, electrical resistivity, water absorption, XRD, SEM and EDS and compressive strength. From the results obtained it was found that BHPT molecularly modified the cement paste (FT-IR).

In the cement pastes it was demonstrated that PMB0.5 was the optimum sample because its fluency value was similar to that of PR (ASTM C 230-20), the BHPT influenced to a lesser extent in thermal conductivity and in the development of hydration products, AFm, AFt, CSH and CH (TGA-DSC), the pastes PMB0.5, PMB1.5 and PMB2.0 were those with higher electrical resistivity than PR (two-probe method); BHPT positively influenced the generation and increase of hydration products (DRX), to form a BHPT-CSH crosslinking network (SEM and EDS) and substantially reduced water absorption (ASTM C1585-20), PMB0.5 and PMB1.5 presented greater increases in compressive strength (ASTM C109/C-709M -21), with respect to PR.

The hypothesis was broadly fulfilled and PMB0.5 was the most acceptable because its properties were similar or superior to those of PR.

Keywords: Modified cement paste, recycled PET, bis-2-hydroxypropyl terephthalate, depolymerization by glycolysis.

OBJETIVOS

Objetivo General

Elaborar una pasta de cemento modificada con tereftalato de bis-2-hidroxipropilo producto del reciclaje de PET que mejore o iguale las propiedades de la pasta de cemento convencional.

Objetivos Específicos

Obtener hojuelas de PET mediante reciclado mecánico, que incluye recolección, corte, limpieza y trituración de botellas posconsumo.

- Sintetizar el BHPT, mediante reciclado químico de hojuelas de PET, por medio de glicólisis.
- Elaborar probetas bajo la norma ASTM C305-19, de referencia (PR) y pastas modificadas (PMB) con 0.50, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 y 3 % de BHPT.
- Evaluar la fluidez de las pastas PR y PMB bajo las normas ASTM C230-19 y C305-19.
- Identificar los enlaces característicos de PET y BHPT, por espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR).
- Identificar la formación de productos de hidratación en las pastas modificadas (PMB) por medio de la identificación de los enlaces característicos (FT-IR) y picos de difracción (DRX).
- Evaluar la resistencia mecánica a compresión de PR y PMB con la norma ASTM C109-21.
- Evaluar la durabilidad de PR y PMB, al medir su conductividad térmica, resistividad eléctrica y absorción de agua, mediante la norma ASTM D7984-21, método de las dos sondas y la norma ASTM C1585-20, respectivamente.

- Evaluar el grado de hidratación por medio de análisis termogravimétrico (TGA), calorimetría diferencial de barrido (DSC), observar la morfología por microscopio electrónico de barrido (SEM) y espectroscopía de energía dispersiva (EDS) de PR y PMB.
- Analizar los resultados y elaborar las conclusiones pertinentes.

ÍNDICE

Carta Repositorio Institucional.....	ii
Carta cesión de derechos del estudiante	iii
Carta cesión de derechos del director de tesis	iv
Aprobación de tema y comité de tesis	v
Carta de liberación de tesis.....	vi
AGRADECIMIENTOS.....	vii
RESUMEN.....	ix
ABSTRACT	x
OBJETIVOS.....	xi
ÍNDICE.....	xiii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xvi
ÍNDICE DE FIGURAS	xvii
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Generalidades.....	1
1.1.1 Aglutinantes hidráulicos.....	1
1.1.2 Cemento Portland.....	1
1.1.3 Pasta de cemento modificada con polímeros.....	2
1.1.4 Tereftalato de bis-2-hidroxi-propilo (BHPT).....	2
1.1.5 Reciclaje del PET	3
1.2 Antecedentes y estado del arte	4
2 ASPECTOS TEÓRICOS.....	7
2.1 Compuestos del cemento Portland.....	7
2.2 Hidratación del cemento	8

2.3	Productos de hidratación.....	10
2.4	Polímeros	12
2.4.1	Clasificación de polímeros	12
2.5	Polimerización.....	14
2.5.1	Polimerización por radical libre	14
2.5.2	Polimerización por condensación.....	15
2.6	Despolimerización por solvólisis	16
2.6.1	Glicólisis y su mecanismo de reacción en la estructura química del PET.	17
2.7	PET, estructura y propiedades.....	18
2.7.1	Síntesis del PET.....	19
3	METODOLOGÍA.....	20
3.1	Material requerido.....	20
3.2	Infraestructura	20
3.2.1	Equipo menor	20
3.2.2	Equipo mayor	21
3.3	Experimento	25
3.3.1	Reciclado mecánico y químico.....	26
3.3.2	Elaboración de probetas con pastas de cemento modificado	29
3.4	Técnicas de caracterización.....	30
3.4.1	Fluidez	30
3.4.2	FT-IR de BHPT y PET	31
3.4.3	FT-IR de PR y PMB.....	32
3.4.4	Análisis termogravimétrico (TGA) y calorimetría diferencial de barrido (DSC)	32

3.4.5	Conductividad Térmica	33
3.4.6	Resistividad eléctrica.....	34
3.4.7	Velocidad de absorción de agua	35
3.5	Difracción de rayos X (DRX)	37
3.6	Microscopía electrónica de barrido (SEM) Y espectroscopía de energía dispersiva (EDS)	38
3.6.1	Resistencia a la compresión.....	38
4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	40
4.1	Propuesta de interacción BHPT - CSH	40
4.2	FT-IR	43
4.2.1	PET y BHPT	43
4.2.2	PR y PMB.....	44
4.3	Fluidez	48
4.4	TGA y DSC	50
4.5	Conductividad térmica	56
4.6	Resistividad eléctrica	57
4.7	Absorción de agua.....	58
4.8	DRX	59
4.9	SEM y EDS	64
4.10	Resistencia a compresión	72
5	CONCLUSIONES.....	74
6	BIBLIOGRAFÍA	75
7	ANEXOS	79

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Nomenclatura de la composición química del cemento Portland utilizada.	7
Tabla 2.2. Abreviación de los componentes más importante del cemento.....	7
Tabla 2.3. Compuestos originados durante la hidratación del cemento.	8
Tabla 3.1. Dosificaciones de las PMB.....	30
Tabla 4.1. Porcentajes de peso con referencia a los productos de hidratación AFm, AFt y CSH de pastas de cemento de PR y PMB0.5, PMB1.0, PMB1.5, PMB2.0, PMB2.5 y PMB3.0 a 28 días de hidratación.....	51
Tabla 4.2. Porcentajes de pérdida de peso atribuido a CH en un rango de 400-500 °C, en pasta de referencia y pastas modificadas con BHPT (0.50, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 y 3.0%) a 28 días de hidratación.....	52
Tabla 7.1. Compendio de constancias de actividades realizadas en el periodo de desarrollo de tesis.....	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Esquema de la reacción al sintetizar PET+PG.....	3
Figura 2-1. Esquema de las diferentes etapas de reacciones del mecanismo de hidratación de una partícula de cemento: C3S silicato tricálcico, C2S silicato dicálcico, C3A aluminato tricálcico, C4AF aluminoferrita tetracálcica, C-S-H silicato cálcico hidratado, AFt trisulfoaluminato cálcico hidratado, AFm monosulfoaluminato cálcico hidratado [1].	10
Figura 2-2. Ejemplo esquemático de estructuras de polímeros [10]: a) lineal, b) ramificado, c) estrella, d) peine, e) escalera, f) semi-escalera y g) red.....	13
Figura 2-3. Esquema de reacción en polimerización a) por adición (radical libre) y b) condensación (por etapas) [12].....	14
Figura 2-4. Esquema de polimerización por adición.	15
Figura 2-5. Esquema de polimerización por condensación.	16
Figura 2-6. Proceso esquemático de la solvólisis.	16
Figura 2-7. Esquema de reacción en una transesterificación.....	17
Figura 2-8. Esquema de la despolimerización por medio de glicólisis.	18
Figura 2-9. Estructura química del grupo éster.....	18
Figura 2-10. Estructura química del PET, con ubicación del grupo funcional éster.	19
Figura 2-11. Esquema de la síntesis del PET.....	19
Figura 3-1. Moldes para pasta de cemento, a)Moldes cilíndricos, b)Moldes de PVC y c) Moldes metálicos.	21
Figura 3-2. Equipo menor utilizado en el experimento, d) Parrilla con temperatura, e) Desecador y f) Multímetros.	21
Figura 3-3. Equipo mayor utilizado en el experimento, ubicado en el laboratorio de química ambiental, a) reactor tipo Vessel, b) bomba de vacío y c) fuente de poder.	22

Figura 3-4. Equipo mayor utilizado en el experimento, ubicado en el laboratorio de electrocerámicos y compósitos reciclados, a) mezcladora eléctrica b) mesa de fluidez, c) horno de secado, d) balanza analítica e) horno de secado y f) cámara de saturación de agua.....	23
Figura 3-5. Trituradora industrial.	23
Figura 3-6. Prensa hidráulica universal.	24
Figura 3-7. Equipo mayor ubicado en las instalaciones de CIMAV, a) espectrómetro, b) Difractómetro, c) equipo simultaneo TGA y equipo de medición TC, d) Unitherm, y e) microscopio electrónico de barrido.....	25
Figura 3-8. Esquema general del Proceso del experimental.....	25
Figura 3-9. Proceso de triturado de botellas de PET posconsumo a) botellas de PET posconsumo, b) (retiro de etiquetas y tapones, c) tiras de PET y d) PET en cuadros pequeños, e) hojuelas en trituradora, f) hojuelas de ½”.....	26
Figura 3-10. Proceso de glicólisis de las hojuelas de PET, a) hojuelas de PET, b) reactor tipo Vessel y c) BHPT líquido.....	27
Figura 3-11. Purificación del BHPT, a) en mezclar etanol y THF y b) después se adicionó el BHPT.....	27
Figura 3-12. Proceso de lavado de BHPT purificado, a) Al BHPT se le añadió agua y b) se repitió este proceso dos veces más.....	28
Figura 3-13. Proceso de filtrado de BHPT purificado y lavado, a) monómero en embudo Buchner y b) de 3 a 4 horas.	28
Figura 3-14. Eliminación de solventes en BHPT por medio de secado en horno, a) horno a 60 °C y b) se obtuvo BHPT.	29
Figura 3-15. Elaboración de la pasta de cemento, a) diluir los materiales líquidos, b) los líquidos se agitaron y c) se agregó al cemento.	29
Figura 3-16. Muestras de pasta de cemento en recipiente con agua.....	30

Figura 3-17. Proceso para la elaboración de la prueba de fluidez, a) se colocaron los materiales en la mezcladora, b) se mezcló, c) colocó en el cono con espátula, d) se llenó el cono y se enrasó, e) en reposo y f) se midieron los diámetros.....	31
Figura 3-18. Esquema general de la primera pérdida (AFm, AFt y CSH) y de la deshidratación del CSH, como ejemplo el termograma de pasta de referencia (PR).	33
Figura 3-19. Medición de la resistividad eléctrica de las pastas de cemento de referencia y modificadas con BHPT, a) Se utilizaron dos electrodos de acero inoxidable, b) se colocaron en contacto con un paño y c) se creó un flujo de corriente.	34
Figura 3-20. Diagrama de flujo de corriente y voltaje.....	35
Figura 3-21. Primera etapa, acondicionamiento de las muestras, para la prueba de velocidad de absorción de agua, a) se calentó agua, b) se disolvió 20 gr de KBr, c-d) se colocaron las pastillas en el recipiente, e) se introdujeron en el horno de secado y f) se empaquetan.	36
Figura 3-22. Esquema de cámara de absorción de agua.	36
Figura 3-23. Proceso para prueba de velocidad de absorción, a) las caras cilíndricas fueron cubiertas con cinta, b) se registró el peso inicial, c-d) se sumergió la cara libre de las probetas y e) se registró la masa.....	37
Figura 3-24. Proceso de prueba de compresión de pastas de cemento de referencia y modificadas, a) se colocaron en horno y b-d) las muestras secas se probaron en la prensa.	39
Figura 4-1. Esquema de interacción molecular de los grupos hidroxilo del BHPT con iones de OH ⁻ y Ca ²⁺ en la solución interfacial.	40
Figura 4-2. Esquema de la interacción del BHPT con los iones OH ⁻ de la solución acuosa interfacial.	41
Figura 4-3. Esquema de la interacción BHPT con los iones Ca ²⁺	42

Figura 4-4. Esquema de granos de cemento hidratado, con la microestructura formada por el BHPT entre los microporos de la solución interfacial de la pasta de cemento	43
Figura 4-5. Espectro FT-IR de PET y BHPT.....	44
Figura 4-6. Espectros de FT-IR de pasta de referencia y pastas modificadas con BHPT (0.50, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 y 3.0% de BHPT) a 28 días de hidratación.	45
Figura 4-7. Espectros de FT-IR de PR y PMB, correspondiente a la R1 con número de onda en el rango 4000-2000 cm^{-1}	46
Figura 4-8. Espectros de FT-IR de PR y PMB, correspondiente a la R2 con número de onda en el rango 4000-2000 cm^{-1}	47
Figura 4-9. Espectros de FT-IR de PR y PMB, correspondiente a la R3 con número de onda en el rango 660-480 cm^{-1}	48
Figura 4-10. Resultado de fluidez de pastas de cemento PR y PMB.....	49
Figura 4-11. Termograma de pasta de cemento PR y pastas modificadas con BHPT (0.50, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 y 3.0%) a 28 días de hidratación.	50
Figura 4-12. TGA y DSC de muestra PR (0% de BHPT)	52
Figura 4-13. TGA y DSC de muestra PMB0.5 (0.5% de BHPT).....	53
Figura 4-14. TGA y DSC de muestra PMB1 (1.0% de BHPT).....	53
Figura 4-15. TGA y DSC de muestra PMB1.5 (1.5% de BHPT).....	54
Figura 4-16. TGA y DSC de muestra PMB2 (2.0% de BHPT).....	54
Figura 4-17. TGA y DSC de muestra PMB2.5 (2.5% de BHPT).....	55
Figura 4-18. TGA y DSC de muestra PMB3 (3.0% de BHPT).....	55
Figura 4-19. Conductividad térmica de pastas de cemento de PR y PMB0.5, PMB1.0, PMB1.5, PMB2.0, PMB2.5 y PMB3.0 a 28 días de hidratación y pasta de cemento con látex (PR-Látex), pasta de cemento con monómero BHET (PR-BHET) y mortero con BHET (MOR-BHET.	56

Figura 4-20. Resistividad eléctrica de PR y PMB0.5 , PMB1, PMB1.5, PMB2, PMB2.5 y PMB3 a 28 días de hidratación.....	58
Figura 4-21. Gráfica de velocidad de absorción de agua PR y PMB0.5, PMB1, PMB1.5, PMB2, PMB2.5 y PMB3 a 28 días de hidratación.....	59
Figura 4-22. Difractogramas de rayos X de pastas de cemento de PR y PMB0.5, PMB1.0, PMB1.5, PMB2.0, PMB2.5 y PMB3.0 a 28 días de hidratación.	60
Figura 4-23. Ampliación del pico más intenso de la portlandita $2\theta = 18.1^\circ$	61
Figura 4-24. Ampliación del pico más intenso de la calcita de 29.5°	62
Figura 4-25. Ampliación del pico más intenso de cuarzo de 26.7°	63
Figura 4-26. Ampliación de pico más intenso de etringita de 15.8°	64
Figura 4-27. Micrografía obtenida por SEM y el análisis elemental, por EDS, de PR. A) 10.00K de aumentos y B) 20.0K de aumentos.	65
Figura 4-28. Morfología con SEM y el análisis elemental con EDS de PMB0.5, A) 5.00K de aumentos y B) 10.0K de aumentos.	66
Figura 4-29. Morfología con SEM y el análisis elemental con EDS de PMB1.5, A) 5.00K de aumentos, B) 10.0K de aumentos y C) 20.0K aumentos.	67
Figura 4-30. Morfología con SEM y el análisis elemental con EDS de PMB3, A) 10.00K de aumentos y B) 15.0K de aumentos.	68
Figura 4-31. Comparación de micrografías con SEM de PR, PMB0.5, PMB1.5 y PMB3.....	69
Figura 4-32. Comparación de micrografías y análisis elemental del CH, por EDS en pastas PR, PMB0.5, PMB1.5 y PMB3	70
Figura 4-33. Comparativo de productos de hidratación de pastas PR y PMB0.5, por micrografías de SEM.	71
Figura 4-34. Comparativo de productos de hidratación de pastas PMB0.5, PMB1.5, PMB2.5 y PMB3 por micrografías de SEM.	72

Figura 4-35. Resistencia a la compresión de pasta de cemento de PR y PMB0.5, PMB1.0, PMB1.5, PMB2.0, PMB2.5 y PMB3.0 a 28 días de hidratación.	73
Figura 7-1. Constancia de asistencia.....	80
Figura 7-2. Constancia participación en laboratorio.....	80
Figura 7-3. Constancia de demostración de laboratorio.	81
Figura 7-4. Constancia de participación en cartel.....	81
Figura 7-5. Constancia demostración de laboratorio.	82
Figura 7-6. Constancia como expositor de cartel.	82
Figura 7-7. Constancia de participación demostración de laboratorio.	83
Figura 7-8. Constancia de asistencia de conferencia online.	83
Figura 7-9. Constancia como asistente al webinar.	84
Figura 7-10. Constancia de participación en el STAFF de congreso.	84
Figura 7-11 Constancia en participación como expositor de cartel.....	85
Figura 7-12. Constancia de asistencia.....	85

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Generalidades

1.1.1 Aglutinantes hidráulicos

Los aglutinantes hidráulicos son unas sustancias que endurecen, para unir y aglomerar materiales sólidos o sobre una superficie de contacto, al generar cohesión y una mejor resistencia al material. Presentan una clasificación según su afinidad por el agua, que se describe a continuación [1]:

- Hidrofilico, es una sustancia inorgánica sólida que reacciona químicamente con el agua y se divide en dos tipos: 1) aéreo, el cual endurece al adicionarle agua y en contacto con el aire, pero una vez endurecida, no es estable en agua; ejemplos, el yeso y la cal aérea, que pueden formar cerámicos y morteros. 2) hidráulico, que endurece al adicionarle agua y en contacto con el aire y una vez endurecida, es estable en aire y bajo el agua; ejemplos, cemento, cal hidráulica y escoria de alto horno, que pueden formar concreto, mortero y lechada hidráulica.
- Hidrofóbico, sustancia orgánica que endurece por tratamiento térmico donde no interviene el agua, es viscoso y al endurecer el material repele el agua. Como ejemplo están algunos polímeros (pegamentos y resinas), que pueden formar impermeabilizantes, pavimentos y recubrimientos de superficie.

1.1.2 Cemento Portland

El cemento Portland es un polvo mineral de la mezcla de piedra caliza, arcilla y otros minerales, conocido como clínker, al cual se le adiciona sulfato de calcio (yeso). Este polvo fragua, al formar una pasta con el agua, endurece progresivamente en aire o agua, donde se producen reacciones de hidratación que originan el endurecimiento de la pasta, por lo que se le conoce como aglutinante hidráulico. El cemento genera una masa sólida y no cohesiva, este es el componente principal en el concreto o mortero [1,2].

El proceso de hidratación del cemento Portland corresponde a reacciones que ocurren al mezclar el cemento con el agua, cuyas variables son, la metodología para su elaboración, tiempo y temperatura. Este proceso inicia desde los primeros minutos del mezclado y

concluye a los 28 días de manera convencional, tiempo que se ha estudiado, alcanza su máxima resistencia a la compresión, sin embargo, puede continuar incrementándose posteriormente, en porcentaje mínimo [1–3].

1.1.3 Pasta de cemento modificada con polímeros

La pasta de cemento está compuesta por agua, cemento y aire (naturalmente atrapado o intencionalmente incluido), quien proporciona la resistencia de acuerdo con el tipo de cemento utilizado y puede formar parte de la estructura del concreto o del mortero. La pasta actúa como lubricante de los agregados, lo que proporciona fluidez en la mezcla, permite una adecuada colocación y acomodo del concreto o mortero, ya que un alto grado de confinamiento proporciona mayor resistencia [4,5].

Una pasta de cemento modificada con polímero (PCMP) es la que está constituida por una mezcla de cemento Portland, agua y polímero (parcialmente sustituye al cemento). Cuando el mortero o concreto está constituido sólo de agregados y polímeros se denomina mortero o concreto polimérico y cuando se forman de agregados, cemento Portland, agua y polímero, se denomina mortero o concreto modificado con polímero (CMP). Cuando los ligantes poliméricos sustituyen sólo parcialmente a la matriz o se utilizan como modificadores de la misma, se produce un material híbrido orgánico-inorgánico [1,4–6].

En la propuesta que se presenta, se elaborará una pasta de cemento modificada con tereftalato de bis-2-hidroxi-propilo (BHPT), producto del reciclaje físico y químico del PET y se producirá un material híbrido orgánico (BHPT)-inorgánico (pasta de cemento).

1.1.4 Tereftalato de bis-2-hidroxi-propilo (BHPT)

En la Figura 1-1 se muestra la reacción química que da lugar al tereftalato de bis-2-hidroxi-propilo (BHPT) ($C_{14}H_{18}O_6$), por medio de la transesterificación, al despolimerizar la molécula del PET para obtener su monómero, esta consiste en la escisión de los enlaces de los ésteres por el oxígeno que proviene del propilenglicol (PG), al agregar los grupos hidroxilos como terminales funcionales, por lo que forma alcoholes como residuo, con los catalizadores de temperatura de 180°C y acetato de zinc. El BHPT se compone por un 1,4-

bencenodicarboxilato en el centro de la molécula, con un grupo hidroxipropilo en cada extremo, característica que le proporciona el prefijo bis [7–10].

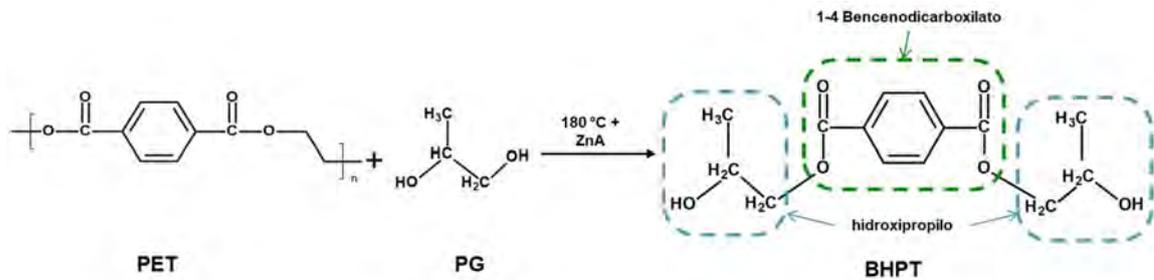


Figura 1-1. Esquema de la reacción al sintetizar PET+PG.

1.1.5 Reciclaje del PET

El reciclaje es la modificación de desechos por medio de distintos procesos, que permiten un ahorro de energía, materias primas o la mejora de algún elemento; el reciclar es lo más factible para el manejo de residuos, que no son posible reutilizarlos o disminuir su consumo. El PET, uno de los polímeros con mayor presencia en los desechos en el mundo, tiene un valor añadido, ya que a diferencia de otros materiales contaminantes y de lenta degradación, tiene la ventaja de su reciclado, ya sea en su forma base o modificándolo químicamente [11].

El reciclaje de PET comprende dos etapas: 1) mecánico, esta implica la reutilización del polímero por procesos físicos, que incluyen lavado, clasificación, trituración (en diferente presentación como fibras, hojuelas y polvos), con el fin de fabricar productos del mismo material. Cuanto más desgaste presente, causará más problemas para usarlo como materia prima, por la heterogeneidad en los residuos, en su forma, color o elemento externo añadido, 2) químico, conocido como una descomposición de la cadena polimérica, en el caso del PET, en grupos de aminas, ácidos, alcoholes, agua y glicoles. Se obtiene como resultado, monómeros u oligómeros, que pueden purificarse para generar material de origen, uno de los métodos más utilizados es la despolimerización por solvólisis [12–14].

1.2 Antecedentes y estado del arte

Algunos polímeros son ecológicos y reciclables, lo que ha permitido que se usen por completo o como parte de materiales de construcción, con aportación de mejora a sus propiedades. Se han usado como sustituto de agregados finos y de cemento, así como aditivo líquido, hojuelas y fibras, en pastas de morteros y concretos [15–17].

Los polímeros tienen influencia en la PCMP, por su solubilidad, debido a que algunos son hidrófobos, por lo que reducen la trabajabilidad en la mezcla o poseen alta viscosidad (aglomeración de partículas), por lo que se pueden agregar superplastificantes y/o antiespumantes [18]. Se ha observado que al modificar pastas de cemento con polímero látex caucho de estireno-butadieno (SBR), éster poliacrílico (PAE) y acetato de vinilo-etileno (VAE), a pesar de ser insolubles en agua, influyeron en la disminución de la cantidad, distribución y tamaño del poro [19]. Una pasta de cemento con éster poliacrílico (PAE) presentó resistencia al ataque de sulfatos mayor al 50% que la pasta de referencia [20]. A una pasta de cemento se le adicionó copolímero de estireno-acrilato de butilo (SBA) (3, 5 y 7%), con un agente antiespumante y superplastificante, con lo que mejoró su contenido de aire, su resistencia mecánica, adhesión, homogeneidad y retraso de hidratación (SEM), con más producción de CSH (DRX) [21]. La pasta de cemento adicionada con polivinilo alcohol (PVA), soluble en agua (0.016% de PCMP) y un superplastificante, mostró (SEM) sustancial incremento de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en los poros de la superficie ocupados anteriormente por aire, lo que mejoró sus propiedades, como la trabajabilidad y adherencia [22]. Un mortero con adición de PVA (0.6%, en peso del cemento) y antiespumante, presentó refinamiento de poros (SEM), que creó pequeños puentes para transferencia de carga, aceleró la tasa de hidratación del cemento, que fue menor a la pasta de referencia y se observó que fue reducida con una incorporación excesiva de PVA (TGA-DSC), el PVA le confirió resistencia a la corrosión química, mayor retención de agua y fluidez, incremento en sus propiedades mecánicas, que disminuyeron conforme aumentó su contenido [23]. En una simulación dinámica molecular de SiO_4 , contenidos en el silicato de calcio hidratado (CSH) con los grupos hidroxilos (OH) del PVA, se confirmó un enlace de hidrógeno y una esfera de coordinación del ion Ca^{+2} , la cual es la región idónea para que se produzca un enlace covalente (O-Ca) [24].

La pasta de cemento modificada con éter diglicídico de bisfenol-A (polímeros hidrofílico) con antiespumante y un agente de curado, mostró disminución de poros y microfisuras (SEM) y se observó la interacción del polímero y la pasta de cemento (FT-IR), sin embargo, no hubo cambio significativo en la generación de los productos de hidratación (DRX): hidróxido de calcio (CH), CSH, etringita (AFt) y monosulfato aluminato de calcio hidratado (AFm) [25].

El rendimiento de la PCMP varía mucho según la naturaleza y el tipo de polímeros, la dosificación de los componentes, la metodología de la mezcla [18] y la técnica de curado, por lo que también se han estudiado los polímeros reciclados químicamente bajo distintos catalizadores [5].

El tereftalato de 2-bis(hidroxietilo) (BHET), monómero hidrofílico (producto de PET despolimerizado con etilenglicol), fue endurecido y pulverizado a nanopartículas, para sustitución del agregado en la elaboración de un mortero, al que le redujo sustancialmente la resistencia mecánica de 31 a 69% y su conductividad térmica de 31 a 62%, respecto al mortero de referencia [26]. En una pasta de cemento se utilizó el politetrafluoroetileno (PTFE) en polvo, que es hidrófobo y no reciclable químicamente, como sustituto del cemento, con un superplastificante; se observó un contenido de CH semejante al de la referencia (TGA), sin diferencias en absorción de agua y resistividad eléctrica, se confirmó la presencia de productos de hidratación, CSH y CH (FT-IR y SEM-EDS) e incrementó la resistencia a compresión en 10-30%, [27]. En otros estudios se elaboraron pastas de cemento con BHET y tereftalato de dioctilo (DOPT), producto de la despolimerización del PET por alcoholisis, ambas con adición de superplastificante. Las pastas modificadas con BHET mostraron mayor uniformidad, ya que este monómero posee una gran compatibilidad con el agua, presentaron valores más altos con respecto a la pasta de referencia, en contenido de CH (grado de hidratación) y resistencia mecánica a compresión, para resistividad eléctrica no mostró cambios significativos y su conductividad térmica disminuyó conforme aumentó el BHET; por otra parte, en las pastas modificadas con DOPT, a pesar de no ser hidrofílico, mostraron un aumento en resistividad eléctrica y resistencia a compresión considerablemente en comparación con la muestra de control, pero una disminución de CH y conductividad térmica [13].

Los materiales cementicios estudiados (pastas, morteros y concretos) con adición o sustitución de un subproducto de reciclaje o polímero, en polvo o líquido, con y sin agentes modificadores como superplastificantes y antiespumantes, presentaron algunas mejoras en sus propiedades estudiadas, sin embargo, no cumplieron por completo, con igualar o superar a una pasta de cemento sin modificación. Estos estudios fueron tomados en cuenta para la metodología de elaboración de las muestras, en la propuesta que se presenta, se elaboró una pasta de cemento modificada con BHPT (hidrofilico), producto del reciclaje físico y químico del PET, sin agente modificador y en porcentajes pequeños (0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 y 3.0 % de BHPT) con referencia al peso de cemento, se sintetizó un material híbrido modificado químicamente: orgánico (BHPT)-inorgánico (pasta de cemento).

2 ASPECTOS TEÓRICOS

2.1 Compuestos del cemento Portland

La nomenclatura compleja de la composición química de los materiales que conforman el cemento Portland, se simplifica al evitar los óxidos, se coloca la primera letra de su fórmula química y la fase de hidratación donde reacciona. En la Tabla 2.1 se muestran estos compuestos mediante una notación simplificada, la cual difiere de la notación química habitual [2].

Tabla 2.1. Nomenclatura de la composición química del cemento Portland utilizada.

Óxido	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	CO ₂	H ₂ O
Símbolo	C	S	A	F	M	N	K	\bar{S}	\bar{C}	H

La Tabla 2.2 se muestran los compuestos más relevantes del cemento, su nombre científico, su composición química, abreviación y la fase de hidratación donde interviene el compuesto [2].

Tabla 2.2. Abreviación de los componentes más importante del cemento.

Compuesto	Composición	Abreviación	Fase de hidratación en la que interviene
Silicato tricálcico	3CaO•SiO ₂	C3S	Aceleración
Silicato dicálcico	2CaO•SiO ₂	C2S	Pos-aceleración
Aluminato tricálcico	3CaO•Al ₂ O ₃	C3A	Pre-inducción/pos-aceleración
Aluminoferrita tetracálcico	3CaO•Al ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃	C4AF	Pre-inducción/pos-aceleración
Sulfato de calcio	CaSO ₄	$C\bar{S}$	Pre-inducción
Yeso	CaSO ₄ •2H ₂ O	$C\bar{S}H_2$	Pre-inducción

De la tabla anterior, se describen los compuestos relacionados [1,2]:

- Silicato tricálcico (C₃S): sustancia que se hidrata y endurece más rápidamente, este componente es responsable del inicio del proceso de fraguado y de la resistencia inicial.
- Silicato dicálcico (C₂S): sustancia que se hidrata y endurece lentamente, por lo que genera la resistencia posterior, después de los 7 días.
- Aluminato tricálcico (C₃A): sustancia que tiene una reacción rápida con el agua y contribuye a desarrollar la resistencia inicial, por lo que genera una gran cantidad de calor

(en menor cantidad de aluminato tricálcico es más resistente a los sulfatos causante de la falta de adherencia entre las partículas).

- Aluminoferrita tetracálcico (C_4AF): se hidrata rápidamente y contribuye muy poco a la resistencia, el color gris del cemento se debe a este compuesto.
- Sulfato de calcio ($C\bar{S}$): también llamado yeso, retrasa la acción del fraguado rápido provocado por los aluminatos con el agua, éste se añade después de obtener el clinker.

2.2 Hidratación del cemento

En la Tabla 2.3 se muestran los compuestos importantes que se generan en el proceso de hidratación del cemento, su composición química, abreviación y la fase donde se origina [1]. Los hidróxidos de calcio, $Ca(OH)_2$ (portlandita, CH) e hidratos de silicato de calcio, $CaO \cdot SiO_2 \cdot H_2O$ (tobermorita, CSH), son los responsables de las características de resistencia del cemento hidratado. También se forma el sulfoaluminato de calcio hidratado, $C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 2H_2O$ (etringita, AFt) en pequeñas cantidades, el cual es potencialmente expansivo y con el tiempo, al perder iones el sulfato, forma monosulfoaluminatos de calcio hidratado, $C_3A \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O$ (AFm), más estable que la fase AFt [1].

Tabla 2.3. Compuestos originados durante la hidratación del cemento.

Compuesto	Composición	Abreviación	Fase donde se original
Hidróxido de calcio	$Ca(OH)_2$	CH	Aceleración
Silicato de calcio hidratado	$CaO \cdot SiO_2 \cdot H_2O$	CSH	Aceleración
Sulfoaluminato de calcio hidratado	$C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 2H_2O$	AFt	Pre-inducción
Monosulfoaluminato de calcio hidratado	$C_3A \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O$	AFm	Difusión limitada

En la Figura 2-1 se esquematiza el proceso de hidratación, que inicia al mezclar cemento con agua, mediante varias fases de reacciones exotérmicas, las cuales se diferencian por su velocidad y temperatura, lo que provoca cambios físicos, mecánicos y químicos en la mezcla, otorgándole propiedades adhesivas y cohesivas. Estas son cinco fases, que se describen enseguida [1,2,28]:

- Pre-inducción. Comienza con reacciones rápidas, principalmente (C_3A y C_4AF) + ($C\bar{S}$ y H) y forma una capa de gel de alúmina, alrededor de la partícula del cemento. En esta

etapa se forma volúmenes cortos aciculares de AFt formada de $C_3A \cdot C\bar{S} \cdot H_2O$, lo que da lugar a una intensa reacción exotérmica inicial.

- Inducción. Continúan las reacciones iniciales, pero a menor escala, con una liberación de calor irrelevante.
- Aceleración. Comienza aproximadamente después de 2 horas, se produce un incremento a la velocidad en las reacciones de hidratación, con liberación de calor, que alcanza su máximo a las 12 horas después de la fase inicial. En esta etapa, se forman los geles CSH exterior de la siguiente manera: primero, se hidratan los C_3S , lo que da lugar al fraguado, donde se pierde la plasticidad y se forma un material con prematura rigidez, baja resistencia mecánica, que puede absorber rápidamente las partículas de agua y para evitarlo se añade yeso, que actúa como regulador y permite la hidratación de otros constituyentes del cemento.
- Pos-aceleración. A las 18 horas aproximadamente después de la fase inicial, la velocidad de la reacción de hidratación baja, así como la liberación de calor. En esta etapa, se forman los geles CSH interior de la siguiente manera: se continúa la hidratación de los silicatos de calcio, con la contribución de C_2S , que expanden a los geles CSH y forman una envoltura que se denomina CSH interior. En una hidratación secundaria de aluminatos (C_3A y C_4AF), forman una fase AFt más acicular que los formados inicialmente.
- Difusión. Después de 24 horas aproximadamente de la fase inicial, la velocidad de hidratación se ralentiza notablemente, debido a que su forma rígida limita el proceso. Sin embargo, se continúa la formación de CSH interior a partir de C_2S y con base en AFt, se produce una nueva fase, monosulfoaluminato cálcico hidratado (AFm).

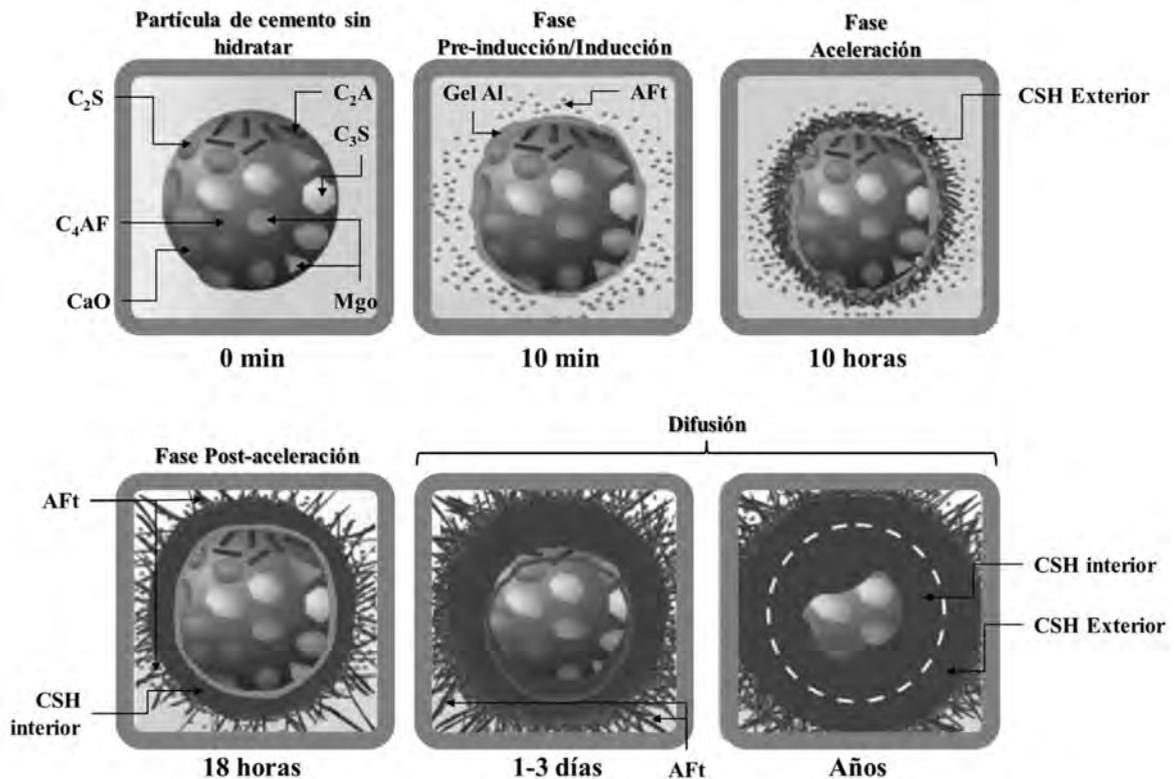


Figura 2-1. Esquema de las diferentes etapas de reacciones del mecanismo de hidratación de una partícula de cemento: C_3S silicato tricálcico, C_2S silicato dicálcico, C_3A aluminato tricálcico, C_4AF aluminoferrita tetracálcica, $C-S-H$ silicato cálcico hidratado, AFt trisulfoaluminato cálcico hidratado, AFm monosulfoaluminato cálcico hidratado [1].

2.3 Productos de hidratación

Los productos de hidratación generados en el proceso de hidrólisis del cemento y le otorgan las diferentes propiedades a la pasta de cemento endurecida, los más trascendentales se describen a continuación [1,2,10,29]:

- **CSH**

Los silicatos de calcio hidratados o tobermorita (CSH) son silicatos cálcicos que ha sufrido una reacción de hidratación a partir de los C_3S y C_2S en el periodo de aceleración, para convertirse en un gel aglutinante que constituye el 50-60% de las fases sólidas en la pasta de cemento Portland. Por sus interacciones moleculares (Van der Waals) inducen la cohesión y adhesión entre las diferentes fases producidas en la reacción, por lo que son responsables de la resistencia mecánica en la mezcla. Los CSH han sido difíciles de definir, por la evolución de su constitución coloidal y composición química, que depende de su fase líquida y su

concentración de iones de calcio, lo que provoca la transformación de su morfología en función del tiempo de hidratación [1,2]. Las fases de hidratación de los grupos de los CSH varían en un amplio rango de morfología que evoluciona. En últimos estudios, se introdujeron los nombres “CSH interior” y “CSH exterior”, estas dos fases son fáciles de distinguir por su morfología y tiempo de origen en la hidratación. El “interior” se forma del C_3S en el grano del cemento y cuando no está totalmente hidratado se puede distinguir del CSH, mientras que el “exterior” se crea en la zona entre los granos hidratados, donde se depositaba el agua [1,2,10,29].

- **CH**

El calcio hidratado o Portlandita (CH), surge de una reacción de hidratación a partir de los C_3S y C_2S en el periodo de aceleración, a su vez reacciona con el agua y los materiales puzolánicos del cemento para formar CSH. Tiene la función de rellenar los poros, por lo que disminuye la difusión de sustancias ajenas y en consecuencia aumenta la resistencia. Su microestructura en hojuelas lisas, es muy definida y fácil de identificar [1,2,10,29].

- **AFt y AFm**

En la pasta de cemento hidratada se pueden producir dos tipos de sulfoaluminato de calcio, contribuyen a la reducción de la porosidad y a reacciones químicas con sulfato. El trisulfoaluminato de calcio o etringita (AFt) se produce al reaccionar yeso, C_3A , iones de sulfato y agua, surge en el periodo de pre-inducción de hidratación del cemento, con una forma de cristales cortos, acicular y muy definida, se ha observado que se encuentra en los espacios vacíos de la pasta y se puede detectar por DRX después de una hora de hidratación [1][2]. El monosulfoaluminato cálcico hidratado (AFm), surge al disminuir la concentración de sulfatos en la mezcla, debido a que el yeso termina su reacción con los iones de aluminato $Al(OH_4)$, comienzan a reaccionar con el AFt y el agua, proceso que ocurre en el periodo de pos-aceleración de hidratación. El AFm se puede observar con una forma de cristales hexagonales, similar a estructuras de placas y ligado íntimamente con los geles de CSH [1,2,10,29].

2.4 Polímeros

Los polímeros son macromoléculas de alto peso molecular formadas por varias unidades estructurales llamadas monómeros (poli- muchos y meros-unidad), que están unidos por enlaces covalentes. Suelen tener alta resistencia y una temperatura de transición vítrea, se obtienen mediante una reacción química llamada polimerización [1–3].

Un oligómero es un polímero de muy bajo peso molecular, sólo está formado por un pequeño número de monómeros. Cuando en el polímero existen unidades repetitivas se conoce como homopolímero, pero cuando existen 2 o más tipos de monómeros, dímeros, trímeros, etc. unidos en la cadena, se le llama copolímero. También existen los telecíclicos, que son macromoléculas, pero con grupos funcionales reactivos diferentes en los extremos de la cadena [10].

2.4.1 Clasificación de polímeros

Los polímeros se pueden clasificar dependiendo de sus propiedades:

- **Origen.**

Los polímeros pueden ser, por su origen: a) naturales, que pueden ser producidos por el cuerpo humano (enzimas, ácidos nucleídos, proteínas) o biológico (almidón, celulosa, caucho); b) sintéticos, son fabricados y existen muchos grupos y subgrupos de estos (elastómeros, fibras, plásticos) [30].

- **Estructura molecular.**

En la Figura 2-2 se muestran las formas moleculares más comunes de los polímeros [10,30]:

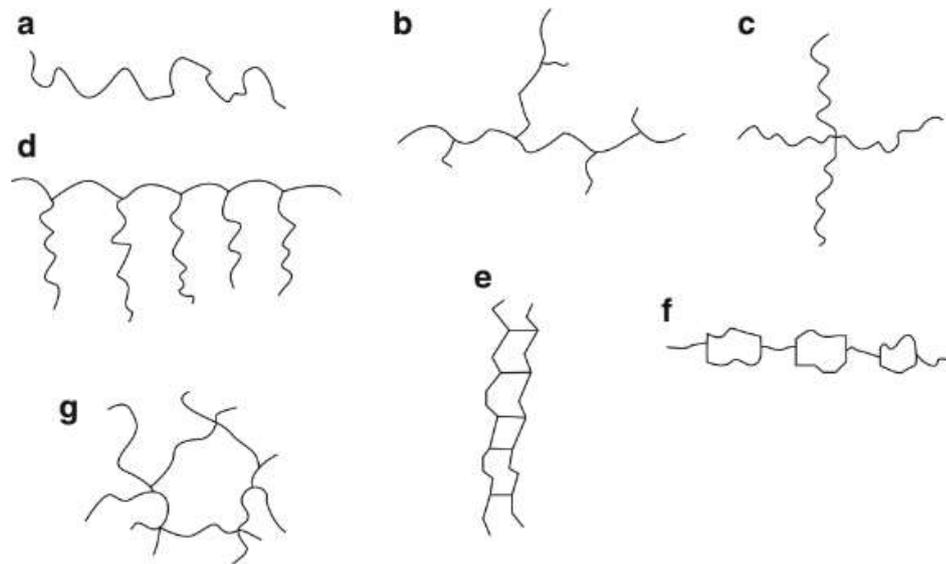


Figura 2-2. Ejemplo esquemático de estructuras de polímeros [10]: a) lineal, b) ramificado, c) estrella, d) peine, e) escalera, f) semi-escalera y g) red.

- **Arreglo estructural.**

Los polímeros pueden ser amorfos o cristalinos al fundirse o enfriarse; esto se debe a que, en el proceso de formación de un sólido, las moléculas suelen atraerse entre sí, acomodándose de forma regular con una disposición ordenada tridimensional. Pero como las cadenas de los polímeros son muy extensas es imposible asegurar que se obtenga un acomodo perfecto, por lo que de esta manera podremos obtener el grado de cristalinidad, la cual puede variar en regiones de la cadena [10,30].

- **Respuesta al calor.**

Los polímeros pueden ser: a) termoestable, cuando al aplicarle calor no puede volver a su estado inicial y forman redes reticuladas o gelificadas (la mezcla toma un estado líquido viscoso), porque sus moléculas no pueden moverse unas junto a otras y b) termoplásticos, los cuales al aplicarle temperatura nunca llegan a gelificarse, su estructura no se modifica, por lo que puede volver a fundirse o diluirse una y otra vez, sin perder sus propiedades iniciales [10,30].

2.5 Polimerización

La polimerización comprende reacciones secuenciales de monómeros, que reaccionan con otros de manera consecutiva, de forma repetitiva y crean una molécula con un aumento de peso molecular, por medio de enlaces entre estas unidades, razón por la que se le llama cadena polimérica [30].

La polimerización se puede clasificar por su mecanismo de reacción, existe la que es por condensación (por etapas) y por adición (radical libre); ver esquema en Figura 2-3 [10].

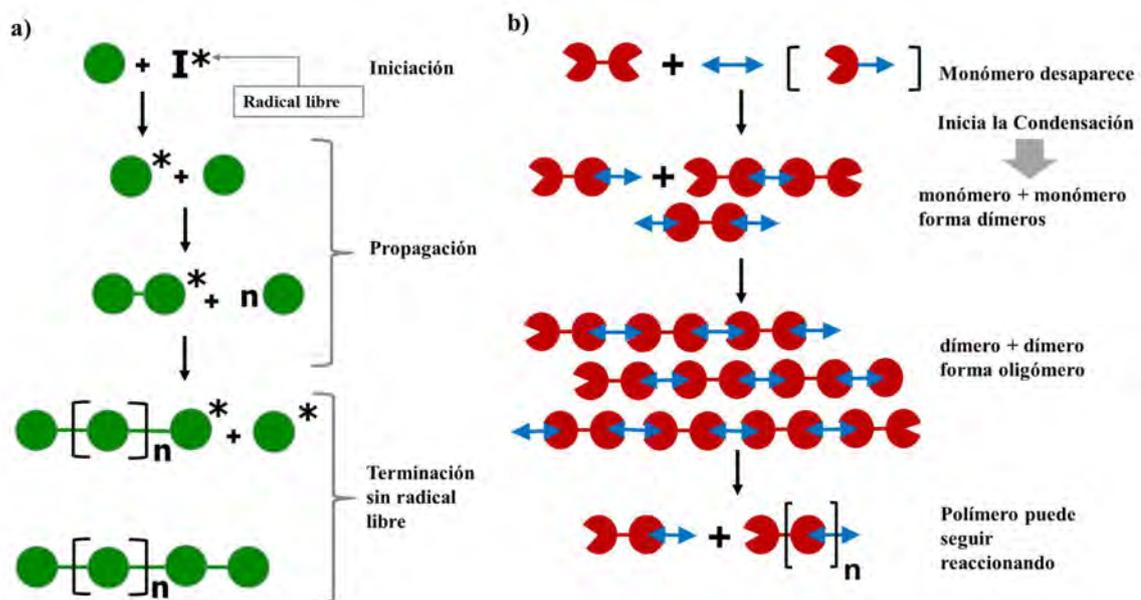


Figura 2-3. Esquema de reacción en polimerización a) por adición (radical libre) y b) condensación (por etapas) [12].

2.5.1 Polimerización por radical libre

La polimerización por adición o radical libre (Figura 2-4) se produce por una reacción en cadena muy rápida, utiliza un radical libre proporcionado por un iniciador, el cual por su naturaleza produce la escisión de enlace doble, convirtiéndolo en simple con un radical libre, por medio de un catalizador (calor y/o reactivo químico), donde los monómeros (generalmente insaturados) se enlazan uno tras otro. Esta se desarrolla en 3 etapas: 1) Iniciación, que comienza con el iniciador, al cual se le aplica temperatura o catalizador, para producir el radical libre. 2) Propagación, etapa donde el radical libre generado tiene como objetivo descomponer los enlaces dobles (insaturados), esto forma enlaces simples con su respectivo radical libre e inicia el proceso de nuevo. 3) Terminación, aquí finalizan todos los

procesos de reacción, se consume la cadena al acabar con los radicales libres y esto puede ser por el aumento de viscosidad o vitrificación. Algunas características importantes de las polimerizaciones por radical libre son [10,30]:

- El radical libre siempre está presente en la reacción.
- Las reacciones se llevan a cabo entre el radical y el monómero, oligómero o polímero.
- La reacción termina al consumirse el radical libre.
- Solo los grupos funcionales en los extremos son los que participan en la reacción.

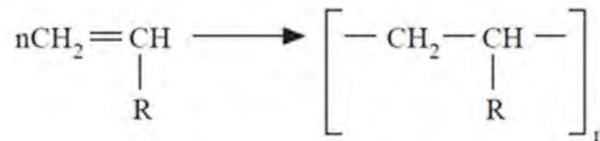


Figura 2-4. Esquema de polimerización por adición.

2.5.2 Polimerización por condensación

La polimerización por condensación, que también se denomina de crecimiento escalonado, se forma a partir de monómeros u oligómeros, que poseen grupos químicamente reactivos (grupos funcionales) al producir la reacción de uno de estos grupos insaturados, lo que permite una escisión del enlace y el monómero se pueda enlazar al otro (ver Figura 2-5). En su mayoría el resultado son estructuras similares a los monómeros del cual se derivan, en este proceso es común que resulten moléculas de agua o alcoholes como residuo. Las macromoléculas que se forman en este tipo de polimerización, siguen reaccionando de manera discreta y requieren de lapsos prolongados de tiempo. Este proceso se divide en dos etapas principales: a) poli-condensación, donde se elimina una pequeña molécula en cada paso y b) poli-adición, en la que los monómeros reaccionan sin que se produzca la adición y sin la eliminación de una molécula pequeña. Algunas de las características de la polimerización por condensación son [10,30]:

- El monómero se consume al inicio de la reacción.
- Las reacciones se llevan a cabo entre monómeros, oligómeros y polímeros.
- No hay terminación definida.

- Todos los grupos funcionales son reactivos en todo el proceso.

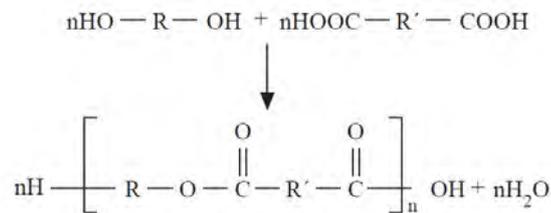


Figura 2-5. Esquema de polimerización por condensación.

2.6 Despolimerización por solvólisis

La despolimerización es una de las técnicas actualmente utilizadas para el reciclaje del PET, ya que, por su lenta degradación y abundantes residuos del material, al disolverlo es una alternativa interesante de reciclaje. Es la reacción contraria a la polimerización, al reducir el peso molecular. Este mecanismo de degradación se basa en la ruptura de los enlaces, lo que convierte el polímero en un monómero, existen varias formas de despolimerización, la más usual es la solvólisis [31].

Para el proceso de solvólisis, la escisión de sus enlaces puede producirse eficazmente por ciertos reactivos, al utilizar diferentes solventes, como en la hidrólisis con agua, alcoholisis con alcoholes, acidólisis con ácidos, glicólisis con glicoles o aminólisis con aminas. De las cuales resaltaremos más adelante la glicólisis ya que su metodología no es compleja y es menos costosa que las demás [4]. En la Figura 2-6 se esquematiza el método de escisión solvótica de la cadena, maneja dos grupos activos en la reacción, el grupo entrante (X - Z), los cuales son los que se enlazan al resto de la molécula no activa y el grupo saliente (Y - C) quedan como un subproducto, el cual después es eliminado [14,32].

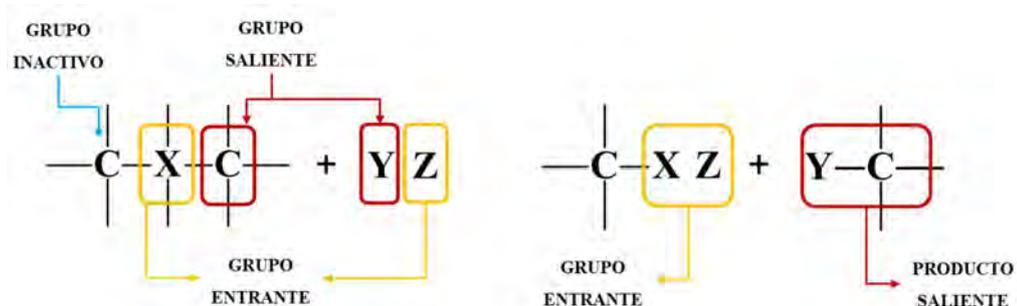


Figura 2-6. Proceso esquemático de la solvólisis.

2.6.1 Glicólisis y su mecanismo de reacción en la estructura química del PET.

Para comprender el mecanismo de reacción que ocurre en la glicólisis es necesario comprender el concepto de transesterificación, ver Figura 2-7. Este es un proceso en el que se produce un intercambio de grupos funcionales entre un orgánico y un alcohol, mediante un catalizador [33].

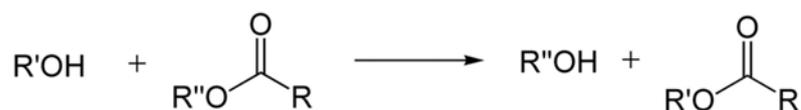


Figura 2-7. Esquema de reacción en una transesterificación.

Dicho esto, la glicólisis, la cual es la degradación de un polímero a través de un solvente, donde la despolimerización molecular es por medio de transesterificación entre los grupos funcionales, este se elige de acuerdo con el resultado que se desee y al polímero que interviene, en este caso un glicol, específicamente propilenglicol. Sin embargo, esta reacción es lenta, por lo que se ha utilizado diferentes catalizadores para aumentar la eficiencia, uno de los más utilizados es el acetato del zinc (AZn), por su eficiencia y costo [14,34,35].

En la Figura 2-8 se muestra el desarrollo del proceso de la glicólisis, en el cual el átomo de oxígeno del grupo hidroxilo (-OH) actúa como nucleófilo y se precipita hacia el carbono del grupo carbonilo (C=O), al provocar la escisión de su doble enlace y genere un enlace simple con el oxígeno del grupo hidroxilo del propilenglicol, lo que genera una geometría tetraédrica intermedia del carbono, después produce la escisión del enlace C-O del grupo saliente (-O-CH₂-CH₂-O) y se produce la regeneración del doble enlace del grupo carbonilo, a su vez en el grupo entrante se produce una pérdida de un protón del hidrogeno (H⁺) el cual reacciona con el grupo saliente (-O-CH₂-CH₂-O), que tiene como resultado el tereftalato de bis-2-hidroxipropilo (BHPT) con un diol de subproducto, proceso que se repite hasta producir solamente monómeros [31,34,35].

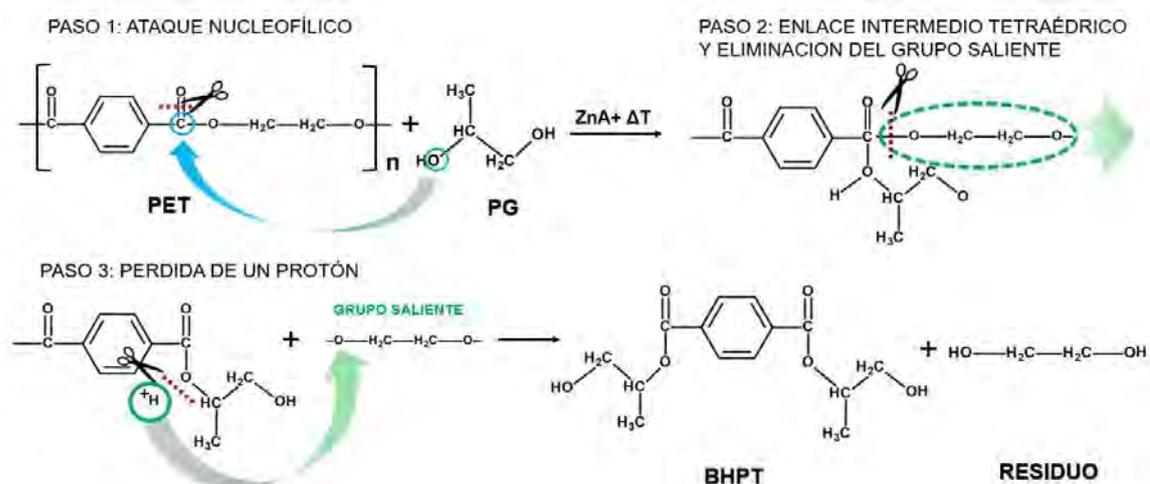


Figura 2-8. Esquema de la despolimerización por medio de glicólisis.

2.7 PET, estructura y propiedades

El PET, es un tipo de poliéster generado por polimerización por condensación, de estructura molecular lineal, amorfo por naturaleza y termoplástico, con propiedades mecánicas, eléctricas, térmicas, resistencia química, transparencia, estabilidad dimensional y baja absorción de humedad. El poliéster (Figura 2-9) es un compuesto que al igual que los polímeros está formado por hetero-cadenas que poseen grupos ésteres de carboxilato repetidos, ya sea en su estructura principal o colgante. Estos a su vez se dividen en saturados e insaturados, donde los saturados son los que no poseen enlaces dobles de carbonos y los insaturados tienen uno (monoinsaturado) o más (poliinsaturado) enlaces dobles o covalentes [33].

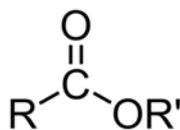


Figura 2-9. Estructura química del grupo éster.

El PET tiene estructura simple homo-polimérica, al ser un material amorfo en su forma más pura, al calentarse pasa al estado vítreo y después al arbóreo flexible, su cristalinidad puede variar por la influencia de aditivos modificadores o tipo de catalizador empleado. Este presenta propiedades nobles para su reciclaje, ya que su estructura no se modifica ante ningún solvente o temperatura [35].

En la Figura 2-10 se muestra la estructura química del tereftalato de polietileno (PET), el cual es un polímero sintético perteneciente a la familia de los poliésteres, formado a partir de la reacción de polimerización entre un ácido y un alcohol. El poliéster policristalino se fabrica por esterificación con la reacción de ácidos tereftálico y alcoholes por medio de un catalizador metálico [14].

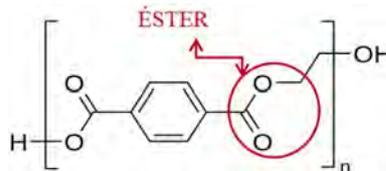


Figura 2-10. Estructura química del PET, con ubicación del grupo funcional éster.

2.7.1 Síntesis del PET

En la Figura 2-11 se muestra la polimerización del PET de alto peso molecular, en 2 etapas, comienza con la reacción de condensación del ácido tereftálico más el etilenglicol, lo que da como resultado un monómero de bajo peso molecular llamado oligómero, con residuos que son evaporados durante el proceso de calentamiento, en la segunda etapa se aplica temperatura más baja al oligómero del PET, que ya se encuentra en estado viscoso o vítreo, lo que provoca que evaporen los residuos del agua y los alcoholes, esto da como resultado un polímero de cadena más larga y de alto peso molecular [4,35].

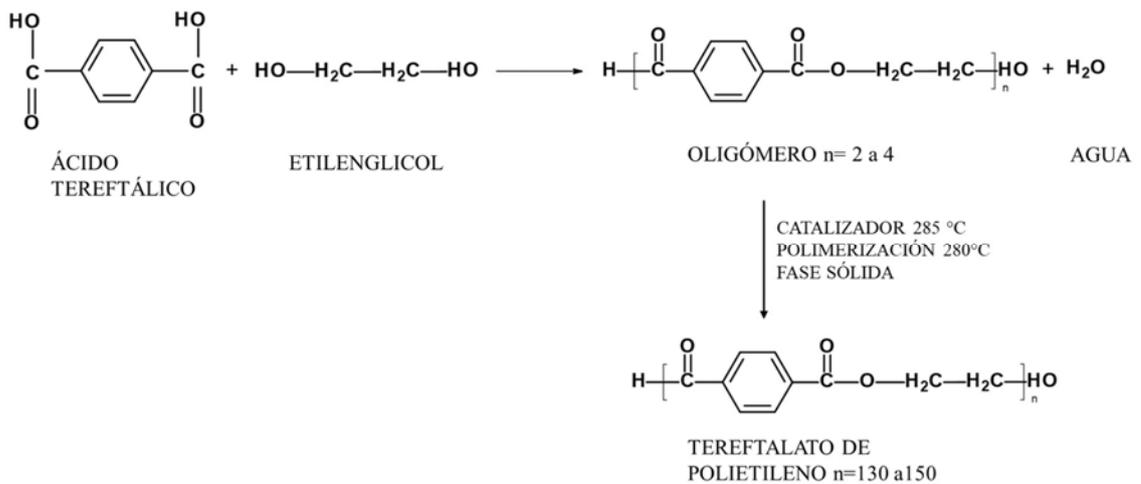


Figura 2-11. Esquema de la síntesis del PET.

3 METODOLOGÍA

3.1 Material requerido

Para la síntesis del BHPT (despolimerización química del PET) se utilizaron hojuelas de PET (1/2”), producto del reciclado mecánico de botellas de PET posconsumo, acetato de zinc, $(\text{CH}_3\text{CO}_2)_2\text{Zn}$, 99,99% base de metales traza, No. 383317 (AZn) y propilenglicol (PG) W294004, $\text{CH}_3\text{CH}(\text{OH})\text{CH}_2\text{OH}$, $\geq 99.5\%$, No. 57-55-6, ambos marca Sigma-Aldrich-Merk. Y por último en la purificación de BHPT, se utilizó agua destilada, etanol $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$, 99.5%, No. 64-17-5 y tetrahidrofurano (THF), $\geq 99.5\%$, No. 1003491251 ambos marca Sigma-Aldrich-Merk. Para la pasta de cemento, se utilizaron cemento Portland gris CPC 30R CEMEX Centenario, agua potable (de la red de agua potable) y vaselina en pasta marca Silika, como desmoldante.

3.2 Infraestructura

3.2.1 Equipo menor

Facultad de Ingeniería Los Mochis, UAS.

En el laboratorio electrocerámicos y compósitos reciclados: Se muestran en las Figura 3-1 y Figura 3-2 el equipo menor que se utilizó en la elaboración de las muestras.

- a) Moldes cilíndricos de 10 cm de diámetro \pm 20 cm altura y 0.025 mm de espesor, marca Alcon.
- b) Moldes de PVC de 1” de diámetro con un espesor de 50 mm, sin marca y probeta de PVC de ½” de diámetro con un espesor 25 mm, sin marca.
- c) Moldes metálicos de 5 x 5 x 5 cm, marca Alcon.
- d) Parrilla con temperatura (máxima 540 °C) y agitación magnética marca CIMAREC.
- e) Desecador.
- f) Dos multímetros, marca Tektronik DMM 4040.

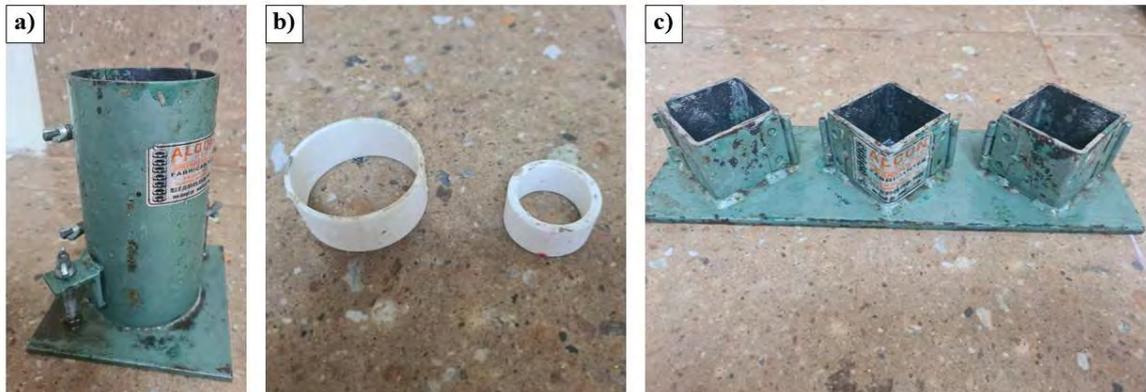


Figura 3-1. Moldes para pasta de cemento, a) Moldes cilíndricos, b) Moldes de PVC y c) Moldes metálicos.

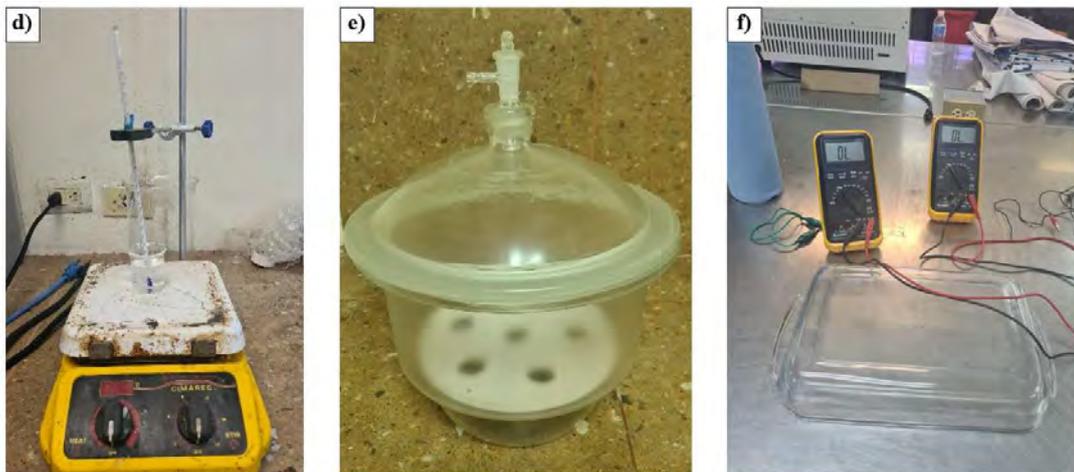


Figura 3-2. Equipo menor utilizado en el experimento, d) Parrilla con temperatura, e) Desecador y f) Multímetros.

3.2.2 Equipo mayor

Facultad de Ingeniería Mochis, UAS:

Laboratorio de química ambiental: En la Figura 3-3 se muestran los equipos utilizados; a) reactor tipo Vessel modelo SYRRIS-GLOBE, b) bomba de vacío marca Pittsburgin (2.5 CFM) y c) fuente de poder regulada de 0 a 15 Vcc, 6, 10 o 30 A, marca STEREN.

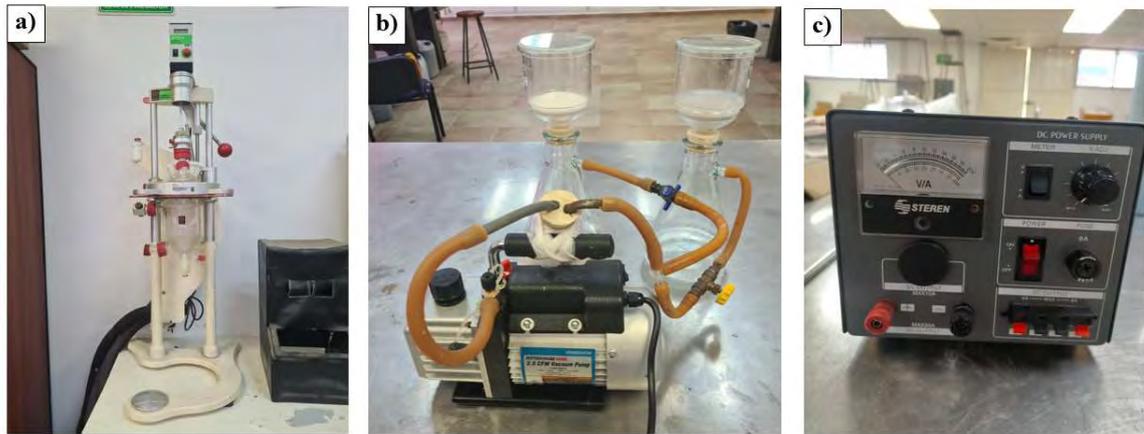


Figura 3-3. Equipo mayor utilizado en el experimento, ubicado en el laboratorio de química ambiental, a) reactor tipo Vessel, b) bomba de vacío y c) fuente de poder.

Laboratorio de electrocerámicos y compósitos reciclados: En la Figura 3-4 se muestran los equipos utilizados; a) mezcladora eléctrica para cemento [29], b) mesa de fluidez [30], c) horno de secado marca Controls temperatura máxima 300 °C, d) balanza analítica (de 0.0001 kg de aprox.) marca Oltaus, e) horno de secado marca Shel Lab con circulación de aire temperatura máxima 200 °C y f) cámara de saturación de agua.

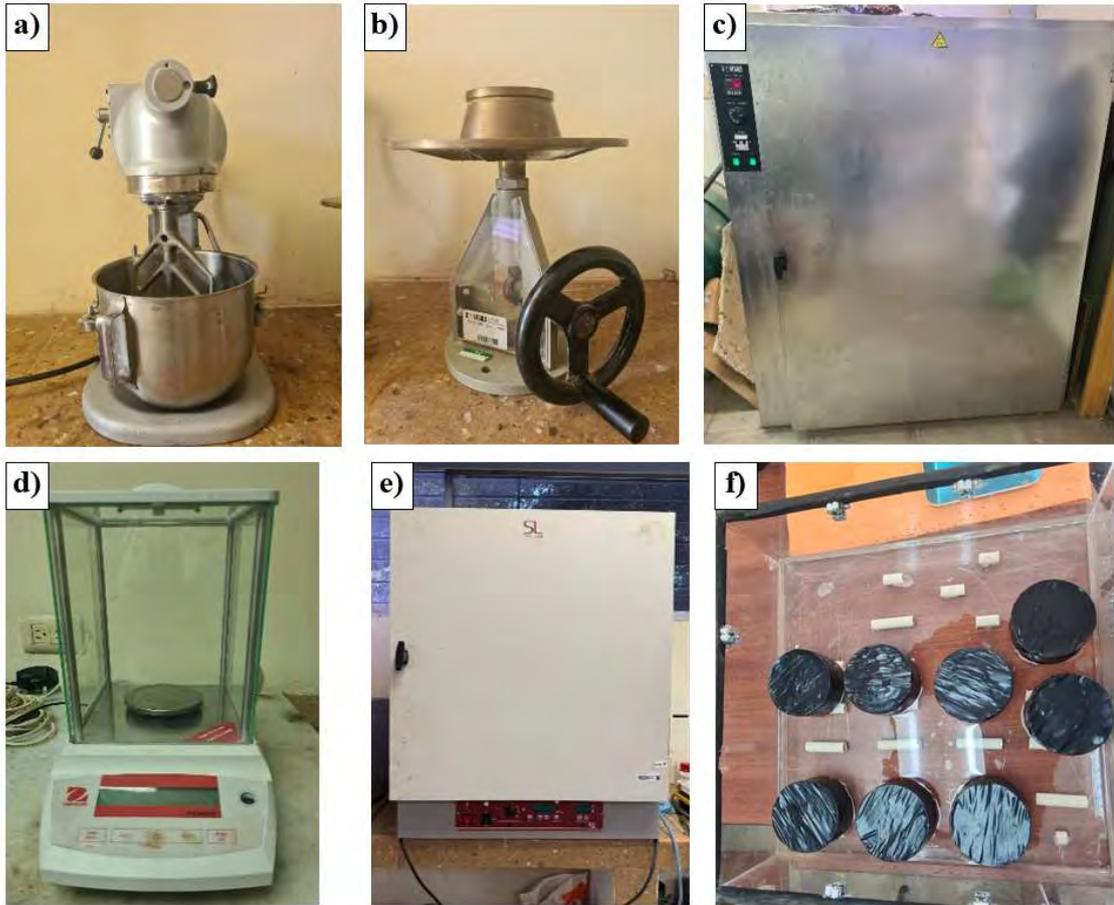


Figura 3-4. Equipo mayor utilizado en el experimento, ubicado en el laboratorio de electrocerámicos y compósitos reciclados, a) mezcladora eléctrica b) mesa de fluidez, c) horno de secado, d) balanza analítica e) horno de secado y f) cámara de saturación de agua.

Área de triturado, trituradora industrial sin marca Figura 3-5.



Figura 3-5. Trituradora industrial.

Laboratorio de mecánica; en la Figura 3-6 se muestra la prensa hidráulica universal INSTRON 600DX capacidad de carga dinámica de 600 kN en tracción y compresión, con una velocidad de carga 1350 N/seg.



Figura 3-6. Prensa hidráulica universal.

Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV):

En la Figura 3-7 se muestran los equipos que se utilizaron:

- Laboratorio de espectroscopía y tamaño de partícula; se usará, a) espectrómetro de Nicolet iS50 con accesorio IR para transmitancia y reflectancia total atenuada, b) Difractómetro marca PANalytical, modelo X'Pert PRO.
- Laboratorio de análisis térmico, c) equipo simultaneo SDT Q 600 TA instrument-TGA y equipo de medición de marca Unitherm 2020, con la normativa ASTM E 1530-18, TC, d) Unitherm modelo 2022.
- Laboratorio NanhoTech, e) microscopio electrónico de barrido marca HITACHI modelo SU3500 acoplado con un detector marca Oxford instruments modelo X-Max M con un voltaje de aceleración de 15 kV .

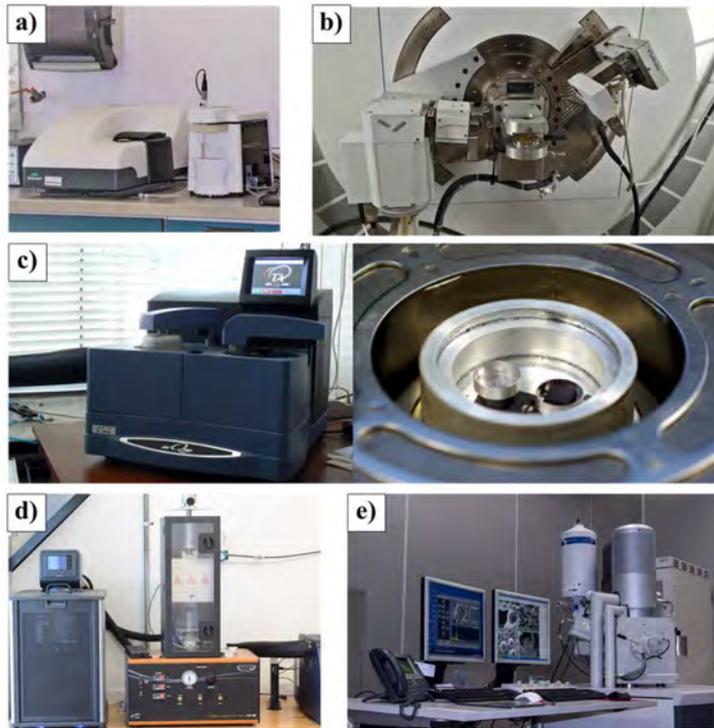


Figura 3-7. Equipo mayor ubicado en las instalaciones de CIMAV, a) espectrómetro, b) Difractómetro, c) equipo simultaneo TGA y equipo de medición TC, d) Unitherm, y e) microscopio electrónico de barrido.

3.3 Experimento

En la Figura 3-8 se presenta el esquema general del experimento, el cual consta de 3 etapas:

1) Reciclado mecánico, 2) Reciclado Químico, 3) Elaboración de muestras.

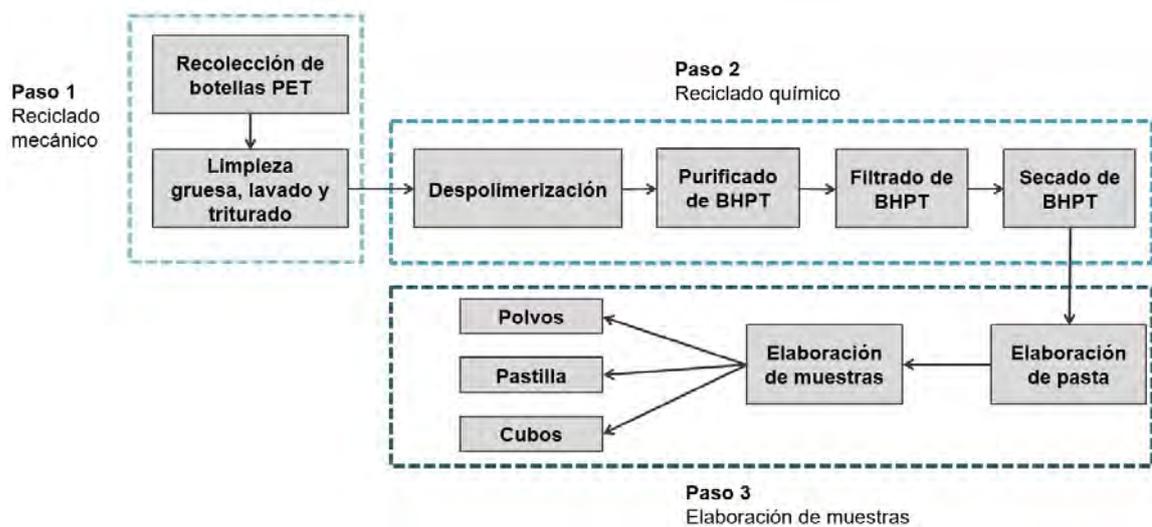


Figura 3-8. Esquema general del Proceso del experimental.

3.3.1 Reciclado mecánico y químico.

En la Figura 3-9 muestra el proceso de triturado, que comenzó con: a) recolección de botellas de PET posconsumo, b) se limpiaron (retiro de etiquetas y tapones), c) se recortaron en tiras y d) en cuadros, e) estas se colocaron en la trituradora, f) para obtener hojuelas de un tamaño máximo aproximado de $\frac{1}{2}$ "

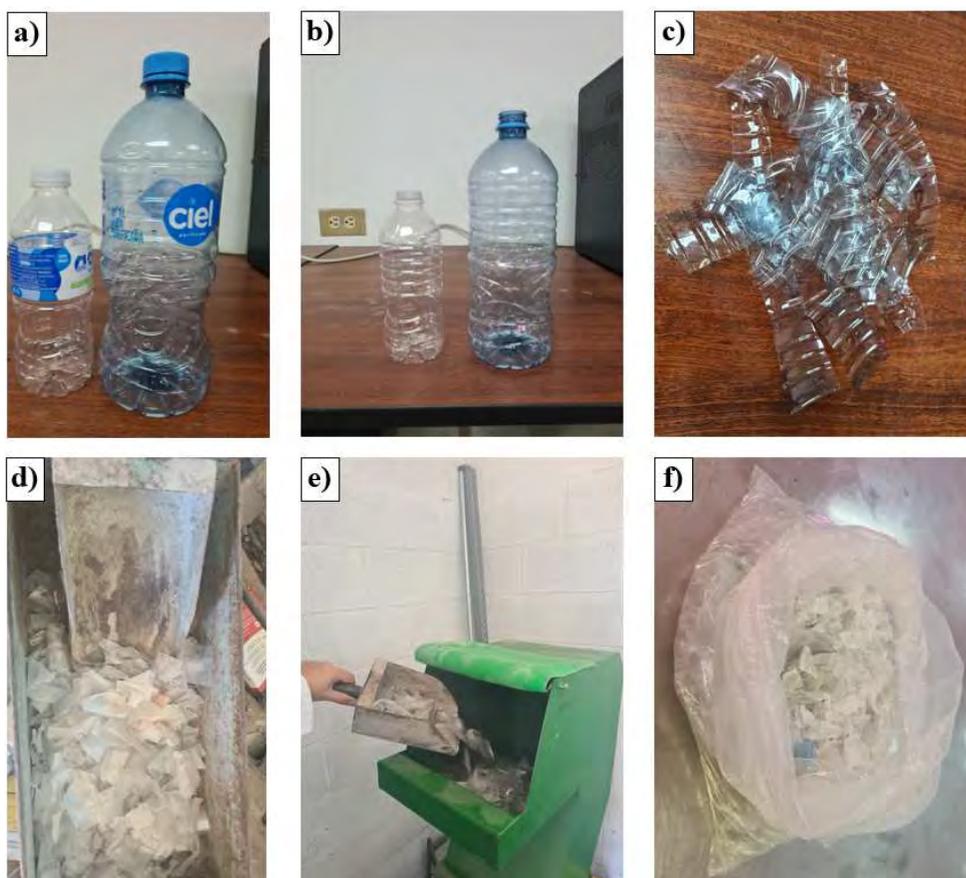


Figura 3-9. Proceso de triturado de botellas de PET posconsumo a) botellas de PET posconsumo, b) (retiro de etiquetas y tapones, c) tiras de PET y d) PET en cuadros pequeños, e) hojuelas en trituradora, f) hojuelas de $\frac{1}{2}$ ".

En la Figura 3-10 se muestra la síntesis del BHPT por glicólisis: a) Las hojuelas de PET, b) se colocaron en el reactor tipo Vessel con adición de PG (100% en peso de PET) y AZn como catalizador (0.5% en peso de PET). Enseguida, la mezcla se mantuvo en agitación por 30 minutos, con incrementos de temperatura, hasta alcanzar 200 °C y permaneció la reacción en estas condiciones por 2 horas, c) con el resultado de BHPT líquido.

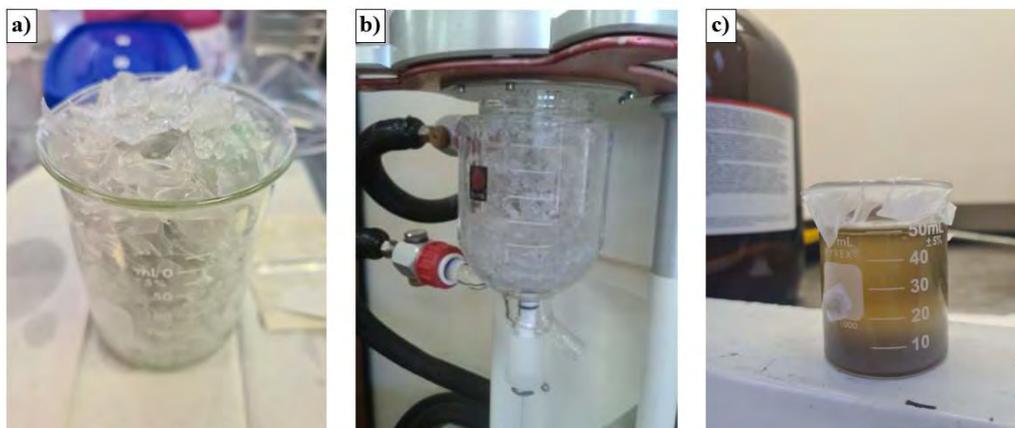


Figura 3-10. Proceso de glicólisis de las hojuelas de PET, a) hojuelas de PET, b) reactor tipo Vessel y c) BHPT líquido.

- Purificación de BHPT Figura 3-11, que consistió: a) en mezclar etanol (100% en volumen de BHPT) y THF (20% en volumen de BHPT) en una parrilla con agitación magnética, por 15 minutos a temperatura ambiente, b) después se adicionó el BHPT y se agitó por 30 minutos.

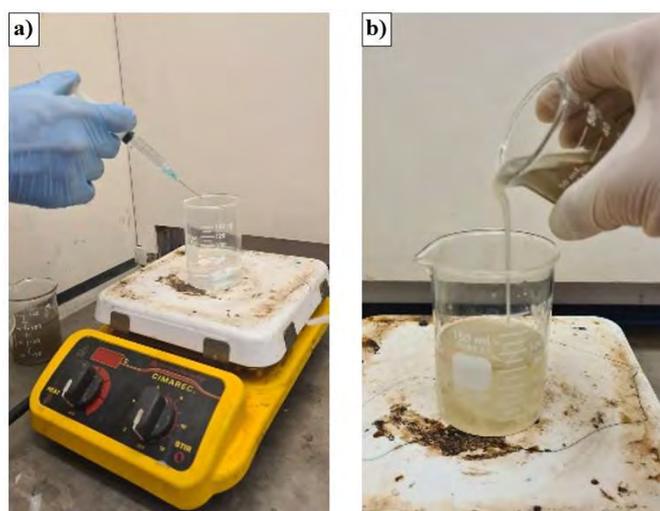


Figura 3-11. Purificación del BHPT, a) en mezclar etanol y THF y b) después se adicionó el BHPT.

En la Figura 3-12 se muestra el proceso de lavado del BHPT purificado, que consiste en lo siguiente: a) Al BHPT se le añadió agua destilada (30 % en volumen de BHPT) y b) permaneció en agitación por 15 minutos a temperatura ambiente, se repitió este proceso dos veces más.

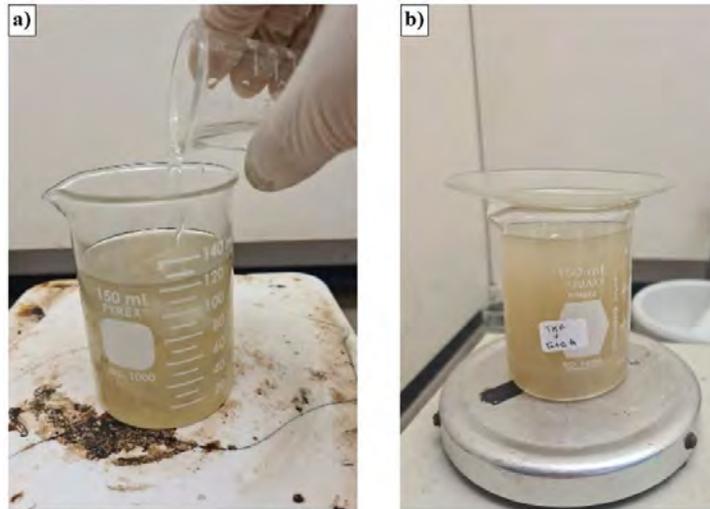


Figura 3-12. Proceso de lavado de BHPT purificado, a) Al BHPT se le añadió agua y b) se repitió este proceso dos veces más.

En la Figura 3-13 se muestra el proceso de filtrado del BHPT: a) Se colocó el monómero al vacío por medio de embudo Buchner, para remover impurezas y residuos y b) el tiempo varió de 3 a 4 horas, al depender de la cantidad del monómero.

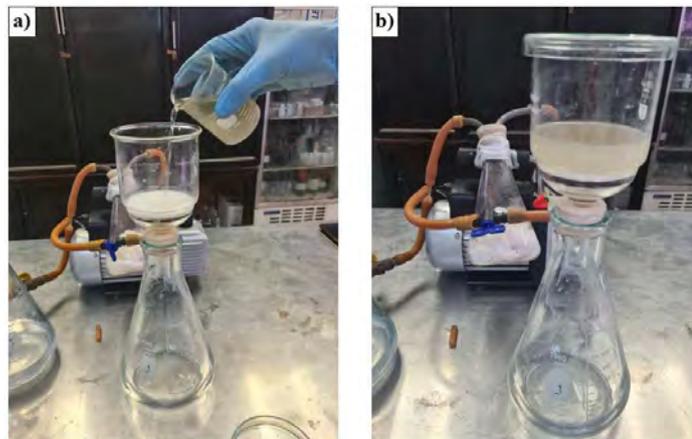


Figura 3-13. Proceso de filtrado de BHPT purificado y lavado, a) monómero en embudo Buchner y b) de 3 a 4 horas.

En la Figura 3-14 se muestra el proceso de eliminación de solventes en el BHPT por secado: a) el cual se introduce en el horno a 60 °C por 24 horas y b) se obtuvo aproximadamente 60% del volumen del BHPT utilizado. Después de la eliminación del solvente, toma un color más claro.

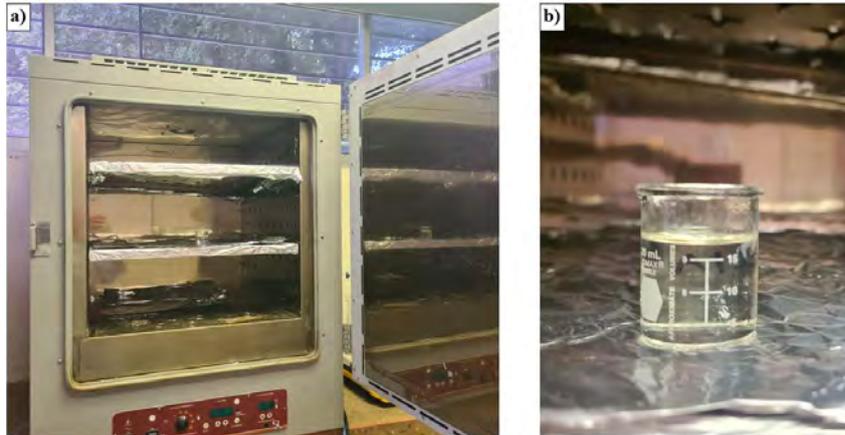


Figura 3-14. Eliminación de solventes en BHPT por medio de secado en horno, a) horno a 60 °C y b) se obtuvo BHPT.

3.3.2 Elaboración de probetas con pastas de cemento modificado

En la Figura 3-15 se empleó como base la proporción planteada [13] de los materiales (cemento, agua y BHPT) con la norma ASTM C 305-19 [36], se comenzó: a) diluir los materiales líquidos (agua y BHPT), b) los líquidos se agitaron por 15 minutos, c) se agregó al cemento en la mezcladora, se batió por 30 segundos velocidad baja, con 15 segundos para remover grumos, por último se batió por 60 segundos más a velocidad media.

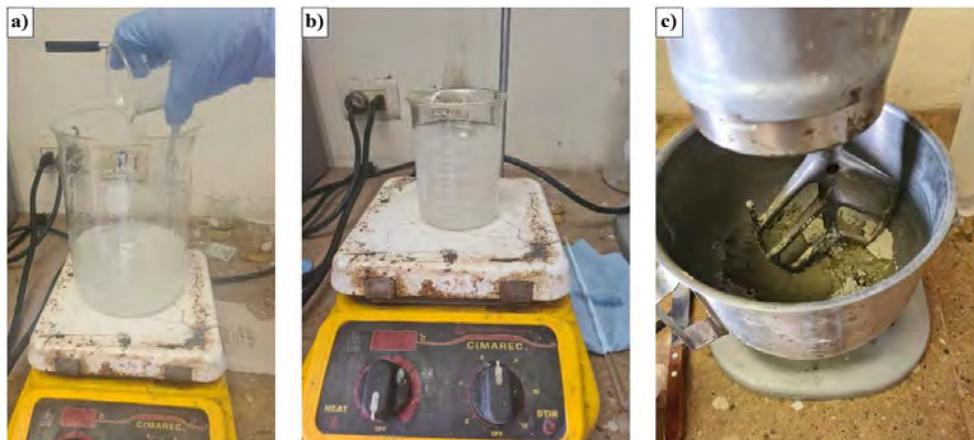


Figura 3-15. Elaboración de la pasta de cemento, a) diluir los materiales líquidos, b) los líquidos se agitaron y c) se agregó al cemento.

En la Tabla 3.1 se describe la dosificación y modo de empleo del BHPT, bajo las siguientes condiciones, la primera columna muestra la nomenclatura PR, que se refiere a “pasta de referencia”, PMB a “pasta modificada con BHPT”, se añadió al final el número del porcentaje de BHPT que se le agregó, en la segunda columna muestra el porcentaje de BHPT que se

agregó como aditivo con respecto al peso del cemento, el cual se mantiene en la misma cantidad en todas las muestras, al igual que la relación agua-cemento a/c [13]:

Tabla 3.1. Dosificaciones de las PMB.

Nomenclatura	% BHPT	% cemento	Relación a/c
PR	0	100	0.45
PMB0.5	0.5	100	0.45
PMB1	1.0	100	0.45
PMB1.5	1.5	100	0.45
PMB2	2.0	100	0.45
PMB2.5	2.5	100	0.45
PMB3	3.0	100	0.45

La última etapa del experimento consistió en la elaboración de probetas de pastas de cemento, con las diferentes dimensiones mencionadas en el apartado Figura 3-1 previamente, se desmoldó al día siguiente de su elaboración, fueron curadas en agua por 28 días (Figura 3-16). Ambos procedimientos fueron llevados a cabo de acuerdo con la norma ASTM C31/C-31M-08 [37], después se caracterizaron por medio de la técnica correspondiente.



Figura 3-16. Muestras de pasta de cemento en recipiente con agua.

3.4 Técnicas de caracterización

3.4.1 Fluidez

En la Figura 3-17 se muestra el procedimiento de elaboración de la prueba de fluidez, que inició al separar los materiales a utilizar con los porcentajes mostrados en la Tabla 3.1, mediante el procedimiento de la norma ASTM C305-19 [36]: a) se colocaron los materiales húmedos (BHPT y agua) con cemento en la mezcladora, con las cantidades específicas para el cono truncado, b) se mezcló con los tiempos estipulados en la norma antes mencionada, c) después de finalizar el mezclado, la pasta se colocó en el cono con espátula hasta la mitad y

se golpeó con un apisonador para eliminar burbujas de aire, d) se llenó el cono y se enrasó, e) se retiró el cono lentamente y se deja unos minutos en reposo, al terminar, se gira la manivela de la mesa de fluidez en 25 ocasiones durante 15 segundos, f) se midieron cuatro diámetros marcados en la mesa de fluidez, para después obtener un promedio. Todo el equipo cumple con las especificaciones establecidas en la norma ASTM C230-19 [38].



Figura 3-17. Proceso para la elaboración de la prueba de fluidez, a) se colocaron los materiales en la mezcladora, b) se mezcló, c) colocó en el cono con espátula, d) se llenó el cono y se enrasó, e) en reposo y f) se midieron los diámetros.

3.4.2 FT-IR de BHPT y PET

Las soluciones se caracterizaron por FT-IR para transmitancia y reflectancia total atenuada, se identificaron sus enlaces principales en el PET y BHPT, de esta manera observar la modificación producida por la despolimerización por medio de glicolisis. Este estudio se realizó con el espectrómetro Nicolet iS50 con transmisión, perteneciente al CIMAV; las soluciones se semi condensaron en un horno con circulación de aire a 120 C durante 24 h y luego se pulverizaron en un mortero de ágata, y se mezcló con bromuro de potasio, usado como referencia, posteriormente se elabora una pastilla y colocadas sobre la superficie de

diamante de los accesorios de reflectancia total atenuada en el rango de longitud de onda de 400-4000 cm^{-1} .

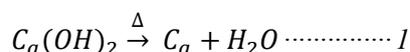
3.4.3 FT-IR de PR y PMB

Las pastas PR y PMB, se caracterizaron por FT-IR para transmitancia y reflectancia total atenuada, se identificaron sus enlaces principales generados en el proceso de hidratación del cemento. Este estudio se realizó con el espectrómetro Nicolet iS50 con transmisión, perteneciente al CIMAV; las pastas se pulverizaron en un mortero de ágata, y se mezclaron con bromuro de potasio, usado como referencia, posteriormente se elabora una pastilla y colocadas sobre la superficie de diamante de los accesorios de reflectancia total atenuada en el rango de longitud de onda de 400-4000 cm^{-1} .

3.4.4 Análisis termogravimétrico (TGA) y calorimetría diferencial de barrido (DSC)

Se evaluó la estabilidad térmica de PR y PMB y el contenido de CH en la pasta de cemento hidratada, mediante análisis termogravimétrico (TGA). Las muestras se pulverizaron (30-60 mg) en un mortero de ágata y se colocaron en un portamuestras. Se realizó con un equipo simultáneo TA Instrument SDT-Q600 en una atmósfera de oxígeno a una velocidad de calentamiento de 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ y en un rango de temperatura de 0-800 $^{\circ}\text{C}$ (CIMAV, Chihuahua, México).

El contenido de portlandita (%CH) en la pasta de cemento está relacionado con la deshidroxilación del CaOH según la ecuación 1, que se estimó a partir de las pérdidas de masas teóricas en el rango de temperaturas de 350 ~ 550 $^{\circ}\text{C}$ confirmadas por DSC [27,39].



Para una mejor precisión, se analizará el TGA y el DSC de cada termograma de las muestras, en tablas, sólo de las dos primeras pérdidas de los productos de hidratación: a) AFm, AFt y CSH y b) CH, de interés para este estudio. Debido a que existe traslape de los picos de pérdida de peso de AFm, AFt y CSH y la deshidratación del CSH, no es posible analizarlos por separado, lo cual se muestra en Figura 3-18, que es un esquema general de la primera pérdida

(AFm, AFt y CSH) y de la deshidratación del CSH, al tomar como ejemplo el termograma de la muestra de la pasta de referencia (PR) [40].

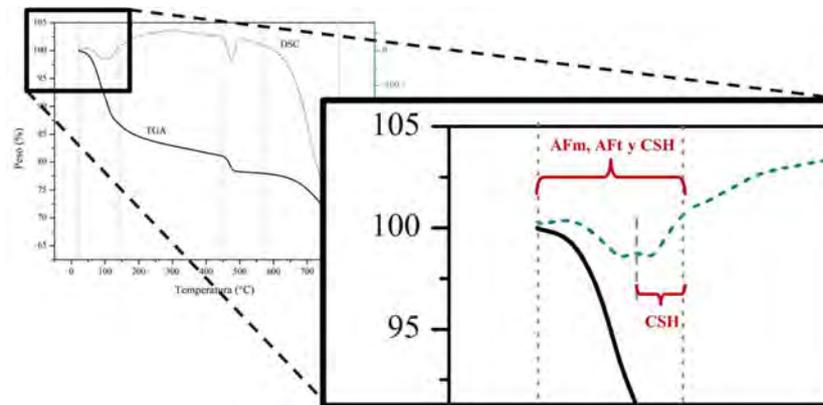


Figura 3-18. Esquema general de la primera pérdida (AFm, AFt y CSH) y de la deshidratación del CSH, como ejemplo el termograma de pasta de referencia (PR).

Para el cálculo de contenido de portlandita (%CH), para una mejor precisión se utilizó el inicio y final de la descomposición marcada con los picos endotérmicos del termograma del DSC, de cada una de las pastas y se utilizó la siguiente ecuación 2:

$$PM = \frac{M_I}{M_F} \dots\dots\dots 2$$

Donde, PM= pérdida de peso, M_I = es el peso de la muestra de acuerdo con el inicio de la descomposición de la portlandita (CH), y M_F = es el peso de la muestra de acuerdo al final de la descomposición de la portlandita. Posteriormente se realizó la operación para obtener el porcentaje de CH, como se ejemplifica en la ecuación 3.

$$CH\% = \frac{PM \times 100}{M_{mu}} \dots\dots\dots 3$$

Donde: CH%: Es la proporción de contenido de portlandita en el analito, M_{mu} : es la masa de la muestra antes de iniciar la prueba. Para el cálculo de AFt, AFm y CSH se sigue el mismo proceso que en %CH.

3.4.5 Conductividad Térmica

La conductividad térmica de las pastas de cemento se obtuvo de acuerdo a lo establecido con la norma ASTM E1530-18, con el equipo de medición Unitherm modelo 2022. Las muestras

empleadas consistieron en pastillas con dimensiones de 5 cm de diámetro por 2 cm de espesor, cuyas caras paralelas fueron previamente pulidas. Dicho instrumento está equipado con dos placas de metal entre las cuales se coloca la muestra y un flujo de calor pasa a través de ella, después se registra la diferencia de temperatura entre las placas.

3.4.6 Resistividad eléctrica

La resistividad eléctrica de las pastas de cemento fue obtenida por el método de las dos sondas, establecido en la norma mexicana NMX-C-514-ONNCCE-2019 [41]. En la Figura 3-19 se muestra el método de las dos sondas, que es una prueba no destructiva y nos indica la resistencia probable a corrosión en las pastas de cemento, se utilizaron muestras en forma de pastillas de $10 \text{ cm} \pm 0.05 \text{ cm}$ con espesor de $5 \pm 0.05 \text{ cm}$ y con 28 días de curado. a) Se utilizaron dos electrodos de acero inoxidable del tamaño del diámetro de la muestra, b) éstos se colocaron en contacto con un paño húmedo del mismo diámetro en ambos lados de la muestra, c) se creó un flujo de corriente eléctrica a través de la probeta transversalmente, que se obstaculiza por la resistencia del material, lo que genera una caída de voltaje, los cuales se midieron con los multímetros.

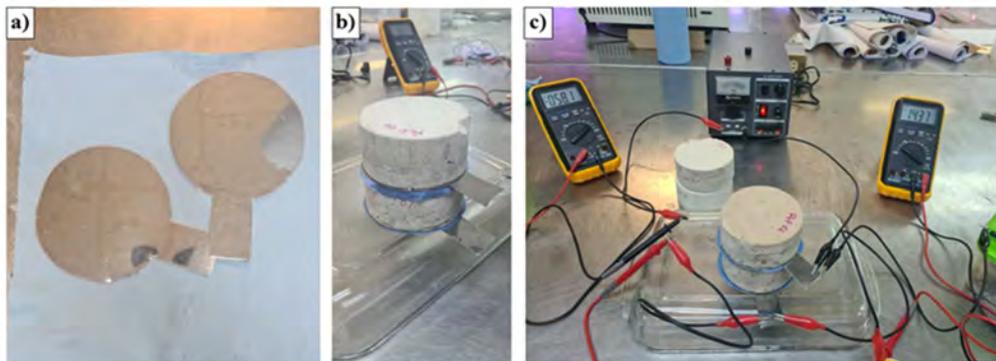


Figura 3-19. Medición de la resistividad eléctrica de las pastas de cemento de referencia y modificadas con BHPT, a) Se utilizaron dos electrodos de acero inoxidable, b) se colocaron en contacto con un paño y c) se creó un flujo de corriente.

En la Figura 3-20 se muestra el diagrama de flujo que esquematiza el circuito empleado en la prueba, este consistió en aplicar una diferencia de potencial por medio de una fuente de poder de corriente directa, el multímetro (M1) se conectó en serie para medir la corriente que fluye a través de la pastilla entre la fuente de poder y la muestra, el multímetro (M2) se conectó en paralelo para medir el voltaje con la fuente de poder y la pastilla.

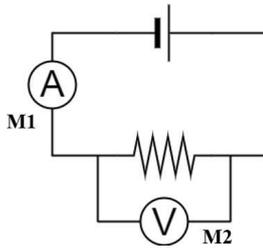


Figura 3-20. Diagrama de flujo de corriente y voltaje.

La resistividad se determinó con la fórmula $\rho=VA/IL$, donde:

ρ : resistividad eléctrica, en $\Omega.cm$

A: área de la sección transversal de la probeta, en cm^2

I: corriente, en Amperes

L: longitud de separación de sondas (espesor de pastilla), en cm

V: volts

3.4.7 Velocidad de absorción de agua

La prueba de absorción de agua de las pastas de cemento, se realizó de acuerdo a la norma ASTM C1585-20 [42], que consiste en tres etapas; la primera etapa es el acondicionamiento de las pastillas, la segunda etapa es la inmersión de una cara de la pastilla en la cámara de saturación de agua y la tercera etapa es el cálculo de absorción de agua.

En la Figura 3-21 se muestra el proceso de acondicionamiento de las pastillas: Los cilindros de pastas de cemento, elaborados previamente, fueron cortados transversalmente, para obtener pastillas con las medidas establecidas de 100 ± 6 mm y espesor de 50 ± 5 mm. Para el acondicionamiento: a) se calentó 40 ml de agua en una parrilla eléctrica y b) se disolvió 20 gr de KBr en el desecado, c-d) se colocaron las pastillas en el recipiente, e) se introdujeron en el horno de secado a $70^\circ C$ por 72 horas para controlar su humedad relativa (80%) y f) se empaquetan las muestras por 15 días.

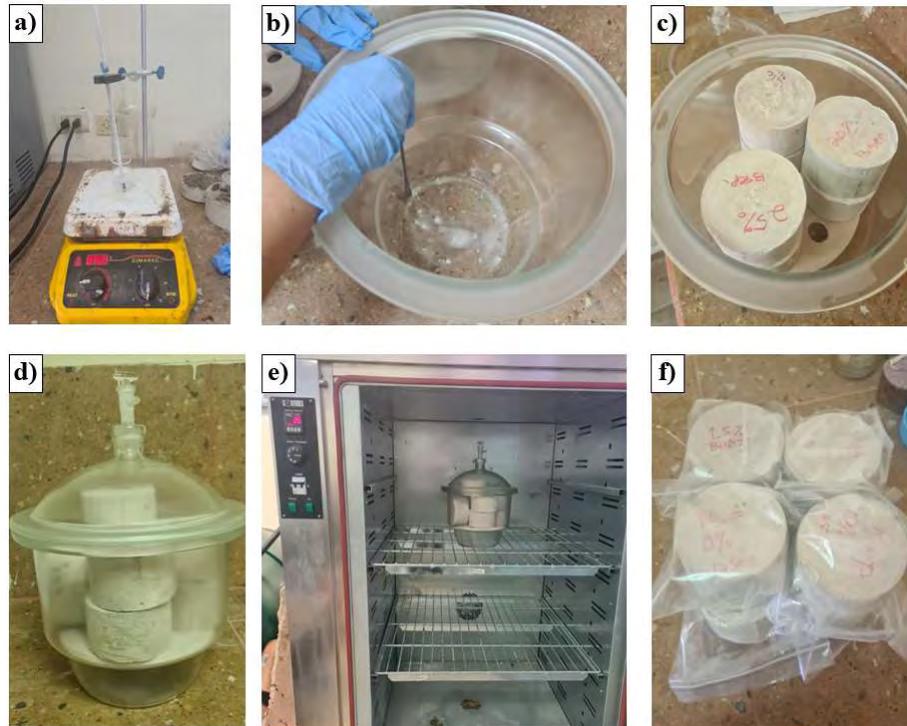


Figura 3-21. Primera etapa, acondicionamiento de las muestras, para la prueba de velocidad de absorción de agua, a) se calentó agua, b) se disolvió 20 gr de KBr, c-d) se colocaron las pastillas en el recipiente, e) se introdujeron en el horno de secado y f) se empaquetan.

En la Figura 3-22 se muestra el esquema de la cámara para absorción de agua, donde describe la colocación de la pastilla en la lámina de agua, que se siguió en este experimento.

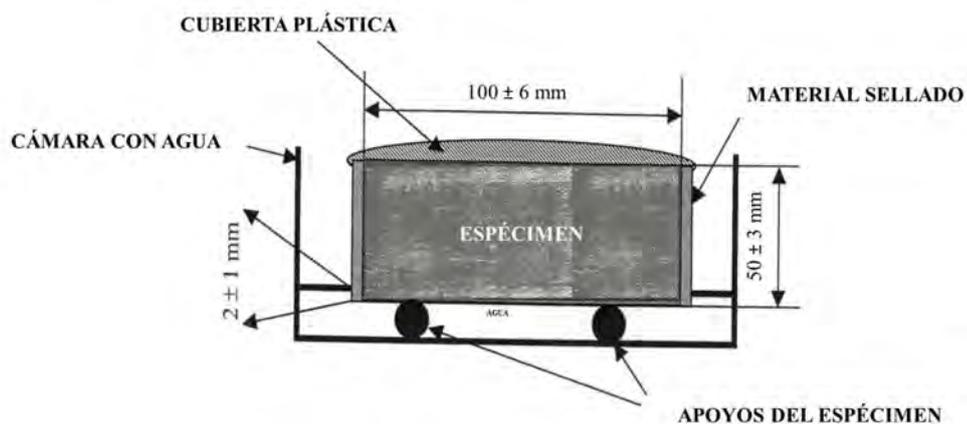


Figura 3-22. Esquema de cámara de absorción de agua.

La Figura 3-23 se muestra la segunda etapa de la prueba de absorción de agua, correspondiente a la inmersión de una cara de la pastilla en la cámara de saturación de agua, con el siguiente procedimiento: a) Una cara paralela y las caras cilíndricas fueron cubiertas

con cinta y se dejó libre una cara, la cual es expuesta durante la prueba, b) se registró el peso inicial, c-d) se sumergió la cara libre de las probetas para una lámina de agua de 2 mm por un tiempo de 1, 5, 10, 20, 30 y 60 min, 2, 3, 4, 5 y 6 h, después, e) se registró la masa de las probetas en cada tiempo determinado.

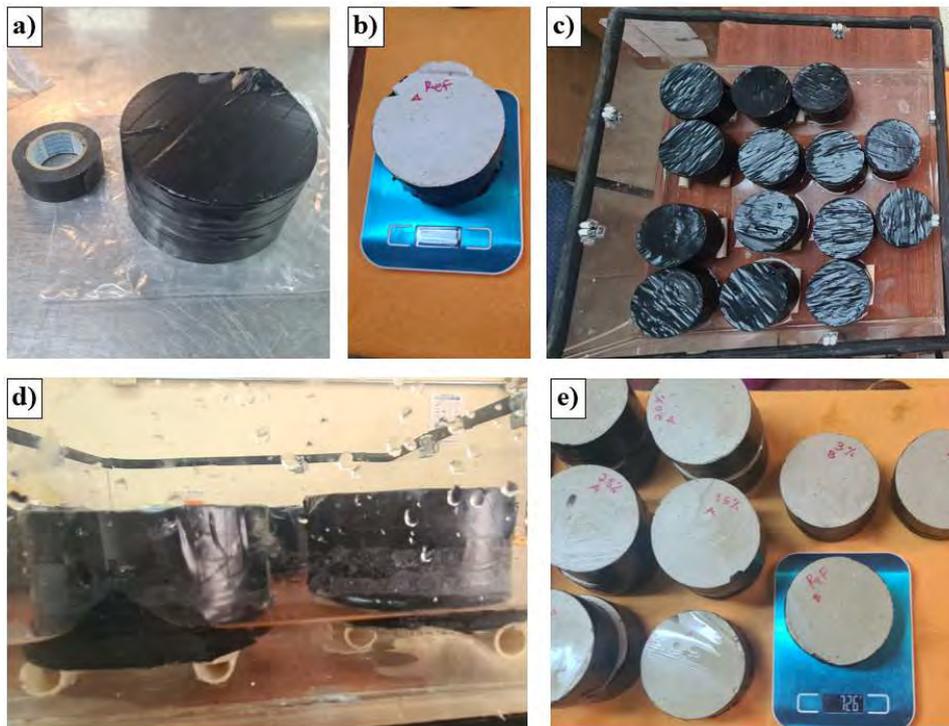


Figura 3-23. Proceso para prueba de velocidad de absorción, a) las caras cilíndricas fueron cubiertas con cinta, b) se registró el peso inicial, c-d) se sumergió la cara libre de las probetas y e) se registró la masa.

La absorción se determinó con la fórmula $I = m_t / (a/d)$, donde:

I: absorción (mm)

m_t : cambio de masas de las probetas, al momento t, (gramos)

a: área expuesta de la probeta, en mm^2

d: densidad del agua (0.001 g/mm^3)

3.5 Difracción de rayos X (DRX)

Las fases de composición y análisis de producción de CSH de las pastas con y sin modificar, fueron identificadas por la técnica de difracción de rayos X (DRX) de polvo. El análisis se llevó a cabo en un difractómetro marca PANalytical, modelo X'Pert PRO. Las muestras se

pulverizaron en un mortero de ágata y se colocaron en un portamuestras, el polvo fue comprimido manualmente. Las condiciones empleadas fueron: radiación de Cu 40 kV, 30 mA de 0.16, rango de 5-90° y un tiempo de 100 s. Las fases de composición de las pastas de cemento hidratadas, se identificaron al utilizar la base de datos PDF4 + 2013 del Centro Internacional de Datos de Difracción (ICDD). Los archivos de difracción de polvos (PDF) utilizados para la etringita, portlandita, calcita y cuarzo, fueron los identificados como 72-0646, 87-0673, 72-1651 y 85-0457, respectivamente.

3.6 Microscopía electrónica de barrido (SEM) Y espectroscopía de energía dispersiva (EDS)

Para facilitar la observación de la morfología y análisis elemental de la pasta de cemento de referencia y las pastas modificadas con BHPT, todas las muestras se trituraron en trozos pequeños. Además, las muestras obtenidas se recubrieron con un baño de oro por 50 s previo a su análisis.

Se utilizó un microscopio electrónico de barrido marca HITACHI modelo SU3500 a +10 kV, en condiciones de alto vacío, para observar las morfologías de las pastas de cemento. Para cada muestra, la distancia de trabajo entre el lente objetivo y la parte superior de las muestras fueron entre 5.9 a 6.8 mm. Las micrografías se realizaron por medio de electrones secundarios (SE) y electrones electrodispersados (BSE-COMP). Además, el análisis elemental se realizó por EDS mediante un detector marca Oxford Instruments modelo X-Max M con un voltaje de aceleración de 15 kV, el cual se encuentra acoplado al microscopio mencionado.

3.6.1 Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión de PR y PMB, fue obtenida de acuerdo con la norma ASTM C109/C109M-21. En la Figura 3-24 se muestra el proceso de resistencia a compresión, donde se utilizan las muestras cúbicas de 5 cm, consistió en: a) se colocaron en horno de secado a temperatura de 70 °C por 24 horas. b-d) las muestras secas se probaron de acuerdo a la norma ASTM C 109-21; los ensayos se realizaron en la prensa universal INSTRON 600DX capacidad de carga dinámica de 600 kN en tracción y compresión, a una velocidad de carga de 1350 N/seg.



Figura 3-24. Proceso de prueba de compresión de pastas de cemento de referencia y modificadas, a) se colocaron en horno y b-d) las muestras secas se probaron en la prensa.

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Propuesta de interacción BHPT - CSH

En la Figura 4-1 se muestra el esquema de interacción molecular de los hidroxilos del BHPT con los iones de OH^- y Ca^{2+} y los productos de hidratación. La línea punteada FI_A , representa la frontera interfacial entre los monómeros de BHPT y los iones OH^- y Ca^{2+} . La segunda línea punteada, FI_B , representa la frontera interfacial entre los iones OH^- y Ca^{2+} y los productos de hidratación. Se observa que en el proceso de la hidrólisis del cemento, se genera una gran cantidad de iones OH^- y Ca^{2+} , que se encuentran en la solución acuosa interfacial, en los espacios vacíos de los granos de cemento hidratados, en espera de ser un punto de reticulación entre los monómeros BHPT y los productos de hidratación (CH, CSH, AFm y otros) [13,17,24,25].

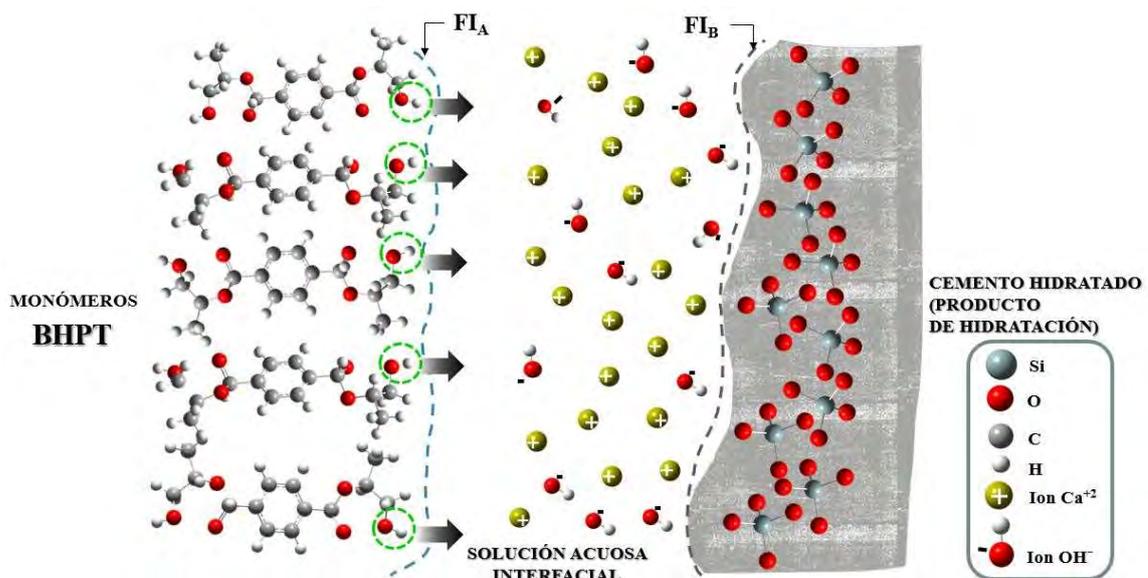


Figura 4-1. Esquema de interacción molecular de los grupos hidroxilo del BHPT con iones de OH^- y Ca^{2+} en la solución interfacial.

En la Figura 4-2 se muestra la interacción del BHPT con los iones OH^- de la solución acuosa interfacial con los productos de hidratación, donde a través de los grupos hidroxilo (O-H) del BHPT reacciona con los iones OH^- de la solución acuosa interfacial, esto genera compuestos polares (el oxígeno del grupo hidroxilo ya sea del BHPT o el ion en la solución acuosa interfacial, adquiere carga negativa y otro adquiere carga positiva) y forman, inicialmente,

enlaces de hidrógeno o de Van Der Waals, lo que libera un ion de hidrógeno y produce H₂O como residuo, lo que forma un ion O⁻ en la molécula del BHPT [13,17,24,25].

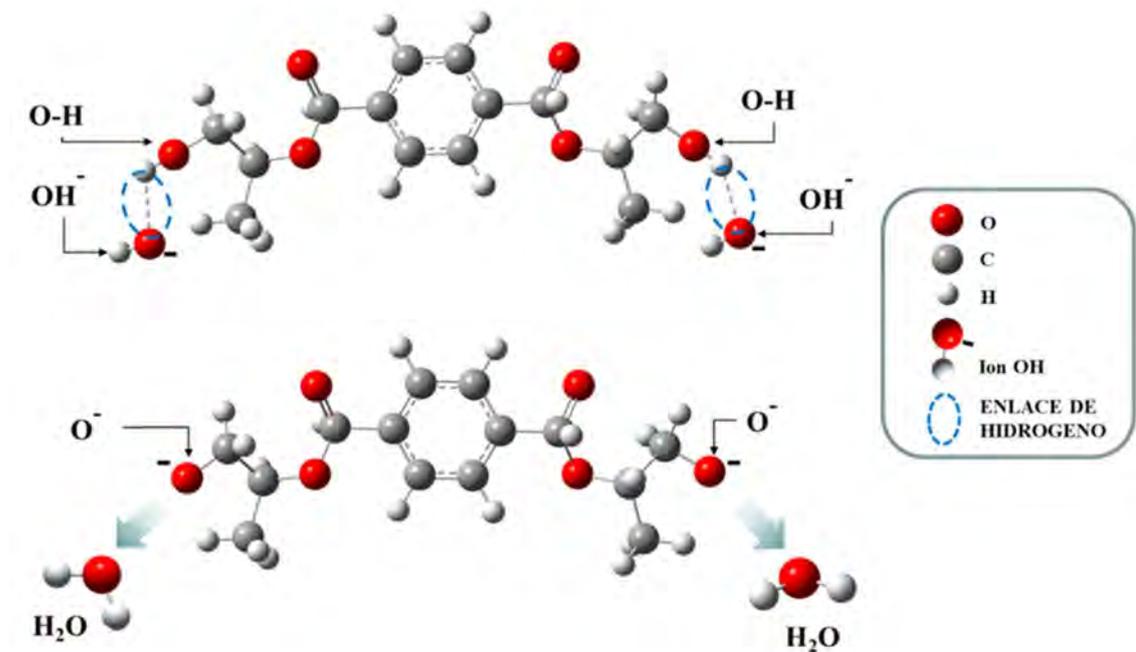


Figura 4-2. Esquema de la interacción del BHPT con los iones OH⁻ de la solución acuosa interfacial.

En la Figura 4-3 se muestra la interacción del BHPT con los iones Ca⁺², liberados en el proceso de hidratación del cemento, estos migran a las áreas de interfase entre los productos de hidratación, los cuales son atraídos por los iones O⁻ del BHPT para formar un enlace covalente (Ca-O), por otro lado, el calcio reacciona simultáneamente con el SiO₄ contenidos en los CSH. Por lo que se asume que, las moléculas de BHPT se adaptan entre los productos hidratados y se obtiene una estructura de red más compacta, en consecuencia, da como resultado una pasta homogénea y menos porosa. [13,17,24,25].

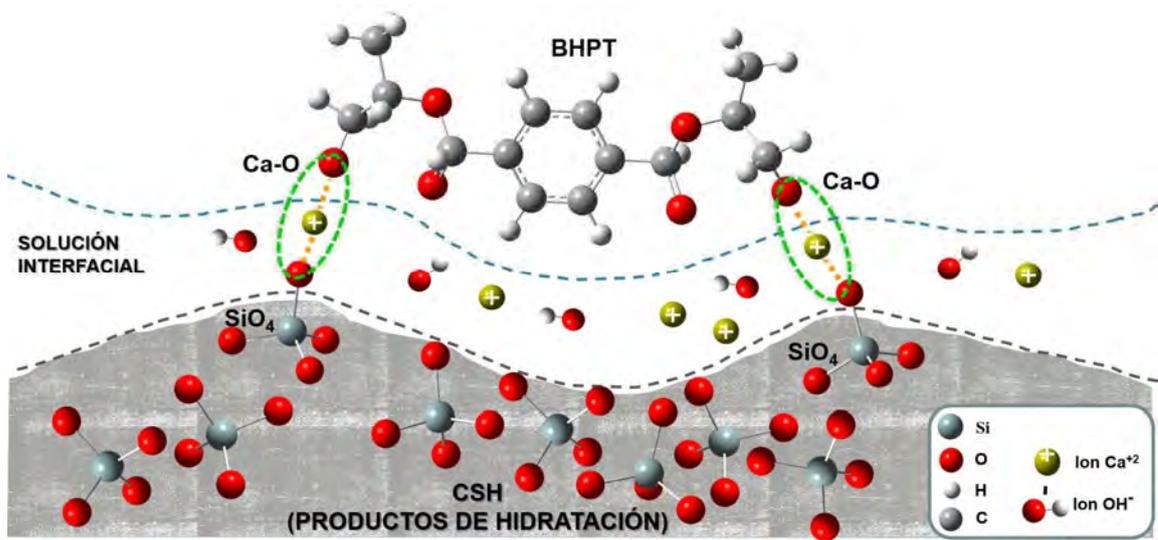


Figura 4-3. Esquema de la interacción BHPT con los iones Ca^{+2}

En la Figura 4-4 se observa un esquema de los granos de cemento hidratados, con la microestructura formada por el BHPT entre los microporos de la solución interfacial de la pasta de cemento. Las modificaciones moleculares dan lugar a un película densa y uniforme entre los granos de cements con geles de hidratación, por ende, se refinan las estructuras porosas, disminuye las microfisuras del sistema, mejora las propiedades de la pasta [12,16,24].

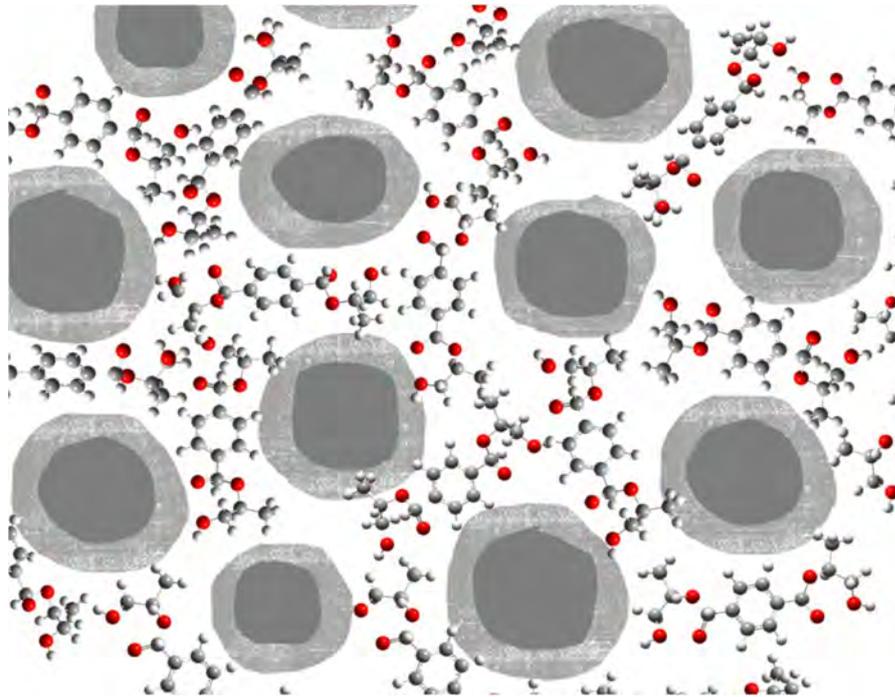


Figura 4-4. Esquema de granos de cemento hidratado, con la microestructura formada por el BHPT entre los microporos de la solución interfacial de la pasta de cemento

4.2 FT-IR

4.2.1 PET y BHPT

En el espectro de la Figura 4-5 se observan los grupos funcionales del PET y BHPT (en ordenadas se muestra la transmitancia u.a. y en las abscisas el número de onda en cm^{-1}). La diferencia entre ambos es notable, la banda ancha del espectro de BHPT en 3360 cm^{-1} , se asocia a la presencia de los grupos hidroxilo (-OH), estos son atribuidos a la reacción de transesterificación entre el PET y el PG, en la que ocurre la escisión de enlaces del grupo carbonilo durante el glicólisis del PET [43,44].

Otra diferencia es la intensidad de las bandas a 2930 cm^{-1} y a 2960 cm^{-1} atribuidos a los enlaces de C-H alifáticos, CH_2 correspondiente a vibraciones de estiramiento simétrico para el PET y BHPT, además, una banda a 2870 cm^{-1} fue identificada solamente en el espectro de BHPT, la cual se asocia al estiramiento asimétrico de los enlaces C-H del grupo CH_3 , los cuales son incorporados por el propilenglicol durante la glicólisis del PET [45].

Otros enlaces que se observan son: C=O alifático de estiramiento a $1750\text{--}1730 \text{ cm}^{-1}$, C=C aromático de estiramiento a $1600\text{--}1430 \text{ cm}^{-1}$, C-H aromático en una banda entre $1275\text{--}1000$

cm^{-1} de flexión, C-O alifáticos en $1300\text{-}1000\text{ cm}^{-1}$ parte del grupo éster, así como también el enlace C-O-C, que se encuentra en 1100 cm^{-1} [46].

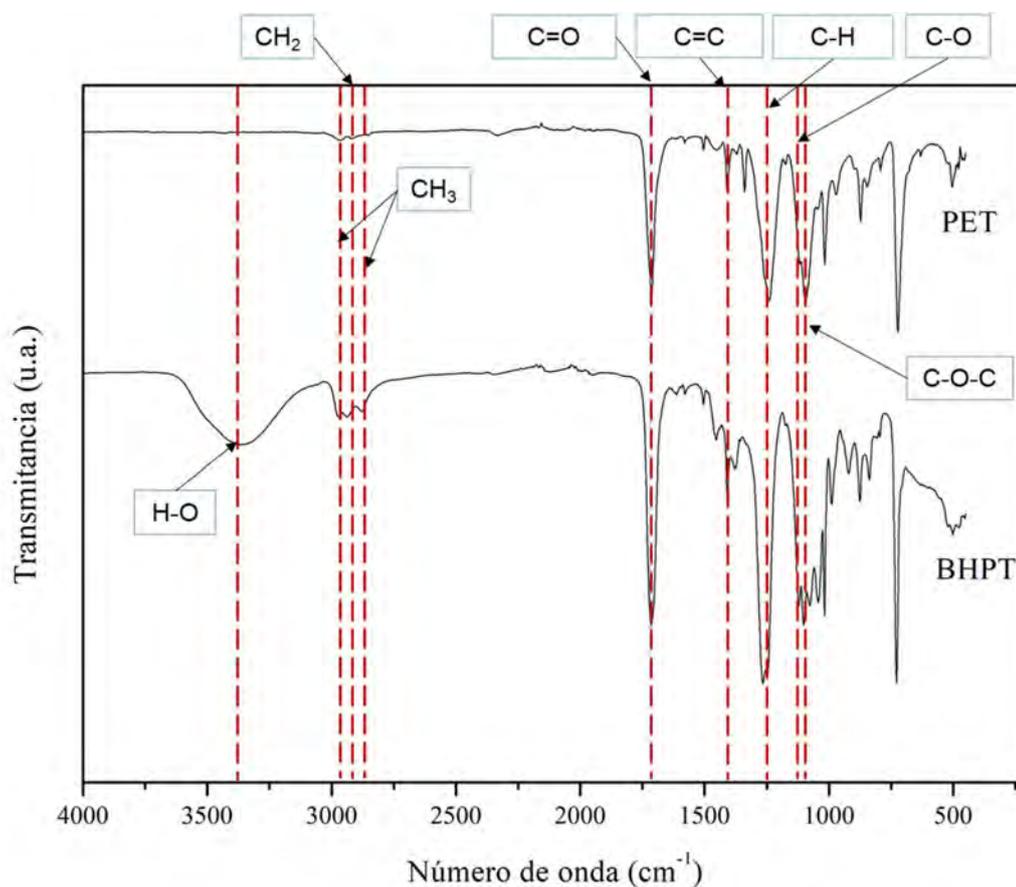


Figura 4-5. Espectro FT-IR de PET y BHPT.

4.2.2 PR y PMB

En la Figura 4-6 se muestran los espectros de FT-IR de pasta de referencia (PR) y pastas modificadas con BHPT de 0.50 a 3.0% de aditivo (PMB0.5, PMB1.0, PMB1.5, PMB2.0, PMB2.5 y PMB3.0) a 28 días de hidratación, en la región de número de onda de 400 a 4000 cm^{-1} (transmitancia u.a. y números de ondas en cm^{-1}). En la misma figura se muestran tres regiones, R1, de $4000\text{-}2000\text{ cm}^{-1}$, R2, de $2000\text{ a }800\text{ cm}^{-1}$ y R3, de $660\text{-}480\text{ cm}^{-1}$, divididas así para facilitar la interpretación de estos resultados, como se describen posteriormente.

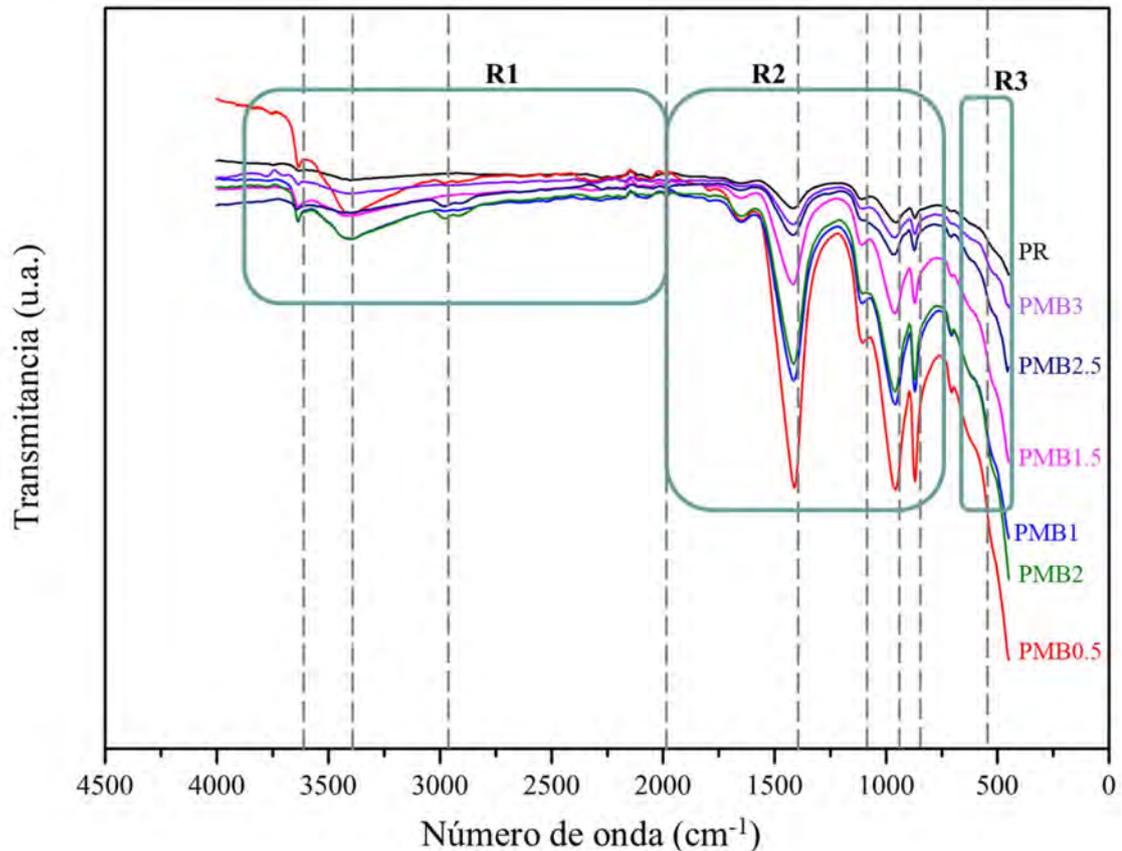


Figura 4-6. Espectros de FT-IR de pasta de referencia y pastas modificadas con BHPT (0.50, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 y 3.0% de BHPT) a 28 días de hidratación.

En la Figura 4-7 se muestran los espectros de FT-IR de las muestras PR y PMB, en R1 de 4000-2000 cm^{-1} . La banda ancha ubicada a 3397 cm^{-1} es atribuida al estiramiento de los enlaces O-H (grupos hidroxilos), la cual se asocia al residuo de H_2O que se genera en la hidratación de la pasta de cemento. La banda identificada a 3639 cm^{-1} , corresponde al estiramiento del enlace O-H de la portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), producto de la hidratación del cemento, lo que nos confirma las reacciones de hidratación favorables [25,46–48].

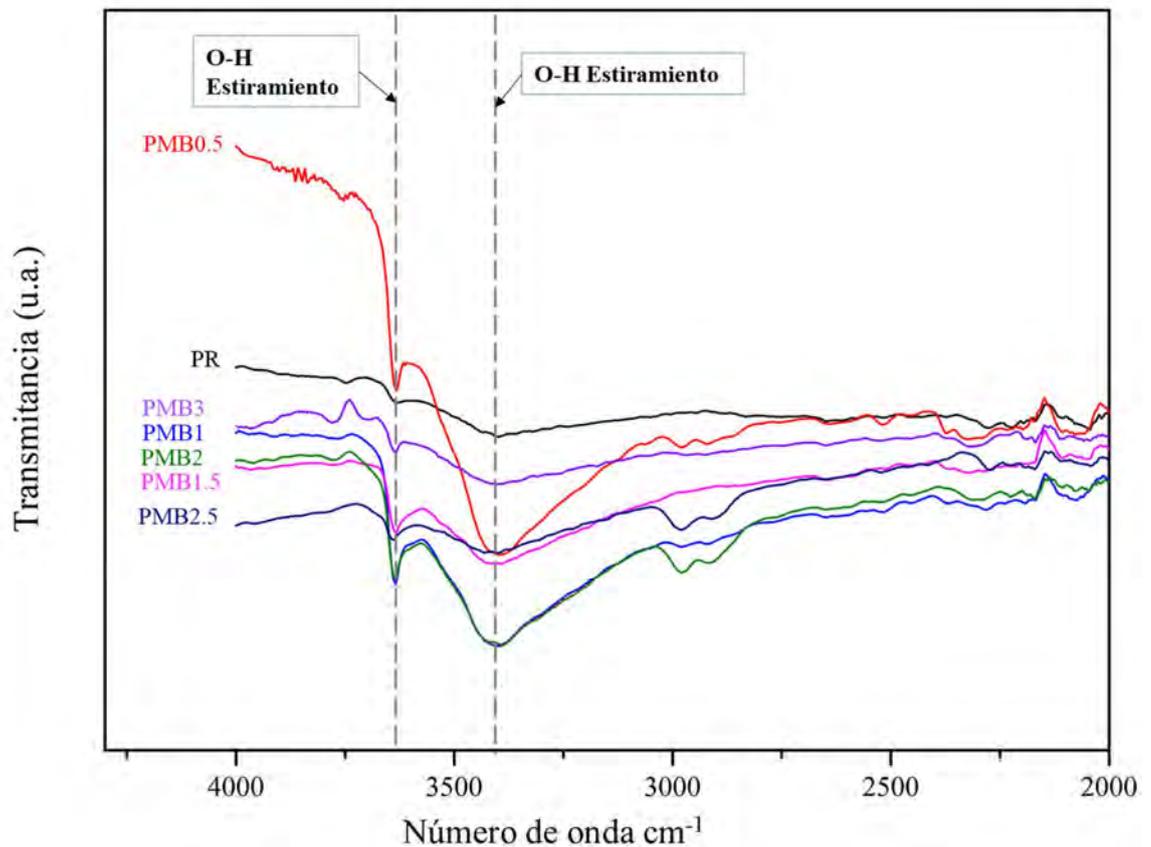


Figura 4-7. Espectros de FT-IR de PR y PMB, correspondiente a la R1 con número de onda en el rango 4000-2000 cm^{-1} .

En la Figura 4-8 se muestra la R2, de 2000 a 660 cm^{-1} , donde se reflejó la influencia del BHPT en la hidratación del cemento. Las bandas observadas a 1410 y 871 cm^{-1} , son atribuidos al ion CO_3^{2-} (enlace C-O), lo que puede indicar la formación de CH durante la hidratación del cemento. Las bandas identificadas a 1100 y 953 cm^{-1} son características del ion SiO_4^{2-} (enlace Si-O), comúnmente atribuidas al CSH. Todos los espectros FT-IR presentaron las mismas bandas, lo que confirma, que el BHPT pudo promover la hidratación del clinker del cemento y en la formación de CSH y CH. Por lo tanto, se puede asumir que el BHPT ha modificado molecularmente la pasta de cemento de una manera favorable, sin eliminar enlaces beneficiosos para conservar sus propiedades [25,46–48].

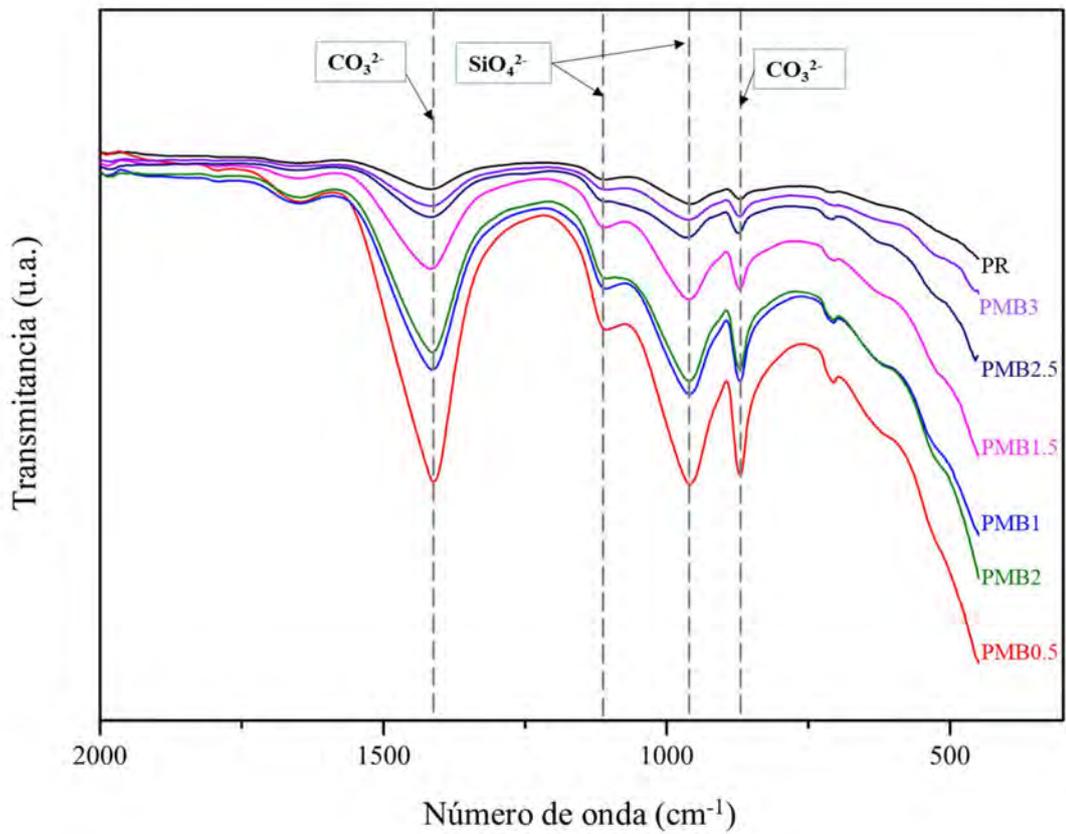


Figura 4-8. Espectros de FT-IR de PR y PMB, correspondiente a la R2 con número de onda en el rango 4000-2000 cm^{-1} .

En la Figura 4-9 se muestran los espectros de FT-IR de la R3, de 660-480 cm^{-1} , de PR y PMB. Se puede apreciar una banda amplia a 550 cm^{-1} atribuido al enlace Ca-O, lo que confirma una nueva estructura de red formado por la reacción de CSH y el BHPT [18,24,49].

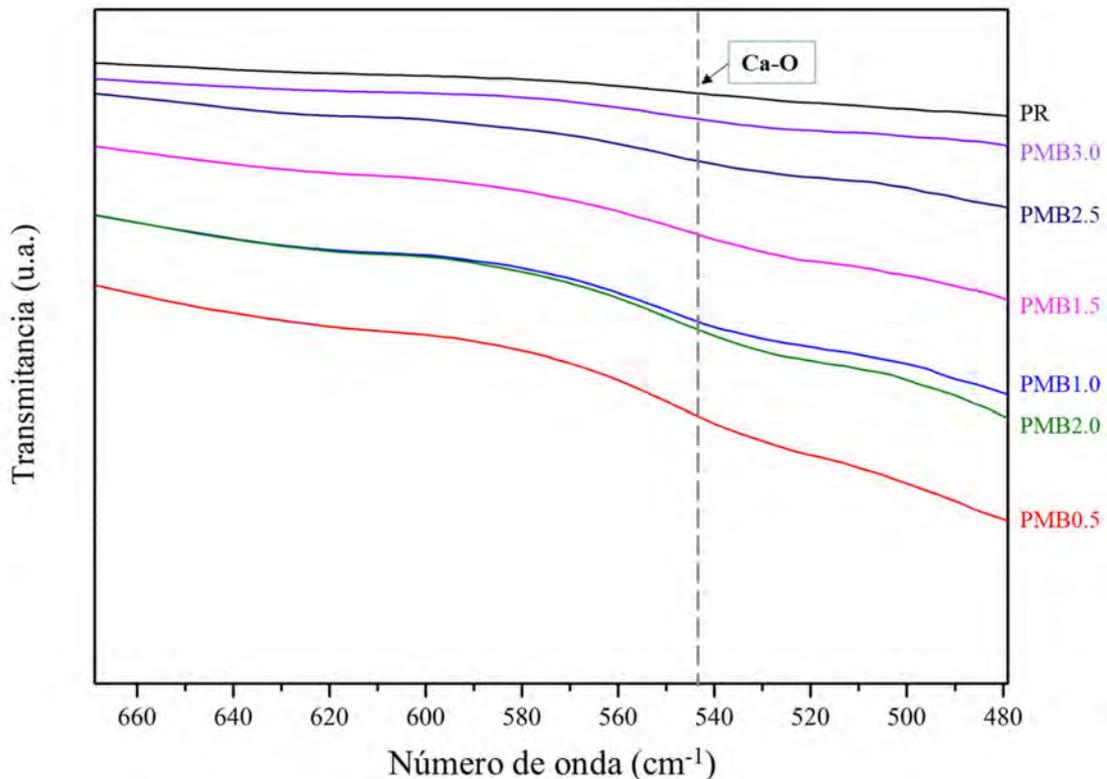


Figura 4-9. Espectros de FT-IR de PR y PMB, correspondiente a la R3 con número de onda en el rango 660-480 cm^{-1}

4.3 Fluidiez

En la Figura 4-10 se presenta la gráfica de fluidez de PR y PMB (0.5%-3.0% de BHPT), donde se muestran en las abscisas las muestras y en las ordenadas los promedios de los diámetros de estas. El promedio de diámetros fue de 21.82, 22.2, 16.5, 19.0, 19.4, 15.55 y 15.6 cm, para PR, PMB0.5, PMB1, PMB1.5, PMB2, PMB2.5 y PMB3, respectivamente.

Los datos obtenidos muestran que la adición de monómero de BHPT a la pasta de cemento redujo el agua necesaria para alcanzar la fluidez deseada, que en este caso es la de referencia, lo que aumenta su viscosidad. Las moléculas del monómero reaccionan, por una parte, con los granos del cemento, estabilizándolo y por otra parte, con las del agua, se reduce la tendencia de los granos de cemento a reaccionar con las del agua, por lo que la mezcla tiende a aglomerarse, sin embargo, una pequeña cantidad de BHPT podría mejorar la fluidez de la pasta sin afectar sus propiedades [18]. Dicho lo anterior y en base a los resultados, se toma como óptima a utilizarse la mezcla PMB0.5, debido a que incrementó levemente la fluidez y

con ello la trabajabilidad de la PMB siguió estable. PMB1.5 y PMB2 presentaron resultados similares entre sí, un poco menor que PR, los cuales se pudieran considerar como valores aceptables. PMB2.5 y PMB3 también presentaron resultados similares entre sí, pero disminuyeron considerablemente su fluidez respecto a PR, con disminución notable en su trabajabilidad, por lo cual no se consideran aceptables.

Es notorio que no se consideró el resultado de la muestra PMB1, debido a que no presenta un comportamiento congruente esperado, lo que implica algún error en su elaboración o medición. Esta omisión se realizará en el análisis de resultados de las caracterizaciones siguientes.

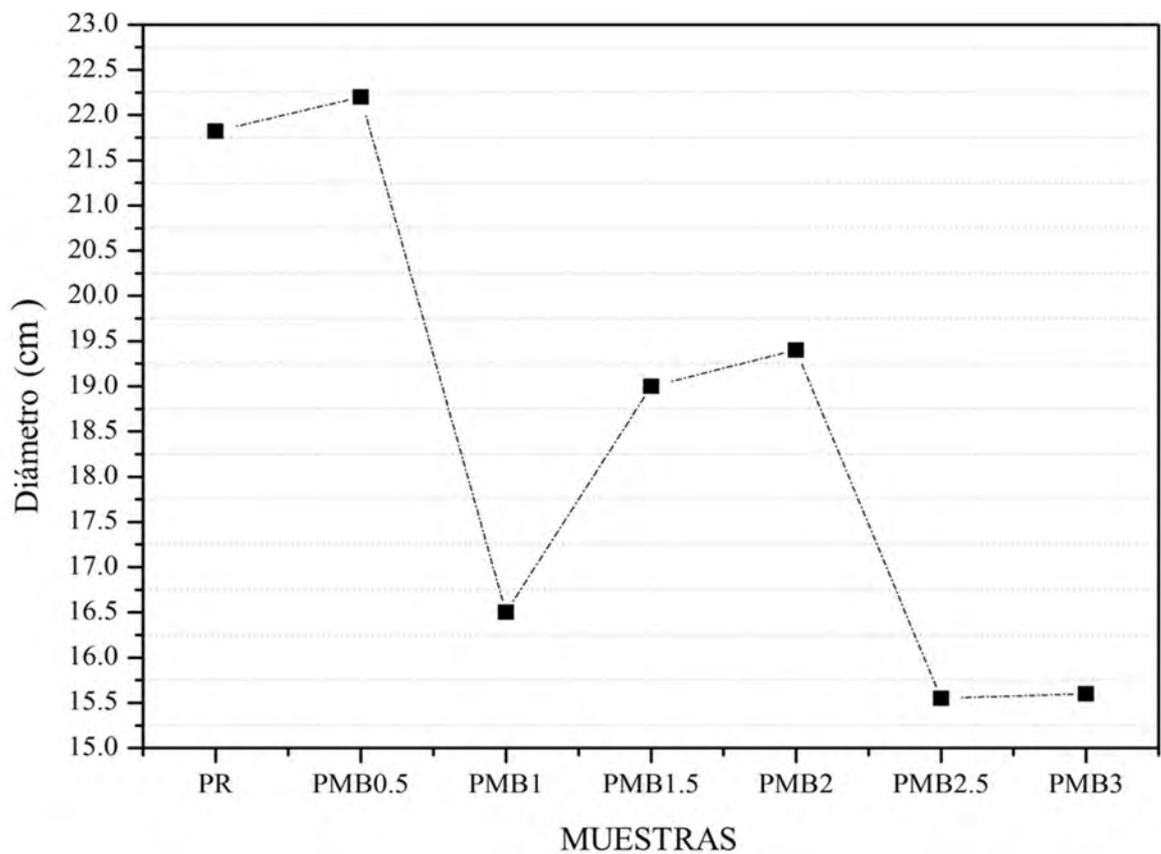


Figura 4-10. Resultado de fluidez de pastas de cemento PR y PMB.

4.4 TGA y DSC

En la Figura 4-11 se muestran los termogramas de TGA de la pasta cemento de referencia y pastas modificadas con BHPT (0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 y 3.0%) a 28 días de hidratación, en la abscisa se muestra la temperatura (24 a 800 °C) y en la ordenada, el porcentaje de peso perdido (60-105 %). Se observa que los termogramas muestran similitud en su comportamiento y presentan las fases principales generadas durante la hidratación del cemento: entre 20-200 °C, la primera pérdida se atribuye a la descomposición de AFm, AFt y CSH; de 350-550 °C, la segunda pérdida se asocia a la descomposición de CH y el ultimo intervalo entre 500-800 °C, la tercera pérdida se relaciona a la descomposición de los carbonatos de calcio (CaCO_3) [39,40,50].

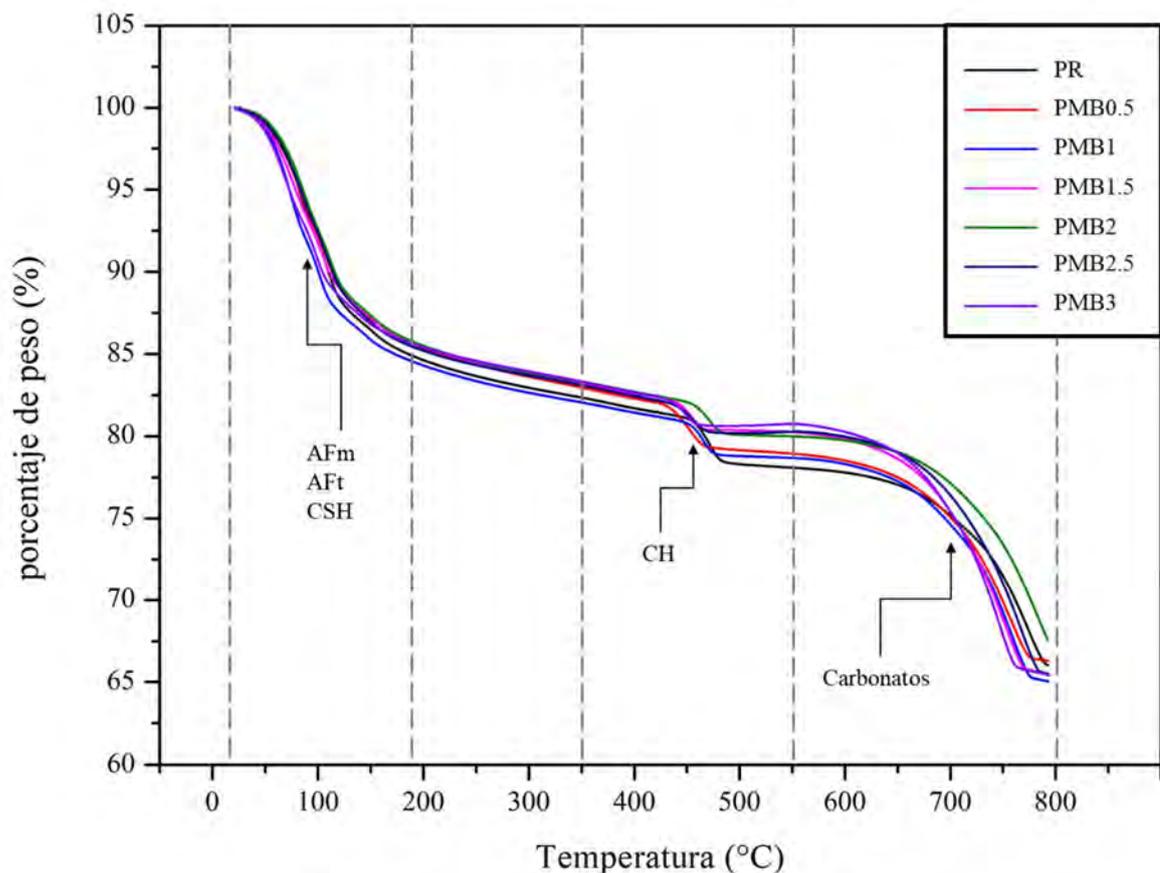


Figura 4-11. Termograma de pasta de cemento PR y pastas modificadas con BHPT (0.50, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 y 3.0%) a 28 días de hidratación.

En la Tabla 4.1 se muestran los porcentajes de peso con referencia a los productos de hidratación AFm, AFt y CSH de pastas de cemento de PR y PMB0.5, PMB1.0, PMB1.5,

PMB2.0, PMB2.5 y PMB3.0 a 28 días de hidratación, correspondientes a la Figura 4-12, Figura 4-13, Figura 4-14, Figura 4-15, Figura 4-16, Figura 4-17 y Figura 4-18 respectivamente, en las cuales se observan los termogramas y flujo de calor con los picos endotérmicos que indican el inicio y final de las pérdidas de peso; utilizados en el cálculo de acuerdo a lo explicado en la sección 3.4.4. Puede observarse que el porcentaje de AFm, AFt y CSH aumentó conforme aumentaba el porcentaje de BHPT, lo que puede atribuirse al aumento de interacción de las moléculas de cemento y agua, por la movilidad de las moléculas de agua [27].

Tabla 4.1. Porcentajes de peso con referencia a los productos de hidratación AFm, AFt y CSH de pastas de cemento de PR y PMB0.5, PMB1.0, PMB1.5, PMB2.0, PMB2.5 y PMB3.0 a 28 días de hidratación.

FIGURA	MUESTRA	TEMPERATURA °C		PESO (mg)	% PESO
Figura 4-12	PR	Inicial	46.45	47.31	12.83
		Final	147.13	41.20	
Figura 4-13	PMB0.5	Inicial	22.63	54.84	14.51
		Final	196.09	46.88	
Figura 4-14	PMB1	Inicial	50.69	31.99	12.38
		Final	141.78	27.98	
Figura 4-15	PMB1.5	Inicial	21.07	40.87	14.40
		Final	192.81	35.00	
Figura 4-16	PMB2	Inicial	28.93	60.76	14.14
		Final	190.11	52.16	
Figura 4-17	PMB2.5	Inicial	27.37	55.12	14.54
		Final	193.16	47.09	
Figura 4-18	PMB3	Inicial	22.65	31.67	14.25
		Final	188.38	27.15	

En Tabla 4.2 se muestran los porcentajes en peso con referencia al producto de hidratación CSH de pastas de cemento de PR, PMB0.5, PMB1.0, PMB1.5, PMB2.0, PMB2.5 y PMB3.0 a 28 días de hidratación. Puede observarse que el contenido de CH disminuyó en todas las pastas modificadas con BHPT, la más cercana es PMB0.5 con un 5% menos que PR, por lo que se puede asumir que el BHPT inhibió el proceso de hidratación y provocó que la velocidad de hidratación sea aún más lenta que la de referencia [10,12,23].

Tabla 4.2. Porcentajes de pérdida de peso atribuido a CH en un rango de 400-500 °C, en pasta de referencia y pastas modificadas con BHPT (0.50, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 y 3.0%) a 28 días de hidratación.

FIGURA	MUESTRA	TEMPERATURA °C		PESO (mg)	% PESO
Figura 4-12	PR	Inicial	434.92	38.68	2.83
		Final	483.65	37.33	
Figura 4-13	PMB0.5	Inicial	421.67	44.99	2.69
		Final	470.41	43.52	
Figura 4-14	PMB1	Inicial	434.56	26.26	2.12
		Final	477.35	25.57	
Figura 4-15	PMB1.5	Inicial	436.58	33.58	1.76
		Final	468.34	32.86	
Figura 4-16	PMB2	Inicial	441.02	50.00	2.08
		Final	491.07	48.73	
Figura 4-17	PMB2.5	Inicial	426.51	45.30	1.86
		Final	472.79	44.27	
Figura 4-18	PMB3	Inicial	435.15	26.03	1.48
		Final	470.45	25.56	

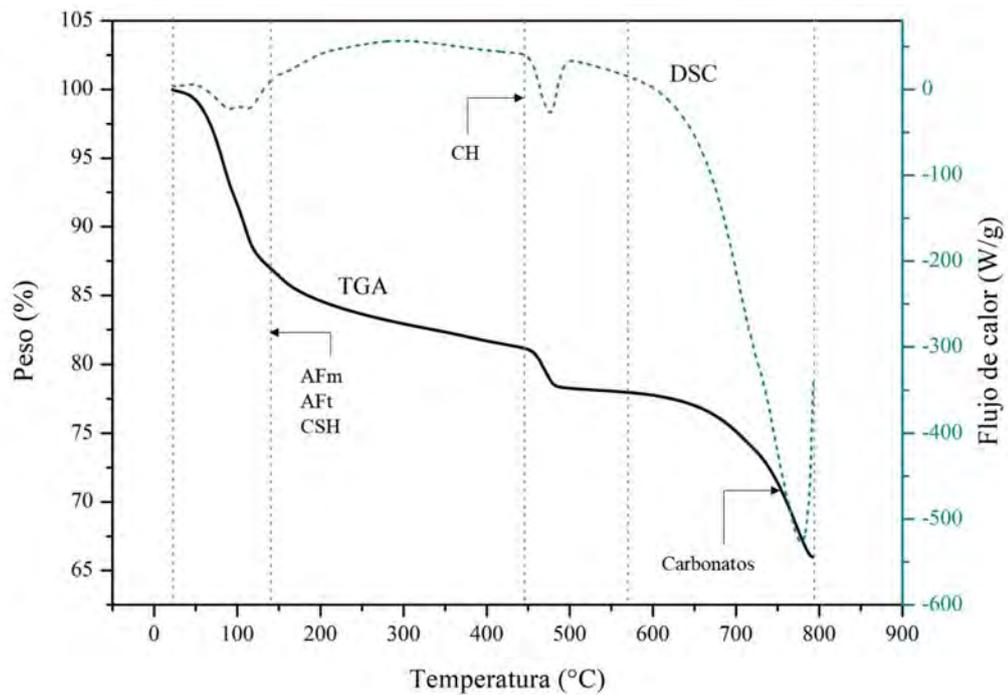


Figura 4-12. TGA y DSC de muestra PR (0% de BHPT)

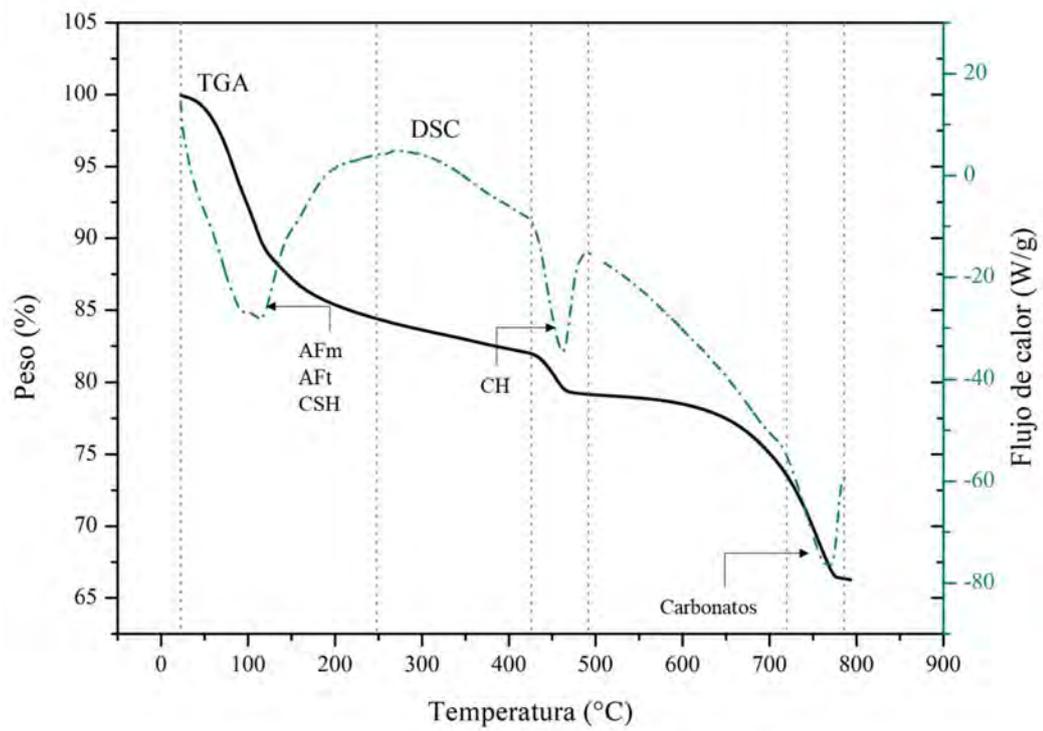


Figura 4-13. TGA y DSC de muestra PMB0.5 (0.5% de BHPT)

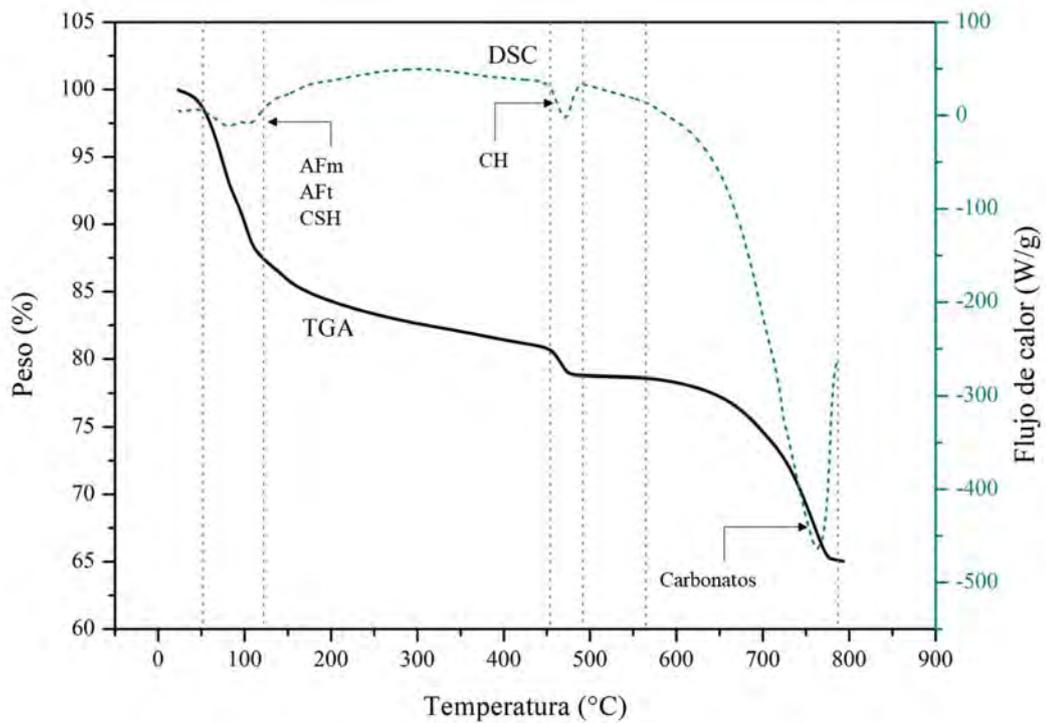


Figura 4-14. TGA y DSC de muestra PMB1 (1.0% de BHPT)

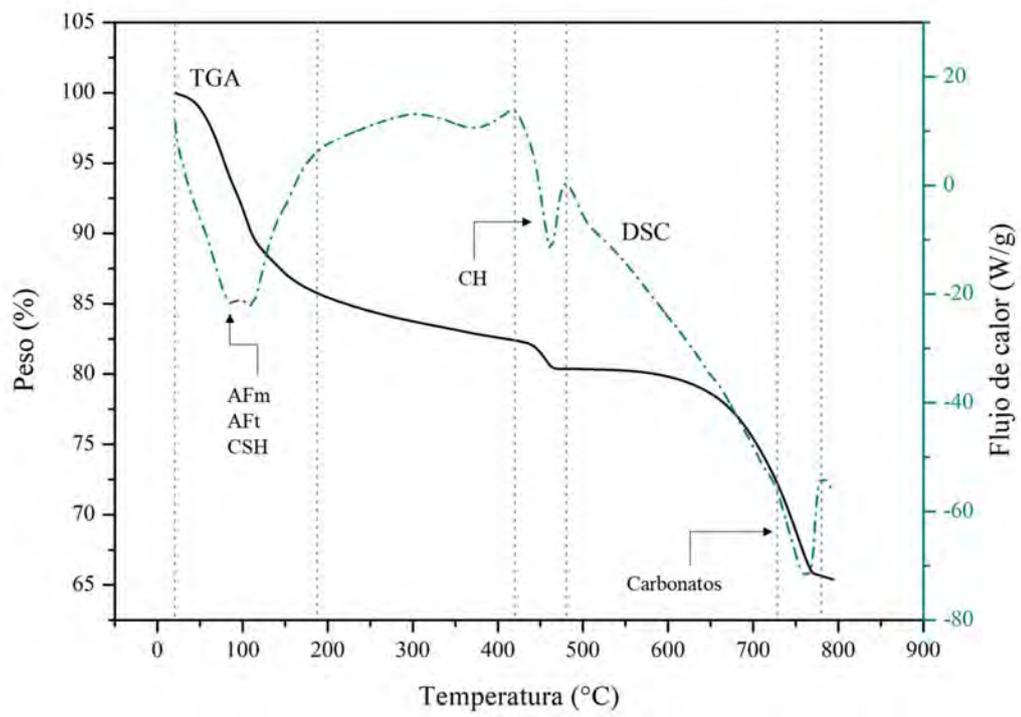


Figura 4-15. TGA y DSC de muestra PMB1.5 (1.5% de BHPT)

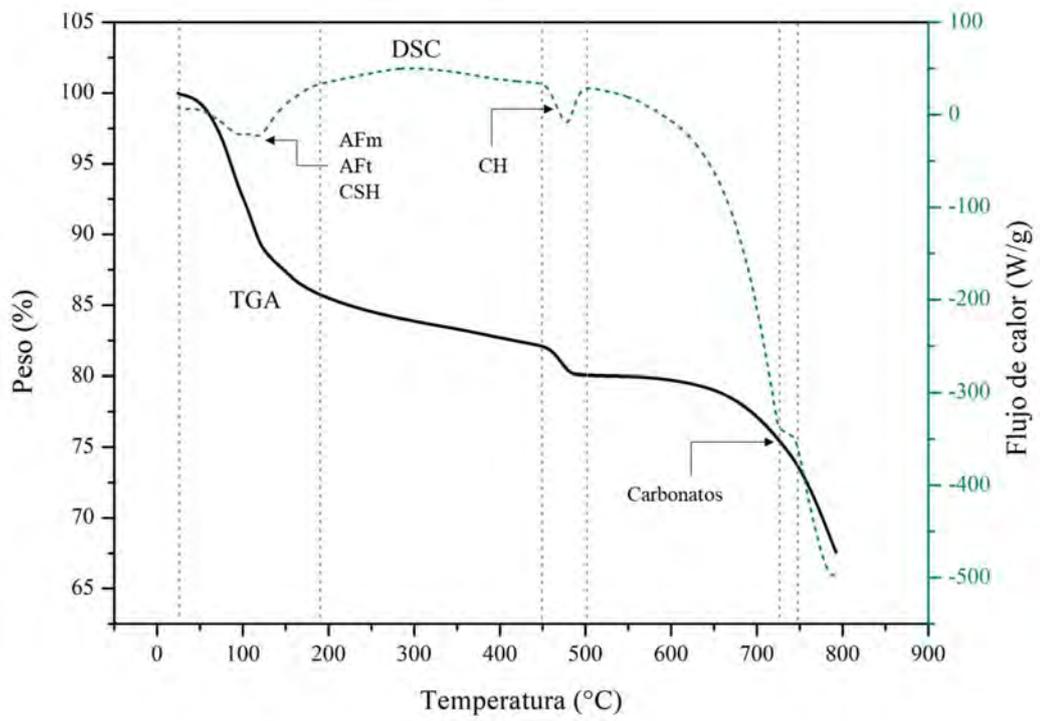


Figura 4-16. TGA y DSC de muestra PMB2 (2.0% de BHPT)

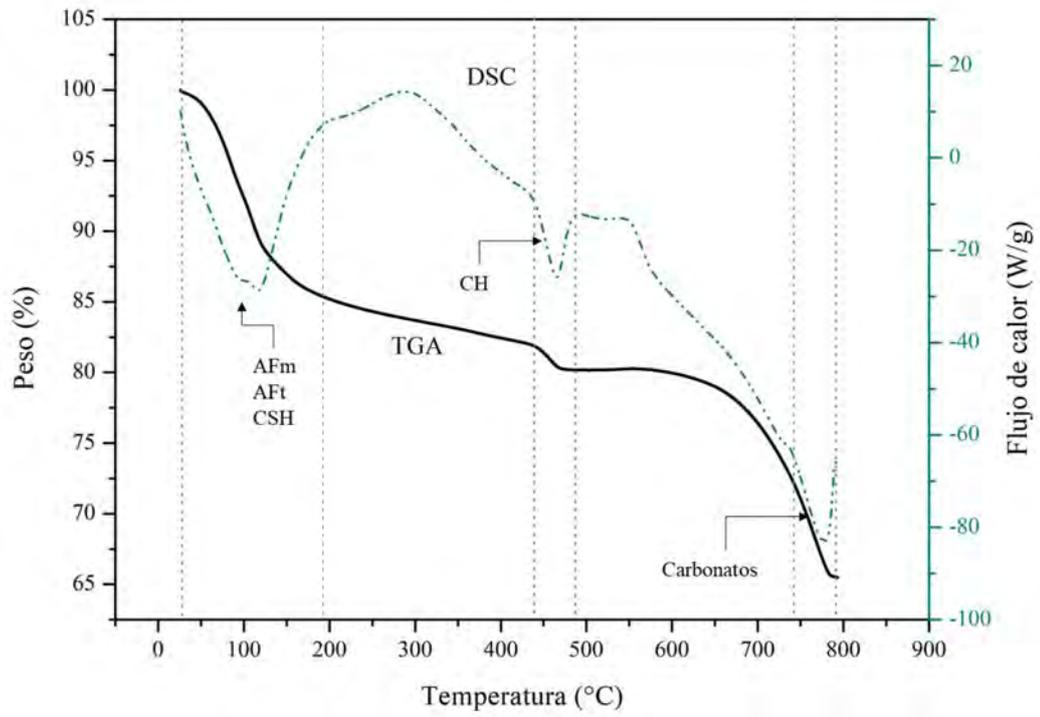


Figura 4-17. TGA y DSC de muestra PMB2.5 (2.5% de BHPT)

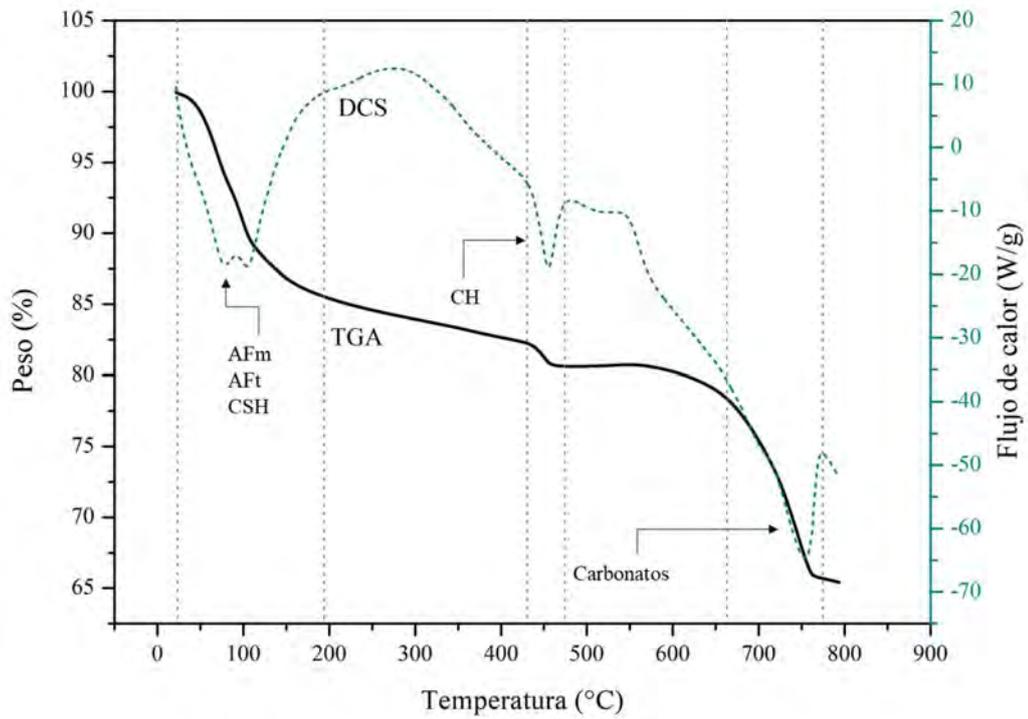


Figura 4-18. TGA y DSC de muestra PMB3 (3.0% de BHPT)

4.5 Conductividad térmica

En la Figura 4-19 se muestra la conductividad térmica de pastas de cemento de PR y PMB0.5, PMB1.0, PMB1.5, PMB2.0, PMB2.5 y PMB3.0 a 28 días de hidratación y resultados de trabajos previos, pasta de cemento con látex (PR-Látex), pasta de cemento con monómero BHET (PR-BHET) y mortero con BHET (MOR-BHET), donde se colocó una línea punteada sobre el valor de PR. Se observa que la adición del BHPT en las pastas no tuvo gran influencia, debido al bajo porcentaje de BHPT utilizado (0.5-3.0% respecto al peso del cemento), confirmado por trabajos previos de pastas de cemento modificadas con porcentaje de adición o sustitución de polímero o monómero, donde se obtuvo conductividad térmica de 0.57 a 0.75 W/mK, al usar porcentajes más altos de aditivo, de un 7 a 20% [13,26,51]. Las fluctuaciones más notorias en PMB1.0, PMB1.5 y PMB2.0, se les atribuyen a algunas aglomeraciones de las moléculas del BHPT [13,26].

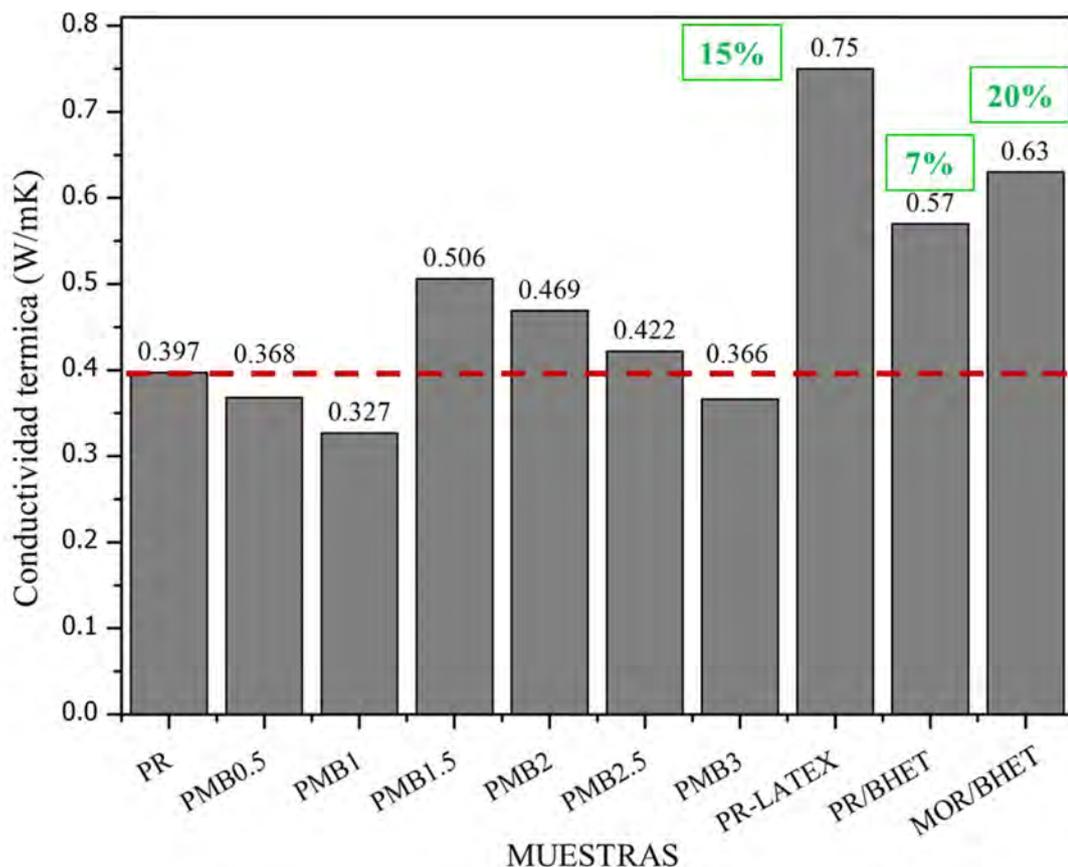


Figura 4-19. Conductividad térmica de pastas de cemento de PR y PMB0.5, PMB1.0, PMB1.5, PMB2.0, PMB2.5 y PMB3.0 a 28 días de hidratación y pasta de cemento con látex (PR-Látex), pasta de cemento con monómero BHET (PR-BHET) y mortero con BHET (MOR-BHET).

4.6 Resistividad eléctrica

En la Figura 4-20 se observan los resultados de resistividad eléctrica ($\Omega\cdot m$) en compuestos cementicios secos a temperatura ambiente, de pastas de cemento de PR y PMB0.5, PMB1.0, PMB1.5, PMB2.0, PMB2.5 y PMB3.0 a 28 días de hidratación. En la gráfica se observa un incremento notable de la resistividad eléctrica con respecto a PR de ($34.57 \Omega\cdot m$). Las muestras PMB0.5, PMB1.5 y PMB2.0 con 53.13, 53.70 y 54.21 $\Omega\cdot m$ respectivamente, son las de mayor resistividad eléctrica y de valores similares entre sí. Las muestras de PMB2.5 ($52.54 \Omega\cdot m$) y PMB3 ($46.41 \Omega\cdot m$) presentan un ligero decremento progresivo respecto a las anteriores. Respecto a la muestra PMB1, se propone no considerarla, debido a que no presenta un comportamiento congruente esperado, lo que implica algún error en su elaboración o medición.

Todas las PMB mostraron un gran incremento a la resistividad eléctrica, lo que nos indica que su porosidad es sustancialmente menor respecto a la de referencia, esta disminución podría haberse producido porque los productos de hidratación y el BHPT, rellenaron los poros existentes, esto proporciona una resistencia a la corrosión aceptable en todas las muestras [13].

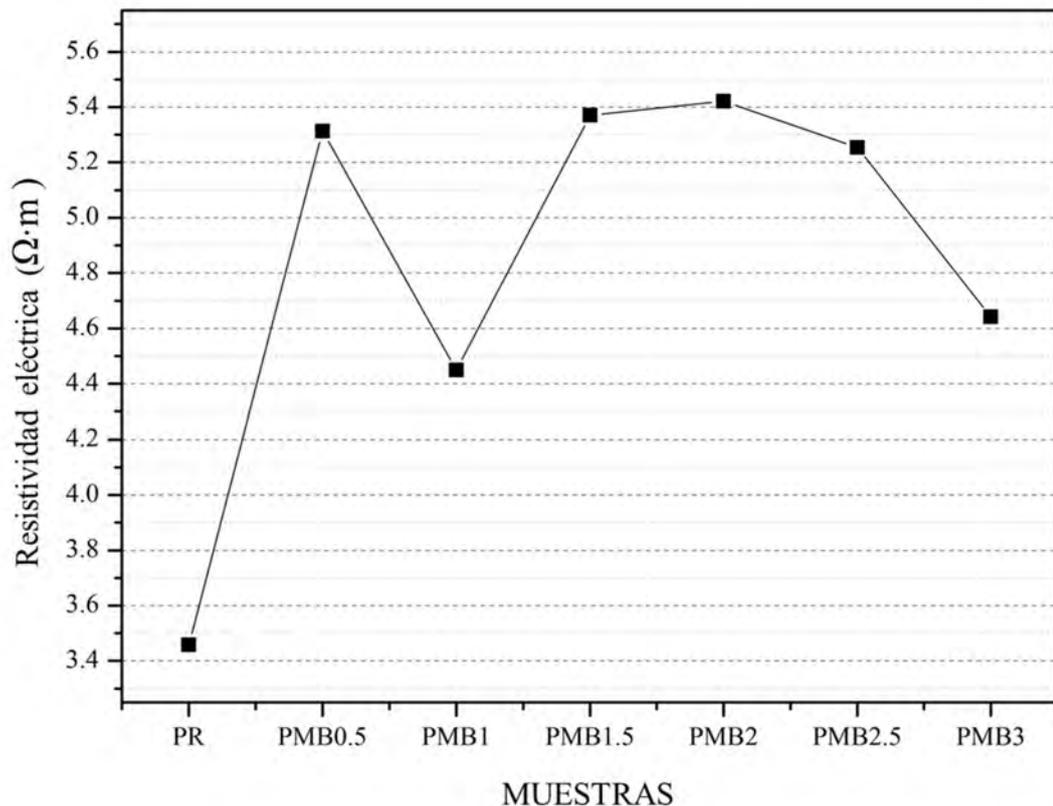


Figura 4-20. Resistividad eléctrica de PR y PMB0.5, PMB1, PMB1.5, PMB2, PMB2.5 y PMB3 a 28 días de hidratación.

4.7 Absorción de agua

En la Figura 4-21 se graficaron los resultados de absorción de agua en las PMB, se muestran en las abscisas el tiempo ($s^{1/2}$) y en las ordenadas las láminas de absorción en (mm). Las mediciones se hicieron de acuerdo con la norma ASTM C 1585-20, con una medición inicial de las primeras 6 horas. Se observa que las gráficas de velocidad de absorción de agua para las PMB son entre ellas de valores y comportamiento similares, porque solo presentan entre las más alejadas (PMB1 y PMB3) una diferencia de 1.5 mm y el punto final (a 6 h) de PR obtuvo una lámina de absorción de 6.0125 mm, el más cercano fue PMB1 con 3.5395 I/mm, con un valor muy cercano está PMB0.5 con 3.3466 I/mm y con el valor mínimo PMB3.0 con 1.9878 I/(mm). Por lo anterior, se considera que todas las PMB tienen un comportamiento muy favorable respecto a PR.

Las PMB presentaron notoriamente menor lámina de absorción de agua que la de PR, lo cual pudo ocurrir por las reacciones químicas entre los grupos funcionales del BHPT y el CH, lo

que aumentó la hidratación por medio de los grupos hidroxilos del BHPT, al absorber el agua libre de los compuestos cementicios [13].

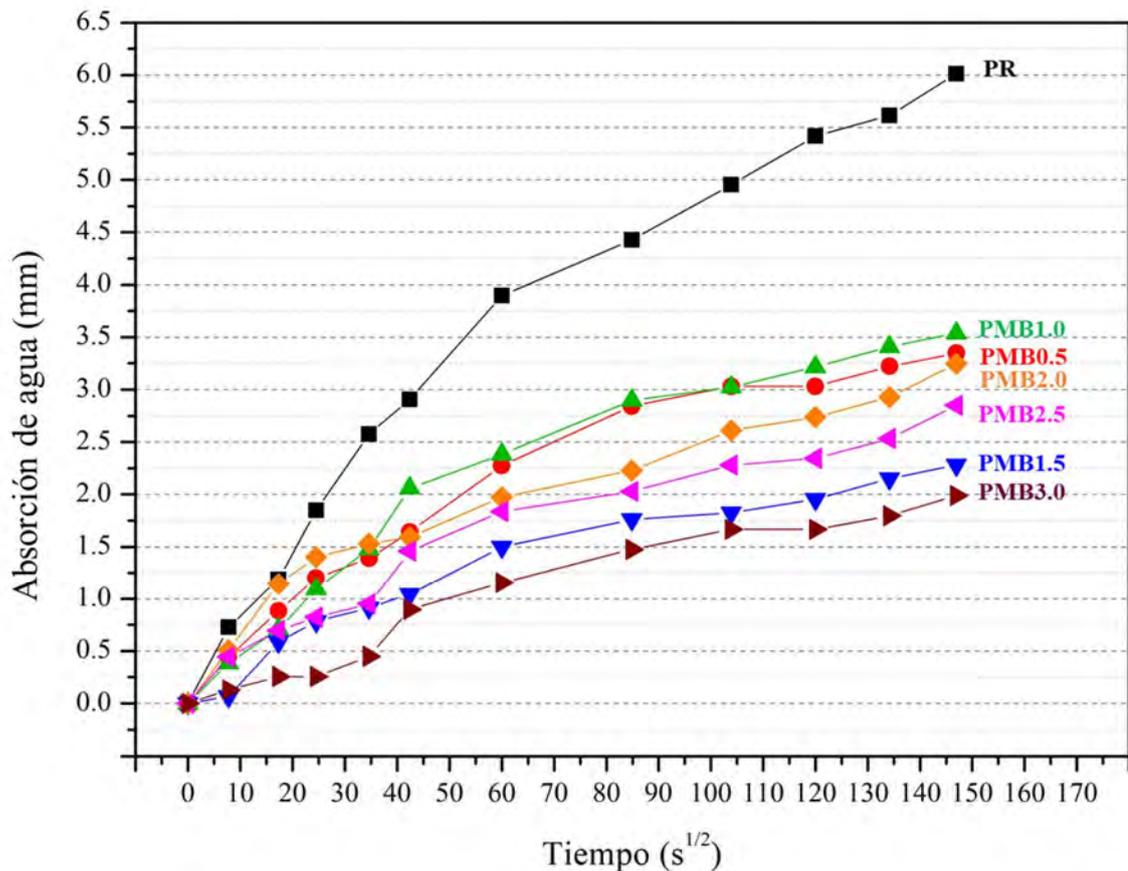


Figura 4-21. Gráfica de velocidad de absorción de agua PR y PMB0.5, PMB1, PMB1.5, PMB2, PMB2.5 y PMB3 a 28 días de hidratación.

4.8 DRX

El estudio de DRX se realizó para analizar la producción de CSH en el proceso de hidratación del cemento, pero debido a su estructura amorfa, no se puede analizar directamente, sino por sus componentes más significativos: portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), calcita (CaCO_3), cuarzo (SiO_2) y etringita (AFt), que presentan una estructura cristalina. En la Figura 4-22 se muestra el difractograma de rayos X de pastas de cemento de PR y PMB0.5, PMB1.0, PMB1.5, PMB2.0, PMB2.5 y PMB3.0 a 28 días de hidratación, sus compuestos, portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), calcita (CaCO_3), cuarzo (SiO_2) y la etringita (AFt), con su pico de difracción más intenso en 2θ , de 18.1° , 29.5° , 26.7° y 15.8° , respectivamente [25][26]. Se observa que no

hubo cambio en los sistemas cristalográficos, con lo cual se infiere que la adición de BHPT no afectó la producción de elementos de hidratación más significativos del cemento.

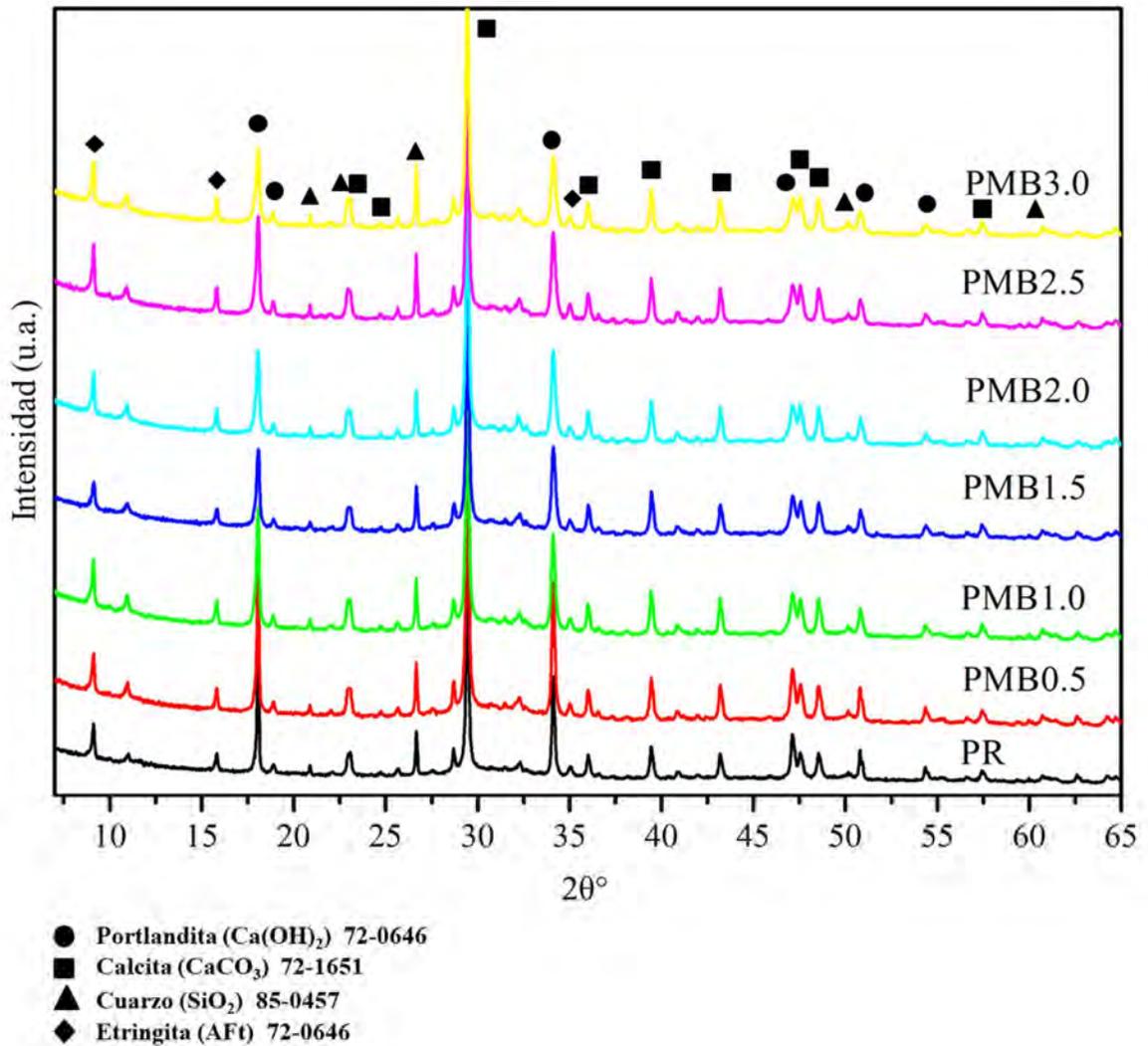


Figura 4-22. Difractogramas de rayos X de pastas de cemento de PR y PMB0.5, PMB1.0, PMB1.5, PMB2.0, PMB2.5 y PMB3.0 a 28 días de hidratación.

En la Figura 4-23 se muestra la ampliación del pico más intenso de la portlandita de 18.1° . Se observa que conforme se incrementa el BHPT disminuye la intensidad del pico (portlandita). Para el caso de PMB0.5, la portlandita incrementó con respecto a la PR [25,39].

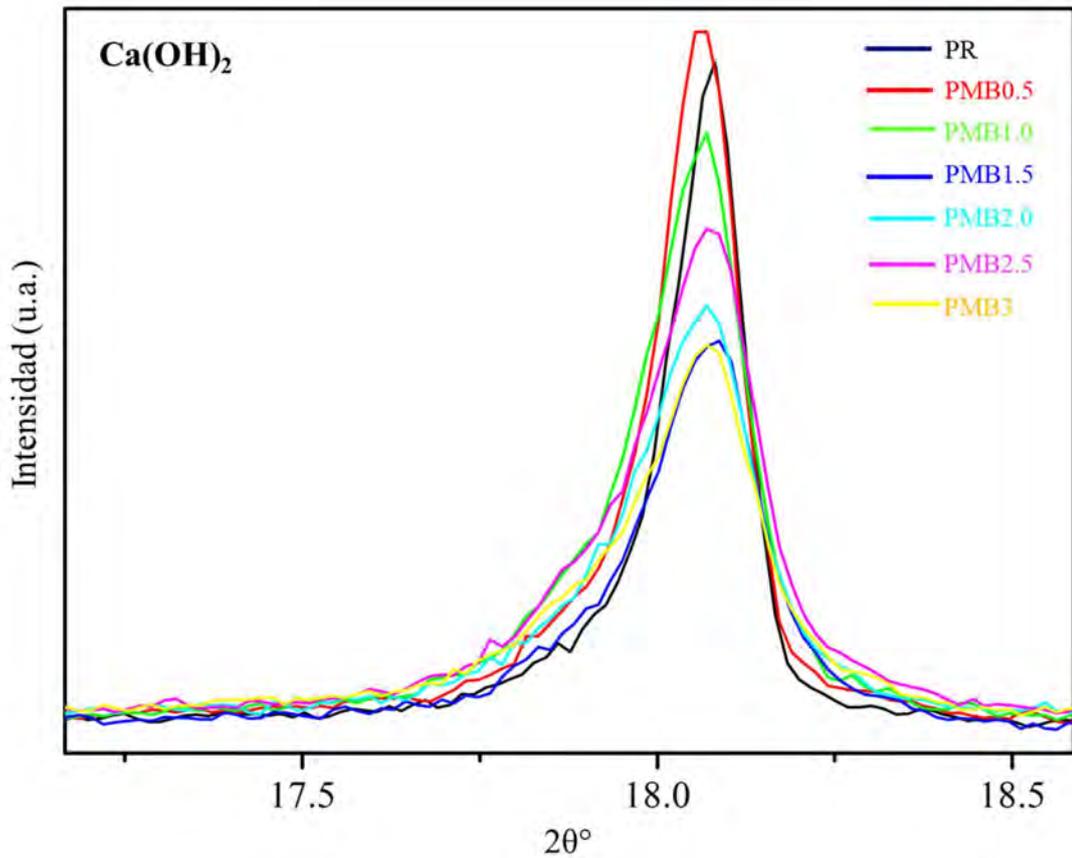


Figura 4-23. Ampliación del pico más intenso de la portlandita $2\theta = 18.1^\circ$.

En la Figura 4-24 se observa la ampliación del pico más intenso de la calcita de 29.5° . Se observa que todos los picos de difracción de las PMB fueron mayores que la PR, lo que indica que la adición del BHPT mejoró el proceso de carbonatación del cemento [25,39].

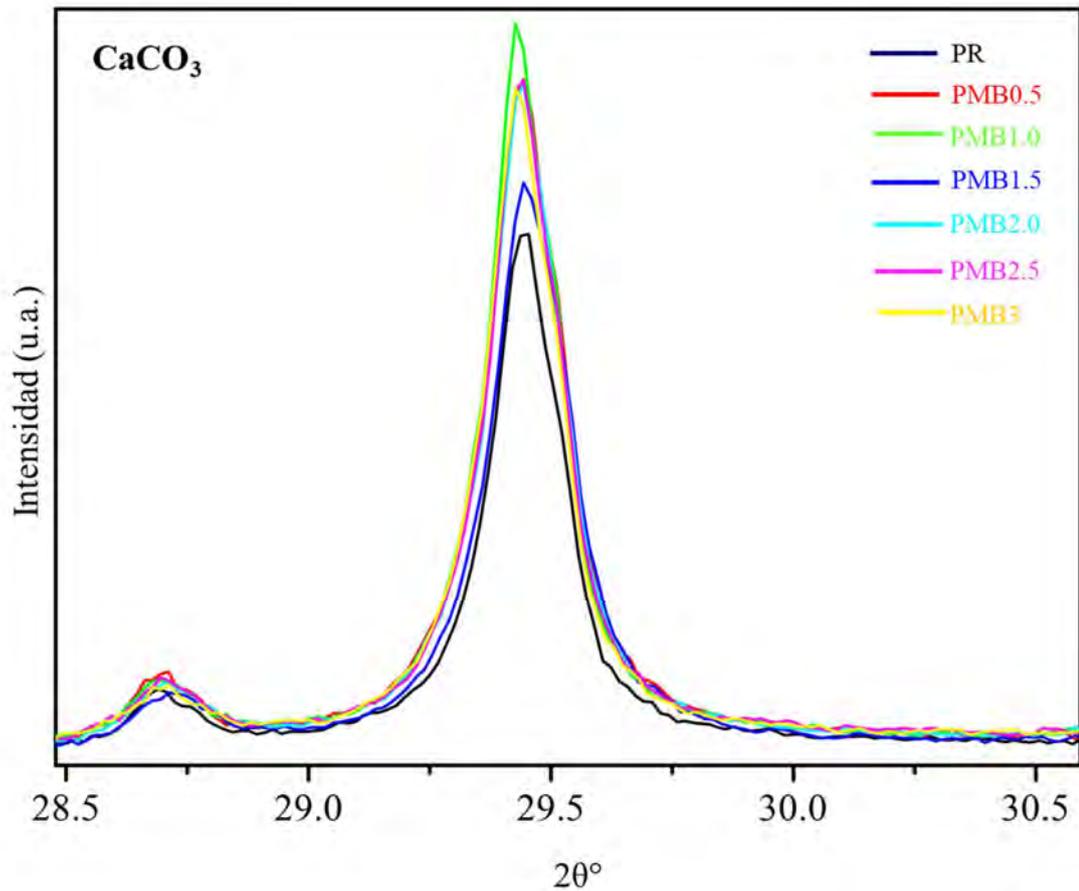


Figura 4-24. Ampliación del pico más intenso de la calcita de 29.5°.

En la Figura 4-25 y Figura 4-26 la se presentan la ampliación del pico más intenso de cuarzo a 26.7° y para etringita a 15.8°. Se observa que todas las muestras con excepción de PMB1.5 tienen una intensidad mayor a la PR, aunque la intensidad no fue directamente proporcional al contenido de estos productos de hidratación, indica que hubo influencia del BHPT, en la mejora de la formación de SiO_2 y AFt [25,39].

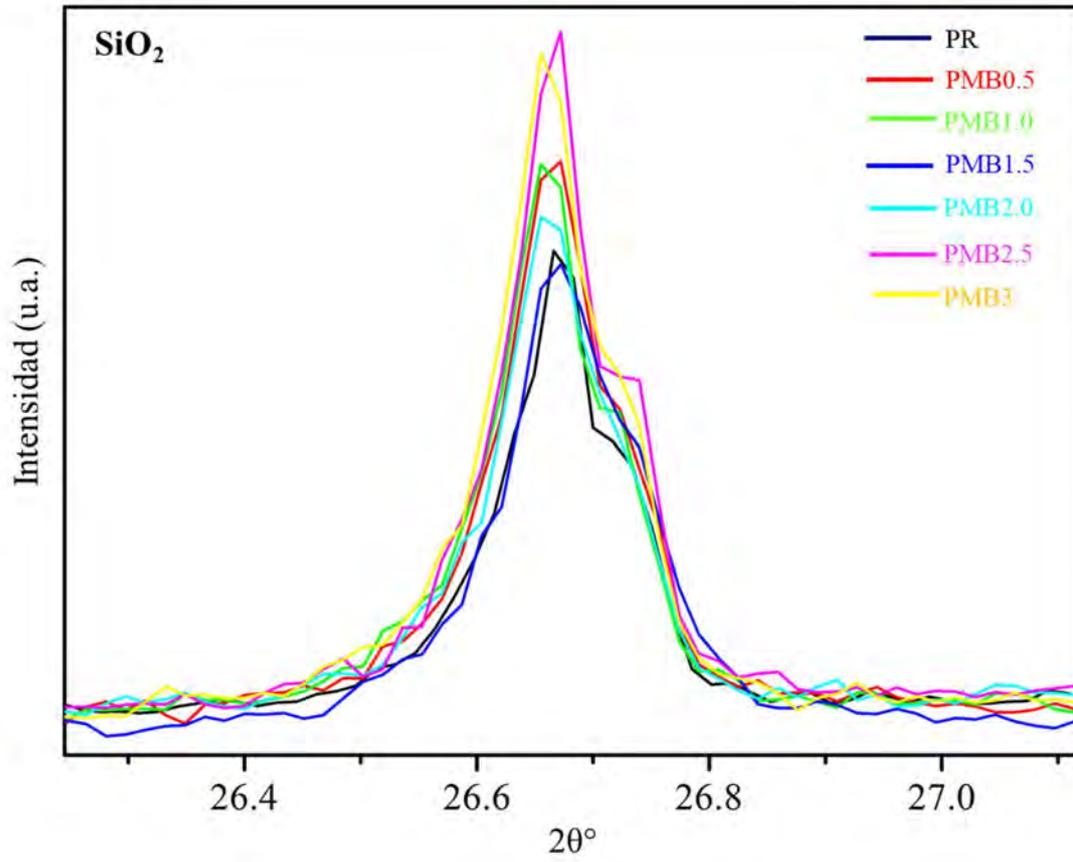


Figura 4-25. Ampliación del pico más intenso de cuarzo de 26.7° .

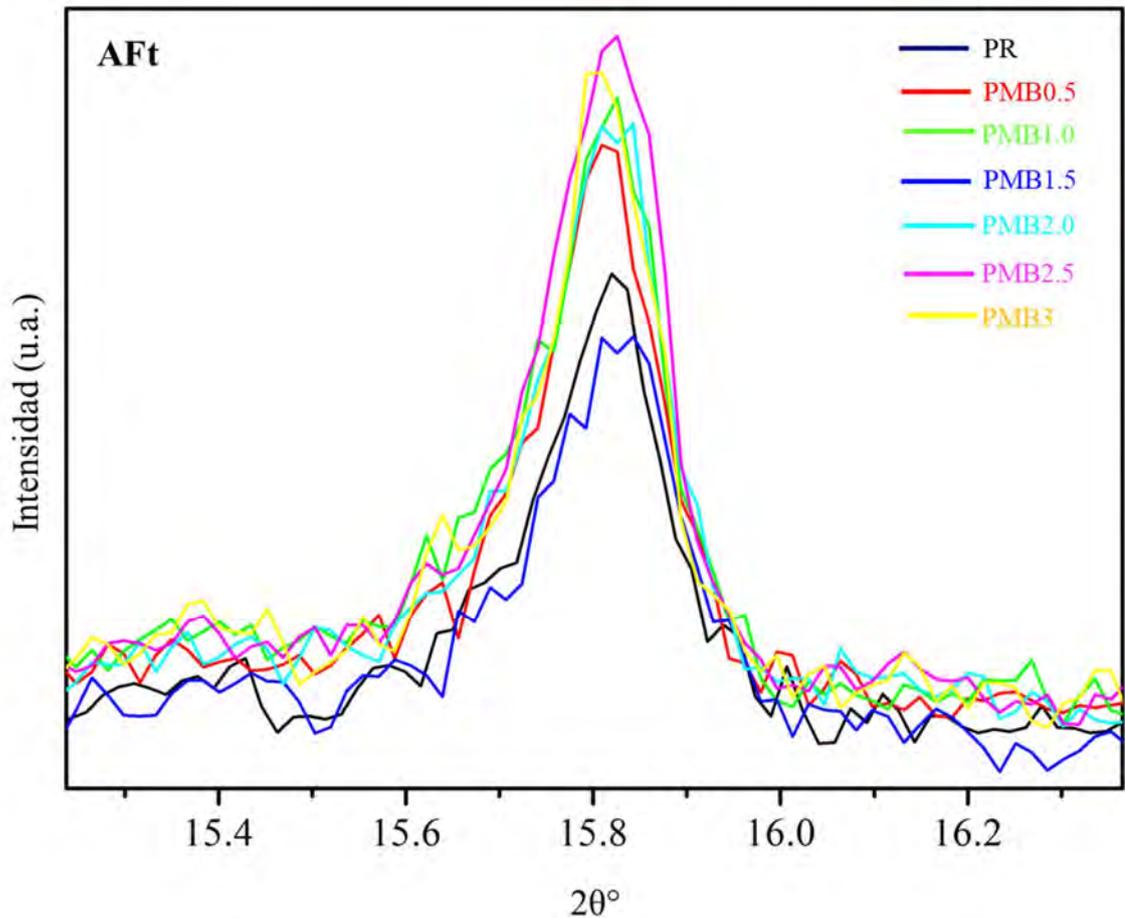


Figura 4-26. Ampliación de pico más intenso de etringita de 15.8°.

4.9 SEM y EDS

En la Figura 4-27 se muestra la micrografía obtenida por SEM y el análisis elemental, por EDS, de PR, en A) 10.0 K de aumentos y B) 20.0 K de aumentos. Se puede observar que el sitio señalado en la micrografía de SEM, de la muestra de EDS 1, presenta una forma característica de gel y en el análisis de elemental por EDS, sus elementos con porcentajes más abundantes son O, Ca y Si, esto confirma la formación de CSH. En el análisis elemental por EDS 2, los elementos con porcentajes más abundantes son O, Ca, Si y Al, así como una forma característica acicular (aguja), lo que confirma la formación de etringita [39,52–54].

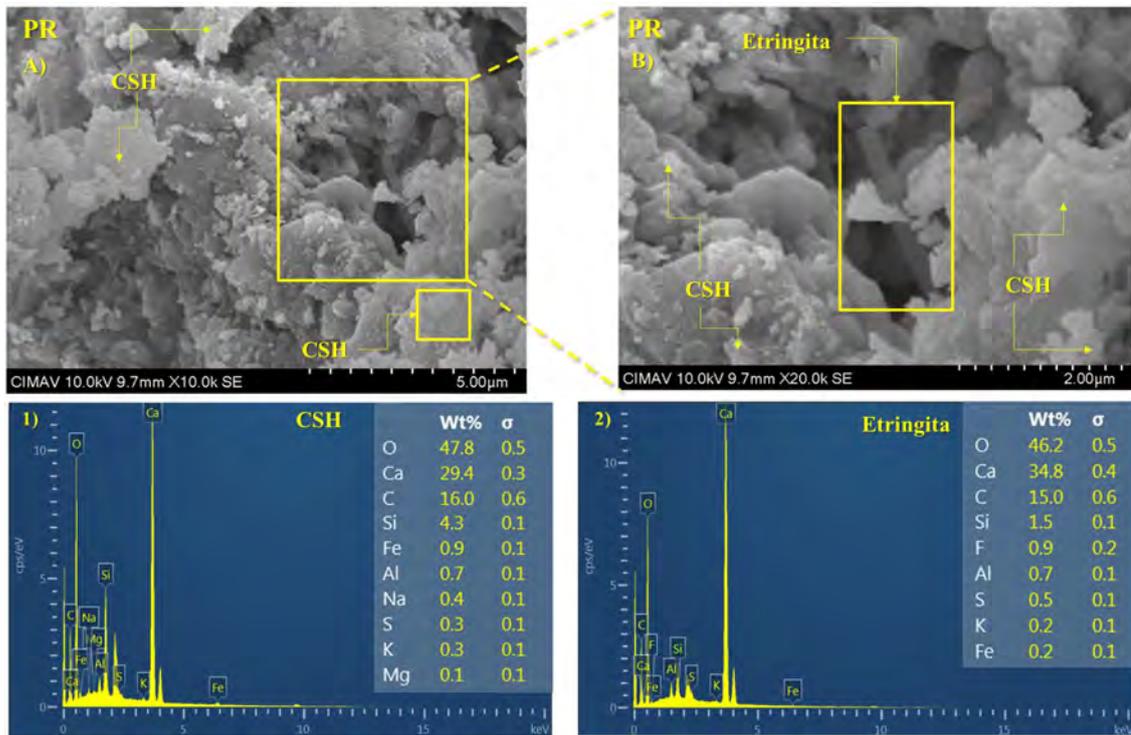


Figura 4-27. Micrografía obtenida por SEM y el análisis elemental, por EDS, de PR. A) 10.00K de aumentos y B) 20.0K de aumentos.

En la Figura 4-28 se muestra la micrografía obtenida por SEM y el análisis elemental, por EDS, de PMB0.5, A) 5.00 K de aumentos y B) 10.0 K de aumentos. Se puede observar en el análisis elemental EDS 1, que los elementos con porcentajes más abundantes son O, Ca y Si, así como una forma característica de panal de abeja, lo que confirma la formación de CSH. En el análisis elemental EDS 2, los elementos con porcentajes más abundantes son O, Ca, Si y Al, así como una forma característica acicular (aguja), lo que confirma la formación de etringita [39,52–54].

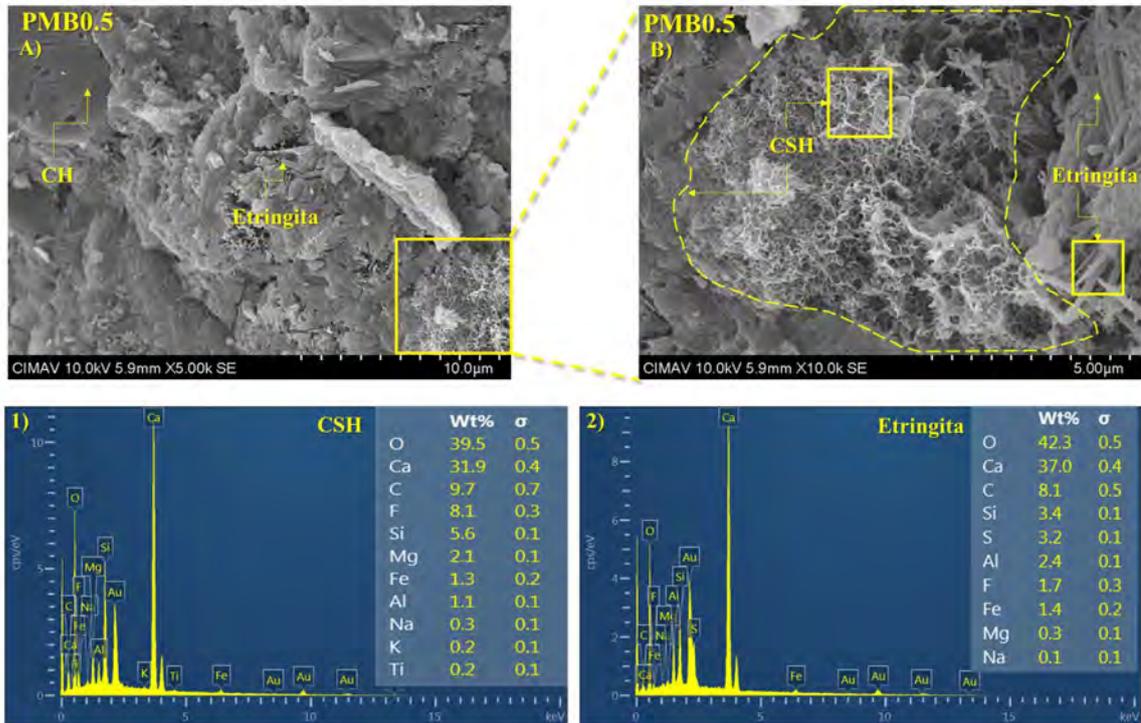


Figura 4-28. Morfología con SEM y el análisis elemental con EDS de PMB0.5, A) 5.00K de aumentos y B) 10.0K de aumentos.

En la Figura 4-29 se muestra la micrografía obtenida por SEM y el análisis elemental con EDS de PMB1.5, A) 10.0 K de aumentos, B) 15.0 K de aumentos y C) 20.0K aumentos. Se puede observar en la micrografía “A” los volúmenes característicos de la Etringita y del CSH, en la micrografía “B” se observa un acercamiento de la zona marcada, se aprecia los volúmenes característicos en forma de hojuela lisas de CH. En la micrografía “C” se puede observar la morfología característica del CSH y la etringita, corroborado en: el análisis elemental EDS 1, los elementos con porcentajes más abundantes son O, Ca y Si, así como una forma característica de red o panal de abeja, lo que confirma la formación de CSH y en el análisis elemental EDS 2, los elementos con porcentajes más abundantes y característicos son O, Ca, Si y Al, así como una forma característica acicular (aguja), lo que confirma la formación de etringita [39,50–52].

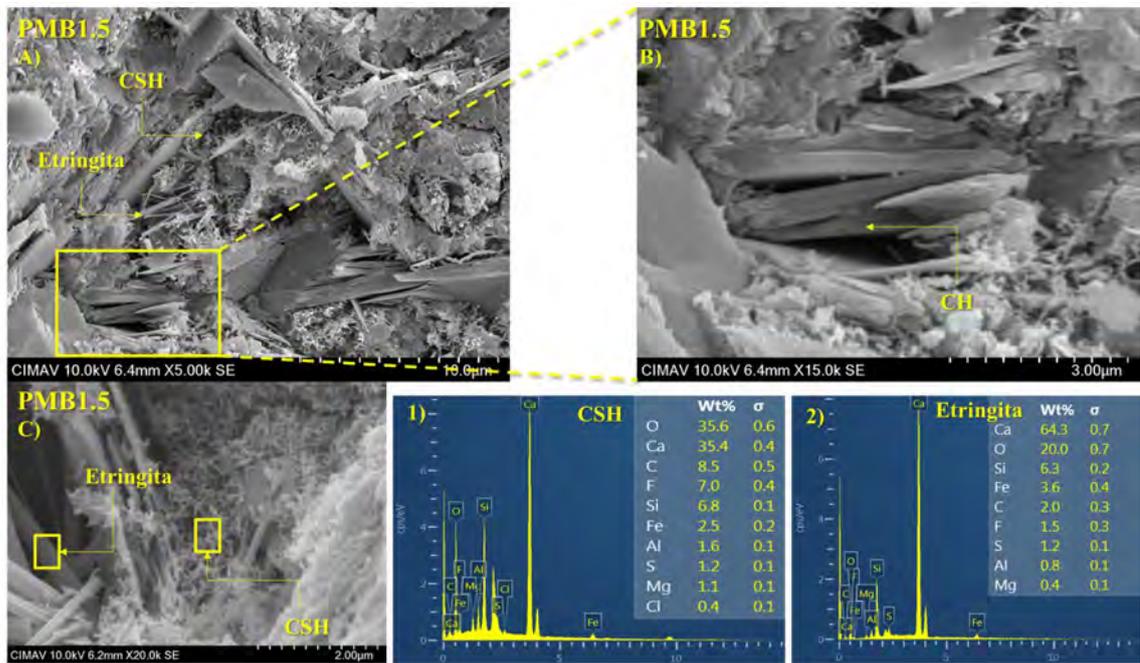


Figura 4-29. Morfología con SEM y el análisis elemental con EDS de PMB1.5, A) 5.00K de aumentos, B) 10.0K de aumentos y C) 20.0K aumentos.

En la Figura 4-30 se muestra la micrografía obtenida por SEM y el análisis elemental con EDS de PMB3, A) 10.0 K de aumentos, B) 15.0 K de aumentos. Se puede observar en el análisis elemental EDS 1, los elementos con porcentajes abundantes son O, Ca y Si, así como una forma característica de panal de abeja, lo que confirma la formación de CSH. En el análisis elemental EDS 2, los elementos con porcentajes abundantes son O, Ca, Si y Al, así como una forma característica acicular (aguja), lo que confirma la formación de etringita [39,52–54].

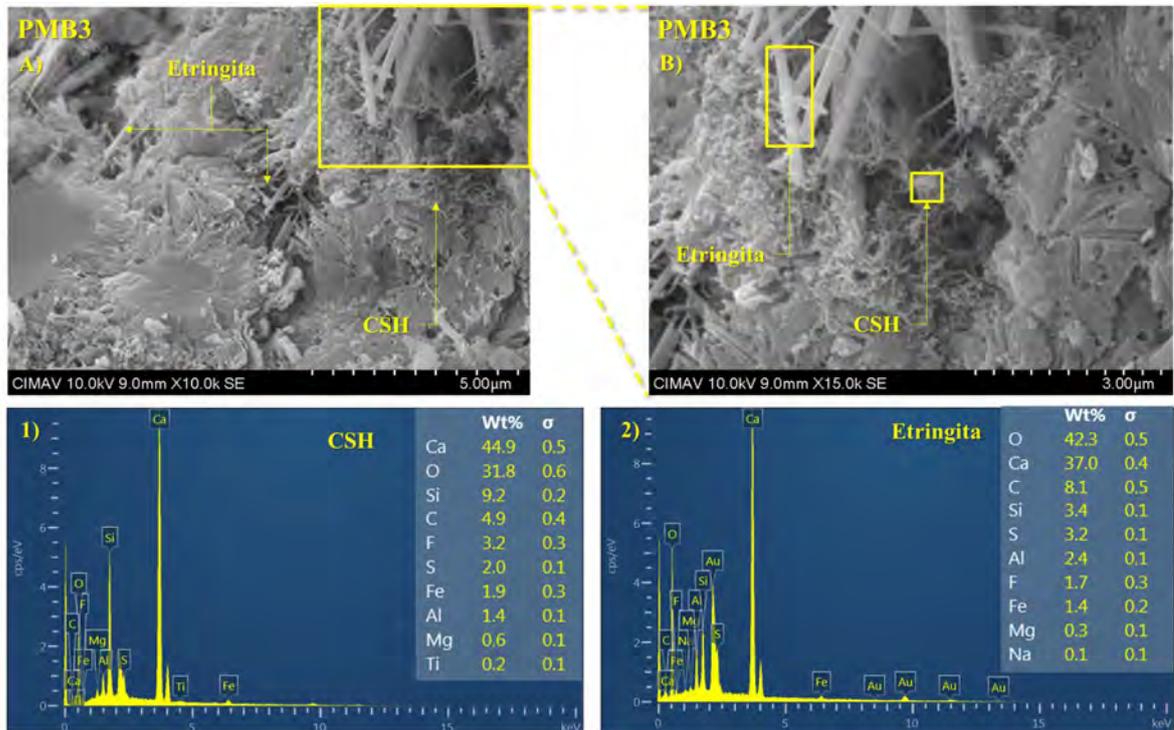


Figura 4-30. Morfología con SEM y el análisis elemental con EDS de PMB3, A) 10.00K de aumentos y B) 15.0K de aumentos.

En la Figura 4-31 se muestran las micrografías obtenidas por SEM, de 8.0 y 10.0 K aumentos, de PR, PMB0.5, PMB1.5 y PMB3. Se observa en las imágenes un incremento de etringita y CSH. También se puede observar que la presencia de BHPT provocó un cambio en la morfología del CSH, en PR presentó una forma semejante a un gel y para PMB0.5, PMB1.5, y PMB3, presentó una forma semejante a una red o panal de abeja, lo que nos permite suponer que el CSH y el BHPT se entrelazaron químicamente, lo que provocó que se relacionaran más estrechamente todos productos de hidratación, lo que densifica la matriz de cemento y probablemente influyó en la mejora sustancial de sus propiedades mecánicas [21,48,52,55,56].

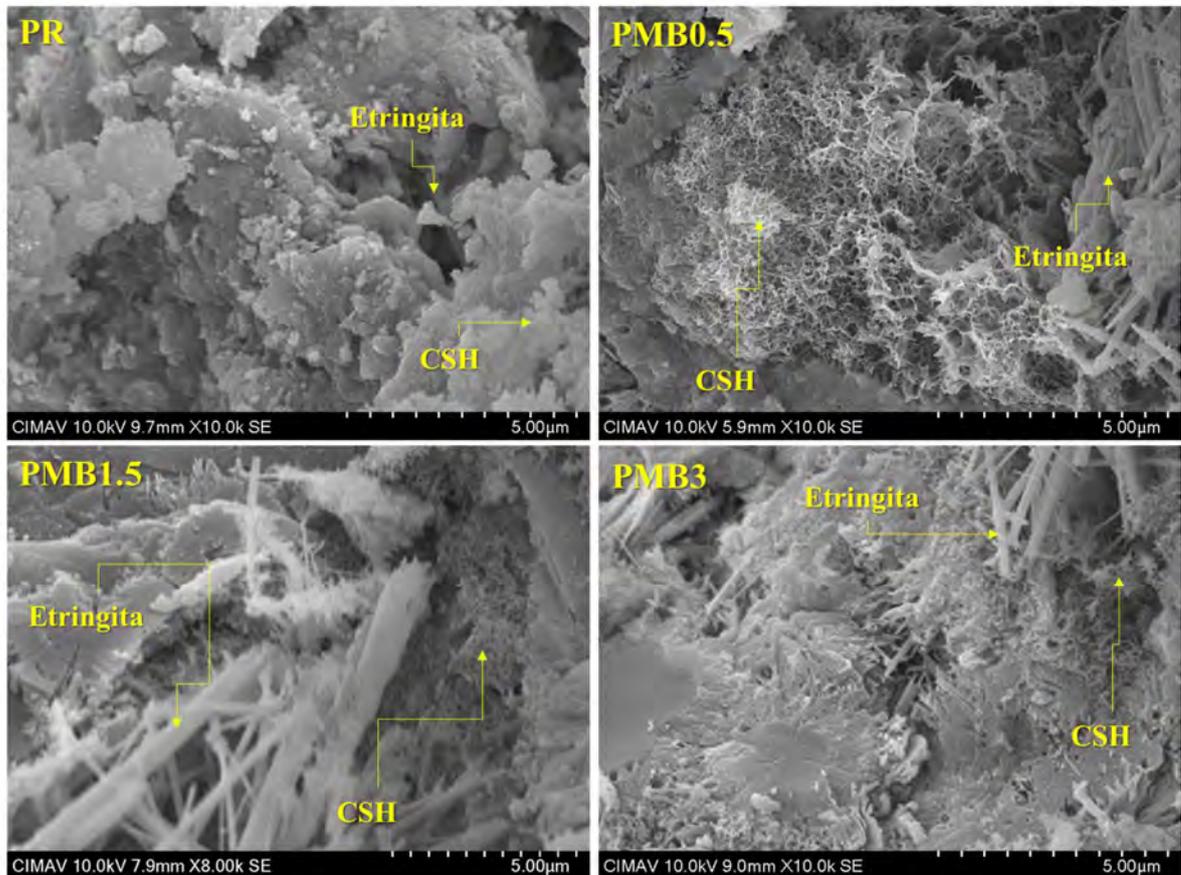


Figura 4-31. Comparación de micrografías con SEM de PR, PMB0.5, PMB1.5 y PMB3.

En la Figura 4-32 se muestran las micrografías obtenidas por SEM, de 600, 15.0 K y 2.0 K aumentos, de PR, PMB0.5, PMB1.5 y PMB3, donde se observa la morfología característica del CH (portlandita) como hojuelas hexagonales lisas, comúnmente ubicadas en los poros y se comprueba su presencia con análisis elemental por EDS, donde sus porcentajes mayores son de oxígeno y calcio. Esto nos indica un comportamiento favorable en el desarrollo de este producto de hidratación imprescindible para la mejora en sus propiedades. Esto verifica que el BHPT no inhibió el desarrollo del CH en las PMB, porque su producción fue favorable al igual que en PR [21,48,52,55,56].

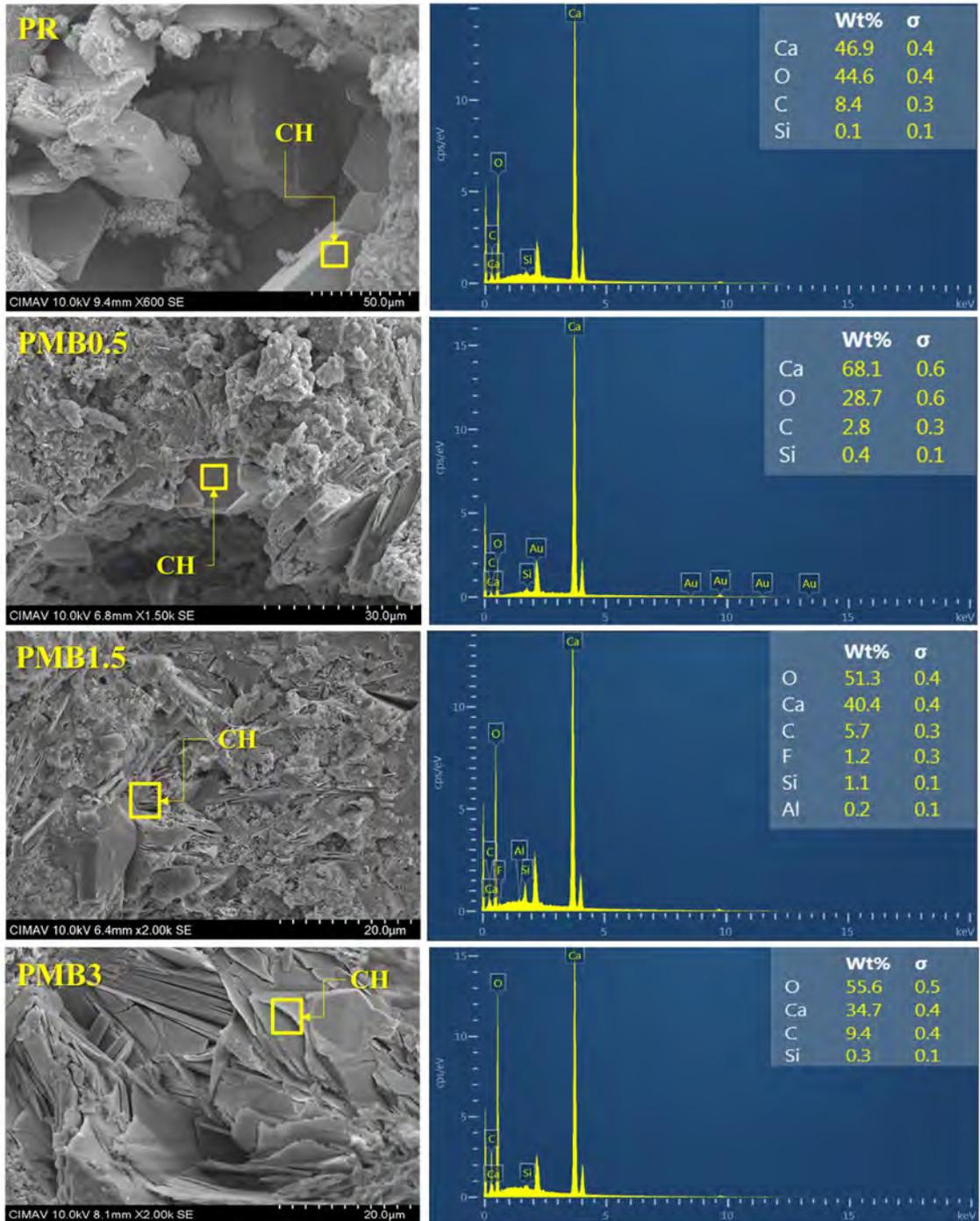


Figura 4-32. Comparación de micrografías y análisis elemental del CH, por EDS en pastas PR, PMB0.5, PMB1.5 y PMB3

En las Figura 4-33 y Figura 4-34, se muestran micrografías obtenidas por medio de SEM, dos de cada una de las muestras PR, PMB0.5, PMB1.5 y PMB3, de 5.0K a 20.0K aumentos. Se observan, para las cinco pastas los volúmenes característicos de CH en hojuelas lisas, el

CSH de gel (en PR) a una red (en PMB) y etringita con morfología característica de aguja. Se puede observar que favoreció el cambio de la morfología del CSH en las pastas PMB, al proporcionar pequeños puentes de enlaces entre los demás productos de hidratación o elementos de la pasta, lo que provoca el relleno de grietas o espacios, que antes estaban ocupados por aire [48,52,55,56].

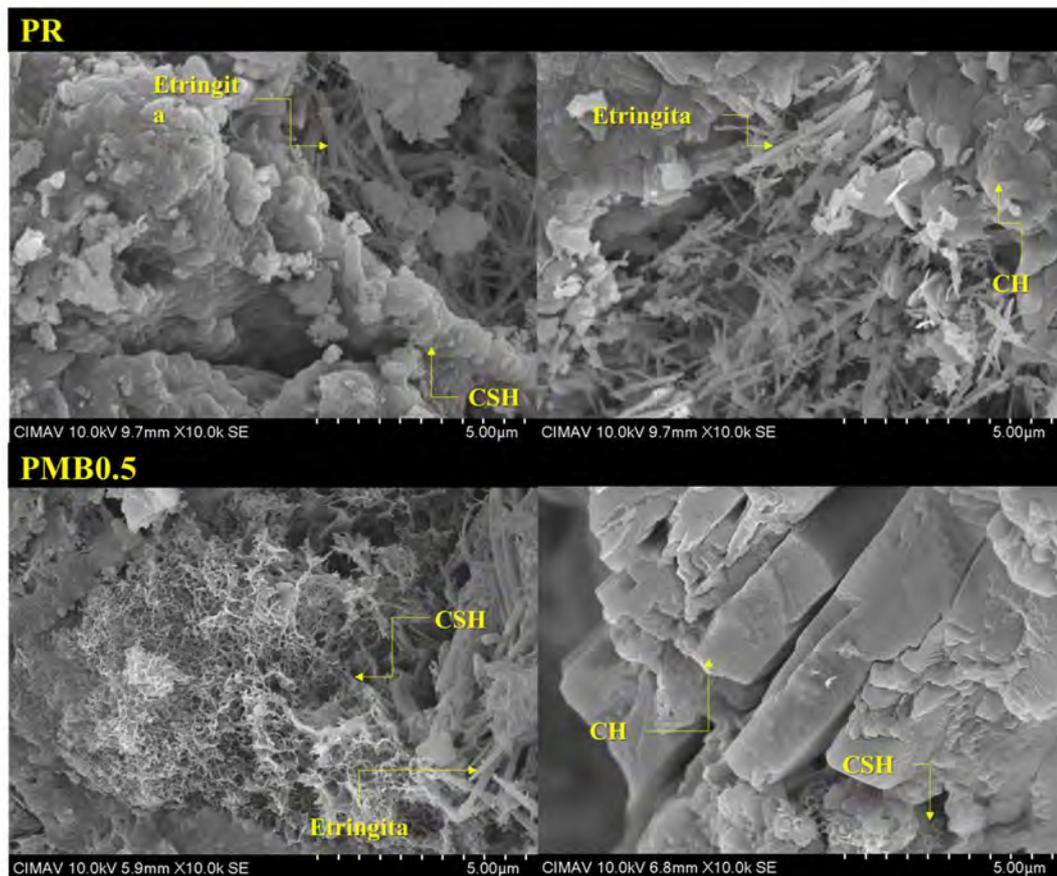


Figura 4-33. Comparativo de productos de hidratación de pastas PR y PMB0.5, por micrografías de SEM.

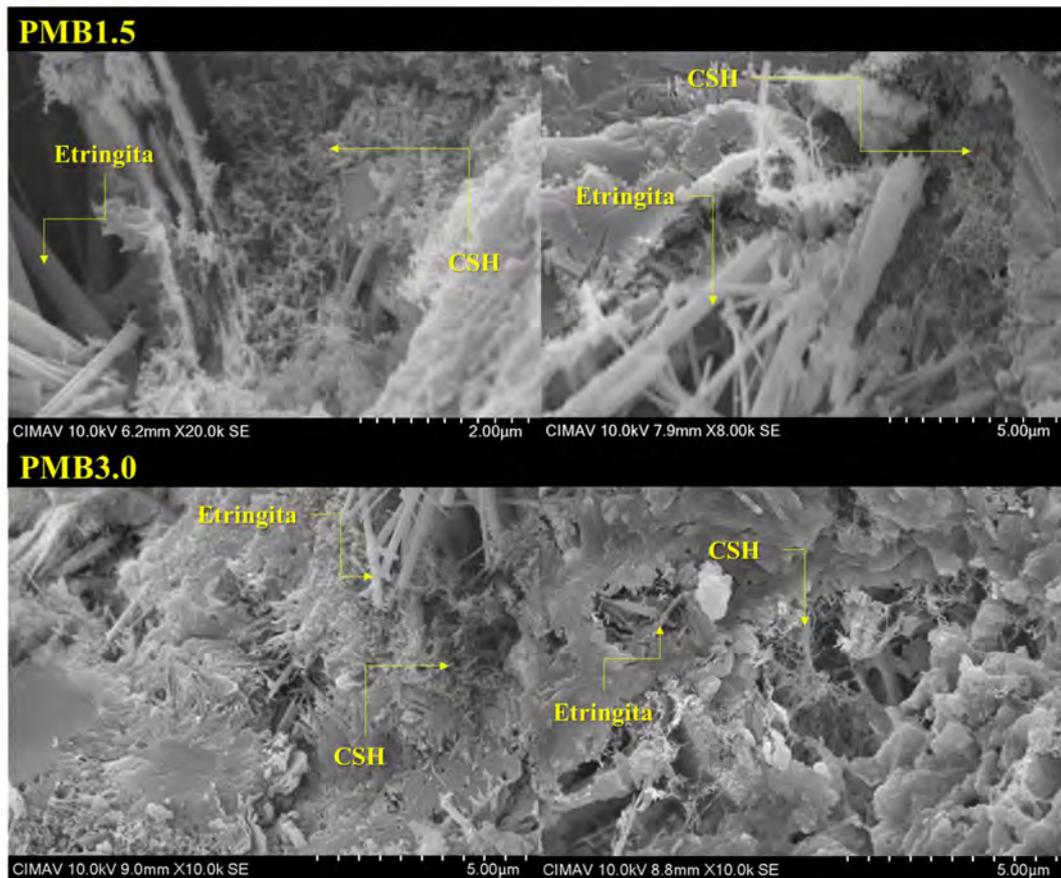


Figura 4-34. Comparativo de productos de hidratación de pastas PMB0.5, PMB1.5, PMB2.5 y PMB3 por micrografías de SEM.

4.10 Resistencia a compresión

La Figura 4-35 muestra la resistencia a compresión (kg/cm^2) después de 28 días de curado para PR y PMB. Se observó que las resistencias de PMB0.5, PMB1.5 presentaron incremento en la resistencia a la compresión con respecto a PR de 33 y 38% respectivamente y las de PMB1 y PMB2, un incremento de 5.9 y 6.2% respectivamente. A diferencia, PMB2.5, PMB3, resultaron con valores menores a la resistencia de PR, en 14.5 y 29.5 % respectivamente. Debido a los iones hidroxilos en la estructura del BHPT, se inhibió la aglomeración entre las partículas, una disminución de la porosidad y una mejora en la hidratación de la pasta. Por lo anterior, PMB0.5, PMB1.5 se consideran más aceptables, porque presentaron mayores incrementos de resistencia a la compresión que los demás, respecto a PR.

Al aumentar el monómero en de BHPT de 2.5 y 3.0 %, disminuyó la resistencia a compresión en un 14.5 y 29.5 %, respectivamente, ya que produjo una saturación, al reducir la solubilidad del material cementicio, que generó una mezcla heterogénea , lo que produce la aglomeración de los compuestos [13,21].

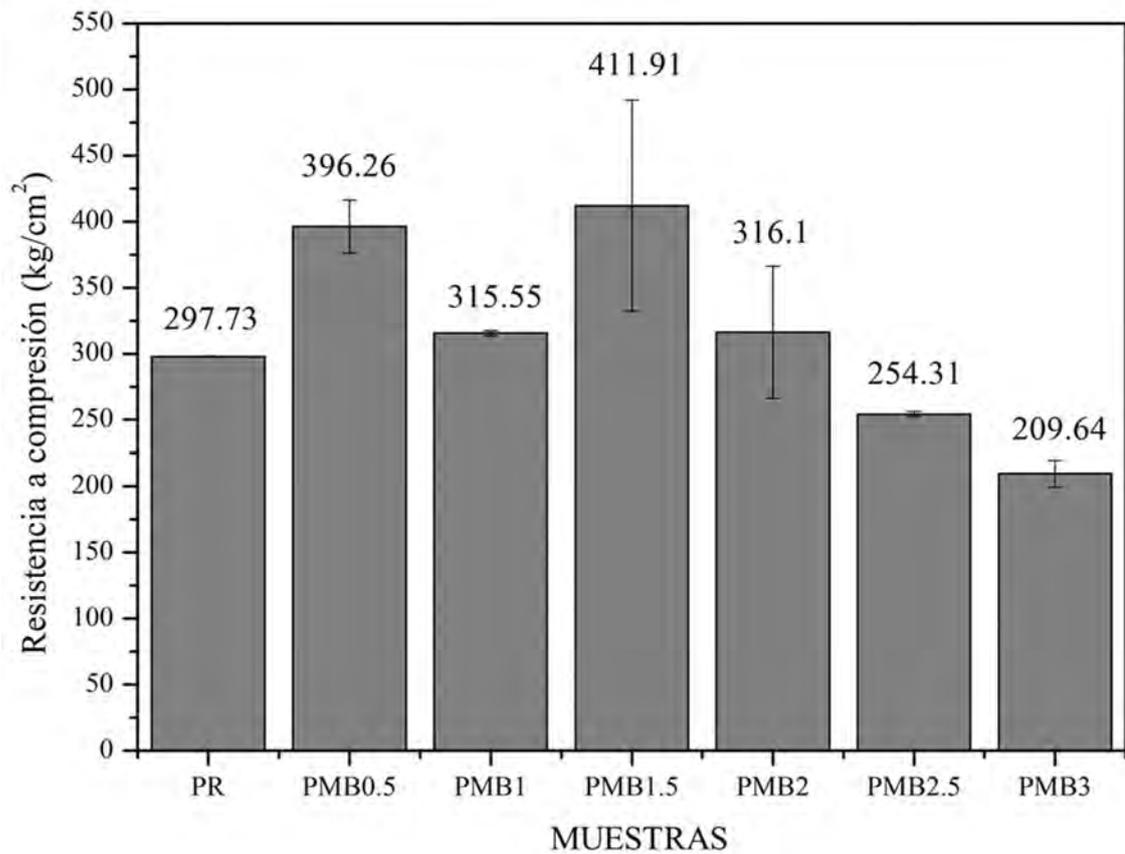


Figura 4-35. Resistencia a la compresión de pasta de cemento de PR y PMB0.5, PMB1.0, PMB1.5, PMB2.0, PMB2.5 y PMB3.0 a 28 días de hidratación.

5 CONCLUSIONES

Se elaboró la pasta de cemento modificado con tereftalato de bis-2-hidroxi-propilo (0 a 3%) producto del reciclaje de PET, sin el uso de otro agente modificador como superplastificante o antiespumante, confirmado por las conclusiones que se describen a continuación:

- La muestra PMB1 no se consideró en el análisis y discusión de resultados, debido a que no presenta el comportamiento congruente esperado, lo que pudiera implicar algún error en su elaboración o medición.
- Se propuso un mecanismo de reacción de la interacción del BHPT con el cemento hidratado de la pasta de cemento, entre los grupos OH del BHPT - los iones OH^- y Ca^{+2} productos de hidratación.
- Se formó una nueva estructura de red por la reacción de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y el BHPT en la pasta de cemento hidratada (FT-IR).
- Se comprobó que las pastas de cemento (PR y PMB) presentaron un comportamiento térmico similar, por el incremento de AFm, AFt y CSH, que indujo una hidratación más lenta que PR (TGA-DSC).
- El BHPT presentó poca influencia en la conductividad térmica respecto a PR.
- Las PMB presentaron fases cristalinas similares en sus productos de hidratación (portlandita, calcita, cuarzo y etringita), pero el BHPT influyó específicamente en cada uno (DRX).
- PMB0.5 presentó comportamiento similar o mejor de sus propiedades con respecto a la pasta de cemento (PR): fluidez con ligero incremento de trabajabilidad, aumento de resistencia a la compresión de 33%, mayor resistividad eléctrica de 54% y disminución de 55% de absorción de agua, con cumplimiento a la hipótesis planteada.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] I. Flores-Colen & J. De Brito. "*Materials for Construction and Civil Engineering: Science, Processing, and Design*". 53–122, 2015.
- [2] W. Kurdowski. "*Cement and Concrete Chemistry*". Springer. New York, London, 41–265, 2014.
- [3] L. Gutiérrez De López. "*El concreto y otros materiales para la construcción*". Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales. 2da. Manizales, Colombia, 33–129, 2003.
- [4] R. Salamanca Correa. "*La tecnología de los morteros*". Ciencia e Ingeniería Neogranadina. 11va. Bogotá, Colombia, 42–43, 2001.
- [5] D. Sánchez De Guzman. "*Tecnología del concreto y del mortero*". 3ra. Colombia, 21–23, 1996.
- [6] C. Ungsson-Nieblas M.J., Rubio-Rosas E. , Vargas-Ortíz R.A. , Bórquez-Mendivil A., Cabrera-Covarrubias F.G. & J. L. A.-S. -Beltrán, García-Grajeda B.A. "Polycarboxylate-based superplasticizer with added silica sub-microspheres for use in Portland cement materials". *Rev. Mex. Ing. Química Polycarboxylate-based*. 22(1) 97–104, 2023.
- [7] R. society of chemistry Chem. "Bis(2-hidroxipropil) tereftalato". Disponible en: <http://www.chemspider.com/Chemical-Structure.13538165.html?rid=560fa50e-df07-4e08-b93e-5e76a83884e8>
- [8] A. Eugenio. "*Introducción a la Nomenclatura IUPAC de Compuestos Orgánicos*". Escuela de Química, Universidad de Costa Rica. Escuela de Química, Universidad de Costa Rica, 1–36, 2000.
- [9] G. R. M. Carey Francis A. "*Química organica*". Mc Graw Hill Education. 9na. Mexico, D.F., 1122–1149, 2014.
- [10] R. A. "*Principles of Polymer Chemistry*". Springer. 3ra Edisió. Niles, IL, USA, 1–10, 2012.
- [11] R. López-fonseca *et al.* "Chemical recycling of post-consumer PET wastes by glycolysis in the presence of metal salts". *Polym. Degrad. Stab.* 95(6) 1022–1028, 2010.
- [12] H. P. Dharamshala. "*Recycling of Polyethylene Terephthalate Bottles*". Elsevier. Chennai, India, 1–8, 2019.
- [13] B. Şimşek. "Bis-hydroxyethyl terephthalate cementitious composites properties: A comparative study including hydrogen bonding mechanism with the dioctyl terephthalate". *Constr. Build. Mater. J.* 258(1) 1–11, 2020.
- [14] N. Malik *et al.* "An overview on PET waste recycling for application in packaging". *Int. J. Plast. Technol.* 21(1) 1–24, 2017.
- [15] O. Adiyanto *et al.* "Optimization of PET Particle - Reinforced Epoxy Resin Composite

- for Eco - Brick Application Using the Response Surface Methodology". *MDPI*. 15(5) 3–21, 2023.
- [16] N. Agha *et al.* "Performance Evaluation of Hot Mix Asphalt (HMA) Containing Polyethylene Terephthalate (PET) Using Wet and Dry Mixing Techniques". *MDPI*. 15(5) 1–23, 2023.
- [17] Y. Ohama. "*Polymer-modified concrete and mortars: Properties and Process Technology*". Noyes Publications. New Jersey, USA, 1–20, 1995.
- [18] X. Zhang *et al.* "Polymer-modified cement mortars : Their enhanced properties , applications , prospects , and challenges". *Constr. Build. Mater.* 299(June 2020) 124290, 2021.
- [19] M. Ramli & A. A. Tabassi. "Effects of polymer modification on the permeability of cement mortars under different curing conditions : A correlational study that includes pore distributions , water absorption and compressive strength". *Constr. Build. Mater.* 28(1) 561–570, 2012.
- [20] P. Łukowski & D. Dominika. "Effect of Polymer Addition on Performance of Portland Cement Mortar Exposed to Sulphate Attack Paweł". *MDPI*. 3(2) 12, 2020.
- [21] Z. Bahranifard *et al.* "An investigation on the effect of styrene-butyl acrylate copolymer latex to improve the properties of polymer modified concrete". *Constr. Build. Mater.* 205(30 April 2019,) 175–185, 2019.
- [22] B. Vignesh *et al.* "Modification of microstructure of cement mortars by water-soluble polyvinyl alcohol To". *IOP Publ.* 737(1) 012057, 2020.
- [23] J. Fan *et al.* "Mechanical Properties and Microstructure of Polyvinyl Alcohol (PVA) Modified Cement Mortar". *MDPI*. 9(1) 2178, 2019.
- [24] Y. Zhou *et al.* "Interaction mechanisms between organic and inorganic phases in calcium silicate hydrates / poly (vinyl alcohol) composites". *Cem. Concr. Res.* 125(March) 105891, 2019.
- [25] Y. Wang & Q. Liu. "Investigation on fundamental properties and chemical characterization of water-soluble epoxy resin modified cement grout". *Constr. Build. Mater.* 299 123877, 2021.
- [26] D. Foti & M. Lerna. "New Mortar Mixes with Chemically Depolymerized Waste PET Aggregates". *Adv. Mater. Sci. Eng. reduce.* 2020(1) 2–9, 2020.
- [27] B. Simsek *et al.* "Comparative evaluation of the effectiveness of PTFE nanoparticles on cement pastes properties with multi-wall carbon nanotubes , graphene oxide and silver nanoparticles". *Constr. Build. Mater.* 319(1) 1–13, 2022.
- [28] J. Bensted. "*Hydration of Portland cement*", 207. Pergamon Press Ltd. Greenhithe, UK, 308–343, 1980.
- [29] P. Pichniarczyk. "The influence of methylcellulose on the hydration process of C3s, C3A and mixture of these phases". *Procedia Eng.* 108 220–230, 2015.
- [30] R. O. Ebewe. "*Polymer science and technology*". Boca Raton New York, 1–531,

2000.

- [31] S. R. Shukla & A. M. Harad. "Glycolysis of Polyethylene Terephthalate Waste Fibers". *J. Appl. Polym. Sci.* 97(October) 513–517, 2005.
- [32] L. Bartolome *et al.* "Recent Developments in the Chemical Recycling of PET". *Mater. Recycl. – Trends Perspect.* 1(May 2014) 1–21, 2012.
- [33] L. C. J. Wade. "*Química Organica*". Pearson Prentice Hall. 5ta edición. MADrid, 1296, 2004.
- [34] M. Kazemi *et al.* "State of the art in recycling waste thermoplastics and thermosets and their applications in construction". *Resour. Conserv. Recycl.* 174(April) 105776, 2021.
- [35] V. Sinha *et al.* "Pet Waste Management by Chemical Recycling : A Review". *J Polym Env.* 18(1) 8–25, 2010.
- [36] T. Modulus *et al.* "C 305 – 06 Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency". *ASTM.* 92(October 2004) 6–8, 2005.
- [37] ASTM C31/C31M. "C31/C31M - Standard Specification for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field". *ASTM Stand.* 04:01 1–6, 2019.
- [38] ASTM International. "C230/C230M-03. Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement". *Annu. B. ASTM Stand.* 7, 2003.
- [39] Z. Zhang *et al.* "Quantitative Analysis of the Calcium Hydroxide Content of EVA-Modified Cement Paste Based on TG-DSC in a Dual Atmosphere". *Materials (Basel).* 15(7) 2022.
- [40] G. Yao *et al.* "Activation of hydration properties of iron ore tailings and their application as supplementary cementitious materials in cement". *Powder Technol.* 360 863–871, 2020.
- [41] Y. SINGH. "Electrical Resistivity Measurements: a Review". *Int. J. Mod. Phys. Conf. Ser.* 22(10) 745–756, 2013.
- [42] ASTM C 1585 04. "ASTM C 1585 04 : Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes". *Am. Soc. Test. Mater.* 1–6, 2007.
- [43] A. Borquez-Mendivil, A. Huertado-Macias *et al.* "Hybrid Coatings of SiO₂ – Recycled PET Unsaturated Polyester Resin by Sol-Gel Process". *MDPI.* 14(16) 1–18, 2022.
- [44] A. Bórquez-Mendivil *et al.* "A New Sustainable PPT Coating Based on Recycled PET to Improve the Durability of Hydraulic Concrete". *Polymers (Basel).* 16(9) 2024.
- [45] J. L. A.-S. Bórquez-Mendivil A., Verdugo-Sánchez J.A., Hurtado-Macías A., Leal-Pérez J.E, Vargas-Ortíz R.A., Flores-Valenzuela J., Cabrera-Covarrubias F.G., García-Grajeda B.A. "Polymeric mortar made with unsaturated polyester hybrid resin (from post-consumer PET bottle recycling) with silane nanocoupling". *Rev. Ing. y*

Tecnol. UAS. 5(1) 17–27, 2023.

- [46] B. H. Stuart. "*Infrared Spectroscopy: Fundamentals and Applications*". Wiley. 1–224, 2005.
- [47] V. J. R. Pavia Donald L., Lampman Gary M., Kriz George S. "*Introcuccion to Spectroscopy*", (February). BROOKS/COLE CENGAGE IEARNING. 4ta edició. Bellingham, Washington Australia, 16, 2009.
- [48] L. Fan *et al.* "A review on the modification mechanism of polymer on cement-based materials". *J. Mater. Res. Technol.* 26(1) 5816–5837, 2023.
- [49] Y. Tian *et al.* "Research on the microstructure formation of polyacrylate latex modified mortars". *Constr. Build. Mater.* 47 1381–1394, 2013.
- [50] H. K. Kim & H. K. Lee. "Hydration kinetics of high-strength concrete with untreated coal bottom ash for internal curing". *Cem. Concr. Compos.* 91(October 2016) 67–75, 2018.
- [51] Y. Xu & D. D. L. Chung. "Effect of sand addition on the specific heat and thermal conductivity of cement". *Cem. Concr. Res.* 30(1) 59–61, 2000.
- [52] B. Şimşek *et al.* "Comparative evaluation of the effectiveness of PTFE nanoparticles on cement pastes properties with multi-wall carbon nanotubes, graphene oxide and silver nanoparticles". *Constr. Build. Mater.* 319(September 2021) 2022.
- [53] M. E. K. Alesmar Luis , Nalia Rendón *et al.* "Microstructural study of Styrene Polyacrylic (SPA) latex modified mortars". *J. Mater. Eng. Struct.* 6(4) 535–545, 2019.
- [54] C. Y. Chen & M. T. Lee. "Application of crumb rubber in cement-matrix composite". *Materials (Basel)*. 12(3) 1–11, 2019.
- [55] J. Fan *et al.* "Mechanical properties and microstructure of polyvinyl alcohol (PVA) modified cement mortar". *Appl. Sci.* 9(11) 2019.
- [56] E. Knapen & D. Van Gemert. "Polymer film formation in cement mortars modified with water-soluble polymers". *Cem. Concr. Compos.* 58 23–28, 2015.

7 ANEXOS

Tabla 7.1. Compendio de constancias de actividades realizadas en el periodo de desarrollo de tesis.

FECHA	TEMA	PARTICIPACIÓN	FIGURA
30/08/2022	Jornada de Actualización y Capacitación Docente en Bases de Datos 2022-2023-1	Asistencia	Figura 7-1. Constancia de asistencia.
27 oct-19 nov/08/2022	Leche de colores	Demostración de laboratorio	Figura 7-2. Constancia participación en laboratorio
27 oct-19 nov/08/2022	Jornada universitaria del conocimiento UAS 2022	Demostración de laboratorio	Figura 7-3. Constancia de demostración de laboratorio
16-19/08/ 2023	Aplicación de subproducto del reciclaje de botellas de PET como aditivo en pastas de cemento	Cartel de investigación	Figura 7-4. Constancia de participación en cartel
16-19/08/ 2023	Evaluación de pasta de cemento modificada con aditivo derivado del reciclaje del PET	Demostración de laboratorio	Figura 7-5. Constancia demostración de laboratorio
16-19/08/ 2023	Pasta de cemento modificado con producto del reciclaje del PET	Cartel de investigación	Figura 7-6. Constancia como expositor de cartel
16-19/08/ 2023	Fluido no newtoniano	Demostración de laboratorio	Figura 7-7. Constancia de participación demostración de laboratorio
15/09/2023	Nociones básicas para la elaboración de un artículo científico	Asistencia a la conferencia internacional online	Figura 7-8. Constancia de asistencia de conferencia online
26/09/2023	Una solución para paso del ciclo de investigación-web of science	Asistencia	Figura 7-9. Constancia como asistente al webinar
16-20/08/2023	XXXVIII Congreso de la Sociedad Mexicana de Electroquímica y 16th Meeting of the Mexican Section of the Electrochemical Society	Participación como apoyo de personal de STAFF en actividades de organización	Figura 7-10. Constancia de participación en el STAFF de congreso
20-22/03/2024	Evaluación de resistencia a compresión en las pastas de cemento modificadas con producto de reciclaje de PET	Expositor de cartel de investigación	Figura 7-11 Constancia en participación como expositor de cartel
20-22/03/2024	Reunión interinstitucional para la divulgación de la ciencia en materiales	Asistencia	Figura 7-12. Constancia de asistencia



Figura 7-1. Constancia de asistencia.



Figura 7-2. Constancia participación en laboratorio.



Figura 7-3. Constancia de demostración de laboratorio.



Figura 7-4. Constancia de participación en cartel.



Figura 7-5. Constancia demostración de laboratorio.



Figura 7-6. Constancia como expositor de cartel.



Figura 7-7. Constancia de participación demostración de laboratorio.



Figura 7-8. Constancia de asistencia de conferencia online.



Figura 7-9. Constancia como asistente al webinar.



Figura 7-10. Constancia de participación en el STAFF de congreso.



Figura 7-11 Constancia en participación como expositor de cartel.



Figura 7-12. Constancia de asistencia.