

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA

COLEGIO DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

Facultad de Ingeniería Mochis

Programa de Doctorado en Ciencias de la Ingeniería



“Recubrimientos de tereftalato de polipropileno y de SiO_2 -resina de poliéster insaturado basados en PET reciclado para mejorar la durabilidad del concreto hidráulico”

TESIS

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

Presenta

M.C. Adrián Bórquez Mendívil

Director de tesis

Dr. Jorge Luis Almaral Sánchez

Codirector de tesis

Dr. Joaquín Flores Valenzuela

Los Mochis, Sinaloa, febrero de 2025



Universidad Autónoma de Sinaloa

Dirección General de Bibliotecas

Repositorio Institucional Buelna

Restricciones de uso

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

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

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



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

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma de Sinaloa (UAS), a la Facultad de Ingeniería Mochis y al Posgrado en Ciencias de la Ingeniería, por otorgarme acceso a sus instalaciones y equipos para la realización de este trabajo de investigación, que me permitió formarme de manera integral en el área de investigación durante estos últimos 4 años en mi doctorado, lo cual me ayudó al cumplimiento de mis logros y metas propuestas.

A la UAS, por medio de la Dirección General de Investigación y Posgrado (DGIP) y al Dr. Jorge Luis Almaral Sánchez, por permitirme colaborar en el proyecto PRO_A8_027, que me suministró reactivos y financió el mantenimiento de equipos, que me sirvieron en la experimentación de este trabajo de investigación.

Al Centro de Investigación en Materiales Avanzados S.C. (CIMAV) por las facilidades proporcionadas durante mi estancia de investigación por seis meses, en la cual se realizaron caracterizaciones de muestras (nanoindentación, SEM, AFM, FT-IR, TGA-DSC y ángulo de contacto) y el estudio de envejecimiento del PPT.

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), antes Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT), por el apoyo económico como becario de doctorado de tiempo completo con clave 924109.

A mis directores de tesis, al Dr. Jorge Luis Almaral Sánchez y al Dr. Joaquín Flores Valenzuela, por sus asesorías y disposición total para culminar este trabajo en tiempo y forma.

A mis sinodales, Dra. Adriana Cruz Enríquez, Dr. Clemente Guadalupe Alvarado Beltrán, Dr. Ramón Álvaro Vargas Ortiz, Dra. Francisca Guadalupe Cabrera Covarrubias, Dr. Abel Hurtado Macías, por sus valiosas revisiones y comentarios que me permitieron desarrollar este trabajo.

Al Dr. Abel Hurtado Macías por su gestión para mi estancia de investigación realizada en CIMAV, Chihuahua y sus valiosas asesorías.

Al Dr. Carlos Paulino Barrios Durstewitz, por su asesoría especializada en las pruebas de durabilidad.

Al Dr. Sergio Flores Gallardo, Dr. Jesús Eduardo Leal Pérez, Dr. Víctor Manuel Orozco Carmona, M.C. Karla Campos Venegas y al Ing. Roberto Pablo Talamantes Soto por el apoyo técnico y asesoría en diversas caracterizaciones.

DEDICATORIA

Este trabajo representa la culminación de una etapa de mi proyecto de vida, que al inicio parecía una meta muy lejana pero que, al proponérmela, sabía que valdría la pena cada esfuerzo realizado para cumplirla. Este logro se lo dedico a mi padre Carlos, a mi madre Cecilia, a mis hermanos Jesús Ramón y Eréndira, y a mi sobrino Gabriel, a quienes les agradezco su apoyo y empatía para superar cada una de las etapas y circunstancias a las que me enfrenté durante un camino largo, en el que con su ayuda logré vencer algunos obstáculos que se llegaron a presentar en ciertos momentos. También, va dedicado al Dr. Jorge Luis Almaral Sánchez, quien, durante más de 10 años, con mucha paciencia me ha orientado, aconsejado y enseñado muchas cosas del área de la investigación, convirtiéndose así en mi mentor y le agradezco mucho cada minuto dedicado en mi formación, con lo que hoy inicia una nueva misión que es transmitir a las nuevas generaciones el conocimiento que el me ofreció. Amistades que han permanecido en el camino y les agradezco mucho su apoyo, a Roberto, Germán, Marco y Pacheco, gracias por los consejos, a la G-18; Julio, Mijael, Karina, Gabriela, Daniel Guadalupe, Karen y Luque, así como a otras que se han creado y me han ayudado de alguna u otra forma, a Narda y Alejandra, a mi equipo de fútbol, Miguel, Alexis, Ángel, Adrián y Orejel. A Gabriela, Daniela, Nieves y Jackie por brindarme una estancia muy amena en Chihuahua. Y sin olvidarme de Gustavo y Ramón, quienes siempre me brindan su compañía. La lista puede hacerse infinita, probablemente me he olvidado de alguno, pero tiene mi más sincero agradecimiento.

GRACIAS, TOTALES.

RESUMEN

En este trabajo se sintetizaron tereftalato de polipropileno (PPT), resina de poliéster insaturado (RPI) y RPI-SiO₂ híbrido (RPIH) a partir de tereftalato de polietileno (PET) reciclado y fueron aplicados como recubrimientos sobre sustratos de concreto hidráulico para mejorar su durabilidad. Para el recubrimiento de PPT (R-P), los desechos de botellas de PET se trituraron y se despolimerizaron mediante glicólisis con propilenglicol (PG) en un reactor tipo Vessel (20–180 °C) para sintetizar bis(2-hidroxipropil)-tereftalato (BHPT), éste último se aplicó como recubrimiento de una a tres capas en sustratos de concreto hidráulico con brocha y posteriormente se polimerizó (150 °C-15 h) para obtener R-P. Para el recubrimiento de RPI (R-R), el BHPT fue policondensado con anhídrido maleico (AM) para sintetizar poliéster insaturado, el cual, posteriormente fue mezclado con estireno (St) y peróxido de benzoilo (PBO), para sintetizar RPI pre-polimerizada que se aplicó como recubrimiento de una a tres capas sobre sustratos de concreto hidráulico con brocha y se polimerizó (120 °C-24 h) para obtener R-R. Para obtener el recubrimiento de RPIH (R-H) por medio de sol-gel, la RPI pre-polimerizada fue mezclada con TMSPM-hidrolizado, el cual fue aplicado como recubrimiento de una a tres capas en sustrato de concreto hidráulico con brocha y se polimerizó (120 °C-24 h) para obtener R-H. El PPT, RPI y RPIH se caracterizaron mediante FT-IR y TGA, y los R-P, R-R y R-H mediante SEM (espesor), ASTM-D3359-17 (adhesión), ángulo de contacto con el agua (humectabilidad) y propiedades mecánicas (nanoindentación). Además, la durabilidad del concreto hidráulico recubierto con R-P, R-R y R-H fue estudiada mediante la evaluación a la resistencia a la penetración de iones cloruro (ASTM-C1202-17), la profundidad de carbonatación a los 28 días (RILEM-CPC-18) y la velocidad de absorción de agua (ASTM-C1585-20). Los resultados de FT-IR demostraron que el BHPT y el PPT se sintetizaron exitosamente y los TGA demostraron que el PPT exhibe un comportamiento térmico similar al PET (TGA); además, los recubrimientos de PPT, con espesores de unidades micrométricas, presentan una buena adhesión al sustrato. Para la protección contra la absorción de agua y carbonatación, la aplicación de R-P en 2 capas fue suficiente, mientras que para R-R y R-H fueron necesarias 3 capas. Para protección contra la penetración de iones de cloruro, la aplicación de R-P en 3 capas redujo significativamente la permeabilidad del concreto hidráulico, a diferencia de la aplicación de R-R y R-H en 3 capas,

que no la redujo lo suficiente para ofrecer protección. Además, se realizó el envejecimiento artificial por intemperismo de R-P para conocer su degradación por medio de la evaluación de sus propiedades mecánicas por nanoindentación y adhesión por nanoragado. Se logró la elaboración de recubrimientos de tereftalato de polipropileno y de SiO₂-resina de poliéster insaturado basados en PET reciclado para mejorar la durabilidad del concreto hidráulico.

Palabras Clave: Reciclaje de PET, recubrimientos, resina de poliéster insaturado, materiales híbridos, sol-gel, tereftalato de polipropileno, concreto hidráulico, durabilidad.

ABSTRACT

In this work, polypropylene terephthalate (PPT), unsaturated polyester resin (UPR), and hybrid UPR (HUPR) were synthesized from recycled polyethylene terephthalate (PET) and applied as coatings on hydraulic concrete substrate to improve its durability. For PPT coating (R-P), PET bottle waste was crushed and depolymerized by glycolysis with propylene glycol (PG) in a vessel reactor (20–180 °C) to synthesize bis(2-hydroxypropyl)-terephthalate (BHPT), which was applied as one- to three-layer coating on hydraulic concrete substrate by brush and polymerized (150 °C-15 h) to obtain R-P. For RPI coating (R-R), BHPT was polycondensed with maleic anhydride (MA) to synthesize unsaturated polyester, which was subsequently mixed with styrene (St) and benzoyl peroxide (PBO) to synthesize pre-polymerized RPI that was applied as one- to three-layer coating on hydraulic concrete substrate by brush and polymerized (120 °C-24 h) to obtain R-R. For RPIH coating (R-H), pre-polymerized RPI was mixed with sol-gel hydrolyzed TMSPM, which was applied as one- to three-layer coating on hydraulic concrete substrate by brush and polymerized (120 °C-24 h) to obtain R-H. PPT, RPI and RPIH were characterized by FT-IR and TGA, and R-P, R-R and R-H by SEM (thickness), ASTM-D3359-17 (adhesion), water contact angle (wettability) and mechanical properties (nanoindentation). The durability of hydraulic concrete coated with R-P, R-R and R-H was studied by evaluating the resistance to chloride ion penetration (ASTM-C1202-17), carbonation depth at 28 days (RILEM-CPC-18) and water absorption rate (ASTM-C1585-20). The results showed that BHPT and PPT were synthesized (FT-IR) and that PPT had a thermal behavior similar to PET (TGA); PPT coatings had good adhesion to the substrate, with thicknesses of micrometric units. For protection against water absorption and carbonation, application of R-P in 2 layers was sufficient, while for R-R and R-H 3 layers were necessary. For protection against chloride ion penetration, application of R-P in 3 layers significantly reduced its effect, unlike application of R-R and R-H in 3 layers, which did not reduce it enough to offer protection. In addition, artificial weathering of R-P was performed to determine its degradation by evaluating its mechanical properties by nanoindentation and nanoscratching adhesion.

Keywords: PET recycling, coatings, unsaturated polyester resin, hybrid materials, sol-gel, polypropylene terephthalate, hydraulic concrete, durability.

OBJETIVOS

Objetivo General

Sintetizar y aplicar recubrimientos de tereftalato de polipropileno y de SiO₂-resina de poliéster insaturado basados en PET reciclado sobre concreto hidráulico para mejorar su durabilidad.

Objetivos Específicos

Reciclar al PET posconsumo mecánicamente (obtención de hojuelas) y químicamente (obtención de BHPT).

Sintetizar PPT, RPI y RPIH a partir de la síntesis del BHPT.

Caracterizar BHPT, PPT, RPI y RPIH, para identificar sus enlaces característicos (FT-IR) y obtener su estabilidad térmica (TGA).

Elaborar probetas de concreto hidráulico (CH) ($F'_c = 150 \text{ kg/cm}^2$).

Aplicar recubrimientos de PPT (R-P), RPI (R-R) y RPIH (R-H) con brocha sobre sustratos de vidrio y CH.

Evaluar a R-P, R-R y R-H, sus propiedades mecánicas por nanoindentación y físicas por humectabilidad (ángulo de contacto), adherencia (ASTM D3359-17) y espesor por microscopía electrónica de barrido (SEM).

Evaluar la durabilidad del CH con R-P, R-R y R-H por pruebas de absorción de agua (ASTM C1585-20), resistencia a la penetración del ion cloruro (ASTM C1202-22) y resistencia a la carbonatación (RILEM CPC-18).

Evaluar durabilidad de R-P envejecido (R-PE) por intemperismo acelerado (ASTM G154-16), por medio de FT-IR, nanoindentación, nanoragado, SEM y AFM.

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.....	viii
AGRADECIMIENTOS.....	ix
DEDICATORIA.....	xi
RESUMEN	xii
ABSTRACT	xiv
OBJETIVOS.....	xv
ÍNDICE.....	xvi
ÍNDICE DE TABLAS.....	xxi
ÍNDICE DE FIGURAS	xxii
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Generalidades	1
1.1.1 Recubrimiento polimérico	1
1.1.2 Polímeros orgánicos	1
1.1.3 Polímeros inorgánicos	2
1.1.4 Polímeros híbridos.....	2
1.1.5 Tereftalato de polietileno (PET).....	2
1.1.6 Tereftalato de polipropileno (PPT).....	2
1.1.7 Reciclaje del PET	3
1.1.8 Resina de poliéster insaturado (RPI)	3

1.1.9	Concreto hidráulico	3
1.1.10	Durabilidad del concreto hidráulico	4
1.2	Antecedentes y estado del arte	4
2	ASPECTOS TEÓRICOS.....	7
2.1	Formación de recubrimientos por enlace químico o anclaje físico.....	7
2.1.1	Formación por enlace químico	7
2.1.2	Formación por anclaje físico	8
2.2	Propiedades mecánicas por nanoindentación.....	9
2.3	Propiedades de adhesión por nanorascado (nanoscratching).....	11
2.4	Etapas del reciclaje mecánico del PET	12
2.5	Mecanismo del reciclaje químico del PET por glicólisis.....	13
2.6	Mecanismo de formación de la resina de poliéster insaturado (RPI).....	14
2.6.1	Policondensación de diol con ácido dibásico para formar el poliéster insaturado (PI).....	14
2.6.2	Entrecruzamiento del PI con estireno (St) para formar la RPI	15
2.7	Polimerización del TMSPM con RPI para la formación de SiO ₂ -RPI.....	15
2.8	Procesos químicos que afectan la durabilidad del concreto hidráulico.....	16
2.8.1	Proceso de penetración de ion cloruro.....	16
2.8.2	Proceso de absorción de agua.....	16
2.8.3	Proceso de carbonatación	17
2.9	Envejecimiento acelerado del PET	19
2.9.1	Envejecimiento en condiciones aceleradas.....	19
2.9.2	Correlación entre el envejecimiento natural y acelerado del PET.....	20
2.9.3	Mecanismos de envejecimiento del PET por fotooxidación (reacciones de Norrish).....	21

3	METODOLOGÍA.....	23
3.1	Material requerido.....	23
3.2	Infraestructura	23
3.3	Laboratorios y equipos	24
3.4	Experimento25	
3.4.1	Reciclaje mecánico de botellas de PET	25
3.4.2	Reciclaje químico de hojuelas de PET por glicólisis	26
3.4.3	Síntesis de tereftalato de polipropileno (PPT).....	26
3.4.4	Síntesis de resina de poliéster insaturado (RPI)	27
3.4.5	Síntesis de RPI híbrida (RPIH).....	27
3.4.6	Preparación de especímenes de concreto hidráulico para evaluar su durabilidad	27
3.4.7	Aplicación de recubrimientos sobre de vidrio y su envejecimiento	30
3.5	Técnicas de caracterización.....	32
3.5.1	Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR)	32
3.5.2	Análisis termogravimétrico (TGA)	32
3.5.3	Propiedades mecánicas de los recubrimientos (nanoindentación)	32
3.5.4	Propiedades físicas de los recubrimientos	33
3.5.5	Durabilidad del concreto hidráulico con recubrimiento de PPT, RPI y RPIH	35
3.5.6	Recubrimientos de PPT envejecidos por intemperismo acelerado (PPT-E)	40
4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	44
4.1	FT-IR de PPT, RPI y RPIH.....	44
4.1.1	Esquema de síntesis de PPT	44

4.1.2	PPT	44
4.1.3	Esquema de síntesis de RPI a partir de la despolimerización del PET.....	46
4.1.4	RPI.....	47
4.1.5	Esquema de síntesis de la RPIH	48
4.1.6	RPIH	50
4.2	Análisis termogravimétrico (TGA) de PPT, RPI y RPIH	51
4.3	Propiedades físicas de los recubrimientos de PPT, RPI y RPIH.....	52
4.3.1	Espesor (SEM).....	52
4.3.2	Humectabilidad (ángulo de contacto).....	53
4.3.3	Adherencia (ASTM D3359-17).....	54
4.4	Esquemas de formación de R-P, R-R y R-H en sustrato de vidrio	56
4.4.1	Formación de R-P en sustrato de concreto	56
4.4.2	Formación de R-H en sustrato de concreto	57
4.4.3	Formación de R-R en sustrato de concreto.....	58
4.5	Propiedades mecánicas de R-P, R-R y R-H por nanoindentación	59
4.6	Durabilidad de concreto hidráulico con R-P, R-R y R-H	61
4.6.1	Prueba rápida de penetración del ion cloruro (ASTM C1202-19)	61
4.6.2	Velocidad de absorción de agua (ASTM C1585-20)	63
4.6.3	Carbonatación (RILEM CPC-18).....	65
4.6.4	Comparación de resultados de durabilidad con literatura reportada	71
4.7	Envejecimiento de R-P por intemperismo acelerado (ASTM G154-16), R-PE73	
4.7.1	Esquema de envejecimiento de R-PE.....	73
4.7.2	FT-IR de R-PE.....	74
4.7.3	Propiedades mecánicas por nanoindentación de R-PE.....	75

4.7.4	Propiedades de adhesión de R-PE (nanorasgado/SEM).....	78
4.7.5	Rugosidad de R-PE (AFM)	79
4.7.6	Morfología de recubrimientos de PPT-E (SEM).....	80
5	CONCLUSIONES.....	82
	TRABAJOS A FUTURO	84
	BIBLIOGRAFÍA.....	85
	ANEXOS	98

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1. Dosificación de mezcla de concreto con relación a/c 0.80.....	28
Tabla 3-2. Total de especímenes de concreto hidráulico requeridos para evaluar su durabilidad (carbonatación, penetración de ion cloruro y absorción de agua).	28
Tabla 3-3. Nomenclatura de especímenes de concreto recubiertos con PPT, RPI y RPIH.	30
Tabla 3-4. Nomenclatura para R-P envejecidos por intemperismo acelerado (ASTM G154-16), R-PE.	32
Tabla 3-5. Clasificación de la permeabilidad del concreto hidráulico al ion cloruro.	37
Tabla 4-1 Carga pasada para R-P1, R-P2, R-P3, R-R1, R-R2, R-R3, R-H1, R-H2 y R-H3.....	61
Tabla 4-2. Mediciones de profundidad de carbonatación para REF, R-P1, R-P2 y R-P3 a 7, 14 y 28 días de exposición al CO ₂	67
Tabla 4-3. Mediciones de profundidad de carbonatación para REF, R-R1, R-R2 y R-R3 a 7, 14 y 28 días de exposición al CO ₂	69
Tabla 4-4. Mediciones de profundidad de carbonatación para REF, R-H1, R-H2 y R-H3 a 7, 14 y 28 días de exposición al CO ₂	71
Tabla 4-5. Comparación entre los resultados de reducción contra la carbonatación de recubrimientos reportados en la literatura y los recubrimientos desarrollados en este trabajo.	71
Tabla 4-6. Comparación entre los resultados de reducción contra ion cloruro de recubrimientos reportados en la literatura y los recubrimientos desarrollados en este trabajo.	72
Tabla 4-7. Comparación entre los resultados de reducción contra absorción de agua de recubrimientos reportados en la literatura y los recubrimientos desarrollados en este trabajo.	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1. Esquema general para la formación de recubrimientos por enlace químico.	7
Figura 2-2. Esquema de posibles anclajes físicos entre una resina polimérica y un sustrato poroso.	8
Figura 2-3. Proceso de la prueba de nanoindentación.	9
Figura 2-4. Curva representativa carga-descarga de una prueba de nanoindentación.	10
Figura 2-5. Esquema del proceso de la prueba de nanorasgado.	12
Figura 2-6. Etapas del reciclaje mecánico del PET.	13
Figura 2-7. Mecanismo de despolimerización por glicólisis del PET.	14
Figura 2-8. Esquema de reacción de la síntesis de PI a partir de AM (anhídrido insaturado) y BHPT (diol).	15
Figura 2-9. Proceso de absorción de agua del concreto hidráulico por capilaridad.	17
Figura 2-10. Proceso de carbonatación del concreto hidráulico.	18
Figura 2-11. Esquema de una cámara de envejecimiento acelerado tipo QUV.	20
Figura 2-12. Mecanismo de envejecimiento del PET por fotooxidación (reacciones de Norrish).	22
Figura 3-1. Esquema general del experimento.	25
Figura 3-2. Procedimiento de aplicación de recubrimiento con brocha.	30
Figura 3-3. Procedimiento para evaluar la adherencia de los recubrimientos de acuerdo con el método de prueba transversal B establecido en la norma ASTM D3359-17.	34
Figura 3-4. Clasificación de recubrimientos por adherencia, de acuerdo con el porcentaje de área removida durante la prueba descrita por la norma ASTM D3359-17.	35

Figura 3-5. Preparación de las muestras para la prueba rápida de penetración de ion cloruro.....	36
Figura 3-6. Medición de la carga pasada de las muestras.....	37
Figura 3-7. Acondicionamiento de especímenes para la prueba de velocidad de absorción de agua del concreto hidráulico (ASTM C1585-20). a) Colocación de especímenes en desecador con KBr, b) Desecador con especímenes en horno de secado a 50°C durante 72 h y c) Especímenes acondicionados almacenados en bolsas de plástico por 15 días.	38
Figura 3-8. Prueba de velocidad de absorción de agua.....	38
Figura 3-9. Casos para la medición de la d_k	40
Figura 3-10. Tipos de falla dúctil y frágil de recubrimientos.	42
Figura 4-1. Esquema propuesto para la síntesis de tereftalato de polipropileno (PPT) a partir del reciclado químico de residuos de PET.....	44
Figura 4-2. PET, BHPT y PPT en el rango de 4000 a 400 cm^{-1} , en b), ampliación de los espectros de PET y PPT en la región de 3020–2860 cm^{-1} , en c), ampliación de los espectros de PET y PPT en la región de 1500 a 1350 cm^{-1} , y en (d), ampliación de los espectros de PET y PPT en la región de 1000-800 cm^{-1}	46
Figura 4-3. Esquema de reacción para la síntesis de RPI a partir de la despolimerización del PET.	47
Figura 4-4. Espectros de FT-IR del BHPT, PI, St y RPI y sus ampliaciones en rangos de 1600-1660 cm^{-1}	48
Figura 4-5. Esquema de reacción para la solución híbrida SiO_2 -RPI por el proceso sol-gel.....	49
Figura 4-6. Espectros de FT-IR del PI, St, TMSPM y RPIH y sus ampliaciones en rangos de 1600-1660 cm^{-1}	51
Figura 4-7. Termogramas de PPT, RPI y RPIH.	52

Figura 4-8. Espesores de los recubrimientos de R-P, R-R y R-H, obtenidos por medio de micrografías de SEM de su sección transversal.	53
Figura 4-9. Humectabilidad, obtenida por medición del ACA de R- PPT, R-RPI y R-RPIH.	54
Figura 4-10. Adherencia de R-P1, R-P2 y R-P3 evaluadas por la ASTM D3359-17.	55
Figura 4-11. Adherencia de R-R1, R-R2 y R-R3 evaluadas por la ASTM D3359-17.	55
Figura 4-12. Adherencia de R-H1, R-H2 y R-H3 evaluadas por la ASTM D3359-17.	56
Figura 4-13. Esquematización general de la formación del recubrimiento de PPT sobre sustrato de concreto.....	57
Figura 4-14. Esquematización general de la formación del recubrimiento de RPIH sobre un sustrato de concreto.....	58
Figura 4-15. Formación de recubrimiento de RPI en sustrato de concreto.	59
Figura 4-16. Curvas de carga-descarga de los recubrimientos de a) R-P, b) R-R y c) R-H obtenidas por nanoindentación.	60
Figura 4-17. Propiedades mecánicas, a) dureza y b) módulo de elasticidad de R-PPT, R-RPI y R-RPIH.	61
Figura 4-18. Clasificación de permeabilidad de los recubrimientos R-P, R-R y R-H de acuerdo con sus valores de carga pasada.	62
Figura 4-19. Velocidad de absorción de agua REF, R-P1, R-P2 y R-P3.....	63
Figura 4-20. Gráfica de velocidad de absorción de agua de los especímenes REF, R-R1, R-R2 y R-R3.	64
Figura 4-21. Gráfica de velocidad de absorción de agua de los especímenes REF, R-H1, R-H2 y R-H3.....	65

Figura 4-22. Profundidad de carbonatación de de REF, R-P1, R-P2 y R-P3 a 7, 14 y 28 días de exposición de CO ₂	66
Figura 4-23. Profundidad de carbonatación de muestras de concreto REF, R-R1, R-R2 y R-R3 a los 7, 14 y 28 días de exposición al CO ₂	68
Figura 4-24. Profundidad de carbonatación de muestras de concreto hidráulico REF, R-H1, R-H2 y R-H3 a los 7, 14 y 28 días de exposición al CO ₂	70
Figura 4-25. Esquemas representativos de los posibles mecanismos de envejecimiento del PPT basados en mecanismos de tipo Norrish.	73
Figura 4-26. Espectros FT-IR de (a) R-PE0, R-PE24, R-PE48 y R-PE72 en la región del número de onda de 4000–400 cm ⁻¹ y aumentos de las regiones espectrales R-PE0, R-PE24, R-PE48 y R-PE72 de (b) 3050 a 2850 cm ⁻¹ , (c) 2000 a 1300 cm ⁻¹ y (d) 1250 a 400 cm ⁻¹	75
Figura 4-27. Profundidad de penetración por nanoindentación en R-PE de R-PE0, R-PE24, R-PE48 y R-PE72.	76
Figura 4-28. Comportamiento mecánico de R-PE0, R-PE24, R-PE48 y R-PE72, en a) dureza (H), b) módulo elástico (E) y c) rigidez (S).	77
Figura 4-29. Evaluación de la adhesión por nanorascado/SEM de R-PE0, R-PE24, R-PE48 y R-PE72 sobre sustrato de vidrio, con cargas de 0.3, 0.4 y 0.5 mN.	79
Figura 4-30. Imágenes de AFM de R-PE0, R-PE24, R-PE48 y R-PE72.	80
Figura 4-31. Micrografías SEM obtenidas con electrones secundarios de los R-PE0, R-PE24, R-PE48 y R-PE72.	81
Figura 5-1. Artículo científico publicado en revista indexada en JCR, Journal of Materials Research and Technology, con el título "Artificial weathering aging of PPT coatings made from recycled PET to protect concrete: Nanomechanical properties evaluation" en 2025.	101

Figura 5-2. Artículo científico publicado en revista indexada en JCR, Polymers, con el título "A New Sustainable PPT Coating Based on Recycled PET to Improve the Durability" en 2024.	102
Figura 5-3. Artículo científico publicado en revista indexada en JCR, Polymers, con el título "Hybrid Coatings of SiO ₂ –Recycled PET Unsaturated Polyester Resin by Sol-Gel Process en 2022.	103
Figura 5-4. Constancia de estancia de investigación en CIMAV sede Chihuahua.....	104
Figura 5-5. Constancia de examen TOEFL con puntaje mayor a 475.....	105
Figura 5-6. Constancia de participación en congreso nacional "Reunión Interinstitucional para la Divulgación en la Ciencia de Materiales" 2024.	106
Figura 5-7. Constancia de participación en congreso nacional "XXVI Reunión Universitaria de Investigación en Materiales", 2023.	107
Figura 5-8. Participación en congreso internacional "VIII Coloquio Internacional de Investigación Universitaria" 2024.....	108
Figura 5-9. Participación en congreso internacional "LatinXChem Conference 2024".....	109
Figura 5-10. Participación en congreso internacional "XV Coloquio Bienal en Ciencia de Materiales 4ta edición internacional", 2023.	110
Figura 5-11. Participación en congreso internacional "LatinXChem Twitter Conference 2023".	111
Figura 5-12. Participación en congreso internacional "VI Coloquio Internacional de Investigación Universitaria", 2022.	112
Figura 5-13. Participación en congreso internacional "International Virtual Conference on Materials Science", 2022.....	113
Figura 5-14. Participación en congreso internacional "LatinXChem Twitter Conference 2022".	114

Figura 5-15. Participación en congreso internacional "XV International Conference on Surfaces, Materials and Vacuum", 2022.....	115
Figura 5-16. Constancia de profesor adjunto con la materia de maestría "Temas Selectos de Materiales".....	116
Figura 5-17. Constancia de profesor adjunto en materia de maestría "Materiales cementicios modificados con polímeros".	117
Figura 5-18. Constancia de profesor adjunto en la materia de maestría "Tecnología avanzada del concreto y nuevos materiales".....	118
Figura 5-19. Artículo científico publicado en revista arbitrada "Revista de Ingeniería y Tecnología UAS".....	119
Figura 5-20. Artículo científico publicado en memoria del congreso XXXVIII Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de Electroquímica.	120
Figura 5-21. Acta de grado de tesista de licenciatura Moreno Rubio Yamilet Viridiana.	121
Figura 5-22. Acta de grado de tesista de licenciatura Torres Beltrán Adilene Margarita.....	122
Figura 5-23. Acta de grado de tesista de licenciatura Verdugo Sánchez Jesús Alonso.....	123
Figura 5-24. Distinción de investigador por parte del Sistema Sinaloense de Investigadores y Tecnólogos.	124
Figura 5-25. 1er lugar en concurso de trabajos de investigación terminados: VIII Coloquio Internacional de Investigación Universitaria organizado por la Universidad de Guadalajara.....	124
Figura 5-26. Constancias de conferencias impartidas (parte 1).....	125
Figura 5-27. Conferencias impartidas (parte 2).	126
Figura 5-28. Constancias de carteles presentados.	127

Figura 5-29. Constancias de talleres impartidos.....	128
--	-----

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Generalidades

1.1.1 Recubrimiento polimérico

Un recubrimiento polimérico es la unión química o física de monómeros que forman una capa aplicada sobre la superficie de un sustrato, que después de someterse a catalizadores (temperatura o químicos) y cierto tiempo, puede convertirse en un material sólido [1], [2]. Entre sus funciones destacan las decorativas y protectoras de superficies utilizadas en industrias como la aeroespacial, ferroviaria, automotriz, electrónica y construcción, entre otras más [3], [4]. El desempeño de los recubrimientos depende fuertemente de sus propiedades estructurales y mecánicas y de sus propiedades adhesivas al sustrato [5]. La nanoindentación se ha convertido en un método integral para evaluar sus propiedades nanomecánicas, por ejemplo, dureza y módulo elástico [6], [7], por medio de la aplicación de las ecuaciones de Oliver-Pharr [8]. En esta técnica, la profundidad de penetración no debe exceder al 10% del espesor del recubrimiento para que en la medición de las propiedades mecánicas del recubrimiento no tenga influencia la dureza del sustrato [7]. Otra caracterización importante para recubrimientos es inferir la adhesión y propiedades tribológicas, por medio de la técnica de nanorascado, que consiste en aplicar una carga lateral con una punta para formar una ranura en la superficie del recubrimiento [9].

La vida útil de los recubrimientos depende del mantenimiento de su apariencia visual y propiedades físicas, químicas y mecánicas [10]. Sus propiedades pueden ser afectadas al exponerse a elementos como la luz ultravioleta, la humedad y la temperatura, que provocan su degradación por mecanismos como la fotooxidación, la hidrólisis y la termólisis, respectivamente [11]–[13].

1.1.2 Polímeros orgánicos

Los polímeros orgánicos consisten en macromoléculas cuya columna principal de su cadena molecular se compone principalmente de átomos de carbono e hidrógeno y en muchos casos

tienen presentes heteroátomos de oxígeno, nitrógeno o azufre [14]. Este tipo de polímeros pueden encontrarse de forma natural o sintética [15].

1.1.3 Polímeros inorgánicos

Los polímeros inorgánicos son macromoléculas que se componen de una cadena principal inorgánica con grupos laterales inorgánicos u orgánicos [16].

1.1.4 Polímeros híbridos

Los polímeros híbridos resultan de la interacción de una fase orgánica y una inorgánica por medio de enlaces covalentes, fuerzas de Van der Waals o puentes de hidrógeno. Estos materiales presentan propiedades nuevas en comparación de las fases orgánicas e inorgánicas que lo forman [16], [17]. Estos materiales pueden sintetizarse por varios procesos, entre ellos, el sol-gel, en la que un alcóxido líquido precursor, $M(OR)_n$, donde M es un metal y R un grupo orgánico, experimenta principalmente reacciones de hidrólisis y condensación para la formación de grupos M-OH y enlaces M-O-M, respectivamente [17]. En ciertos casos, para lograr la interacción entre la fase orgánica e inorgánica son necesarios los agentes acoplantes que presentan un grupo hidrolizable y un grupo organofuncional no hidrolizable con la capacidad de formar enlaces entre materiales inorgánicos y orgánicos respectivamente [18], [19].

1.1.5 Tereftalato de polietileno (PET)

El PET es un polímero termoplástico que consiste en largas cadenas compuestas de moléculas no ramificadas producidas a partir de la policondensación entre un glicol con ácido tereftálico o con dimetil tereftalato [20].

1.1.6 Tereftalato de polipropileno (PPT)

El PPT es un polímero termoplástico que consiste la politransesterificación de monómeros de tereftalato de bis(2-hidroxipropilo).

1.1.7 Reciclaje del PET

En las últimas décadas, el crecimiento industrial y la expansión de la producción de consumibles han provocado un aumento exponencial en la generación de residuos poliméricos, entre ellos el PET [19], porque ha sido ampliamente utilizado en la producción de envases de bebidas y alimentos, pero no ha sido posible sistematizar adecuadamente su disposición final, por lo que permanece en el medio ambiente [20]. Ante la urgente necesidad de abordar la contaminación generada por los residuos poliméricos y la transición a prácticas más sostenibles, el reciclaje de PET se ha convertido en una respuesta fundamental [21]. En 2019, se reportó una producción anual de 30.5 millones de toneladas (MT) de PET en el mundo, que podría incrementar actualmente 35.3 MT [22], cantidades correspondientes a la generación de botellas de PET, que posteriormente serían desperdiciadas, lo que ha generado el interés por explorar alternativas para su reciclaje y convertirlas en nuevos materiales con valor agregado [23]. El reciclaje de PET se puede realizar en las fases primaria; obtención del mismo material que se recicla, secundaria; transformación física, terciaria; transformación química y cuaternaria; recuperación de energía por combustión [24]. El PET puede reciclarse mecánicamente por medio de su procesamiento físico con la finalidad de obtener materiales como fibras [21], pellets [22] u hojuelas [23]. Además, puede ser reciclado químicamente por medio de solvólisis para la obtención de sus monómeros u oligómeros de origen [24], para la elaboración de resinas, recubrimientos y adhesivos [28]–[30].

1.1.8 Resina de poliéster insaturado (RPI)

La RPI es un copolímero termoestable que se produce por la polimerización de radicales libres entre un poliéster insaturado de cadena corta y un monómero de vinilo, como el estireno, lo cual forma una red tridimensional [25].

1.1.9 Concreto hidráulico

El concreto hidráulico es un material compuesto de matriz a base de pasta de cemento, la cual es producida mediante la mezcla de agua y un aglutinante, normalmente compuesto de cemento hidráulico y agregados (grueso y fino). Además, en algunos casos puede contener

aditivos, fibras u otros tipos de cementantes. Sus características y aplicaciones le confieren versatilidad a este material, característica principal que lo ha convertido en el material de construcción más utilizado en el mundo [26].

1.1.10 Durabilidad del concreto hidráulico

La durabilidad del concreto hidráulico consiste en la capacidad de resistir el deterioro debido a la intemperie, abrasión, ataque químico, como pueden ser carbonatación, penetración del ión cloruro, absorción de agua o diversas condiciones ambientales y poder mantener su resistencia y apariencia íntegra, con mantenimiento normal, durante su vida útil [27], [28]. Esto se puede lograr con un adecuado diseño de mezcla [29] o con la aplicación de recubrimientos que ofrezcan protección a los agentes atmosféricos citados [30], [31].

1.2 Antecedentes y estado del arte

Productos glicolizados de PET obtenidos a partir de su despolimerización con PG y etilenglicol (EG) han sido utilizados como materia prima, junto con anhídrido maleico y estireno para la síntesis de RPI [32]–[36]. Productos glicolizados de PET obtenidos a partir de su despolimerización con PG y dietilenglicol fueron utilizados como materia prima, junto con poliésteres alifáticos hiperramificados con ácidos grasos de aceite de linaza y girasol, para sintetizar resinas alquídicas de aceite medio aplicadas como recubrimientos en sustratos de vidrio y acero [37]. Productos glicolizados de PET obtenidos a partir de su despolimerización con EG fueron utilizados como materia prima, junto con bisfenol A y epiclorhidrina para la síntesis de resinas epóxicas para la elaboración de pinturas [38]. Partículas de PET obtenidas por molienda, fueron utilizadas para elaborar recubrimientos anticorrosivos en sustratos de acero con bajo contenido de carbono por prensado a calor (260 °C) [39]. Recubrimientos de PET/asfalto/silicatos han sido aplicados en sustratos de concreto hidráulico para mejorar su durabilidad [40].

Otro tipo de materiales que han sido aplicados como recubrimientos, son los materiales híbridos. El método sol-gel ha sido empleado para la síntesis de estos materiales con los sistemas fase inorgánica/acoplante silano [41]–[43] tales como tetraetilortosilicato/-glicidoxipropiltrimetoxisilano [44] y tetraetilortosilicato/3-aminopropiltriethoxisilano [45],

que fueron utilizados como recubrimientos anticorrosivos, tetraetilortosilicato/poli-dimetilsiloxano, utilizado para el recubrimiento protector de esculturas históricas de roca [46] y ZrO_2 /octadeciltriethoxisilano [47]. La matriz RPI reforzada con sílice mejoró su estabilidad térmica [48]–[51] y sus propiedades mecánicas [52]. Los sistemas híbridos RPI-nanoarcilla y RPI-nanosílice fueron sintetizados por el método de mezcla y aplicados como recubrimientos de 250 μm y 1 mm de espesor, respectivamente, sobre roca natural [53], [54]. El 3-(trimetoxisilil)propil metacrilato (TMSPM) es un agente de acoplamiento [55]–[57], que podría unirse al R_RPI por enlaces $\text{C}=\text{C}$ [58] y al tetraetilortosilicato hidrolizado por grupos OH. La adherencia en recubrimientos híbridos sintetizados con agentes de acoplamiento ha sido evaluada por el método ASTM D3359-17 [59] y reportada como 5B para sistemas SiO_2 -MMA y epoxi- SiO_2 -grafeno [60], [61] su interacción química entre las fases orgánica-inorgánica ha sido identificada por la técnica FT-IR [62], [63].

La técnica de nanoindentación se ha utilizado en películas de PET orientadas uniaxiales y biaxiales [64], cintas de PET uniaxiales [65] y fibras de PET/óxido de grafeno [66]. Otros polímeros evaluados por esta técnica son películas de acrilonitrilo-butadieno-estireno con y sin caucho, óxido de polietileno con arcilla, nylon con organoarcilla [18], resinas epóxicas reforzadas con SiO_2 [67], [68] y nanopartículas de ZnO [69]. La técnica de nanoscratching ha sido empleada para recubrimientos de resina epóxica [70], acrílico [71] y poliuretano [72], [73], para determinar su adhesión, fricción y comportamiento tribológico.

La resistencia contra la carbonatación ha sido mejorada para concreto hidráulico recubierto con materiales acrílicos [74], epóxicos [75], cementicios modificados con nano SiO_2 y nano SiO_2 híbrido [75], de crema de silano (alquilalcoxisilano) y gel de silano (triethoxisilano) [76], a base de terpolímero de acrilato [77], fluorosilicato de magnesio, vidrio soluble, fluorosilicato de sodio [78], pinturas para interiores y exteriores [79], silicato de calcio y acrílico-silicio [80]. La permeabilidad al ion cloruro ha sido disminuida para concreto hidráulico recubierto con resina epoxi modificada con óxido de grafeno [81], nanosílice, silano/nanoarcilla [82], caucho clorado, poliuretano [83] y alquilalcoxisilano [84]. El comportamiento a la absorción de agua del concreto hidráulico, ha sido estudiada para dicho material recubierto con resina epoxi modificada con óxido de grafeno [81], agentes hidrófugos a base de silano como alquilalcoxi silano [85], isobutiltriethoxisilano [86],

fluoroalquil silano modificado con ceniza de cascarilla de arroz [87] y silano/siloxano [84]. El concreto hidráulico recubierto con poliuretano ha presentado un bajo riesgo de corrosión al obtener su resistividad eléctrica [88].

El tratamiento de envejecimiento del PET se ha estudiado en condiciones naturales y aceleradas que involucran exposición a luz ultravioleta, humedad y temperatura, que afectan sus propiedades mecánicas, como la resistencia a la tracción [89]–[91], la resistencia al impacto [90], [92], elongación a la rotura [89], [93] y coloración [90], [94]. Además, su degradación molecular por efectos del envejecimiento ha sido estudiada por FT-IR y está asociada a mecanismos de Norrish (tipo I y II) [95], [96].

Después de una exhaustiva revisión bibliográfica, no se encontraron estudios sobre la síntesis y aplicación de recubrimientos de PPT y SiO₂-RPI a base de PET reciclado para mejorar la durabilidad del concreto hidráulico. El éxito de nuestra investigación radica en el desarrollo de recubrimientos sostenibles de PPT y SiO₂-RPI, materiales sintetizados a partir de PET reciclado y aplicados con brocha, para la mejora de la durabilidad del concreto hidráulico. El BHPT, PPT, RPI y SiO₂-RPI se caracterizaron mediante FT-IR y TGA. Los recubrimientos se caracterizaron mediante SEM, ángulo de contacto, adhesión, profundidad de carbonatación, permeabilidad de iones de cloruro y absorción de agua. Además, se estudió el envejecimiento del recubrimiento de PPT por intemperismo acelerado.

2 ASPECTOS TEÓRICOS

2.1 Formación de recubrimientos por enlace químico o anclaje físico

2.1.1 Formación por enlace químico

En la Figura 2-1 se presenta el esquema general para la formación de recubrimientos por enlace químico. En a) se muestra la representación de monómeros con grupos OH con la estructura R-OH, donde R puede ser un radical orgánico o inorgánico, y la representación del sustrato con grupos OH en su superficie, el cual puede ser considerado como vidrio o concreto. En b) se presenta la formación de enlaces hidrógeno entre el monómero y el sustrato por medio de los grupos OH de ambos, etapa que se produce en estado húmedo. En c), se presenta la formación de enlace covalente entre el polímero y el sustrato, con la consiguiente pérdida de agua, para finalizar la formación del recubrimiento polimérico [97].

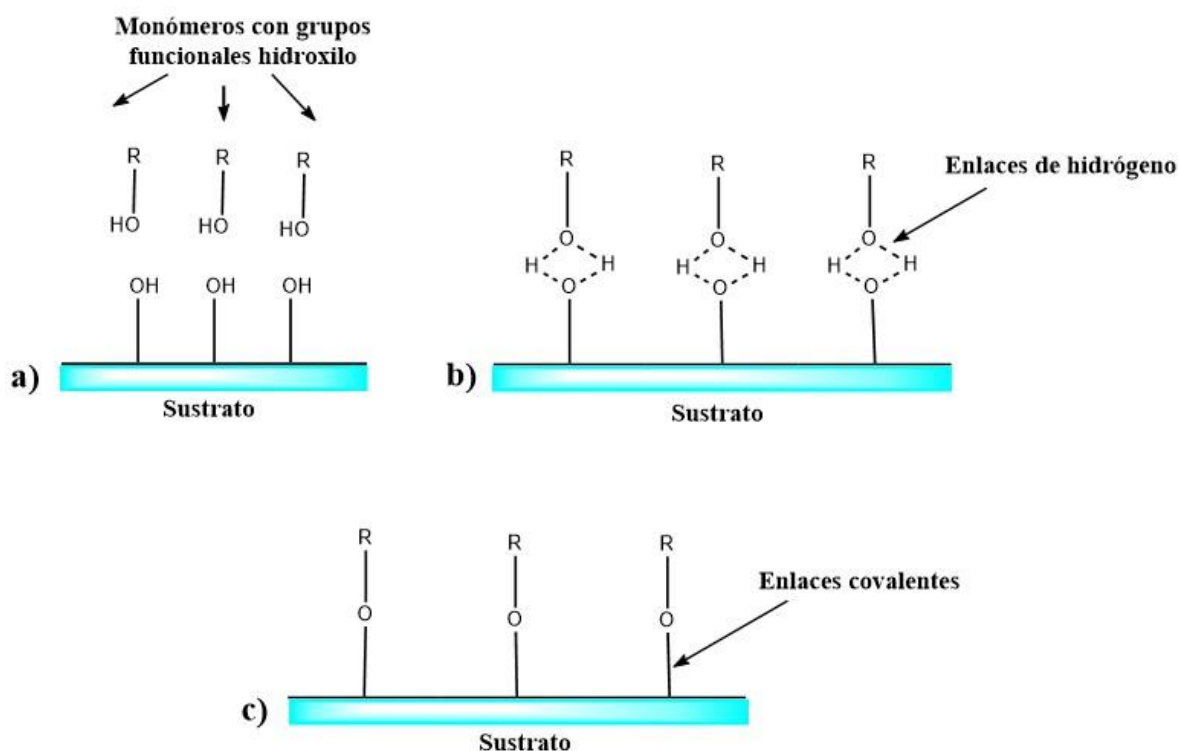


Figura 2-1. Esquema general para la formación de recubrimientos por enlace químico.

2.1.2 Formación por anclaje físico

Los polímeros cuyos grupos funcionales no son compatibles con la superficie del sustrato, por ejemplo, la resina de poliéster insaturado con la superficie del concreto, se depositan a través de poros capilares y producen una interacción por medio de la formación de un anclaje físico. En la Figura 2-2 se presenta el esquema de posibles anclajes físicos entre una resina polimérica y un sustrato poroso. En la parte superior se presenta la matriz porosa del sustrato, en planta, con la distribución de una resina polimérica y en la parte inferior una representación transversal del eje A-A'. En 1), 3) y 4) se observa un anclaje profundo relacionado con diámetros pequeños de poro y en 2) se aprecia un anclaje de menor profundidad con un mayor diámetro de poro [98], [99].

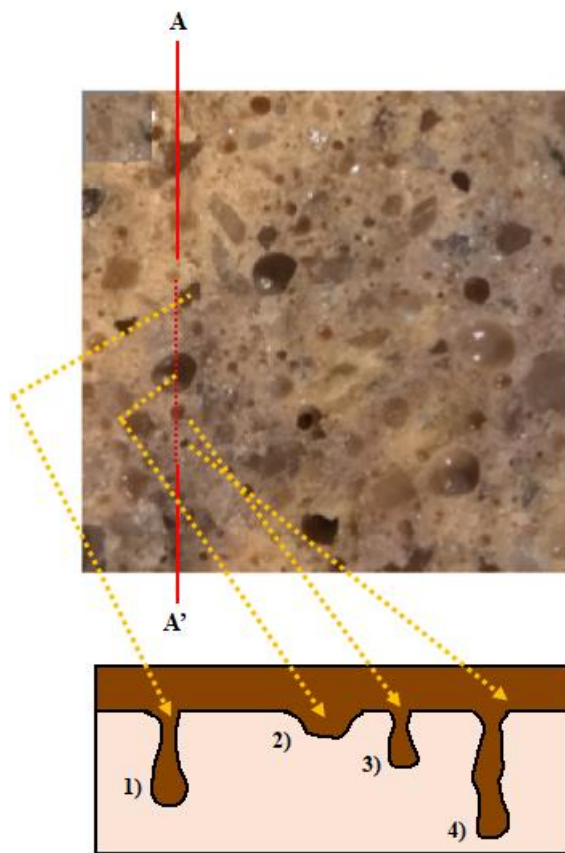


Figura 2-2. Esquema de posibles anclajes físicos entre una resina polimérica y un sustrato poroso.

2.2 Propiedades mecánicas por nanoindentación

La Figura 2-3 muestra esquemáticamente el proceso de la prueba de nanoindentación la cual consiste en dos etapas: 1) etapa de carga, en la cual un indentador con geometría específica (tipo Berkovich o Cube Corner) aplica una carga de manera controlada sobre el recubrimiento para producir una deformación máxima, conocida como h_{max} . 2) Etapa de descarga, después de retirar la carga de manera controlada es producida una huella residual en el recubrimiento, h_f , la reducción de la profundidad con respecto a h_{max} , está en función de su módulo elástico [100].

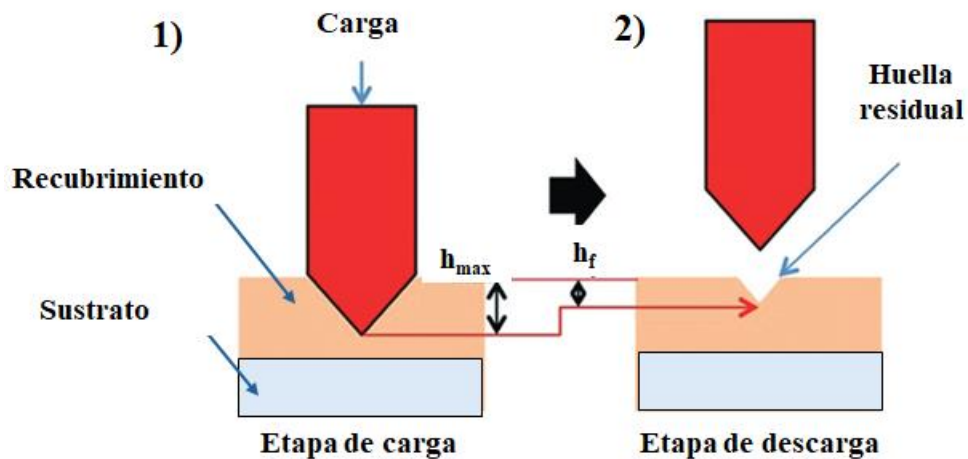


Figura 2-3. Proceso de la prueba de nanoindentación.

En la Figura 2-4 se presenta una curva representativa carga-descarga de una prueba de nanoindentación, en la cual se visualiza la zona de la etapa de carga, la cual consiste en el registro del desplazamiento, h , producido por el indentador en función de la carga aplicada, que finaliza con la carga máxima, P_{max} , aplicada la cual produce un desplazamiento máximo, h_{max} . La zona de descarga consiste en el registro de la distancia de desplazamiento recuperada durante el retiro de la carga, h_f . La rigidez de contacto que se determina con la información de la zona de descarga, denominada S [100].

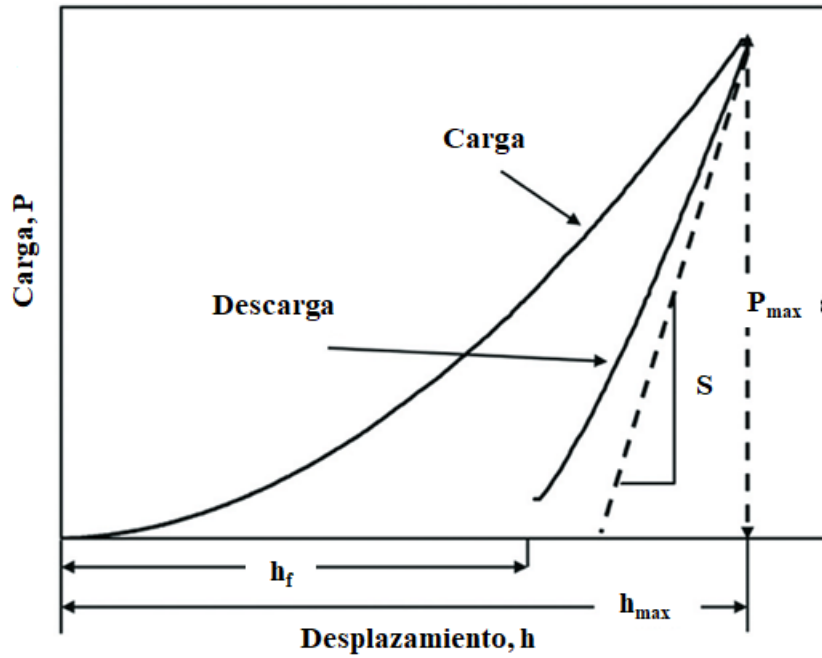


Figura 2-4. Curva representativa carga-descarga de una prueba de nanoindentación.

Los fundamentos para la medición de las propiedades de nanoindentación fueron establecidas por Oliver-Pharr en las ecuaciones que se describen enseguida [12].

La profundidad de contacto (h_c) se calcula a partir de la ecuación. 1, con los datos medidos al inicio de la etapa de descarga en el ensayo de nanoindentación (carga de indentación, P , penetración total, h , y rigidez de contacto, S (dP/dh)).

$$h_c = h_{max} - \varepsilon \frac{P_{max}}{S} \quad (1)$$

donde ε es una constante ($\varepsilon \approx 0.75$).

Para obtener la rigidez de contacto, S , se necesita una función de regresión del tipo ley potencial, que se ajusta a la curva de descarga. El área de contacto A se calcula a partir de la ecuación 2, en el que interviene la función de calibración ($f = 24.5$) y h_c .

$$A = f h_c^2 = 24.5 h_c^2 \quad (2)$$

El módulo compuesto (E_r) se calcula a partir de la ecuación 3 que depende de S y A , como se muestra a continuación:

$$Er = \pi^2 \beta S A \quad (3)$$

donde β , es el factor de corrección que depende de la forma del penetrador, ($\beta \approx 1.07$ para punta Berkovich). El módulo de elasticidad del recubrimiento (E) se calcula con la ecuación 4 de Er . Esta ecuación muestra que el Er depende de las características tanto de la muestra (E y ν , coeficiente de Poisson de la muestra) como de la punta del penetrador (E_i y ν_i).

$$\frac{1}{E_r} = \frac{1 - \nu^2}{E} + \frac{1 - \nu_i^2}{E_i} \quad (4)$$

La dureza, H , consiste en el grado de resistencia de la muestra a la deformación plástica local y se puede obtener de la ecuación 5, con la relación entre P_{max} y A .

$$H = \frac{P_{max}}{A} \quad (5)$$

2.3 Propiedades de adhesión por nanorascado (nanoscratching)

La Figura 2-5 presenta el esquema del proceso de la prueba de nanorascado, en la que se observa un indentador (puede ser tipo Rockwell, Berkovich o Cube Corner) que aplica una carga sobre la superficie, la cual puede ser por rampas (prueba de rasgado con carga progresiva) o de forma continua con aumentos lineales y produce un desplazamiento que sigue una trayectoria longitudinal a lo largo de la superficie (prueba de rasgado con carga lineal). El rango de las cargas empleadas durante esta prueba varía desde decenas hasta cientos de miliNewtons mientras que las trayectorias oscilan desde unidades nanométricas hasta cientos de nanómetros [101].

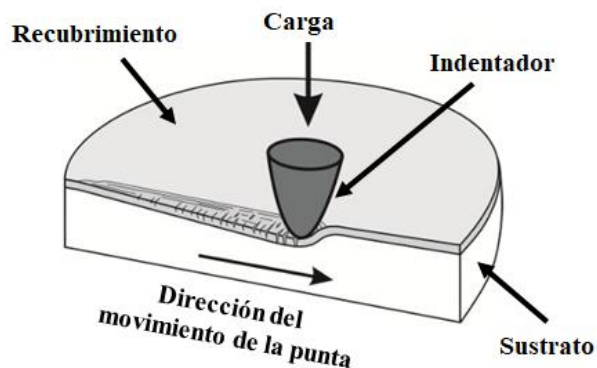


Figura 2-5. Esquema del proceso de la prueba de nanorascado.

El nanorascado (nanoscratching) se utiliza para obtener la adhesión del recubrimiento sobre el sustrato y considera la dureza de ambos como parámetros principales, que se puede presentar de cuatro maneras: 1) Recubrimiento blando sobre sustrato blando: creación de ranura residual por arado en la que predomina la deformación plástica y ausencia de grietas a excepción de cargas muy altas. 2) Recubrimiento blando sobre sustrato duro: adelgazamiento gradual hasta producir la visibilidad del sustrato, predomina la deformación plástica. 3) Recubrimiento duro sobre sustrato blando: Deformación plástica o agrietamiento del recubrimiento provocado por el doblamiento de la ranura por deformación plástica del sustrato. 4) Recubrimiento duro sobre sustrato duro: agrietamiento del revestimiento que puede propagarse al sustrato, se presentan deformaciones plásticas menores o insignificantes [101].

2.4 Etapas del reciclaje mecánico del PET

El reciclaje mecánico del PET consiste en el procesamiento físico de las botellas post-consumo para la obtención de hojuelas, pellets o fibras. En la Figura 2-6 se presentan sus etapas, que consisten en: a) recolección de residuos poliméricos generados en la sociedad se someten en b) selección de botellas post-consumo, en c), su clasificación por elección de botellas por color y retiro de otros polímeros presentes (tapas y etiquetas), en d) lavado en NaOH y agua destilada para la remoción de contaminantes como polvo y materia orgánica, en e) molienda y trituración y en f) cribado para la obtención de hojuelas con tamaño deseado [102].

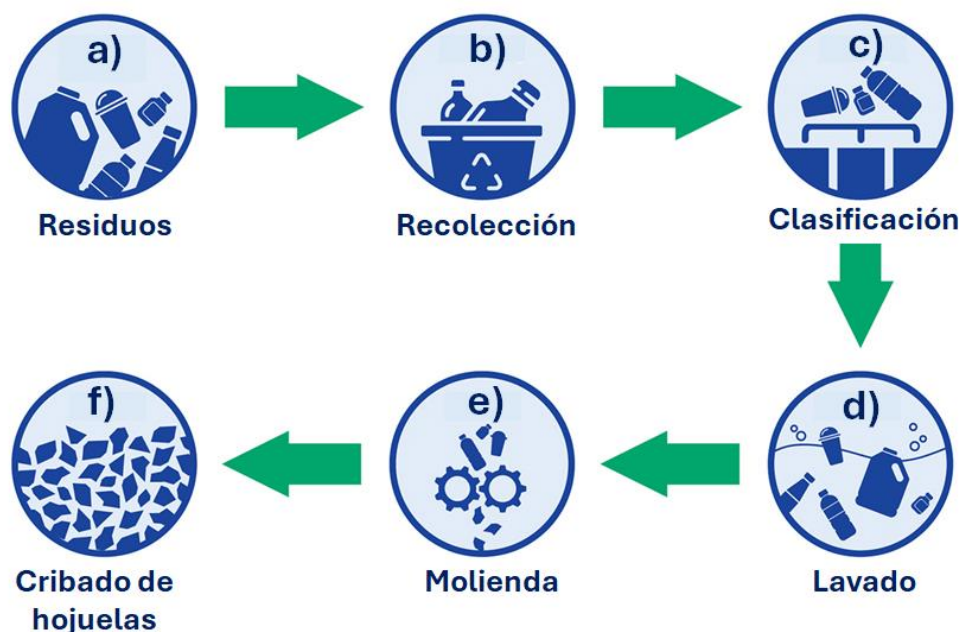


Figura 2-6. Etapas del reciclaje mecánico del PET.

2.5 Mecanismo del reciclaje químico del PET por glicólisis

El reciclaje químico del PET se lleva a cabo por solvólisis, la cual involucra mecanismos como hidrólisis, metanólisis, aminólisis, amonólisis y glicólisis. La glicólisis consiste en la degradación molecular del PET por glicoles, en presencia de catalizadores de transesterificación, donde los enlaces éster se rompen y se reemplazan por terminales hidroxilo. En la Figura 2-7 se muestra el mecanismo de despolimerización por glicólisis del PET. En a), el átomo de oxígeno del grupo hidroxilo (-OH) actúa como nucleófilo y ataca el carbono del grupo carbonilo (C=O), en b), provoca la escisión de su doble enlace y genera un enlace simple con el oxígeno del grupo hidroxilo del PG, lo que produce un intermedio tetraédrico, después, en c) produce la escisión del enlace C-O del grupo saliente ($\text{-O-CH}_2\text{-CH}_2\text{-O}$) 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 ($\text{-O-CH}_2\text{-CH}_2\text{-O}$), que tiene como resultado el BHPT con un diol de subproducto, proceso que se repite hasta producir solamente monómeros [103]–[105].

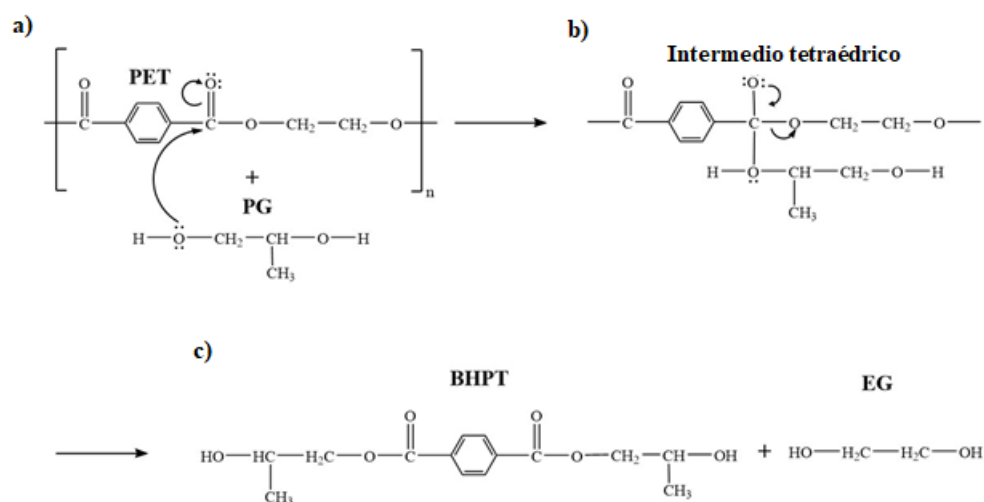


Figura 2-7. Mecanismo de despolimerización por glicólisis del PET.

2.6 Mecanismo de formación de la resina de poliéster insaturado (RPI)

El mecanismo de formación de la RPI consiste en dos etapas; 1) Policondensación de diol con ácido dibásico para formar el poliéster insaturado (PI) y 2) Entrecruzamiento del PI con estireno (St) para formar la RPI [106].

2.6.1 Policondensación de diol con ácido dibásico para formar el poliéster insaturado (PI)

Los poliésteres insaturados se constituyen de poliésteres lineales de bajo peso molecular que contienen insaturaciones ($\text{C}=\text{C}$) y se obtienen por la policondensación (polimerización de crecimiento por etapas) de diácidos o anhídridos saturados y/o insaturados con dioles. En la Figura 2-8 se muestra el esquema de reacción de la síntesis de PI a partir de AM (anhídrido insaturado) y BHPT (diol). En a) se muestra la formación de mono-éster, donde el AM reacciona con el BHPT, experimenta una isomerización, cambia su forma de maleato a fumarato y en conjunto con el BHPT forman el mono-éster. En b) se muestra la policondensación entre los mono-ésteres, por medio de los grupos OH, para producir PI con H_2O como residuo [107].

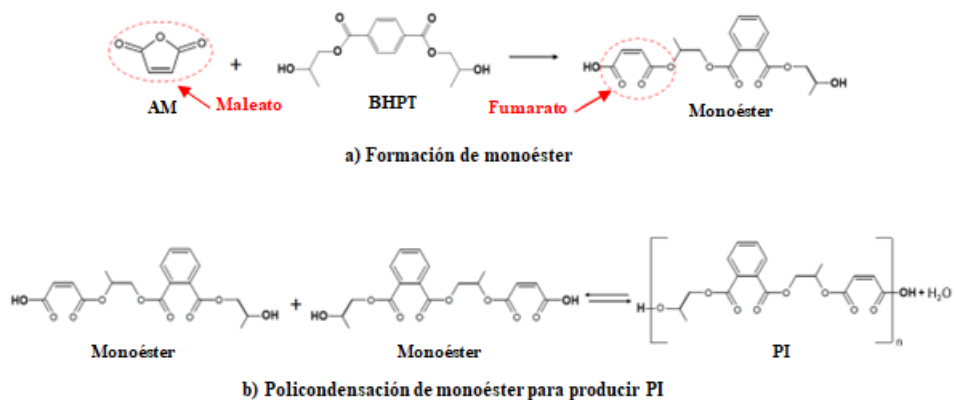


Figura 2-8. Esquema de reacción de la síntesis de PI a partir de AM (anhídrido insaturado) y BHPT (diol).

2.6.2 Entrecruzamiento del PI con estireno (St) para formar la RPI

El entrecruzamiento de la RPI se produce por radicales libres, suministrados por un iniciador. Los iniciadores comúnmente empleados son peróxidos orgánicos (peróxido de benzoilo, PBO y el peróxido de metiletil cetona) o compuestos del tipo azo (2,2 azo-bis (isobutironitrilo)). El iniciador puede descomponerse mediante un catalizador, temperatura o químico, entre estos últimos están las sales orgánicas metálicas (octoato de cobalto y naftenato de cobalto) y aminas aromáticas (n,ndimetil- ptoluidina y dimetil anilina) [108].

El entrecruzamiento de la RPI se produce en tres etapas: 1) iniciación; ocurre la ruptura homolítica del enlace O-O presente en el iniciador por acción de catalizador, lo que genera radicales libres. 2) propagación; los radicales libres proporcionados por el iniciador atacan las insaturaciones (C=C) presentes lo que produce nuevos radicales libres, éstos pueden reaccionar con los monómeros de St o con las cadenas del PI; enseguida las cadenas de polímero comienzan a crecer y entrecruzarse, según tres posibles procesos reactivos: copolimerización St-PI, homopolimerización St-St y homopolimerización PI-PI y 3) terminación, ocurre con el agotamiento de radicales libres presentes en la cadena [109].

2.7 Polimerización del TMSPM con RPI para la formación de SiO₂-RPI

La polimerización de TMSPM por sol-gel para la formación de SiO₂-RPI consiste en cuatro etapas: 1) Hidrólisis del grupo trialcóxido, Si-OCH₃, del TMSPM, para formar grupos

silanoles Si-OH, los cuales permiten incorporar fases inorgánicas. 2) Condensación de los grupos Si-OH, para formar enlaces Si-O-Si, reacción progresiva que produce una red tridimensional de SiO₂ [110]. 3) Polimerización por crecimiento de cadenas, en el que un radical libre presente en la RPI pre-polimerizada actúa como iniciador y ataca a la insaturación presente en el grupo organofuncional del TMSPM, que, seguido por reacciones de propagación y terminación, produce el material híbrido SiO₂-RPI [111], [112].

2.8 Procesos químicos que afectan la durabilidad del concreto hidráulico

La durabilidad del concreto hidráulico puede ser afectada por procesos de deterioro de tipo físico [113] y químico; este último consiste en la interacción entre sustancias y componentes del concreto hidráulico que producen problemas de disolución o expansión; donde destaca la carbonatación, penetración del ion cloruro y absorción de agua [114].

2.8.1 Proceso de penetración de ion cloruro

El proceso de penetración de ion cloruro en la microestructura del concreto hidráulico afecta significativamente su durabilidad a largo plazo y varía de acuerdo con la permeabilidad, que es una medida de la cantidad de agua, aire y otras sustancias que pueden penetrar el concreto hidráulico debido a la presencia de poros en su matriz por lo que representa una de las principales causas de su deterioro debido a la corrosión del acero de refuerzo [115].

La norma ASTM C1202-22 establece los procedimientos para determinar la permeabilidad del concreto al ion cloruro, el cual comprende la determinación de la conductancia eléctrica del concreto hidráulico para obtener una indicación rápida de su resistencia a la penetración de iones de cloruro por medio del cálculo de la carga pasada (Q) [116].

2.8.2 Proceso de absorción de agua

En la Figura 2-9 se presenta el proceso de absorción de agua del concreto hidráulico por capilaridad. El concreto presenta poros capilares, que conectan desde la superficie exterior hasta su interior, los cuales generan una zona de absorción capilar de agua, que se produce debido a sus propiedades como pequeño tamaño molecular, alto calor de vaporización y

capacidad de humedecer y disolver diversas sustancias. La humedad del concreto se ubica en la zona de filtración del agua producida por la cantidad absorbida por la red de poros interconectada a los de tipo capilar y está en función del tipo de aglutinante, agregados, impurezas nocivas presentes en el concreto y a la temperatura del ambiente [117] [118]. proceso se mide mediante la norma ASTM C1585-19, que considera el aumento de la masa de una muestra resultante de la absorción de agua en función del tiempo cuando solo una superficie de la muestra está expuesta al agua [119].

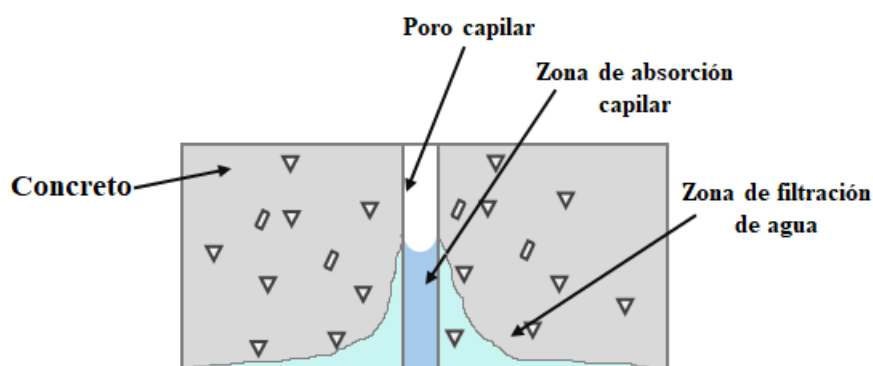


Figura 2-9. Proceso de absorción de agua del concreto hidráulico por capilaridad.

2.8.3 Proceso de carbonatación

En la Figura 2-10 se presenta el proceso de carbonatación del concreto hidráulico. En a) se muestra esquemáticamente el proceso de difusión, por el cual las moléculas de CO_2 se introducen en el concreto a través de su matriz de poros. En b) se presenta la reacción de carbonatación que ocurre cuando el CO_2 presente en la atmósfera ingresa al concreto por medio de su matriz de poros y reacciona con el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ presente en ella, esto reduce la alcalinidad del concreto. Esto último genera el deterioro de la capa de óxido pasivo que cubre la superficie de acero, en caso de concreto reforzado. La reacción de este proceso se presenta en la siguiente ecuación [120] [121]: $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{CaCO}_3 + 2\text{H}_2\text{O}$

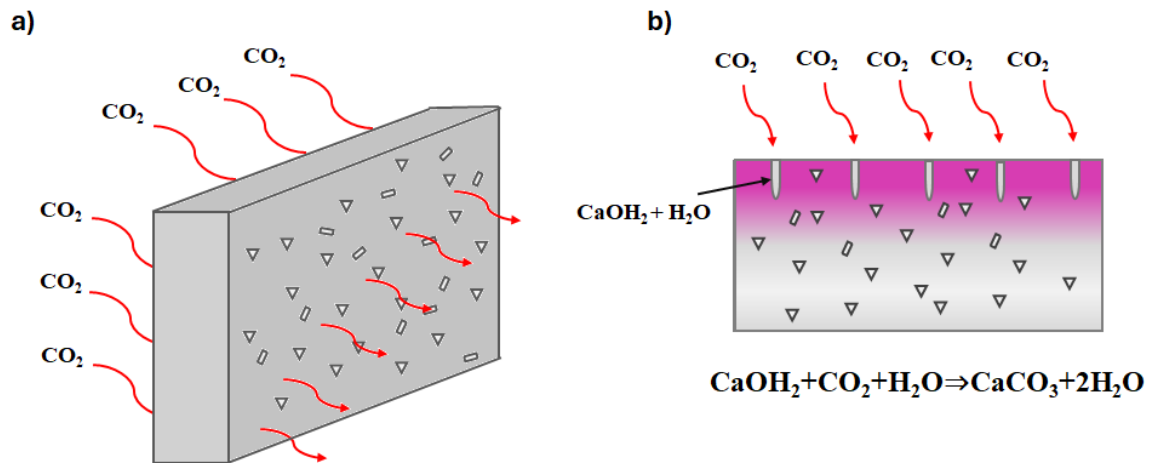


Figura 2-10. Proceso de carbonatación del concreto hidráulico.

La velocidad de carbonatación, generalmente, es proporcional a la raíz cuadrada del tiempo y depende de las condiciones de curado inicial, la relación agua/cemento, a/c (a mayor a/c , mayor velocidad) y condiciones ambientales como la humedad relativa, HR , (velocidad máxima a HR de 60 a 70%). La reacción de este proceso genera agua como subproducto que debe ser liberada para una velocidad de carbonatación adecuada, caso que puede ser impedido cuando la humedad es demasiado lenta, lo que genera su ralentización [121].

La profundidad de carbonatación en concreto hidráulico endurecido consiste en la distancia comprendida desde el límite superior de la superficie del espécimen hasta el límite inferior de la zona reaccionada y por lo regular se denomina d_k [122].

La norma RILEM CPC-18 establece el procedimiento para la medición de d_k en muestras elaboradas en laboratorio o en obra, las cuales hayan sido expuestas en condiciones naturales en períodos de 28, 90, 180 días; 1, 2, 4, 8, 16 años. En caso de condiciones aceleradas (5% de CO_2 , temperatura de 25 °C y 60% de humedad relativa), pueden variar de acuerdo con el alcance del estudio (28 días o hasta que termine de carbonatar la muestra).

2.9 Envejecimiento acelerado del PET

2.9.1 Envejecimiento en condiciones aceleradas

Las técnicas de envejecimiento acelerado combinan la radiación UV, el calor y la humedad, para simular, en tiempos más cortos, los factores naturales que provocan la degradación de los polímeros, esto permite evaluar la idoneidad de los materiales para aplicaciones en exteriores. La degradación de los polímeros se puede medir en diversas condiciones aceleradas y, en general, se considera una metodología más representativa y precisa para los estudios de degradación de polímeros que la fotólisis o la hidrólisis por sí solas [123]. En la Figura 2-11 se presenta un esquema de una cámara de envejecimiento acelerado tipo QUV. Este equipo se compone principalmente de portamuestras para especímenes de pruebas que son expuestos a cierta distancia a lámparas UV, (en longitudes de onda de entre 300 y 400 nm, ya que los rayos ultravioleta cortos son los que provocan la mayoría de los efectos de la intemperie), que simulan la radiación del sol, así como calentador de agua que genera su evaporación la cual es suministrada en la cámara por boquillas de rociado para simular la humedad del ambiente. Además, se compone de compartimiento de enfriado por aire y respiradero de oxigenación como complementos de los ciclos de envejecimiento [124].

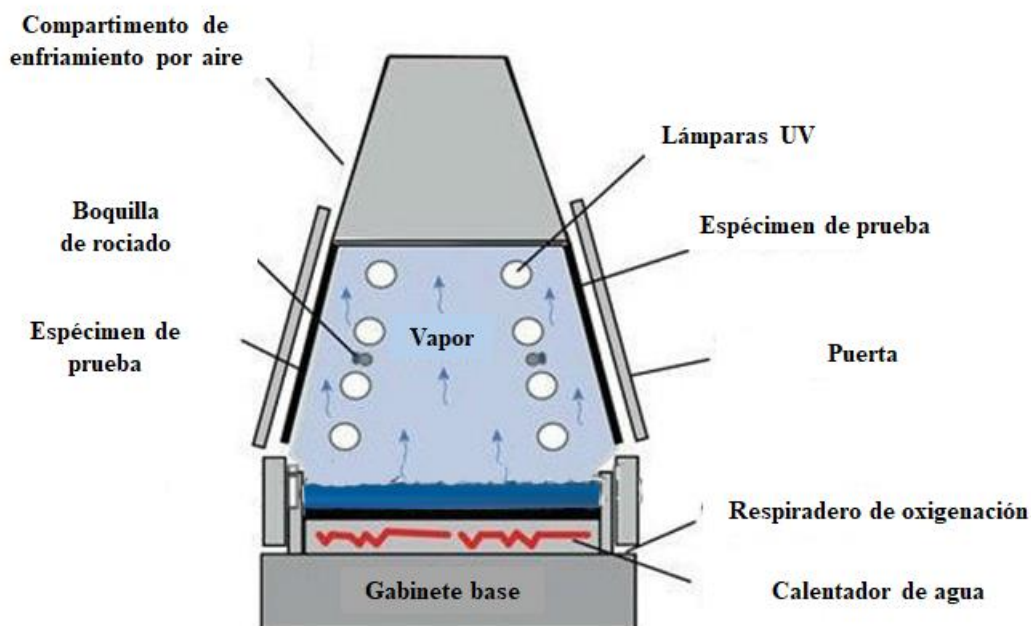


Figura 2-11. Esquema de una cámara de envejecimiento acelerado tipo QUV.

2.9.2 Correlación entre el envejecimiento natural y acelerado del PET

Los polímeros se degradan con el tiempo debido a factores ambientales, lo que afecta sus propiedades y rendimiento. Esta degradación se acelera en pruebas de “envejecimiento acelerado”, en las que los materiales se exponen a condiciones ambientales intensificadas (como radiación UV, altas temperaturas, humedad y agentes químicos) para prever su comportamiento a largo plazo. Sin embargo, los resultados no siempre son equivalentes a los del envejecimiento natural, lo que genera incertidumbre y dificulta la comparación entre estudios debido a variaciones en los parámetros de prueba. La durabilidad de un polímero depende de su estructura química, de las condiciones de producción y de los agentes a los que esté expuesto, variando según el lugar y las condiciones climáticas. Los principales causantes de su degradación incluyen radiación UV, oxígeno, humedad y productos químicos. Estos procesos de degradación son usualmente irreversibles, produciendo cambios en las propiedades del material (mecánicas, térmicas, ópticas) que acortan su vida útil. La durabilidad en aplicaciones específicas, como componentes automotrices, neumáticos o piezas aeronáuticas, depende del tipo y nivel de exposición ambiental. Algunos entornos combinan múltiples factores (UV, temperatura, humedad) de forma simultánea, lo que

intensifica la degradación. Las condiciones al aire libre son variables y dependen de la ubicación, la altitud y la época del año, lo que hace difícil prever los efectos exactos en los polímeros. Además, la degradación se clasifica según el agente predominante, como oxidación, fotooxidación o degradación térmica [125].

2.9.3 Mecanismos de envejecimiento del PET por fotooxidación (reacciones de Norrish)

En la Figura 2-12 se presenta el mecanismo de envejecimiento del PET por fotooxidación (reacciones de Norrish). En a), la luz ultravioleta induce la oxidación de los grupos metileno del PET, que genera la abstracción de átomos de hidrógeno; en b), la molécula resultante reacciona con oxígeno lo que produce un peróxido; en c), este reacciona con el hidrógeno abstraído en la primera etapa, lo que da como resultado la formación de hidroperóxidos, que son fotoinestables; en d), ocurre la homólisis del enlace O-O para producir macrorradicales alcóxido y radicales hidroxilo ó macrorradicales éster y CHOCH_2 ; en e) macrorradicales alcóxido, en condiciones de ausencia de O_2 , pueden recombinarse con los radicales hidroxilo lo que genera reticulación de las cadenas y produce tereftalato de dihidroxilo; y en f) macrorradicales éster pueden recombinarse con los radicales CHOCH_2 para producir especies tereftálicas con grupo con terminales de ácido carboxílico [96].

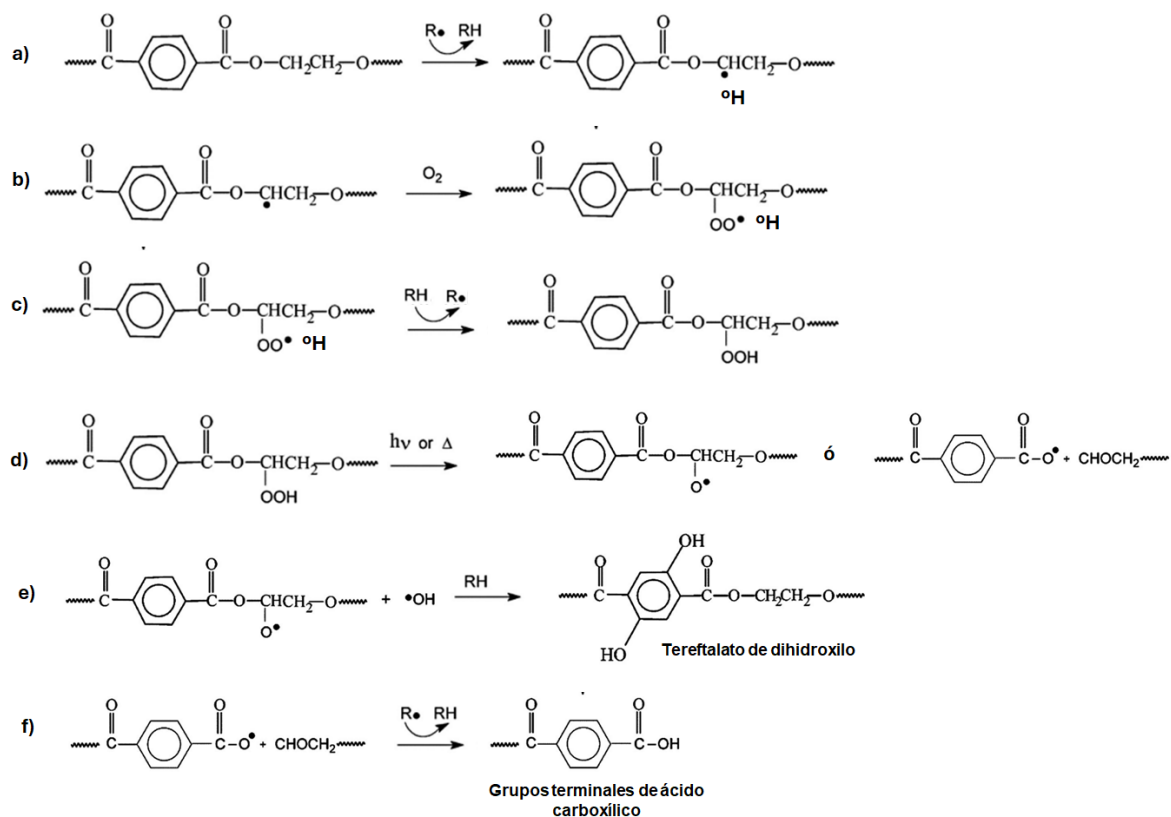


Figura 2-12. Mecanismo de envejecimiento del PET por fotooxidación (reacciones de Norrish).

3 METODOLOGÍA

3.1 Material requerido

Para la obtención de hojuelas de PET se utilizaron botellas de PET post-consumo, agua destilada e hidróxido de sodio (NaOH), marca Sigma-Aldrich.

Para la síntesis de BHPT se utilizaron hojuelas de PET, propilenglicol (PG) y acetato de zinc (AZn). Para su purificación se emplearon tetrahidrofurano (THF), etanol y agua destilada. Todos los reactivos marca Sigma-Aldrich con pureza $\geq 99\%$.

Para la síntesis de PPT se utilizó BHPT obtenido del reciclaje químico del PET.

Para la síntesis de RPI se empleó BHPT, anhídrido maleico (AM), estireno (St), peróxido de benzoilo Luperox® A98 (PBO), todos los reactivos marca Sigma-Aldrich con pureza $\geq 98\%$.

Para la síntesis de resina de poliéster insaturado híbrido (RPIH), se utilizó RPI sintetizada a partir de BHPT, metacrilato de 3-(trimetoxisilil)propilo (TMSPM), NaOH, etanol, agua destilada y ácido clorhídrico (HCl). Todos los reactivos utilizados son marca Sigma-Aldrich con pureza $\geq 99\%$.

Para la elaboración de concreto hidráulico se usó cemento Portland ordinario tipo III marca CEMEX, CPC, de acuerdo con la norma ASTM C150/C150M-22 y agregados naturales (grueso y fino) adquiridos en CONSTRURAMA, S.A. de C.V. y el agua fue suministrada por la red local de agua potable.

Para la elaboración de recubrimientos se emplearon sustratos de concreto hidráulico de 10 cm de diámetro y 5 cm de espesor y sustratos de vidrio marca Corning de 2.5 X 7 cm y espesor entre 0.8-1.1 mm.

3.2 Infraestructura

Este trabajo de investigación se realizó gracias a la disponibilidad de acceso a las instalaciones de la Facultad de Ingeniería Mochis de la Universidad Autónoma de Sinaloa (FIM-UAS) ubicada en Los Mochis, Sinaloa y al Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV), S.C., ubicado en Chihuahua, Chihuahua.

3.3 Laboratorios y equipos

La FIM-UAS aportó los siguientes laboratorios y equipos:

Área de Triturado: Molino triturador para PET sin marca y revolvedora para concreto, marca Joper.

Laboratorio de Química Ambiental: Campana extractora de gases, marca Fisher Hamilton; reactor tipo Vessel, marca Syrris y sistema de vacío con embudo Buchner marca Pittsburgh 2.5 CFM.

Laboratorio de Corrosión: Cortadora para concreto, marca Controls, modelo 55 C0210/DZ; medidor de cloruro marca Controls, modelo 58-E5204; celda electroquímica, sin marca; cámara de acrílico para aborción de agua, sin marca y cámara de carbonatación acelerada, sin marca.

LEyCR: Horno de secado, marca Shel-Lab; bomba de vacío, marca Weg modelo 253660E1P56J; cámara de vacío, marca Bel-art Products y desecador de muestras, marca Pyro-Rex.

El CIMAV cuenta con los siguientes laboratorios y equipos: (LEyTP), Análisis Térmico (LAT), Reología (LR) y Nanotech (LN).

Laboratorio de Espectroscopía y Tamaño de Partícula: Espectrómetro Nicolet iS50.

Laboratorio de Análisis Térmico: Equipo simultáneo SDT Q 600 TA Instrument.

Laboratorio de Reología: Analizador de ángulo de contacto FTA 200.

Laboratorio Nanotech: Microscopio Electrónico de Barrido JEOL Mod. JSM5800LV, microscopio de fuerza atómica MFP3D-SA marca ASYLUM RESEARCH y nanoindentador G200.

Laboratorio de Corrosión y Protección: Cámara de envejecimiento acelerado, marca QUV, modelo QUV/se.

3.4 Experimento

En la Figura 3-1 se presenta el esquema general del experimento en el que se observan las etapas que lo comprenden, así como las técnicas de caracterización empleadas en cada una de ellas.

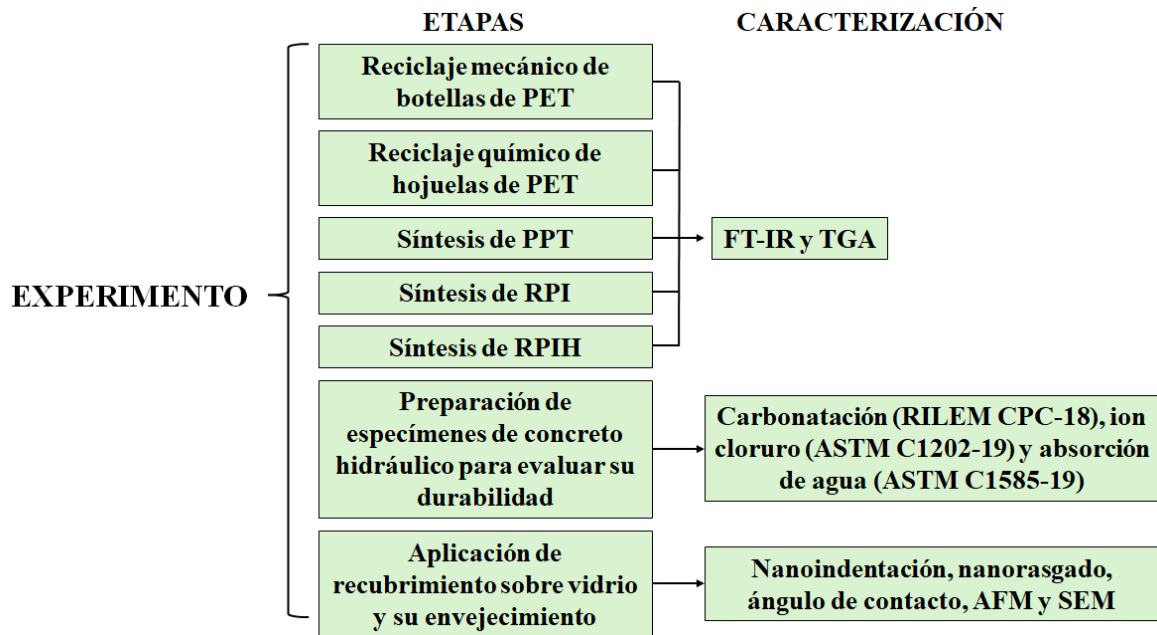


Figura 3-1. Esquema general del experimento.

3.4.1 Reciclaje mecánico de botellas de PET

El reciclaje mecánico de botellas de PET post-consumo consistió en su recolección procedente de baldíos y parques de la ciudad de Los Mochis, posteriormente se clasificaron por color y se seleccionaron aquellas de aspecto transparente para conseguir un control homogéneo de la hojuela resultante. Después, se procedió con el retiro de tapones, anillos y etiquetas, enseguida, la parte superior e inferior de las botellas fueron eliminadas, para facilitar el procesamiento del molino triturador que se tiene; el cuerpo fue reducido a tiras con medidas aproximadas de 5 x 3 cm, mediante el uso de tijeras industriales y después se procedió a su trituración y cribado en molino para obtener hojuelas de PET. Éstas fueron lavadas en dos etapas; primero con agua destilada para la eliminación de polvo y segundo con solución acuosa de NaOH al 10%, en la cual se dejaron en reposo por 24 h., para eliminar cualquier residuo o sustancia presente en ellas. Por último, las hojuelas de PET fueron

secadas en horno con circulación de aire a 50 °C por 24 h. y almacenadas para su posterior empleo.

3.4.2 Reciclaje químico de hojuelas de PET por glicólisis

El proceso de reciclaje químico de botellas de PET implicó su despolimerización con propilenglicol para obtener los monómeros BHPT. El procedimiento se llevó a cabo en las siguientes etapas: las hojuelas de PET se depositaron en un reactor tipo Syrris Vessel a temperatura ambiente. Se añadió PG (100% en peso de PET) y acetato de zinc, como catalizador (0.5% en peso de PET). Posteriormente, estos reactivos se mezclaron con agitación mecánica a temperatura ambiente durante 15 min. A continuación, la temperatura posterior aumentó en pasos de 5 °C/min desde 20 °C a 180 °C durante 3 h. Luego se mantuvo en reposo hasta alcanzar temperatura ambiente para su posterior uso. Como resultado del proceso, se supuso que resultó una mezcla de BHPT con exceso de PG y EG, como subproductos.

Los monómeros de BHPT obtenidos se sometieron a un proceso de purificación para eliminar el exceso de PG y EG. EtOH y THF, 100 % y 20 % en volumen de BHPT, respectivamente, se agitaron en un vaso de precipitado durante 15 min. Luego, se agregaron los monómeros de BHPT a la mezcla y se agitó durante 30 min. a temperatura ambiente. A continuación, se realizaron tres lavados con agua destilada (30% en volumen de BHPT) durante 15 min. La solución se filtró al vacío en un embudo Buchner, luego se secó en horno con circulación de aire a 60 °C durante 24 horas y se mantuvo en reposo hasta alcanzar temperatura ambiente, para su uso en etapas posteriores.

3.4.3 Síntesis de tereftalato de polipropileno (PPT)

La síntesis de PPT se llevó a cabo mediante de acuerdo con las dos etapas siguientes: 1) Se prepararon muestras en bulto de PPT, para lo cual, el BHPT purificado y a temperatura ambiente, se vertió en moldes de 1.5 cm de altura y 2.5 cm de diámetro, enseguida, 2) estos moldes se expusieron a 150 °C durante 15 h, en horno con circulación de aire, para su polimerización.

3.4.4 Síntesis de resina de poliéster insaturado (RPI)

La síntesis de la RPI se llevó a cabo en tres etapas: 1) Síntesis de poliéster insaturado (PI), para lo cual, el BHPT fue calentado a 90 °C y enseguida se le añadió AM en una relación molar BHPT:AM de 1:1.1 y esta mezcla fue agitada durante 1 h. Después de este tiempo, se le incrementó la temperatura a 180 °C, con rampas de 5 °C/min., se mantuvo en agitación por 2 h. y posteriormente, se permaneció en reposo hasta alcanzar la temperatura ambiente, para ser utilizado en la siguiente etapa. 2) Síntesis de RPI prepolimerizada (RPI-P), en esta etapa, al St, previamente desinhibido con NaOH (30% en vol. de PI), se le añadió PBO (0.1% en peso respecto al PI+St) y esta mezcla fue agitada por 15 min., después fue añadida al PI y la nueva mezcla se mantuvo en agitación por 30 min. 3) Síntesis de RPI, para lo cual, la RPI prepolimerizada se vertió en moldes de 1.5 cm de altura y 2.5 cm de diámetro, para elaborar compuestos en bulto, luego de eso, se mantuvieron a 120 °C durante 24 h, en un horno con circulación de aire para su polimerización.

3.4.5 Síntesis de RPI híbrida (RPIH)

Para la síntesis de la RPIH, se utilizó la RPI-P como fase orgánica y el TMSPM para incorporar grupos inorgánicos. El TMSPM se hidrolizó, para lo cual, previamente fue desinhibido con NaOH y enseguida fue mezclado con EtOH y H₂O a temperatura ambiente por 30 min. a una relación molar de 1:2:4 para TMSPM:EtOH:H₂O, respectivamente. Posteriormente se añadió HCl a 0.01 M como catalizador y se agitó hasta observar una apariencia homogénea y transparente. Luego, el TMSPM hidrolizado se añadió al RPI-P y la mezcla se agitó durante 30 min. para obtener la RPIH pre-polimerizada. Para su polimerización fueron empleadas las mismas condiciones descritas para RPI.

3.4.6 Preparación de especímenes de concreto hidráulico para evaluar su durabilidad

3.4.6.1 Elaboración de especímenes de concreto hidráulico

Los especímenes de concreto hidráulico se elaboraron mediante el siguiente procedimiento:

- a) Se dosificó una mezcla de concreto de resistencia a compresión de 150 kg/cm², de acuerdo

con el método ACI 211.1-22, mostrado en la Tabla 3-1, para una relación agua/cemento de 0.8.

Tabla 3-1. Dosificación de mezcla de concreto con relación a/c 0.80.

<i>Material</i>	<i>Cantidades (Kg/m³)</i>
Cemento	256.25
Agua	205.00
Agregado grueso	1024.00
Agregado fino	608.40

La preparación de la mezcla se realizó de acuerdo con lo descrito en la norma ASTM C192/C192M-14 [126], posteriormente, la mezcla se vertió en moldes metálicos cilíndricos de dimensiones 10 cm de diámetro por 20 cm de altura, después de 24 horas, los cilindros de concreto recién fraguados fueron desmoldados y se curaron en una pileta con agua durante 28 días. Los cilindros de concreto endurecidos, posteriormente a su curado, se cortaron en pastillas, con un espesor de 5 cm para su uso en las caracterizaciones posteriores.

En la Tabla 3-2 se muestra el número de especímenes de concreto hidráulico requeridos para evaluar su durabilidad (carbonatación, penetración de ion cloruro y absorción de agua).

Tabla 3-2. Total de especímenes de concreto hidráulico requeridos para evaluar su durabilidad (carbonatación, penetración de ion cloruro y absorción de agua).

<i>Caracterización</i>	<i>Cilindros de concreto utilizados</i>	<i>Cálculo de especímenes</i>	<i>Total de especímenes por caracterización</i>
Carbonatación	10	3 edades (7, 14 y 28 días). 10 tipos (Ver Tabla 3-3)	30
Penetración de ion cloruro	10	10 tipos por triplicado (Ver Tabla 3-3)	30
Absorción de agua	10	10 tipos por triplicado (Ver Tabla 3-3)	30

3.4.6.2 Preparación de la superficie de concreto hidráulico para la aplicación de recubrimientos con brocha de PPT, RPI y RPIH

La superficie de concreto hidráulico por recubrir se preparó previamente, para asegurar una correcta adherencia con el recubrimiento, cumpliendo lo establecido en la norma SSPC-SP-13/NACE N°6 [127], que expresa lo siguiente: “Una superficie de concreto debe estar libre

de contaminantes, lechada, concreto débilmente adherido y de polvo, proporcionando un sustrato uniforme adecuado para la aplicación de recubrimiento de protección”. El procedimiento para la preparación de la superficie consistió en los siguientes pasos: 1) La superficie se lavó con jabón líquido y cepillo para eliminar cualquier residuo de grasa, exceso de polvo o impureza no deseada, 2) los sustratos de concreto se saturaron en agua por 24 horas para eliminar algún residuo de polvo presente y 3) los sustratos se secaron a 60 °C por 48 h en horno con circulación de aire.

3.4.6.3 Aplicación de recubrimiento sobre especímenes de concreto hidráulico con brocha

En la Figura 3-2 se muestra el procedimiento para la aplicación de recubrimiento con brocha. En 1), se muestra la superficie a recubrir. En 2), la superficie se divide en franjas de 2 cm y se recubre alternadamente con cinta de papel adhesivo, con la finalidad de evitar traslapes al momento de aplicar el recubrimiento. En 3), se aplica una capa de recubrimiento con la brocha, en ángulo de 45° respecto a la superficie del sustrato, en dirección de izquierda a derecha (previamente, la brocha se sumergió a la solución en 1/3 de la longitud de sus cerdas por 5 segundos, enseguida se escurrió en tiempo igual sujetándola contra la boca del contenedor, para eliminar excesos). En 4), se observa la superficie recubierta parcialmente. En 5), se retira la cinta de papel adhesivo y el recubrimiento se somete a polimerización, por calor en horno, de acuerdo con las condiciones descritas en las secciones 3.4.3, 3.4.4 y 3.4.5. En 6), las zonas recubiertas se cubren con cinta de papel adhesivo para evitar que exista traslape en la aplicación del recubrimiento. En 7), la superficie faltante se encuentra recubierta. En 8) se procede a retirar la cinta de papel adhesivo y el recubrimiento se somete a calor para su polimerización, bajo las mismas condiciones que en el paso 5. El procedimiento se repite para la aplicación de capas subsecuentes de recubrimiento.

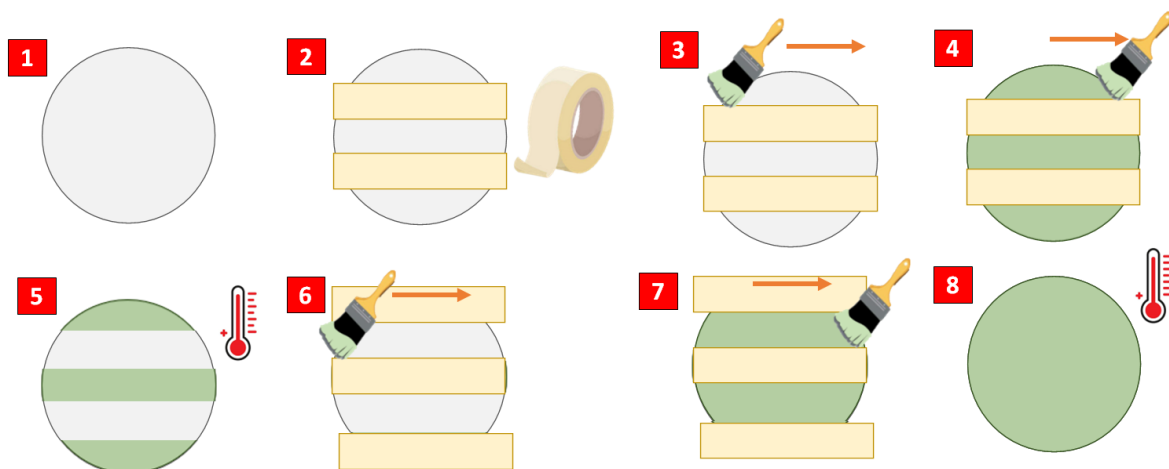


Figura 3-2. Procedimiento de aplicación de recubrimiento con brocha.

En la Tabla 3-3 se presenta la nomenclatura de los especímenes de concreto hidráulico recubiertos con PPT, RPI y RPIH a 1, 2 y 3 capas cada uno.

Tabla 3-3. Nomenclatura de especímenes de concreto recubiertos con PPT, RPI y RPIH.

Recubrimiento	No. de capas	Nomenclatura
N/A	0	REF
PPT	1	R-P1
	2	R-P2
	3	R-P3
RPI	1	R-R1
	2	R-R2
	3	R-R3
RPIH	1	R-H1
	2	R-H2
	3	R-H3

3.4.7 Aplicación de recubrimientos sobre de vidrio y su envejecimiento

3.4.7.1 Preparación de la superficie de sustratos de vidrio

Sustratos de vidrio marca Corning, con dimensiones de 7 cm de largo, 5 cm de ancho y 0.8-1.1 mm de espesor, se utilizaron como especímenes para aplicación de recubrimientos y medirles espesor (SEM), humectabilidad (ángulo de contacto), propiedades mecánicas (nanoindentación) y envejecimiento (ASTM C 154-16).

Los vidrios Corning fueron lavados con agua y jabón, posteriormente se introdujeron en agua desionizada y etanol, se secaron con un pañuelo marca Kimwipe y en horno a 60 °C por tres horas, después se enfriaron a temperatura ambiente y fueron almacenados en bolsas de plástico para su posterior uso.

3.4.7.2 Aplicación de recubrimiento por inmersión sobre sustratos de vidrio

El monómero BHPT, la RPI-P y RPIH-P, se usaron en estado líquido para aplicar los recubrimientos de PPT, RPI y RPIH sobre sustrato de vidrio por el método por inmersión. Las condiciones utilizadas fueron las siguientes; velocidad de inmersión y extracción de 30 cm/min y tiempo de inmersión de 5 s. Los recubrimientos húmedos de BHPT, RPI-P y RPIH-P se polimerizaron en un horno con circulación de aire a 150 °C durante 15 h, 120 °C durante 24 h y 120 °C durante 24 h, respectivamente, para obtener recubrimientos de PPT (R-P), RPI (R-R) y RPIH (R-H), respectivamente.

3.4.7.3 Envejecimiento de R-P por intemperismo acelerado (ASTM G154-16)

El R-P se envejeció en condiciones de intemperismo acelerado por medio de la exposición de luz ultravioleta, temperatura y humedad de acuerdo con la norma ASTM G154-16 [124]. Se utilizó una lámpara UVA-340 con una longitud de onda aproximada de 340 nm y una irradiancia de 0.89 W/m²/nm, con el objetivo de simular la energía ultravioleta de la luz solar a la que está expuesta. La distancia de separación entre las lámparas UV y las muestras fue de 5.2 cm. Las muestras fueron expuestas a 2, 4 y 6 ciclos de envejecimiento; cada ciclo incluyó 8 horas de radiación UV a 50 °C y 4 horas de condensación a 40 °C y 100% de humedad relativa. En la Tabla 3-4 se muestra la nomenclatura utilizada.

Tabla 3-4. Nomenclatura para R-P envejecidos por intemperismo acelerado (ASTM G154-16), R-PE.

Ciclos de exposición	Tiempo de envejecimiento	Nomenclatura
0	8 h de radiación UV + 4 h de condensación = 12 h	R-PE0
2		R-PE24
4		R-PE48
6		R-PE72

3.5 Técnicas de caracterización

3.5.1 Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR)

Las muestras de PET, BHPT, PPT, RPI y RPIH se analizaron mediante la técnica FT-IR para identificar sus enlaces característicos por medio de un espectrómetro Nicolet iS50 con reflectancia total atenuada. Para su análisis, el PPT, RPI y RPIH fueron condensados en horno de secado (el primero a 150 °C durante 15 h y los últimos dos a 120 °C por 24 h) y se redujeron a polvo con mortero de ágata y el BHPT fue analizado en estado líquido. Las mediciones se llevaron a cabo dentro del rango de longitud de onda de 4000 a 400 cm⁻¹.

3.5.2 Análisis termogravimétrico (TGA)

El PET, BHPT, PPT, RPI y RPIH se caracterizaron por TGA para determinar su estabilidad térmica, con un equipo simultáneo TA Instrument SDT-Q600 en atmósfera de oxígeno a velocidad de calentamiento de 10 °C/min y un rango de temperatura de 0–800 °C. Las muestras fueron polvos de 8 a 15 mg y su estabilidad térmica fue evaluada después de ser polimerizadas, excepto el BHPT, que fue medido en fase líquida, debido a que es un monómero.

3.5.3 Propiedades mecánicas de los recubrimientos (nanoindentación)

Los recubrimientos de PPT, RPI y RPIH fueron evaluadas por nanoindentación, para obtener sus propiedades mecánicas de dureza (*H*) y módulo de elasticidad (*E*), mediante un nanoindentador marca Aligent Technologies modelo G200 con punta tipo Berkovich. Las mediciones fueron llevadas a cabo en un arreglo matricial de 3x3 y la profundidad de penetración fue limitada a menos del 10% del espesor de los recubrimientos para evitar la influencia del sustrato en la medición. Los sustratos de vidrio recubiertos fueron cortados

con lápiz de punta de diamante para obtener fragmentos de 1 x 1 cm y se colocaron en un portamuestras de aluminio con cinta adhesiva doble cara. Las condiciones para la medición de las propiedades mecánicas fueron las siguientes: 0.4 mN de carga máxima, 10 s de tiempo de carga y se consideraron coeficientes de Poisson de 0.37, 0.38 y 0.40 de para PPT, RPI y RPIH, respectivamente. Los valores de las propiedades mecánicas fueron obtenidos mediante:

$$H = \frac{P_{max}}{A} \text{ y } \frac{1}{E_r} = \frac{1-\nu^2}{E} + \frac{1-\nu_i^2}{E_i} \text{ (sección 2.2).}$$

3.5.4 Propiedades físicas de los recubrimientos

3.5.4.1 Espesor por microscopía electrónica de barrido (SEM)

El espesor de los recubrimientos de PPT, RPI y RPIH se midió con un microscopio electrónico de barrido marca JEOL Mod. JSM5800LV SEM (CIMAV, Chihuahua, México). Las muestras se cortaron con lápiz con punta de diamante, en fragmentos de 1 cm², que fueron recubiertos con oro y se colocaron verticalmente sobre una plataforma de análisis. Se utilizaron electrones secundarios y el tipo de detector fue COMPO, con voltaje de funcionamiento de 15.0 kV, aumento de 5.000x y distancia de trabajo de 7.8 nm.

3.5.4.2 Humectabilidad (ángulo de contacto)

La humectabilidad (hidrofobicidad o hidrofiliidad) de los recubrimientos de PPT, RPI y RPIH, fue medida de acuerdo con la norma ASTM D5946-17 mediante un analizador de ángulo de contacto FTA 200 (First Ten Amstrongs, Portsmouth, VA, EE. UU.). Las muestras se cortaron en fragmentos de 3 x 9 cm y se colocaron horizontalmente sobre una plataforma de análisis, después de eso, se colocó una gota de agua destilada (10 µL) sobre la superficie del recubrimiento. Las mediciones se realizaron seis veces para obtener su media y desviación estándar.

3.5.4.3 Adherencia (ASTM D3359-17)

En la Figura 3-3 se presenta el procedimiento para evaluar la adherencia de los recubrimientos de acuerdo con el método de prueba transversal B establecido en la norma ASTM D3359-17 [59], mediante un paquete probador de adherencia marca PosiTest CH, que contiene un cortador, una cinta adhesiva, una lupa y un cepillo o brocha. En a), una cuadrícula

de once cortes perpendiculares entre sí y separación de 1 mm se realizó sobre el recubrimiento, cada corte debe de desprender el recubrimiento del sustrato, en b) se retiraron los residuos con una brocha, en c) una tira de cinta adherible fue aplicada firmemente con presión sobre la cuadrícula, después de 90 ± 30 s, en d) se retiró la cinta rápidamente y en e) se procedió a observar la apariencia de la cuadrícula.

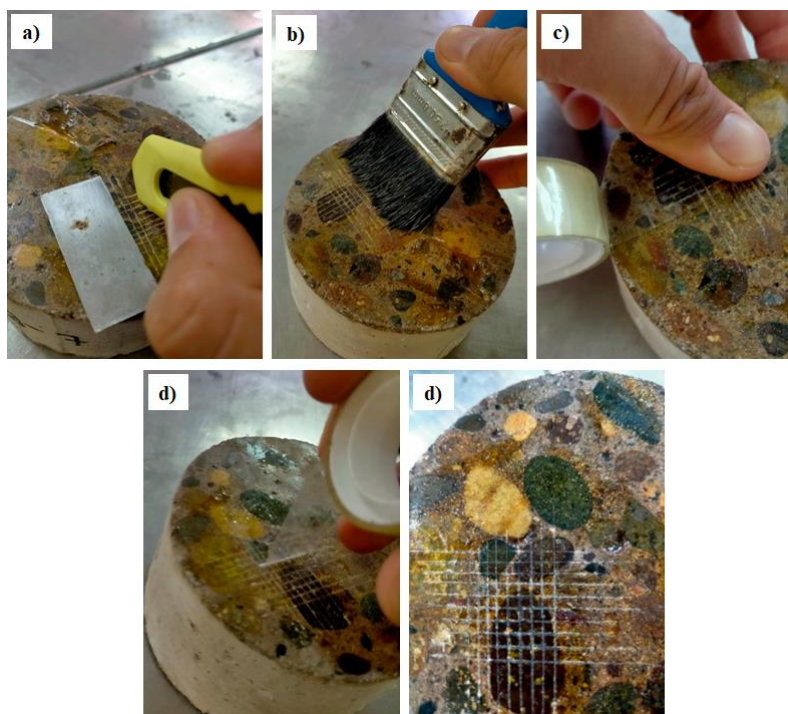


Figura 3-3. Procedimiento para evaluar la adherencia de los recubrimientos de acuerdo con el método de prueba transversal B establecido en la norma ASTM D3359-17.

Esta norma establece los procedimientos para evaluar la adhesión de recubrimientos a sustratos metálicos mediante la aplicación y remoción de cinta sensible a la presión sobre cortes realizados en el recubrimiento. El nivel de adhesión se clasifica según el porcentaje del área de eliminación en el recubrimiento después de la prueba de la siguiente manera: 0B (>65%), 1B (35–65%), 2B (15–35%), 3B (5–15 %), 4B (<5%) y 5B (0%, sin eliminación de recubrimiento) (Ver Figura 3-4). Por lo tanto, un recubrimiento clasificado como 0B representa muy mala adherencia, mientras que uno clasificado como 5B representa muy buena adherencia.

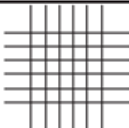
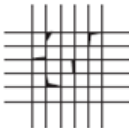
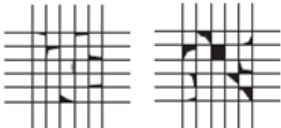
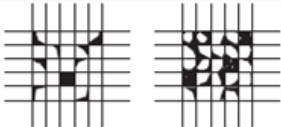
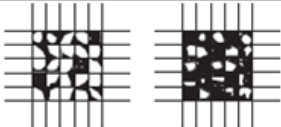
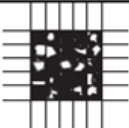
Clasificación por porcentaje de área removida	Apariencia de la superficie del área de corte transversal desde la cual se produjo desprendimiento
5B – 0% Nada	
4B – Menos del 5%	
3B – 5 a 15%	
2B – 15 a 35%	
1B – 35 a 65%	
0B – Menos del 65%	

Figura 3-4. Clasificación de recubrimientos por adherencia, de acuerdo con el porcentaje de área removida durante la prueba descrita por la norma ASTM D3359-17.

3.5.5 Durabilidad del concreto hidráulico con recubrimiento de PPT, RPI y RPIH

3.5.5.1 Prueba rápida de penetración del ión cloruro (ASTM C1202-19)

En la Figura 3-5 se muestra la preparación de los especímenes para la prueba rápida de penetración de ion cloruro de acuerdo con lo establecido en la norma ASTM C1202-19 [18]. En a) se muestran los especímenes de concreto hidráulico, que consisten en pastillas de 10 cm de diámetro y 5 cm de altura, cuyas caras cilíndricas fueron selladas con silicón líquido. En b), las muestras fueron sometidas a vacío (50 mm Hg) en un desecador durante 3 horas. Posteriormente, c) se saturaron con agua hervida y permanecieron en la misma condición durante una hora más. Después, d) los especímenes continuaron en saturación por 18 ± 2 horas.

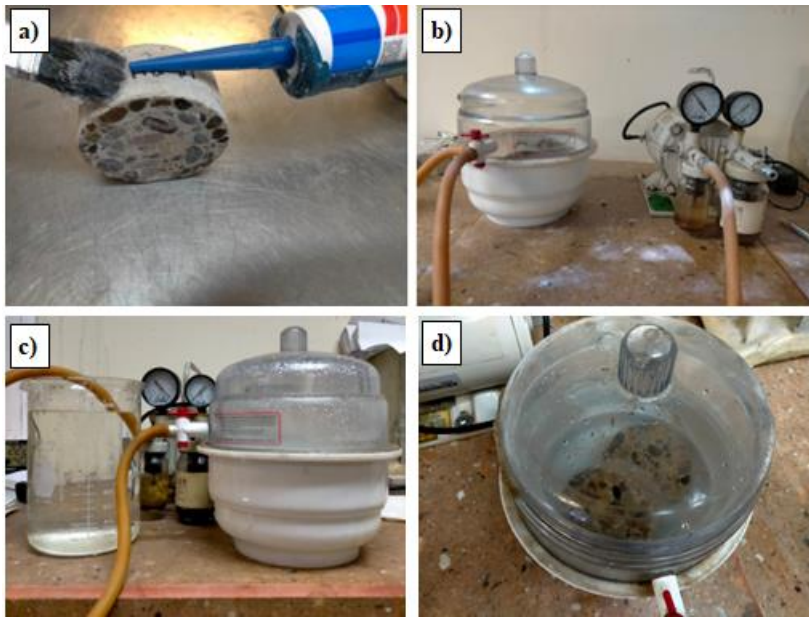


Figura 3-5. Preparación de las muestras para la prueba rápida de penetración de ion cloruro.

La norma ASTM C1202-22 establece la fórmula para el cálculo de la Q , basada en la regla trapezoidal, es la siguiente [116]:

$$Q = 900(I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{300} + I_{360})$$

Donde:

Q = carga pasada (Coulombs).

I_0 = Corriente inmediatamente después de la aplicación del voltaje (amperes); el subíndice 0 indica el tiempo en minutos.

I_t = Corriente a t minutos después de la aplicación del voltaje (amperes).

En la Figura 3-6 se presenta la medición de la carga pasada de los especímenes. Esta se llevó a cabo por medio de una celda electroquímica en la que se depositó una solución de NaCl al 3% como anolito y otra de NaOH al 0.3 N como catolito; la cara recubierta del espécimen de concreto hidráulico se expuso a la solución de NaCl. La celda se conectó a un medidor de cloruros, con el que se aplicó una corriente eléctrica continua de 60 V entre los electrodos, registrada en intervalos de 30 minutos durante seis horas.

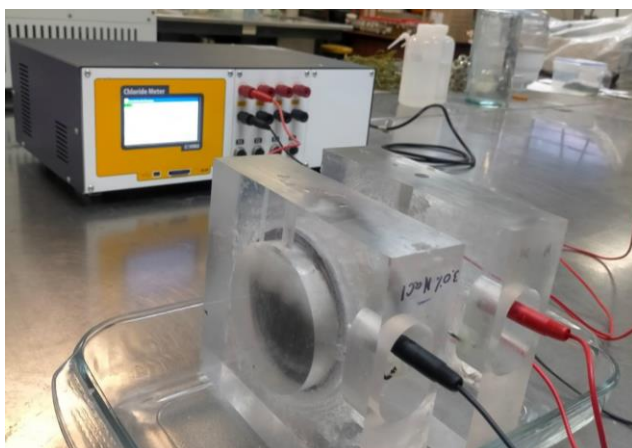


Figura 3-6. Medición de la carga pasada de las muestras.

En la Tabla 3-5 se presenta la clasificación de la permeabilidad del concreto hidráulico al ion cloruro de acuerdo con la carga pasada obtenida durante la prueba [116].

Tabla 3-5. Clasificación de la permeabilidad del concreto hidráulico al ion cloruro.

<u>Carga pasada (Coulombs)</u>	<u>Permeabilidad al ion cloruro</u>
> 4000	Alta
2000-4000	Moderado
1000-2000	Bajo
100-1000	Muy bajo

3.5.5.2 Velocidad de absorción de agua (ASTM C1585-20)

En la Figura 3-7 se presenta el acondicionamiento de especímenes para la prueba de velocidad de absorción de agua del concreto hidráulico, realizada de acuerdo con la norma ASTM C1585-20 [19]. Los especímenes de concreto hidráulico fueron secados en un horno a 50°C durante 24 horas, luego, en a) fueron colocados en un desecador con una solución saturada de bromuro de potasio en el fondo, el cual, en b) se mantuvo en horno de secado a 50°C durante 72 h. Transcurrido este tiempo, en c), los especímenes acondicionados se almacenaron en bolsas de plástico por 15 días.



Figura 3-7. Acondicionamiento de especímenes para la prueba de velocidad de absorción de agua del concreto hidráulico (ASTM C1585-20). a) Colocación de especímenes en desecador con KBr, b) Desecador con especímenes en horno de secado a 50°C durante 72 h y c) Especímenes acondicionados almacenados en bolsas de plástico por 15 días.

En la Figura 3-8 se presenta la prueba de velocidad de absorción de agua del concreto. En a) se muestra la cara del espécimen sin sellar, que se va a estudiar y estará en contacto con el agua, en b), se muestran las caras (plana y curva) del espécimen selladas con cinta aislante, que no estarán en contacto con el agua. En c) se observan los especímenes de concreto (previamente pesados en una balanza analítica) con la cara sin sellar hacia abajo sobre soportes plásticos dentro de una cámara de acrílico, con agua hasta el nivel que sature a los especímenes en una lámina de 2 ± 1 mm de espesor en su cara inferior. En d), se procedió a medir su peso en los siguientes intervalos de tiempo: 1 min., 5 min., 10 min., 20 min., 30 min., 1 h, 2 h, 3 h y 6 h.

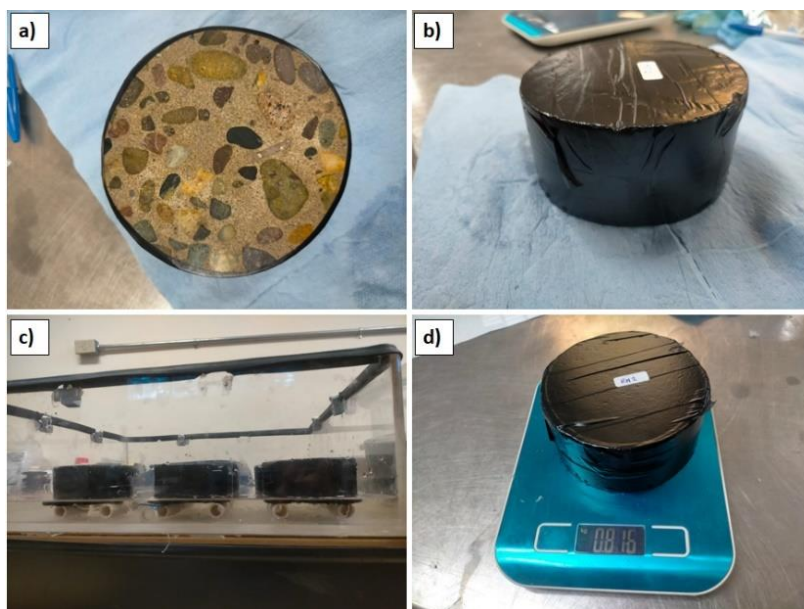


Figura 3-8. Prueba de velocidad de absorción de agua.

Para los efectos de esta prueba, se desprecia la dependencia de la densidad del agua con la temperatura y se utiliza un valor de 0.001 g/mm^3 . La absorción, I , se calcula con la siguiente ecuación [119]:

$$I = m_t/a*d$$

donde:

I = absorción, (mm)

m_t = cambio en la masa del espécimen en gramos, en el tiempo t ,

a = área expuesta de la muestra, en mm^2

d = densidad del agua en g/mm^3

3.5.5.3 Carbonatación (RILEM CPC-18)

La profundidad de carbonatación se realizó según la norma RILEM CPC-18 [122], después de 7, 14 y 28 días de exposición a CO_2 , en una cámara de carbonatación acelerada con las siguientes condiciones: temperatura de $25 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$, humedad relativa media de $60 \pm 5\%$ y concentración media de CO_2 del 5%. Los especímenes fueron rociados con una solución diluida de fenolftaleína (1% en alcohol etílico), que reacciona con las zonas no carbonatadas y cambia su color a morado. La profundidad de carbonatación de las muestras se obtuvo con el promedio de 9 mediciones realizadas con un vernier.

Las características de las muestras consisten en pastillas obtenidas por corte con grosor de 5 cm y el procedimiento de medición consiste en rociarlas con solución de fenolftaleína al 1% en alcohol etílico al 70%, la cual tiñe de rosa la zona no carbonatada del concreto, mientras que la zona carbonatada permanece incolora. La precisión de la medición debe ser de 0.5 mm, por lo que aquellas menores de 0.5 mm no se diferencian. En la Figura 3-9 se presentan los casos para la medición de la d_k en a), la d_k se presenta como una franja recta y paralela a la superficie lo que permite realizar la medición desde cualquier zona, en b), la d_k se presente como una franja curveada por lo cual su valor resulta de un promedio de mediciones realizadas en distintos puntos y en c), el d_k se presenta en algunas zonas como franja recta y en otras como franja profunda aislada, por lo cual se registra el valor de la d_k normal y d_k máxima, respectivamente [122].

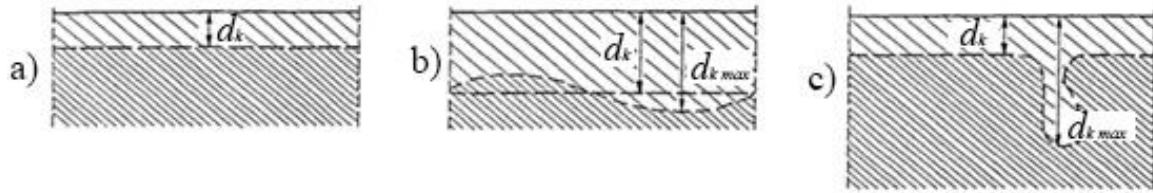


Figura 3-9. Casos para la medición de la d_k .

Los especímenes de laboratorio pueden presentar d_k en sus esquinas, caso que debe ser ignorado debido a la penetración simultánea del CO_2 por los lados y para el caso de la presencia de agregados máximos de gran tamaño, solamente se considera la carbonatación en la pasta de cemento endurecida [122].

3.5.6 Recubrimientos de PPT envejecidos por intemperismo acelerado (PPT-E)

3.5.6.1 FT-IR de los PPT-E

Los PPT-E se aplicaron sobre vidrio y fueron analizados mediante la técnica de FT-IR (de referencia y envejecidos) para estudiar la degradación de sus enlaces a diferente envejecimiento, por medio de un espectrómetro Nicolet iS50 con configuración de transmitancia de reflectancia total atenuada y accesorios. Los PPT-E se colocaron sobre una superficie de diamante y se realizaron mediciones espectroscópicas dentro del rango de longitud de onda de 4000 a 400 cm^{-1} .

3.5.6.2 Propiedades mecánicas de los PPT-E (nanoindentación y nanoscratching)

Las propiedades mecánicas de los PPT-E fueron evaluadas mediante nanoindentación y nanoscratching (con la que también se obtuvo su adhesión). Ambas pruebas se llevaron a cabo en un nanoindentador Agilent Technologies modelo G200 con punta de diamante de geometría Berkovich.

La técnica de nanoindentación se utilizó para obtener la dureza (H_i) y módulo elástico (E) de los PPT-E mediante el método de Oliver y Pharr, que relaciona la información obtenida durante la prueba y las características específicas del espécimen y la punta utilizada. Las condiciones de la prueba fueron: carga máxima de $300 \text{ }\mu\text{N}$, tiempo de carga de 10 s , número de veces de carga de 1 y coeficiente de Poisson de 0.37 . Las profundidades de penetración

se restringieron a ser menores o iguales al 10% del espesor del recubrimiento, para evitar la influencia del sustrato en la medición de las propiedades del recubrimiento [128].

La técnica de nanoscratching se utilizó para obtener la dureza (H_s) y la adhesión de los PPT-E. Las condiciones de la prueba fueron: longitud de la trayectoria de desgaste de 50 μm , velocidad de desgaste de 10 $\mu\text{m/s}$, orientación de la ranura de desgaste de 0° y carga de desgaste de 0.3, 0.4 y 0.5 mN.

3.5.6.3 Identificación de fallas producidas por nanorascado en recubrimientos

En la Figura 3-10 se presentan los tipos de falla producidos por el nanorascado en recubrimientos. En a) se presentan las fallas en recubrimientos blandos y se caracterizan por grietas más pequeñas limitadas a la zona de la ranura residual, de tipo dúctil, que son 1) espalación, 2) pandeo, 3) agrietamiento conforme y 4) agrietamiento por tensión, las cuales se presentan. En b) se presentan las fallas en recubrimientos duros y se caracterizan por que sus grietas regularmente se extienden más allá de los bordes de la ranura, de tipo frágil, que son 1) espalación bruta, 2) espalación compresiva, 3) recuperación de espalación, 4) agrietamiento tipo Hertz y 5) agrietamiento de tensión [101].

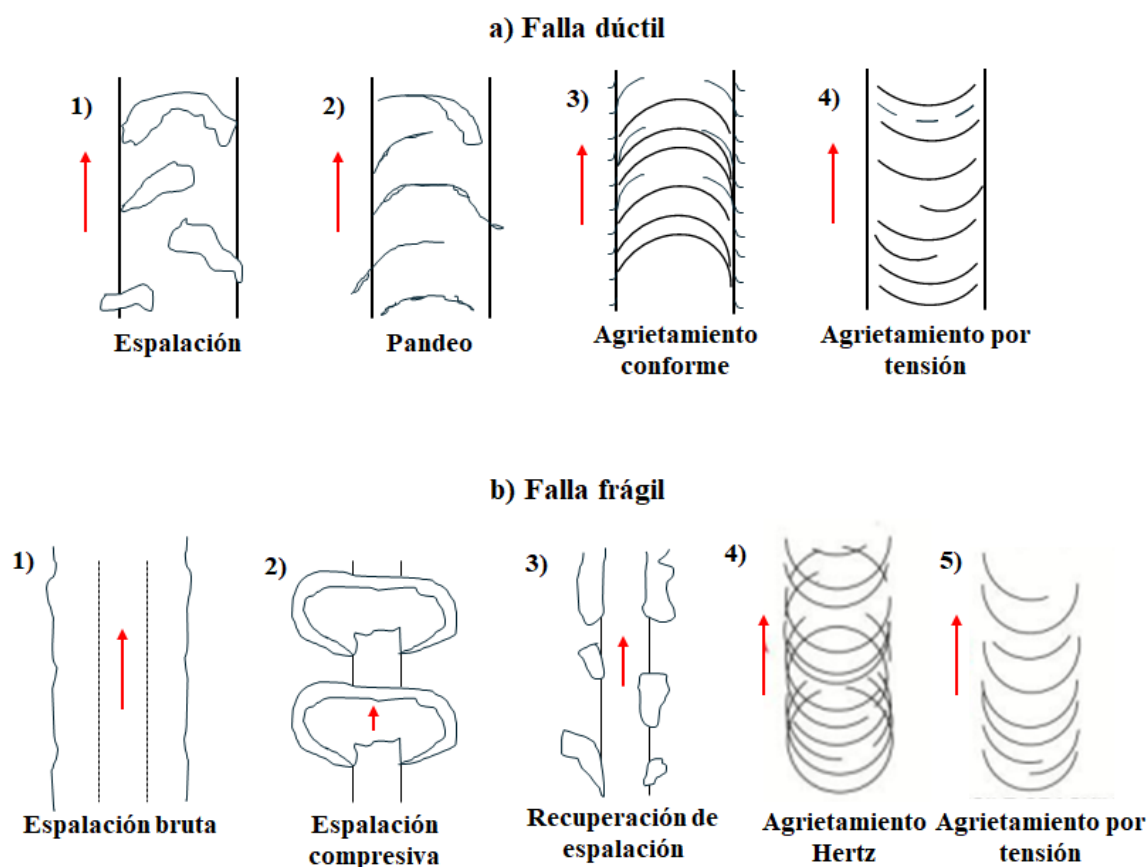


Figura 3-10. Tipos de falla dúctil y frágil de recubrimientos.

3.5.6.4 Rugosidad de los PPT-E (AFM)

La rugosidad de los PPT-E se obtuvo mediante un microscopio de fuerza atómica ASYLUM RESEARCH, modelo MFP3D-SA. Las superficies de escaneo fueron de 30 x 30 y 10 x 10 μm y fueron analizadas mediante el modo tapping AC con punta de silicio sin recubrimiento, con una frecuencia de vibración de 70 KHz, punto de ajuste de 1.32 V, distancia de trabajo de 1 mm y 512 puntos y líneas. Además, se obtuvo el perfil de las ranuras realizadas por nanoscratching para calcular la dureza al rayado.

3.5.6.5 Morfología de los PPT-E (SEM)

La morfología de los PPT-E fue obtenida mediante un microscopio electrónico de barrido (SEM), para observar los cambios morfológicos de la superficie del recubrimiento producidos por el tratamiento de envejecimiento al que fue sometido. Para esto se utilizó un SEM JEOL, modelo JSM5800LV (CIMAV, Chihuahua, México). El detector utilizado fue

tipo COMPO con voltaje de operación de 15.0 kV, aumento entre 1000-5000 $\times$, distancia de trabajo entre 6.0-8.0 nm y electrones secundarios.

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 FT-IR de PPT, RPI y RPIH

4.1.1 Esquema de síntesis de PPT

La Figura 4-1 muestra el esquema propuesto para la síntesis de tereftalato de polipropileno (PPT) a partir del reciclado químico de residuos de PET. El PPT se sintetiza en dos etapas: 1) El PET se despolimeriza mediante glicólisis con el empleo de PG como disolvente con un catalizador para formar una mezcla de monómeros de BHPT con exceso de PG y EG. Después, esta mezcla se somete a lavados para eliminar el exceso de PG y EG y obtener los monómeros BHPT [8]. 2) Los monómeros BHPT se politransesterifican en condiciones establecidas de temperatura para formar PPT [109], [129].

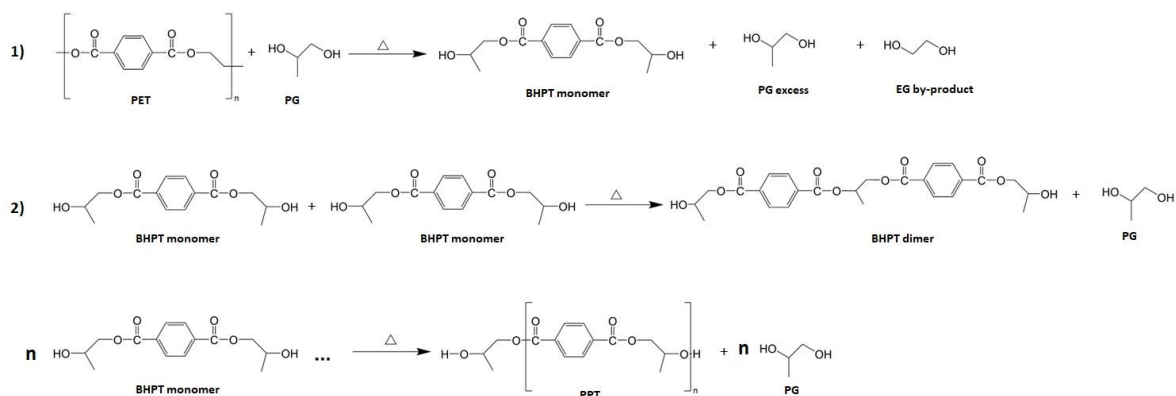


Figura 4-1. Esquema propuesto para la síntesis de tereftalato de polipropileno (PPT) a partir del reciclado químico de residuos de PET.

4.1.2 PPT

En la Figura 4-2 se presentan cuatro espectros de FT-IR: En a) PET, BHPT y PPT en el rango de 4000 a 400 cm^{-1} , en b), c) y d), la ampliación de los espectros de PET y PPT en las regiones de 3020–2860 cm^{-1} , 1500 a 1350 cm^{-1} y 1000-800 cm^{-1} , respectivamente. Los espectros fueron desplazados arbitrariamente en el mismo eje de transmitancia con una previa normalización a sus valores máximos de transmitancia. En a), en el espectro del PET, se identificó una banda a 1720 cm^{-1} atribuida al estiramiento del enlace C=O, presente en el

grupo éster de la molécula de PET. También se identificaron bandas a 2968 y 2908 cm^{-1} correspondientes al estiramiento asimétrico y simétrico del enlace C-H del grupo metileno. Además, se identificó una banda a 1605 cm^{-1} atribuido al estiramiento del enlace C=C aromático, presente en el grupo tereftalato de la molécula [130]. En el espectro del BHPT, se observaron las mismas bandas características del PET, que confirmó la permanencia de su estructura básica, además, se identificó una nueva banda ancha a 3300 cm^{-1} , correspondiente al estiramiento del grupo hidroxilo (OH) [131] y una banda en 2981 cm^{-1} , atribuida a la presencia de grupos CH_3 . Estas dos últimas bandas confirman la transesterificación entre el PET y el PG, producida durante la glicólisis del PET para obtener monómeros de BHPT [132]. En el espectro del PPT, se observaron las mismas bandas características del PET, que confirmó la permanencia de su estructura básica y se identificó, además, bandas correspondientes al grupo metilo (CH_3), generado durante la politransesterificación del BHPT, que no se aprecian en el espectro, debido a la escala utilizada, para lo cual se presentarán en ampliaciones del mismo espectro en varias regiones, que se muestran en b), c) y d).

En (b), se presenta la ampliación de los espectros de PET y PPT en la región de $3020\text{--}2860\text{ cm}^{-1}$. En el espectro del PET, se observan bandas a 2968 cm^{-1} y 2908 cm^{-1} (líneas punteadas negras) y en el espectro del PPT, esas bandas se desplazaron hacia números de onda más bajos, 2952 y 2883 cm^{-1} (líneas punteadas rojas), además, se observó una banda a 2981 cm^{-1} en (línea punteada roja), que estaba ausente en el espectro de PET, que se atribuyó a la presencia de grupos metilo en la molécula del PPT. En c), se muestra la ampliación de los espectros de PET y PPT en la región de 1500 a 1350 cm^{-1} . En el espectro del PPT aparecen dos nuevas bandas, ausentes en el espectro PET, a 1452 y 1379 cm^{-1} (indicadas con líneas punteadas rojas), atribuidas a vibraciones de flexión de los grupos CH_3 . En (d), se presenta la ampliación de los espectros de PET y PPT en la región de $1000\text{--}800\text{ cm}^{-1}$. En el espectro del PPT se observan las bandas nuevas respecto al PET, a 987 , 937 , 920 y 811 cm^{-1} (líneas punteadas rojas), que son características del polipropileno [133], [134].

De lo anterior se puede concluir que las diferencias mostradas entre los espectros de PET y PPT se deben a que el PET se sintetizó a partir de etilenglicol, mientras que el PPT se sintetizó a partir de propilenglicol.

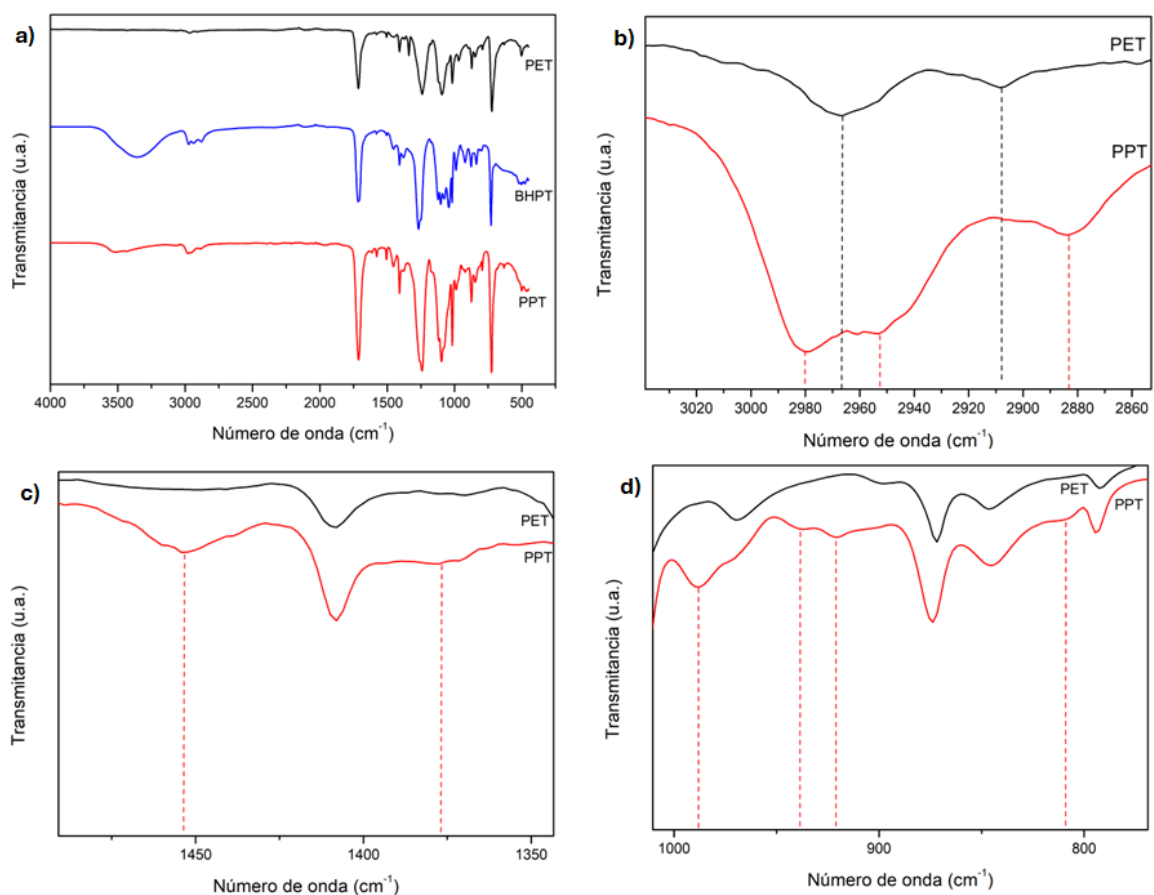


Figura 4-2. PET, BHPT y PPT en el rango de 4000 a 400 cm^{-1} , en b), ampliación de los espectros de PET y PPT en la región de 3020–2860 cm^{-1} , en c), ampliación de los espectros de PET y PPT en la región de 1500 a 1350 cm^{-1} , y en d), ampliación de los espectros de PET y PPT en la región de 1000-800 cm^{-1} .

4.1.3 Esquema de síntesis de RPI a partir de la despolimerización del PET

La Figura 4-3 muestra el esquema de reacción para la síntesis de RPI a partir de la despolimerización del PET. En a), el PET reacciona con PG, a temperatura de 20-180 °C y AZn, para provocar su despolimerización por glicólisis, a través de transesterificación, para obtener como producto BHPT. En b) el BHPT reacciona con AM, a temperatura de 20-180 °C, por policondensación, para formar PI. En c), el PI reacciona con St, que, en presencia de un PBO y 120 °C, ataca sus insaturaciones y se reticula con una cadena de PI u otro St, para finalmente formar una red tridimensional, que es la RPI.

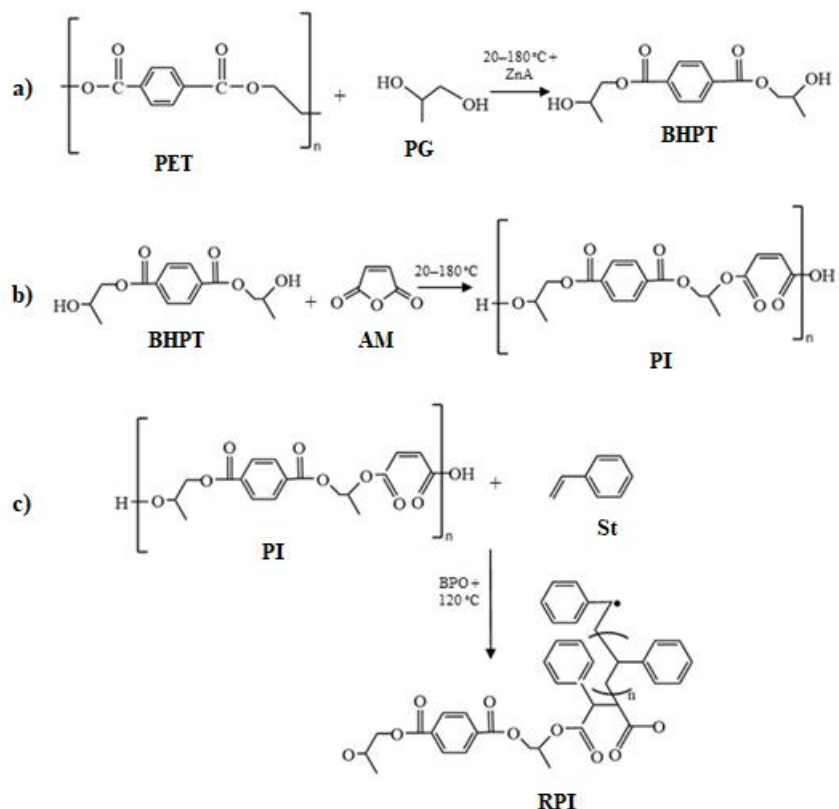


Figura 4-3. Esquema de reacción para la síntesis de RPI a partir de la despolimerización del PET.

4.1.4 RPI

En la Figura 4-4 se presentan los espectros de FT-IR del BHPT, PI, St y RPI, los cuales fueron desplazados arbitrariamente a lo largo del eje de transmitancia y se muestran ampliaciones de estos en rangos que oscilan de $1600\text{--}1660\text{ cm}^{-1}$. En el espectro del BHPT, cuyas bandas características se identificaron en 0, destacan la banda en 3300 cm^{-1} referido a los grupos OH, que participan en reacciones de policondensación y la ampliación de $1700\text{--}1620\text{ cm}^{-1}$, zona sin picos o bandas, que demuestra la ausencia de insaturaciones [135]. En el PI, aparecen las mismas bandas que en el BHPT, con diferencias en la banda a 3300 cm^{-1} , que presenta menor intensidad, atribuido a grupos OH remanentes (que aún no participan en la reacción de polimerización) y en la ampliación de $1700\text{--}1620\text{ cm}^{-1}$, donde se observa una banda a 1643 cm^{-1} , correspondiente al enlace $\text{C}=\text{C}$, de sus insaturaciones (por la policondensación entre el BHPT y el AM) [132], [136], [137], [138], [139], [140], [63]. En el espectro del St se identificaron bandas a 2920 y 2851 cm^{-1} correspondientes a enlaces C-H alifáticos, en 1494 y 1457 cm^{-1} , se atribuyeron a enlaces $\text{C}=\text{C}$ aromáticos y en 759 y 697

cm^{-1} , fueron asociados a enlaces C-H aromáticos y en la ampliación de $1640\text{-}1580\text{ cm}^{-1}$ se observa una banda en 1601 cm^{-1} , atribuida al estiramiento del C=C, que representa sus sitios de insaturación [141]. En el RPI, aparecen las mismas bandas que en el PI y algunas bandas destacadas del St a 763 (759 cm^{-1} con corrimiento) y 697 cm^{-1} , con diferencias en la banda a 3300 cm^{-1} , que presenta menor intensidad, atribuido a grupos OH remanentes y en la ampliación de $1700\text{-}1620\text{ cm}^{-1}$, donde no se observan bandas, asociado a la ausencia de insaturaciones (pertenecientes al PI que se entrecruzaron con el St) y una reducción de la banda en 1601 cm^{-1} , que se atribuye a insaturaciones remanentes del St [141]. Lo anterior confirma la formación de RPI.

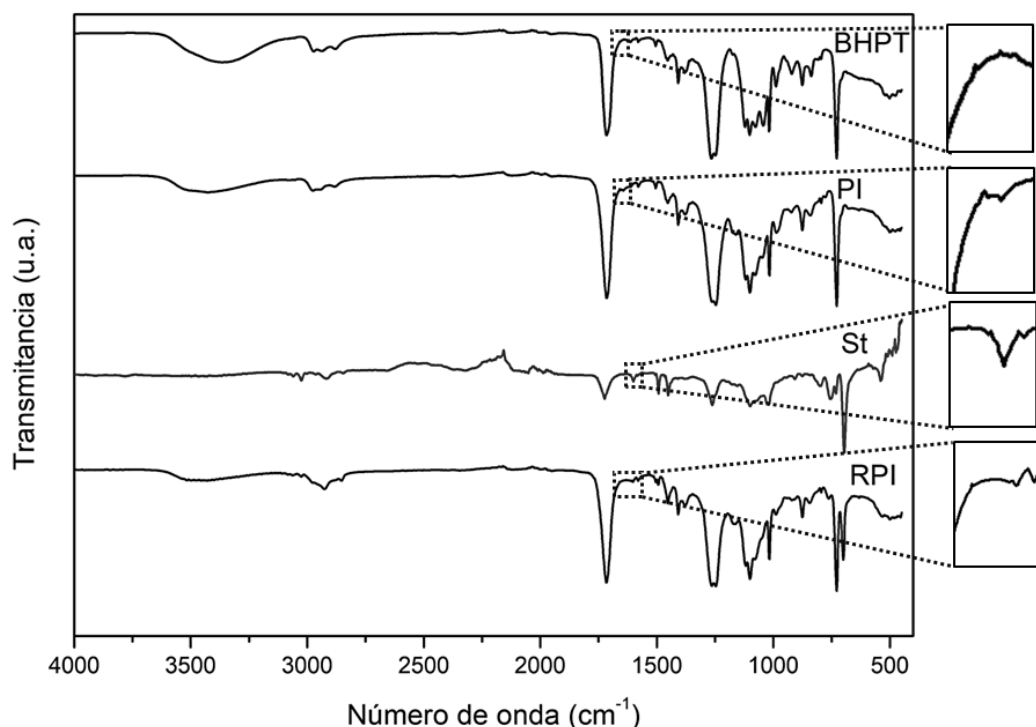


Figura 4-4. Espectros de FT-IR del BHPT, PI, St y RPI y sus ampliaciones en rangos de $1600\text{-}1660\text{ cm}^{-1}$.

4.1.5 Esquema de síntesis de la RPIH

La Figura 4-5 presenta el esquema de reacción para la solución híbrida $\text{SiO}_2\text{-RPI}$ por el proceso sol-gel. En a), el TMSPM es mezclado con agua para hidrolizar sus grupos inorgánicos funcionales Si-CH_3 y formar grupos silanoles Si-OH . En b) se muestra la RPI

pre-polimerizada con radicales libres los cuales atacan al grupo orgánico funcional, C=C, del TMSPM hidrolizado para formar un enlace covalente simple, C-C, y formar la RPIH pre-polimerizada. En c), los grupos silanoles de la RPIH pre-polimerizada reacciona por condensación con otros de la misma naturaleza para producir enlaces Si-O-Si y producir el material híbrido SiO₂-RPI conocido como RPIH.

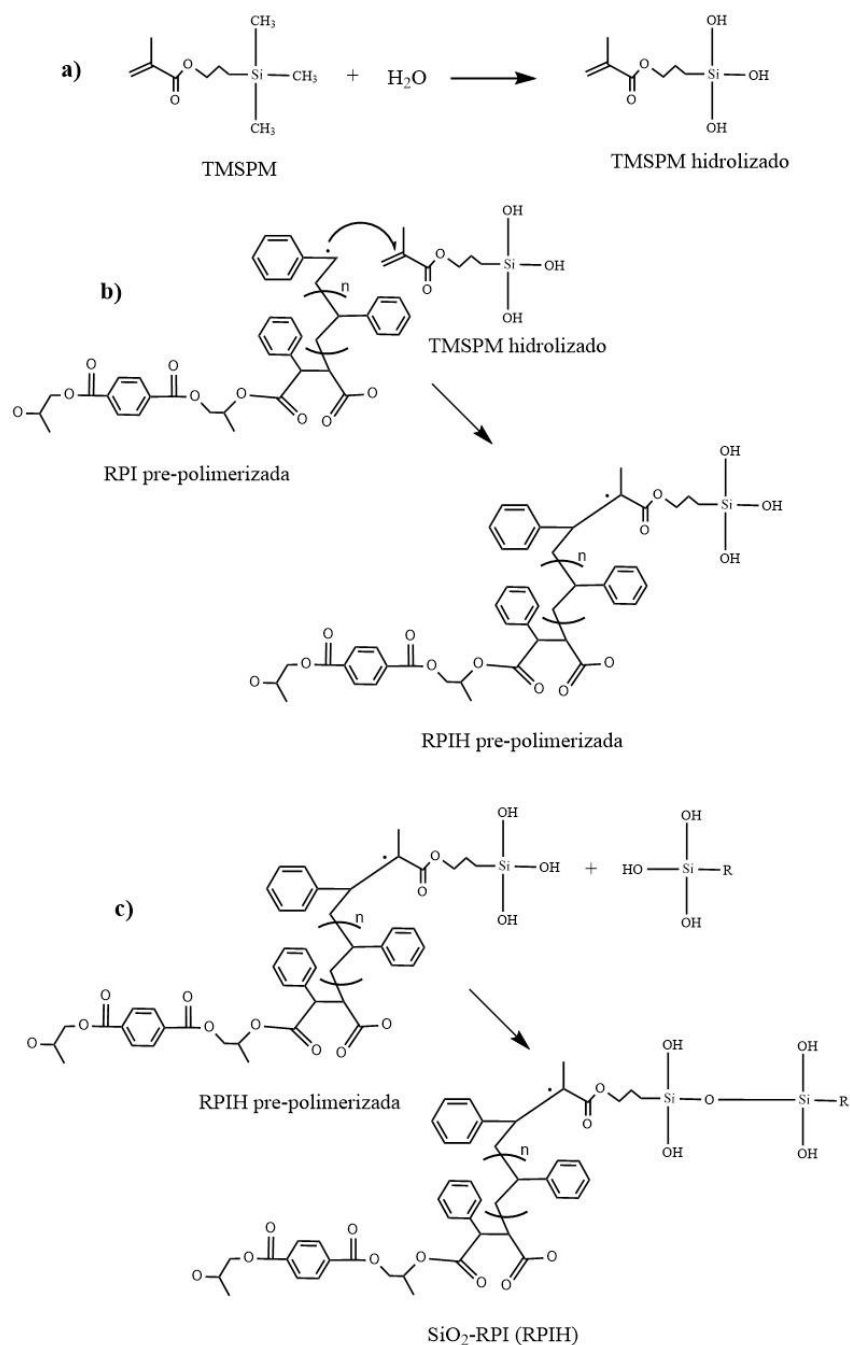


Figura 4-5. Esquema de reacción para la solución híbrida SiO₂-RPI por el proceso sol-gel.

4.1.6 RPIH

En la Figura 4-6 se presentan los espectros FT-IR del PI, St, TMSPM y RPIH los cuales se desplazaron arbitrariamente a lo largo del eje de transmitancia y se muestran ampliaciones de estos en rangos que oscilan de 1660-1600 cm^{-1} . En el espectro del PI, cuyas bandas características se identificaron en 4.1.3, en la ampliación destaca la banda en 1643 cm^{-1} correspondiente al enlace C=C, de sus insaturaciones [136], [137], [138], [140]. En el St, cuyas bandas características se identificaron en 4.1.3, en la ampliación de 1640 a 1580 cm^{-1} se identifica la banda en 1601 cm^{-1} , correspondiente al enlace C=C alifático [141]. En el TMSPM se identificaron las bandas siguientes: en 3500 cm^{-1} , atribuida enlaces Si-OH producto de su hidrolización; en 2938 y 2871 cm^{-1} , asociadas a enlaces C-H; en 1717 cm^{-1} , correspondiente al enlace C=O; en 1108 cm^{-1} , atribuida a enlaces Si-O-C y en 1000 cm^{-1} , debido a enlaces Si-O-Si, producidos por la condensación de los grupos silanoles (Si-OH) formados [142], [143], [144], [145], [146]; en la ampliación de 1660-1600 cm^{-1} , se identificó una banda a 1640 cm^{-1} asociada al enlace C=C. En el espectro de la RPIH se observan las mismas bandas que en el PI y algunas bandas características del St a 763 y 697 cm^{-1} y del TMSPM a 1108 y 1099 cm^{-1} , además, se observa la desaparición de la banda a 3300 cm^{-1} , lo que indica la condensación de los grupos OH participantes y en la ampliación de 1700-1620 cm^{-1} no se observan bandas, asociado a la ausencia de insaturaciones (debido al entrecruzamiento entre PI-St con el grupo organofuncional C=CH₂ del TMSPM). Lo anterior confirma la formación exitosa de la RPIH.

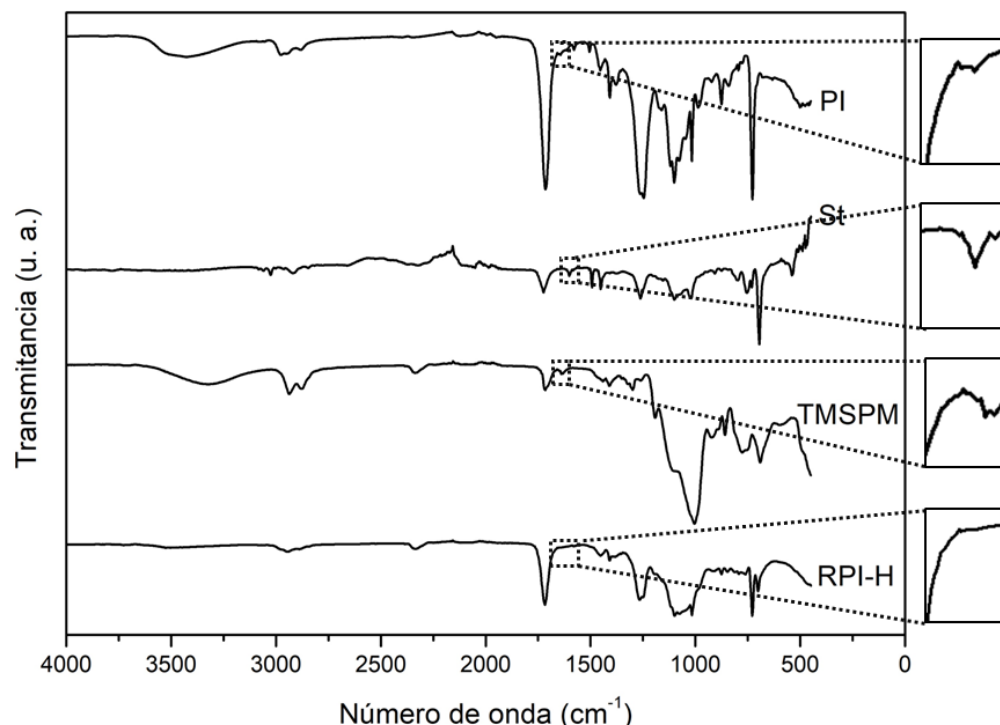


Figura 4-6. Espectros de FT-IR del PI, St, TMSPM y RPIH y sus ampliaciones en rangos de 1600-1660 cm^{-1} .

4.2 Análisis termogravimétrico (TGA) de PPT, RPI y RPIH

En la Figura 4-7 se presenta el TGA de PPT, RPI y RPIH, en el eje de las ordenadas la pérdida de peso en % y en el eje de las abscisas la temperatura en $^{\circ}\text{C}$. Para PPT, se observaron tres pérdidas de masa; la primera fue del 2.5% (30–210 $^{\circ}\text{C}$), relacionada con grupos -OH residuales que no participaron durante la politransesterificación del BHPT; la segunda, del 10.5% (210–312 $^{\circ}\text{C}$), atribuida a la descomposición del grupo CH y la tercera, del 80% (312–445 $^{\circ}\text{C}$), correspondiente a la escisión aleatoria del enlace éster por el incremento de temperatura [147], [148], [149], [150], [151], [152]. Para la RPI, se observaron tres pérdidas de masa, la primera fue del 5% (30-205 $^{\circ}\text{C}$), asociada a la deshidratación del agua [153]; la segunda, del 78% (205-455 $^{\circ}\text{C}$), atribuida a la despolimerización de la muestra y la tercera, del 17% (455-553 $^{\circ}\text{C}$), relacionada con la degradación total de la muestra [48], [154], [155]. Para RPIH, se observaron cuatro pérdidas de masa, la primera, del 3.5% (30-192 $^{\circ}\text{C}$), atribuida a la evaporación de agua y etanol; la segunda, del 76.5% (192-474 $^{\circ}\text{C}$), asociada a la despolimerización de la RPI [48], [154], [155]; la tercera, del 7.5% (474-539 $^{\circ}\text{C}$), asociada

a la degradación de los grupos silanol de la red de SiO_2 [156] y la cuarta, del 7.0% (539-616 °C), atribuida a la eliminación de presencia orgánica residual.

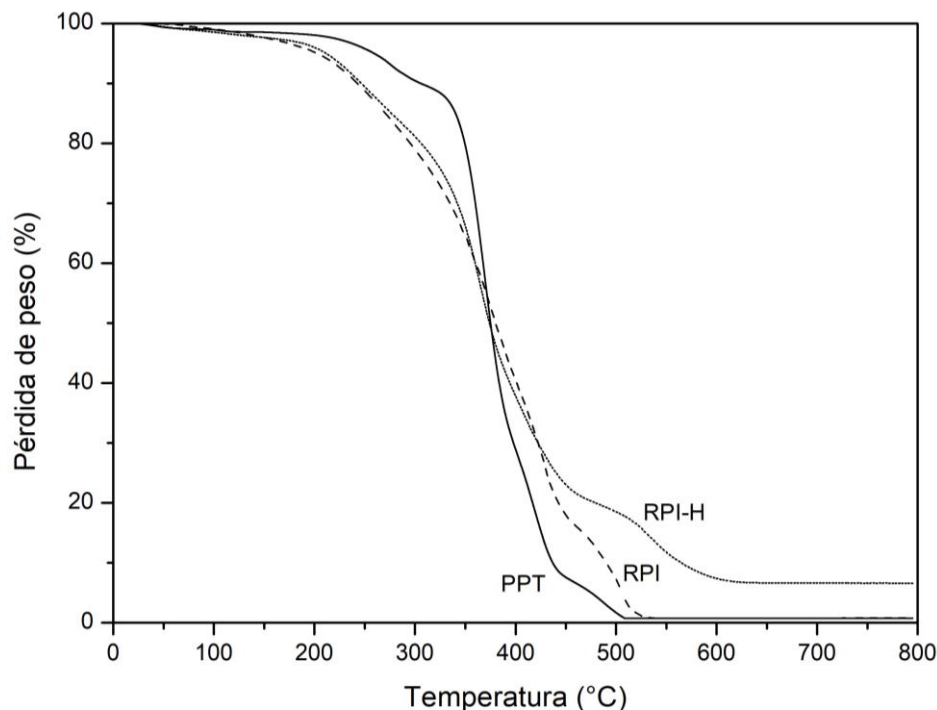


Figura 4-7. Termogramas de PPT, RPI y RPIH.

4.3 Propiedades físicas de los recubrimientos de PPT, RPI y RPIH

4.3.1 Espesor (SEM)

En la Figura 4-8 se muestran los espesores de los recubrimientos de PPT (R-P), RPI (R-R) y RPIH (R-H), obtenidos por medio de micrografías de SEM de su sección transversal. R-P, R-R y R-H presentaron espesor promedio de 2.50, 10.8 y 8.91 μm , respectivamente. R-P obtuvo el menor espesor, porque su estructura es lineal similar al PET [157], mientras R-R obtuvo el mayor espesor y R-H, presentó menor espesor que R-RPI, que puede asociarse a la adición de TMSPM a la RPI, el cual influyó en mejorar la condensación de la red tridimensional [158], [159].

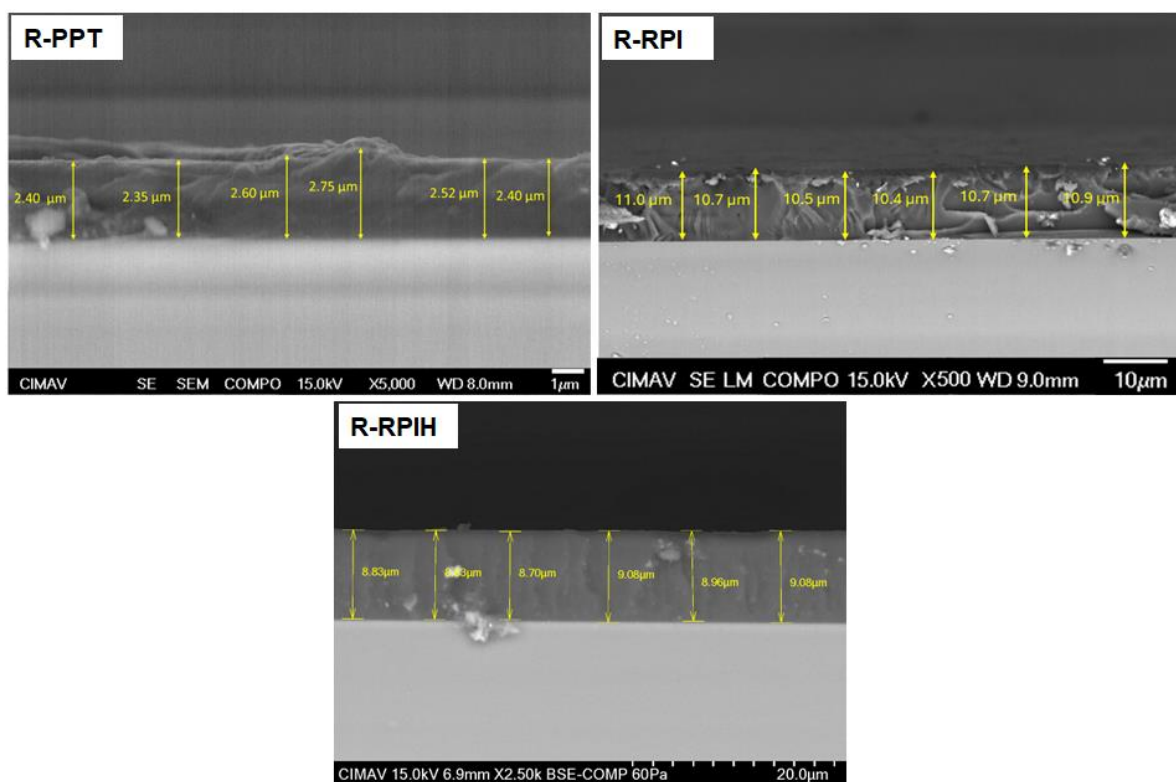


Figura 4-8. Espesores de los recubrimientos de R-P, R-R y R-H, obtenidos por medio de micrografías de SEM de su sección transversal.

4.3.2 Humectabilidad (ángulo de contacto)

La Figura 4-9 muestra la humectabilidad, obtenida por medición del ángulo de contacto al agua (ACA) de R-P, R-R y R-H. El ACA promedio de R-P fue de $72.90^\circ \pm 1.51$, de comportamiento hidrofílico y valor aproximado a recubrimientos de PET [160], [161], [162]. El ACA promedio de R-R fue de $76.11^\circ \pm 2.03$, con comportamiento hidrofílico [163]. El ACA promedio de R-H fue de $70.14^\circ \pm 0.78$, con comportamiento hidrofílico, menor a R-P y R-R, atribuido al contenido de SiO_2 , proporcionado por el TMSPM, que es de naturaleza hidrofílica [164], [165].

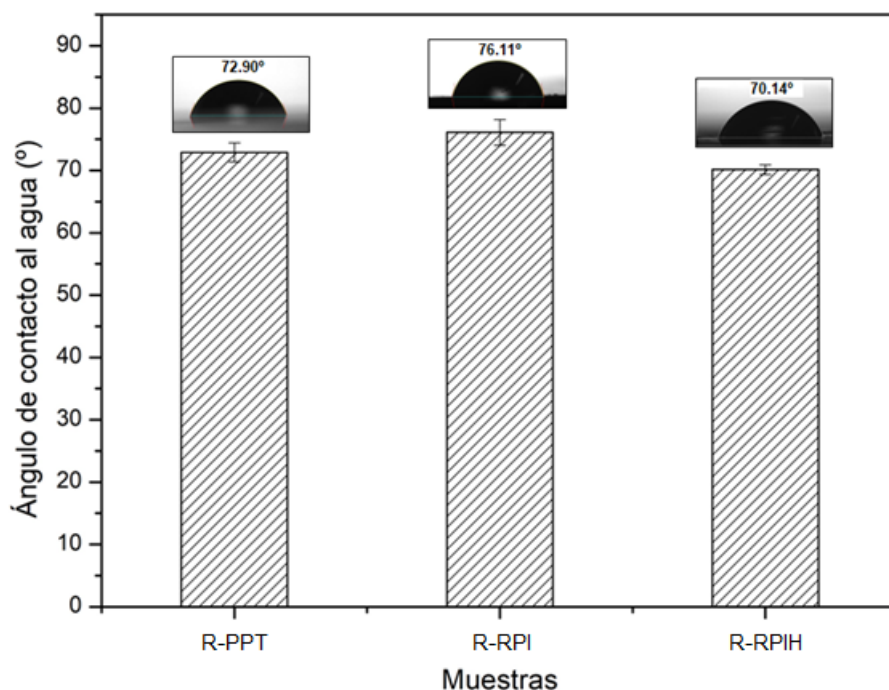


Figura 4-9. Humectabilidad, obtenida por medición del ACA de R- PPT, R-RPI y R-RPIH.

4.3.3 Adherencia (ASTM D3359-17)

4.3.3.1 R-PPT

La Figura 4-10 muestra la adherencia de R-P1, R-P2 y R-P3 evaluadas por la ASTM D3359-17. En ella se puede observar que no hubo desprendimiento de material del interior de la malla formada al realizar los cortes (área removida de 0%). Por lo tanto, las muestras presentaron muy buena adherencia con el concreto y fueron clasificadas como 5B según la norma citada. Estos resultados son similares a los reportados para recubrimientos sobre sustratos de vidrio y metal, elaborados con resinas sintetizadas a partir de productos PET glicolizados [37], [38].

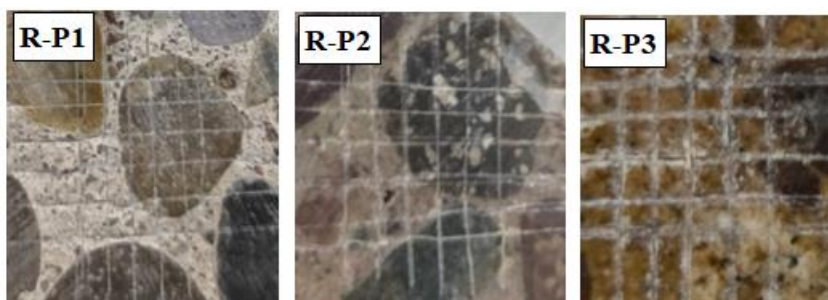


Figura 4-10. Adherencia de R-P1, R-P2 y R-P3 evaluadas por la ASTM D3359-17.

4.3.3.2 R-RPI

La Figura 4-11 muestra la adherencia de R-R1, R-R2 y R-R3 evaluadas por la ASTM D3359-17. En ella se puede observar que no hubo desprendimiento de material del interior de la malla formada al realizar los cortes (área removida de 0%). Por lo tanto, las muestras presentaron muy buena adherencia con el concreto y fueron clasificadas como 5B según la norma citada.

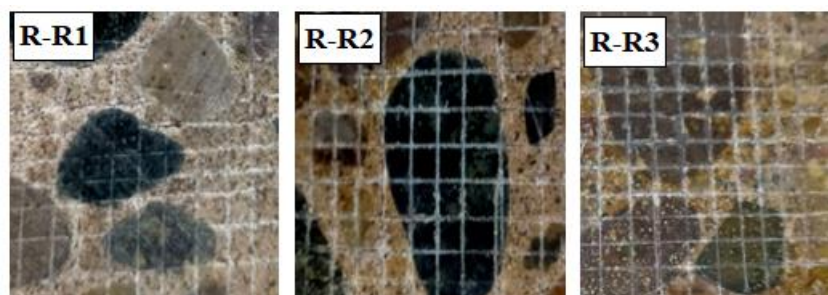


Figura 4-11. Adherencia de R-R1, R-R2 y R-R3 evaluadas por la ASTM D3359-17.

4.3.3.3 R-H

La Figura 4-12 muestra la adherencia de R-H1, R-H2 y R-H3 evaluadas por la ASTM D3359-17. En ella se puede observar que no hubo desprendimiento de material del interior de la malla formada al realizar los cortes (área removida de 0%). Por lo tanto, las muestras presentaron muy buena adherencia con el concreto y fueron clasificadas como 5B según la norma citada.

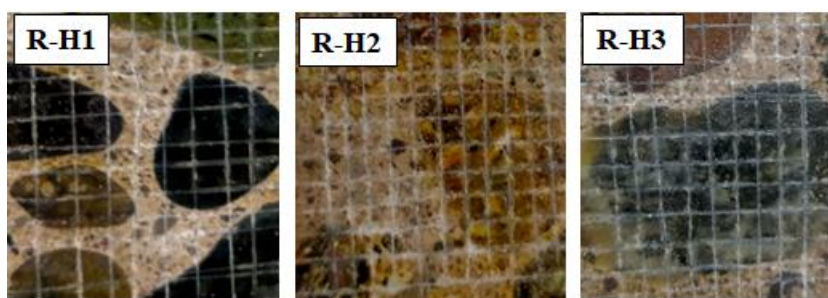


Figura 4-12. Adherencia de R-H1, R-H2 y R-H3 evaluadas por la ASTM D3359-17.

4.4 Esquemas de formación de R-P, R-R y R-H en sustrato de vidrio

4.4.1 Formación de R-P en sustrato de concreto

La Figura 4-13 presenta la esquematización general de la formación del recubrimiento de PPT sobre un sustrato de concreto. En a) se presenta la representación de la molécula de BHPT y el sustrato de concreto, elementos para la formación del recubrimiento de PPT. La formación del recubrimiento a partir de monómeros de BHPT, obtenidos a partir de residuos de PET, sobre un sustrato de concreto se propone en dos etapas. En b) se presenta la primera etapa, que consiste en la formación del recubrimiento húmedo de BHPT. En este caso, la adhesión entre el monómero de BHPT y el sustrato de concreto se realiza a través de enlaces de hidrógeno, formados entre los grupos hidroxilo presentes tanto en el BHPT como en el sustrato [97]. En c) se presenta la segunda etapa, que consiste en la polimerización del recubrimiento húmedo de BHPT, a través de su condensación y formación de enlaces covalentes a través de sus grupos hidroxilo [109]. Se propone que la polimerización de BHPT resulte en PPT, esto debido a la naturaleza de la glicólisis utilizada en su síntesis [31].

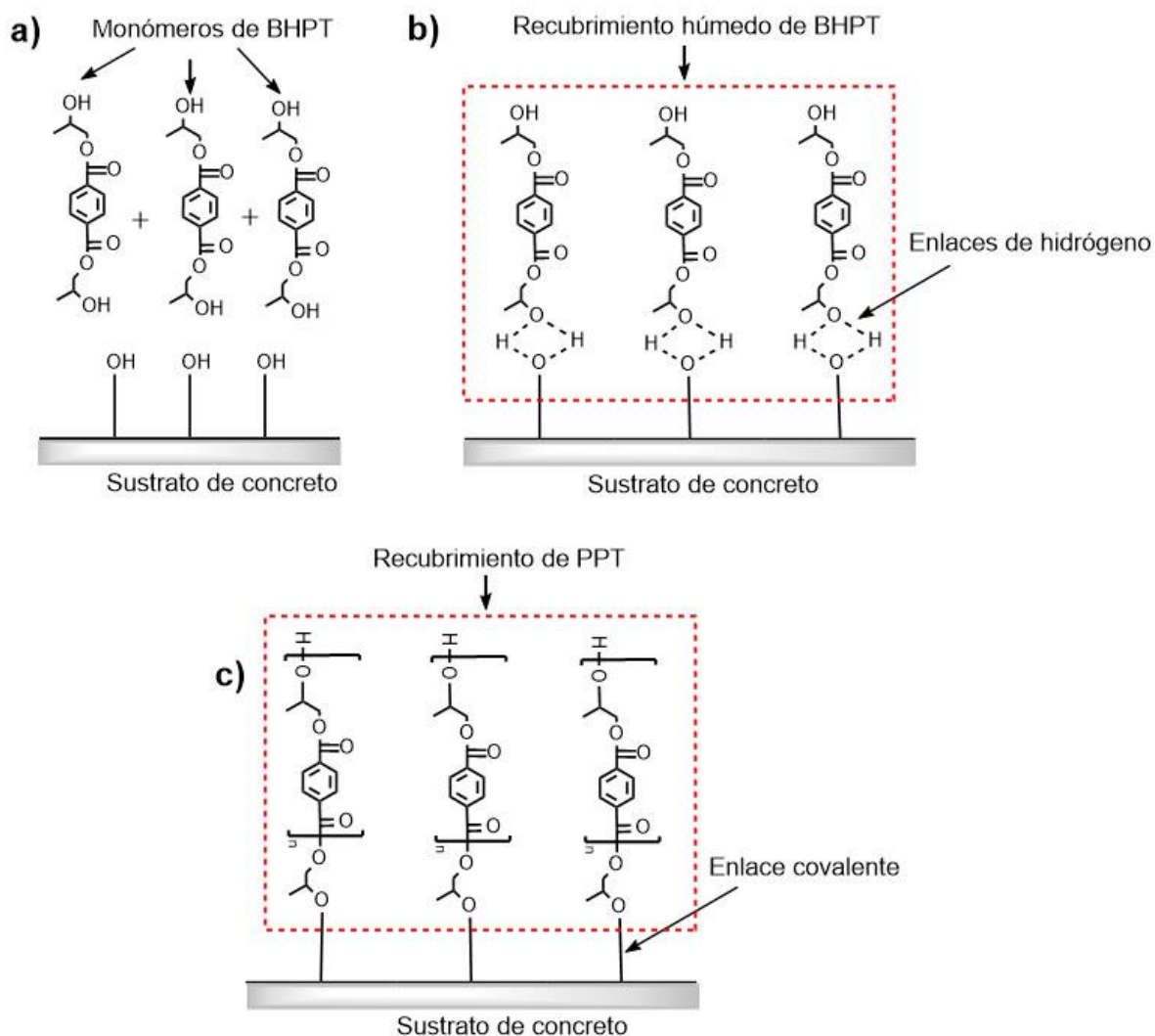


Figura 4-13. Esquemización general de la formación del recubrimiento de PPT sobre sustrato de concreto.

4.4.2 Formación de R-H en sustrato de concreto

La Figura 4-14 presenta la esquematización general de la formación de R-H sobre un sustrato de concreto. En a) se presenta la representación de la molécula de RPIH pre-polimerizada y el sustrato de concreto, elementos para la formación de R-H. La formación del recubrimiento a partir de RPIH prepolimerizada, obtenidos a partir de residuos de PET, sobre un sustrato de concreto se propone en dos etapas. En b) se presenta la primera etapa, que consiste en la formación del recubrimiento húmedo de RPIH. En este caso, la adhesión entre la RPIH y el sustrato de concreto se realiza a través de enlaces de hidrógeno, formados entre los grupos hidroxilo presentes tanto en la RPIH como en el sustrato [97]. En c) se presenta la segunda

etapa, que consiste en la polimerización del recubrimiento húmedo de RPIH, a través de la condensación de grupos silanoles (Si-OH) para formar enlaces covalentes Si-O-Si a través de sus grupos hidroxilo [109].

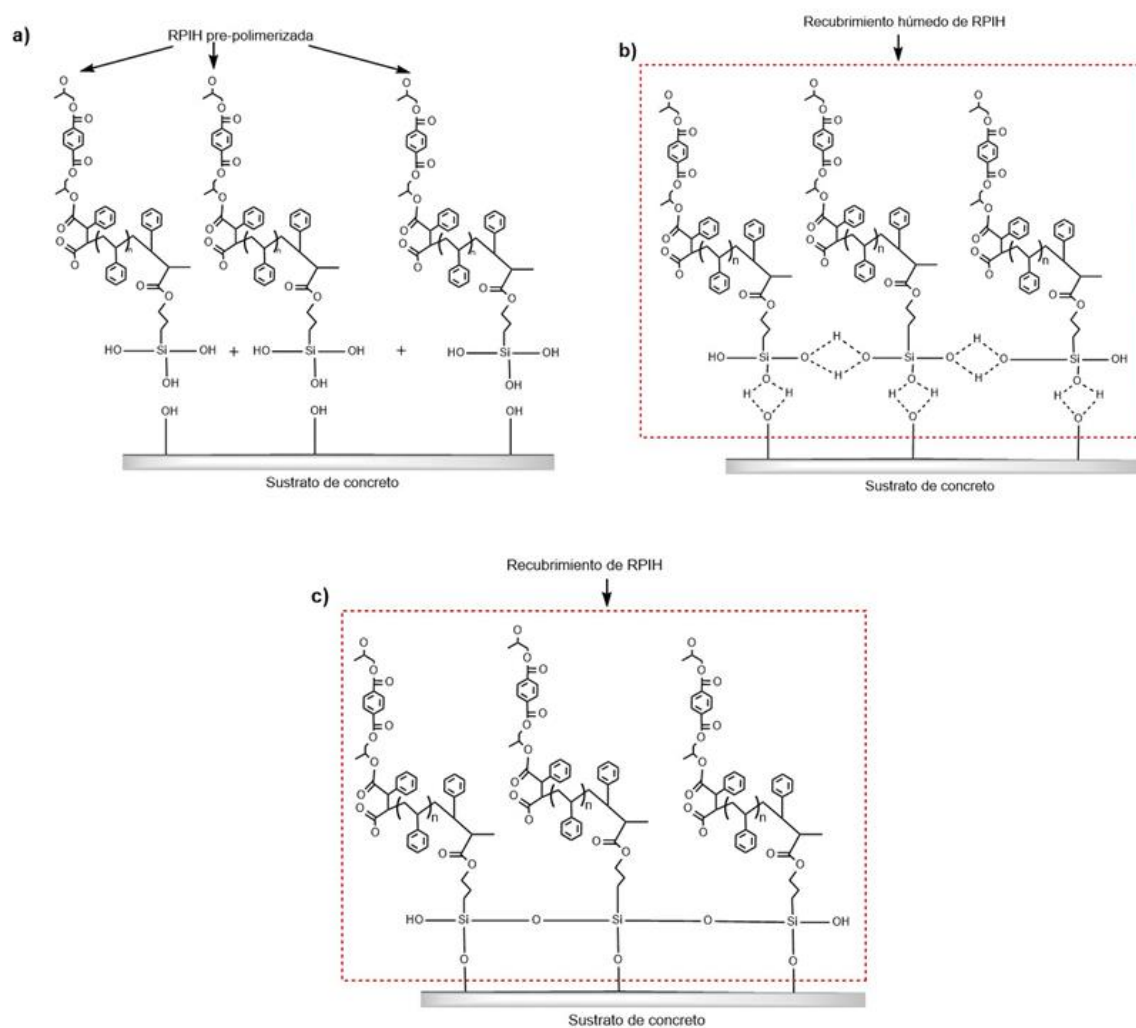


Figura 4-14. Esquematización general de la formación del recubrimiento de RPIH sobre un sustrato de concreto.

4.4.3 Formación de R-R en sustrato de concreto

En la Figura 4-15 se presenta la formación de recubrimiento de RPI en sustrato de concreto. En a) se esquematiza la RPI pre-polimerizada y el sustrato de concreto en el que se observa que los grupos funcionales de la RPI, $\text{C}=\text{C}$, y de la superficie del sustrato, OH , no son reactivos químicamente entre sí. Por lo que en b) se presenta un esquema de formación del

R-R polimerizado a través del anclaje físico de la resina con los poros capilares presentes en la superficie del sustrato de concreto.

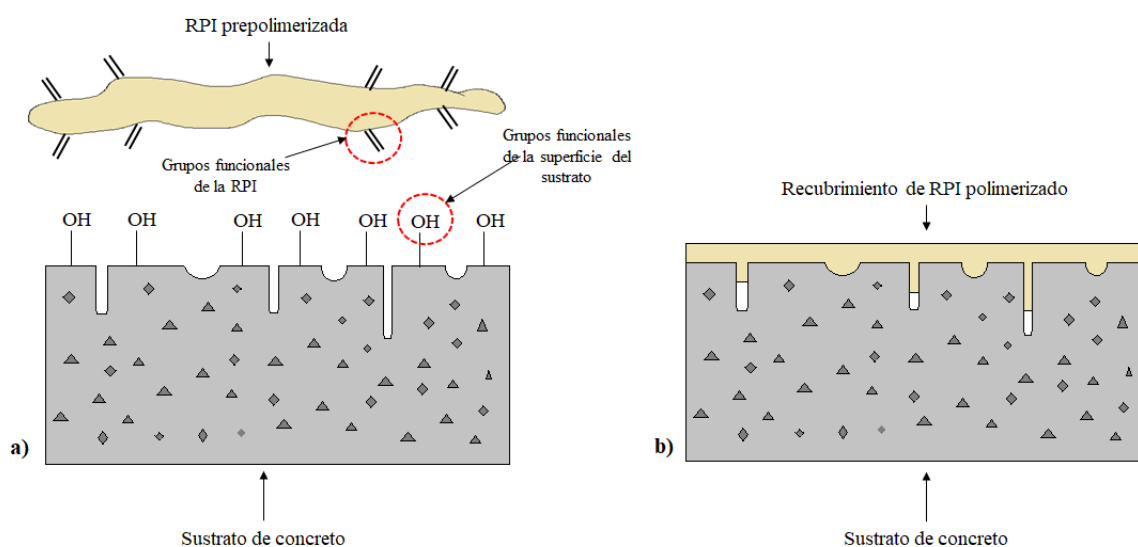


Figura 4-15. Formación de recubrimiento de RPI en sustrato de concreto.

4.5 Propiedades mecánicas de R-P, R-R y R-H por nanoindentación

La Figura 4-16 muestra las curvas de carga-descarga para R-P, R-R y R-H, obtenidas por nanoindentación. Las muestras presentaron deformación permanente a la carga máxima de 0.3 mN para R-P y 0.4 mN para R-R y R-H con una profundidad de penetración máxima de 145.4 nm, 512.14 nm y 346.9 nm., para R-P, R-R y R-H, respectivamente (valores inferiores a 10% de su espesor (SEM), lo que indica que el sustrato no influyó en su medición [128]). Se observa que el R-P presentó menor profundidad de penetración, R-R, la mayor (10 veces mayor que el R-P y cuatro veces mayor que el R-H aproximadamente) y R-H fue 2.4 veces mayor que el R-P).

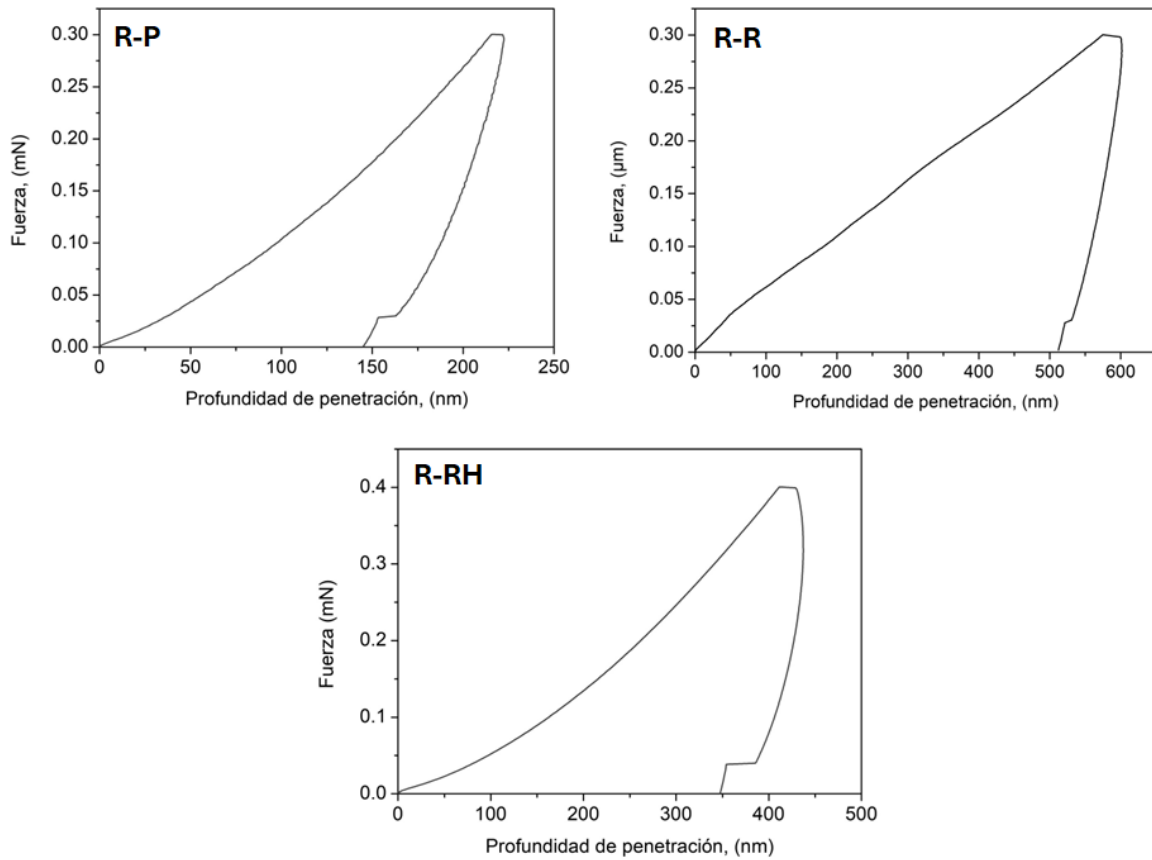


Figura 4-16. Curvas de carga-descarga de los recubrimientos de a) R-P, b) R-R y c) R-H obtenidas por nanoindentación.

En la Figura 4-17 se presentan las propiedades mecánicas, a) dureza y b) módulo de elasticidad de R-P, R-R y R-H. En a), R-P, R-R y R-H presentaron una dureza de 200, 30 y 90 MPa, respectivamente y en b), R-P, R-R y R-H presentaron un módulo de elasticidad de 5.1, 1.3 y 3.4 GPa, respectivamente. Se observa que R-P presentó mejores propiedades mecánicas, lo cual se puede deber a la naturaleza semicristalina del PET [166], en comparación con R-R y R-H, que son completamente amorfos [167] y que R-H mejoró sus propiedades mecánicas con respecto a los de R-R. La mejora de las propiedades mecánicas en R-H respecto a R-R es debido a la incorporación de SiO_2 , contenido en el agente acoplante TMSPM, que forma enlaces Si-O-Si y refuerza a la R-R [72].

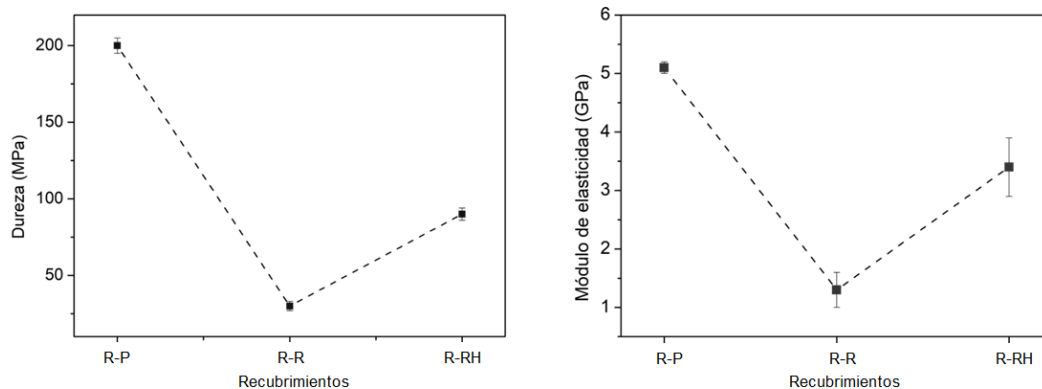


Figura 4-17. Propiedades mecánicas, a) dureza y b) módulo de elasticidad de R-PPT, R-RPI y R-RPIH.

4.6 Durabilidad de concreto hidráulico con R-P, R-R y R-H

4.6.1 Prueba rápida de penetración del ion cloruro (ASTM C1202-19)

La Tabla 4-1 presenta los resultados de la prueba rápida de penetración del ion cloruro (ASTM C1202-19), consistente en la carga pasada para las muestras con una capa de recubrimiento (R-P1, R-R1 y R-RH1), con dos capas de recubrimiento (R-P2, R-R2 y R-RH2) y con tres capas de recubrimiento (R-P3, R-R3 y R-RH3). La carga pasada promedio de REF fue de 7520 C.

Tabla 4-1 Carga pasada para R-P1, R-P2, R-P3, R-R1, R-R2, R-R3, R-H1, R-H2 y R-H3.

Muestra 1 capa	Carga pasada (C)	Muestra 2 capas	Carga pasada (C)	Muestra 3 capas	Carga pasada (C)
R-P1	5958	R-P2	2030	R-P3	1775
R-R1	6326	R-R2	4618	R-R3	4316
R-H1	6526	R-H2	4577	R-H3	4113

En la

Figura 4-18 se presentan las gráficas de las muestras descritas en la Tabla 4-1 con su carga pasada correspondiente, comparados con la norma ASTM C1202-19 [116], que establece la clasificación de permeabilidad alta (>4000 C), moderada (2000-4000 C), baja (1000-2000 C), baja (100-1000 C) y despreciable (<100 C).

Se puede observar que los tres tipos de recubrimientos (R-P, R-R y R-RH) redujeron la penetración del ion cloruro respecto a REF. Para una capa de recubrimiento, R-P1, R-R1 y

R-RH1 resultaron con carga pasada correspondiente a permeabilidad alta, con menor carga pasada para R-P1. Para dos capas de recubrimiento, R-R2 y R-RH2 tuvieron permeabilidad alta con carga pasada similar, mientras que R-P2 tuvo sustancial disminución de carga pasada correspondiente al límite entre permeabilidad baja y moderada. Para tres capas de recubrimiento, R-R3 y R-RH3 disminuyeron ligeramente su carga pasada, que aún se clasifica como permeabilidad alta y R-P3 disminuyó su carga pasada para clasificarse como permeabilidad baja. R-P presenta mejor comportamiento de barrera contra el ion cloruro que R-R y R-H para una, dos y tres capas de recubrimiento, esto puede deberse a que para R-R y R-H, se presentan canales microporosos de difusión, formados durante la etapa de curado que permiten el ingreso de la solución de NaCl, que provoca hinchazón en el recubrimiento y posteriormente reacciones químicas que degradan la red polimérica [168], [169]. R-P3, presentó el mejor comportamiento de barrera ante la penetración de iones cloruro, porque es el que presentó permeabilidad baja.

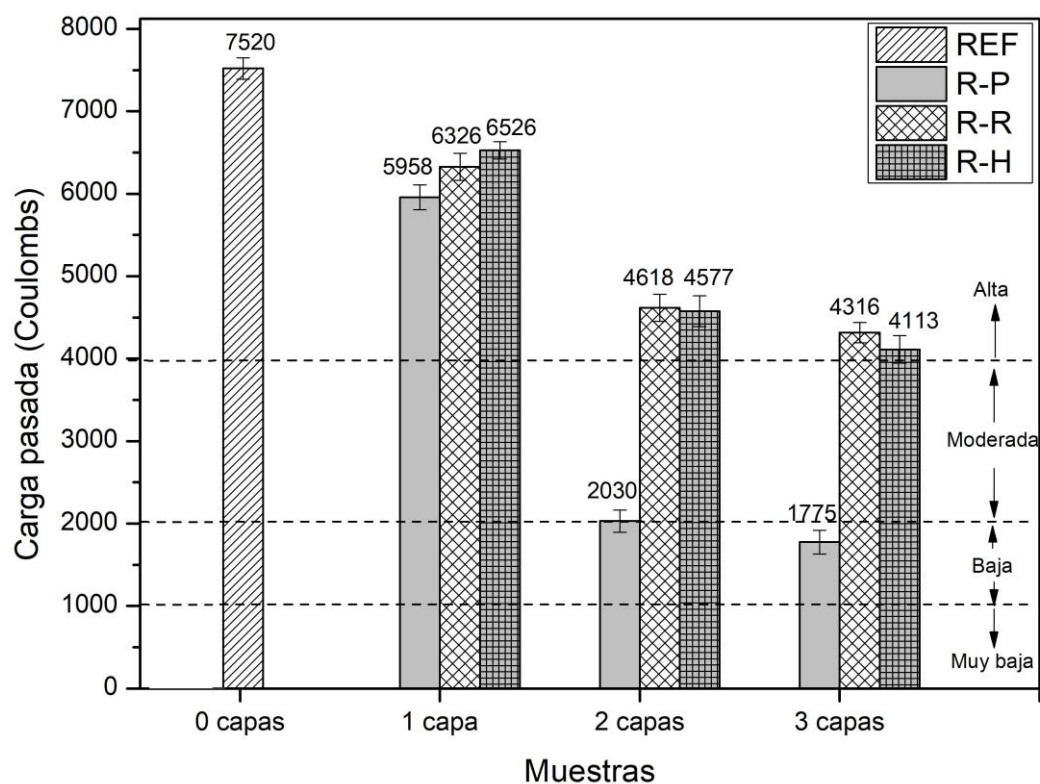


Figura 4-18. Clasificación de permeabilidad de los recubrimientos R-P, R-R y R-H de acuerdo con sus valores de carga pasada.

4.6.2 Velocidad de absorción de agua (ASTM C1585-20)

4.6.2.1 R-P

La Figura 4-19 muestra la velocidad de absorción de agua obtenida de acuerdo con la norma ASTM C1585-20, de REF, R-P1, R-P2 y R-P3, donde REF y R-P1 están superpuestas, al igual que R-P2 y R-P3. Se observa que REF y R-P1 tuvieron la mayor tasa de absorción de agua y al ser de igual valor, se puede inferir que el R-P1 no protegió contra la humedad. R-P2 y R-P3 tuvieron la menor tasa de absorción de agua, se puede inferir que como R-P2 y R-P3, protegieron contra la humedad de manera muy eficiente y similar, por lo tanto, es suficiente aplicar dos capas de recubrimiento para mejorar esa propiedad. Esto indica que el recubrimiento redujo la presencia de poros capilares en la superficie del concreto responsables de la absorción capilar del agua [87], [170].

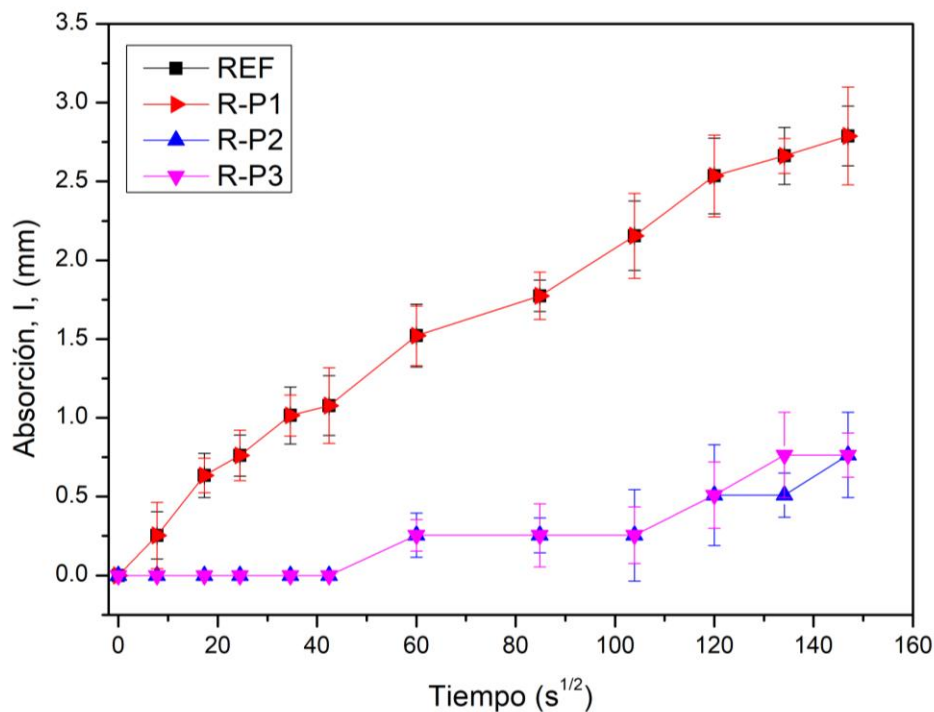


Figura 4-19. Velocidad de absorción de agua REF, R-P1, R-P2 y R-P3.

4.6.2.2 R-R

La Figura 4-20 muestra los resultados de la velocidad de absorción de agua de REF, R-R1, R-R2 y R-R3. La muestra REF presentó la mayor velocidad de absorción de agua. R-R1 y R-R2 presentaron valores similares entre sí con 19% menores que REF, lo cual indica una

mejoría en la resistencia a la absorción al agua por capilaridad. R-R3 presentó el menor valor de tasa de absorción de agua, al reducirlo en un 67 y 59 % con respecto a REF y R-R1/R-R2, respectivamente. Esto indica que el recubrimiento R-R3 formó una capa continua sobre la superficie de concreto con propiedades de barrera. Esto indica que R-R3 redujo la presencia de poros capilares en la superficie del concreto responsables de la absorción capilar del agua [87], [170].

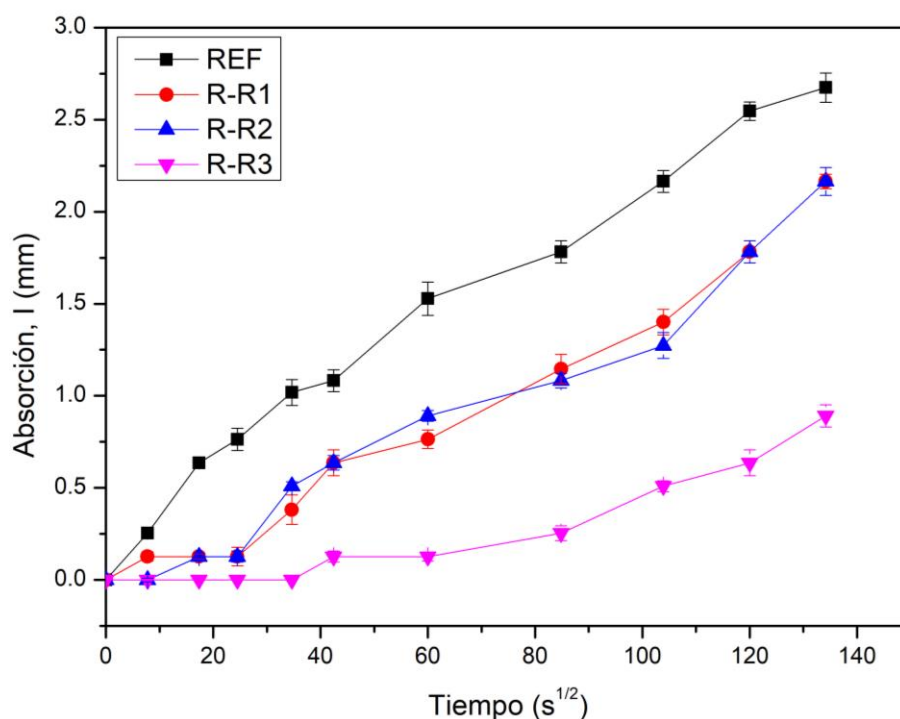


Figura 4-20. Gráfica de velocidad de absorción de agua de los especímenes REF, R-R1, R-R2 y R-R3.

4.6.2.3 RPIH

La Figura 4-21 muestra los resultados de la tasa de absorción de agua de REF, R-H1, R-H2 y R-H3. Las muestras REF y R-H1 presentaron la mayor tasa de absorción de agua. R-H2 disminuyó la tasa de absorción de agua con respecto a REF y R-H1, en un 38 %, para ambos casos. R-H3 presentó el menor valor de tasa de absorción de agua, al reducirlo en un 71 y 54 % para REF y RH1/R-H2, respectivamente. Esto indica que el recubrimiento R-H3 formó una capa continua sobre la superficie de concreto con propiedades de barrera. Esto indica que R-H3 redujo la presencia de poros capilares en la superficie del concreto responsables de la absorción capilar del agua [87], [170].

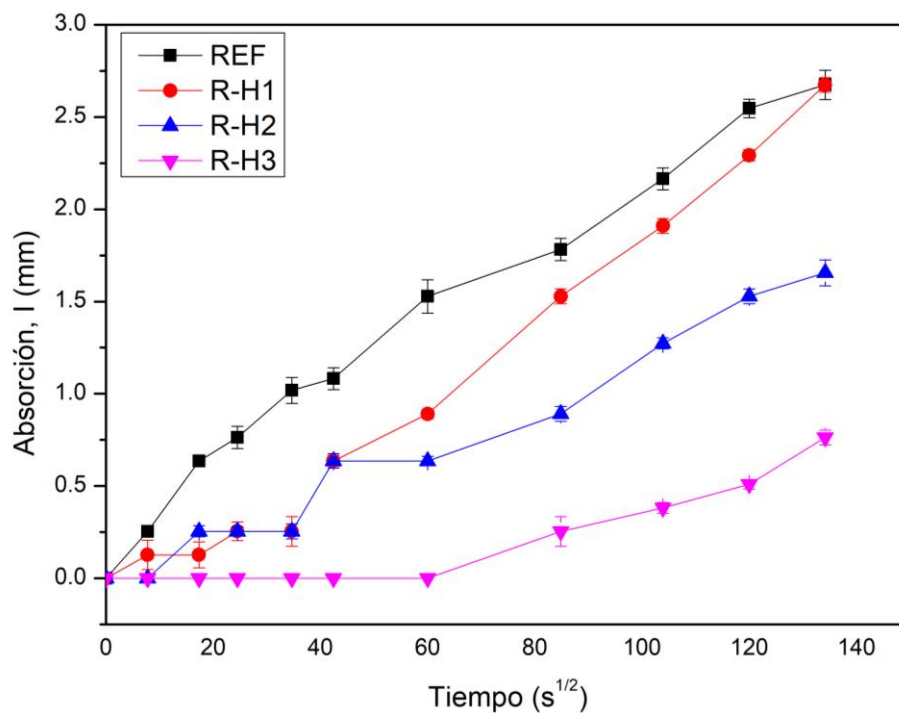


Figura 4-21. Gráfica de velocidad de absorción de agua de los especímenes REF, R-H1, R-H2 y R-H3.

4.6.3 Carbonatación (RILEM CPC-18)

4.6.3.1 PPT

La Figura 4-22 muestra la profundidad de carbonatación de REF, R-P1, R-P2 y R-P3 a 7, 14 y 28 días de exposición de CO_2 . En REF y R-P1 a 7 y 14 días se aprecia la aparición del color violeta, característico de la reacción de la fenolftaleína con la zona no carbonatada y a 28 días este color desaparece, lo que indica que el espécimen carbonató. En R-P2 y R-P3 se observa que a 7, 14 y 28 días aparece el color violeta, lo que indica que ambos especímenes no carbonataron durante ese período.

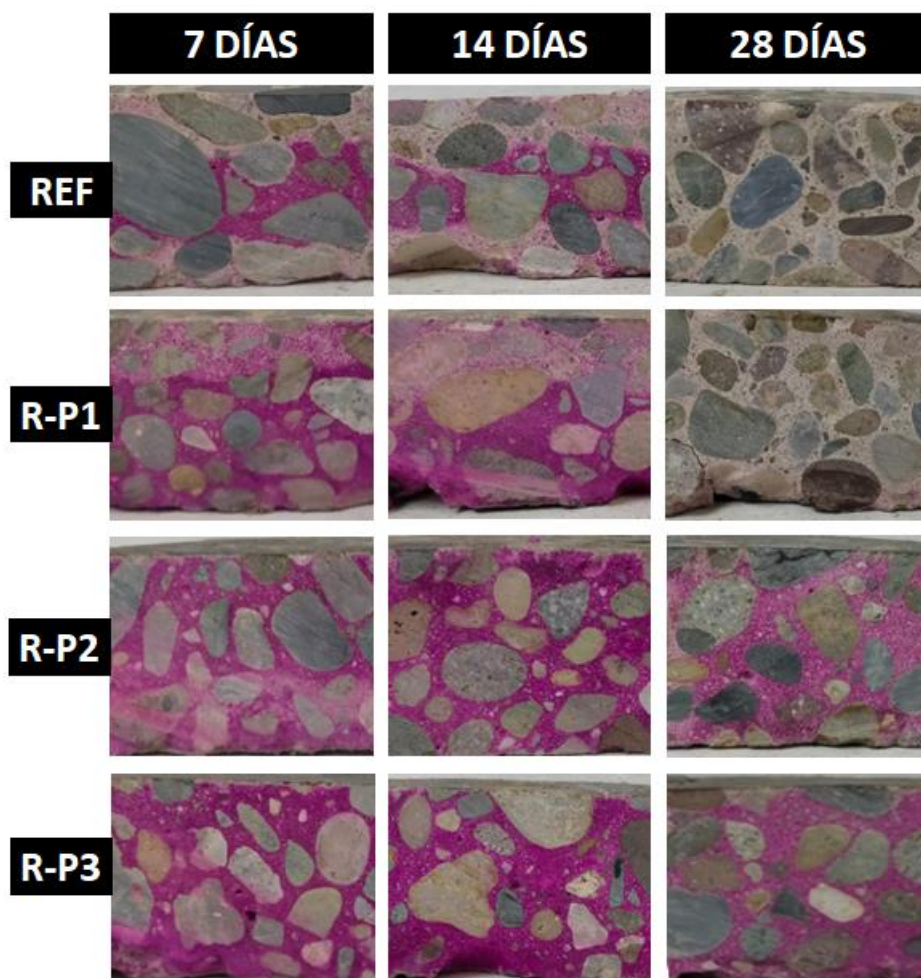


Figura 4-22. Profundidad de carbonatación de de REF, R-P1, R-P2 y R-P3 a 7, 14 y 28 días de exposición de CO_2 .

La Tabla 4-2 muestra las mediciones de la profundidad de carbonatación para REF, R-P1, R-P2 y R-P3. Los valores de la profundidad de carbonatación para REF y R-P1 a 14 y 28 días son iguales, lo que indica que R-P1 no ofrece protección al concreto contra el CO_2 . Los valores de la profundidad de carbonatación para R-P2 y R-P3 son nulos, lo que indica que sirvieron como barrera protectora del concreto contra el CO_2 , el cual presenta baja reactividad química con polímeros de alto peso molecular, como el PPT, que no le permite actuar como su disolvente [171]–[173].

Tabla 4-2. Mediciones de profundidad de carbonatación para REF, R-P1, R-P2 y R-P3 a 7, 14 y 28 días de exposición al CO₂.

Profundidad de carbonatación (mm)				
Tiempo de exposición/muestras	REF	R-P1	R-P2	R-P3
7 días	14.97	11.27	0	0
14 días	15.65	15.65	0	0
28 días	25	25	0	0

4.6.3.2 R-R

La Figura 4-23 muestra la profundidad de carbonatación de REF, R-R1, R-R2 y R-R3 a 7, 14 y 28 días de exposición de CO₂. En REF a 7 y 14 días se aprecia la aparición del color violeta, característico de la reacción de la fenolftaleína con la zona no carbonatada y a 28 días este color desaparece, lo que indica que el espécimen carbonató. R-R1 presentó ligera carbonatación a 7 días, la cual incrementó a los 14 días al observarse zonas de color violeta difuminado, lo que se atribuye a una carbonatación parcial de la muestra, la cual termina al observarse zona de color violeta (zona no carbonatada) y a 28 días el espécimen carbonató por completo al no identificarse zonas de color violeta. R-R2 presentó el mismo comportamiento que R-R1 a 7 y 14 días de exposición y a 28 días presentó una mayor zona carbonatada y sólo una pequeña zona de color violeta que indica que la muestra no carbonató en su totalidad. R-R3, presenta una mínima profundidad de carbonatación a los 7 días, la cual se mantiene para los 14 y 28 días, esta muestra es la más efectiva para la protección del concreto hidráulico contra la carbonatación.

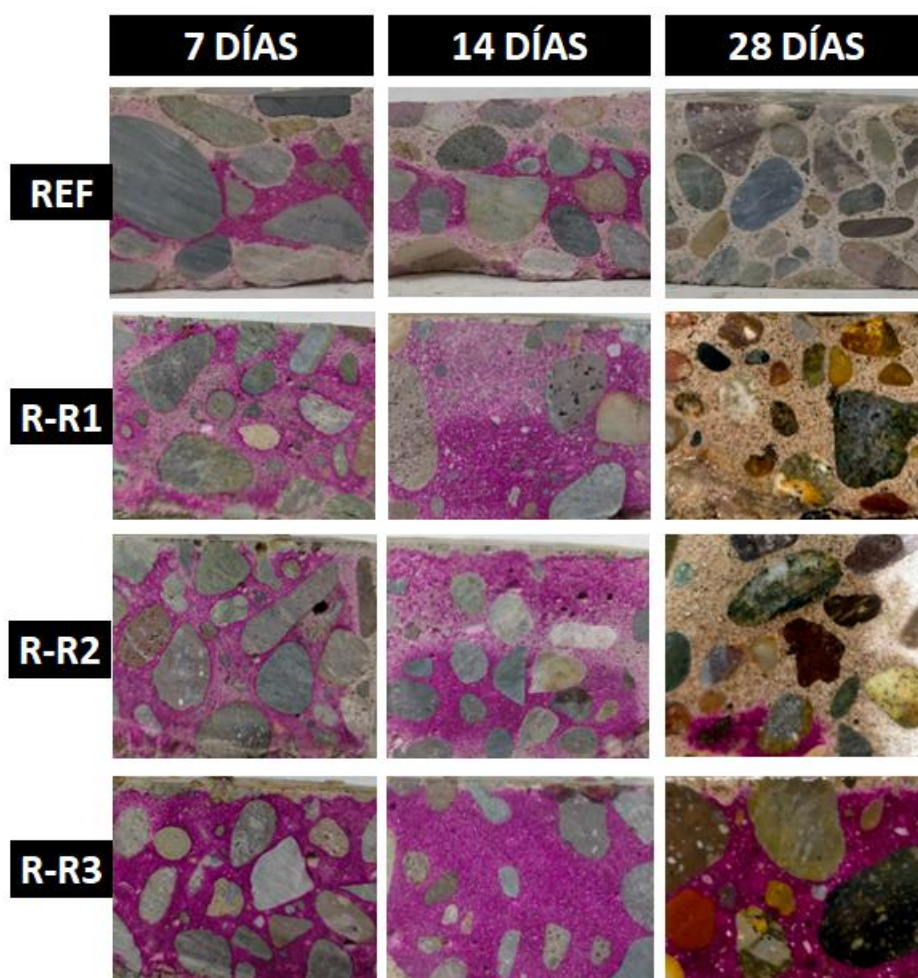


Figura 4-23. Profundidad de carbonatación de muestras de concreto REF, R-R1, R-R2 y R-R3 a los 7, 14 y 28 días de exposición al CO_2 .

La Tabla 4-3 muestra las mediciones de la profundidad de carbonatación para REF, R-R1, R-R2 y R-R3. La tendencia de los valores de profundidad de carbonatación para REF y R-R1 a 7, 14 y 28 días son muy similares, lo que indica que R-R1 no ofrece protección al concreto contra el CO_2 . Los valores de profundidad de carbonatación para R-R2 incrementan progresivamente alto de 7 a 28 días, esto indica que R-R2 ofrece una débil protección al concreto. Los valores de profundidad de carbonatación para R-R3 presentan un ligero incremento progresivo, el valor final presentado a 28 días indica un buen comportamiento de protección ante la carbonatación. Esto se puede deber a la baja reactividad química entre el CO_2 y la RPI, explicado en el apartado anterior [4.6.3.1].

Tabla 4-3. Mediciones de profundidad de carbonatación para REF, R-R1, R-R2 y R-R3 a 7, 14 y 28 días de exposición al CO₂.

Profundidad de carbonatación (mm)				
Tiempo de exposición/muestras	REF	R-R1	R-R2	R-R3
7 días	18	6	5	3
14 días	21	19	18	5
28 días	50	50	35	7

4.6.3.3 R-H

La Figura 4-24 muestra la profundidad de carbonatación de REF, R-H1, R-H2 y R-H3 a 7, 14 y 28 días de exposición de CO₂. En REF a 7 y 14 días se aprecia la aparición del color violeta, característico de la reacción de la fenolftaleína con la zona no carbonatada y a 28 días este color desaparece, lo que indica que el espécimen carbonató. R-H1 presentó ligera carbonatación a 7 días, la cual incrementó a los 14 días al observarse zonas de color violeta difuminado, lo que se atribuye a una carbonatación parcial de la muestra, la cual termina al observarse zona de color violeta (zona no carbonatada) y a 28 días el espécimen carbonató por completo al no identificarse zonas de color violeta. R-H2 presentó el mismo comportamiento que R-H1 a 7 y 14 días de exposición y a 28 días presentó una mayor zona carbonatada y sólo una pequeña zona de color violeta que indica que la muestra no carbonató en su totalidad. R-H3, presenta una mínima profundidad de carbonatación a los 7 días, la cual se mantiene para los 14 y 28 días, esta muestra es la más efectiva para la protección del concreto hidráulico contra la carbonatación.

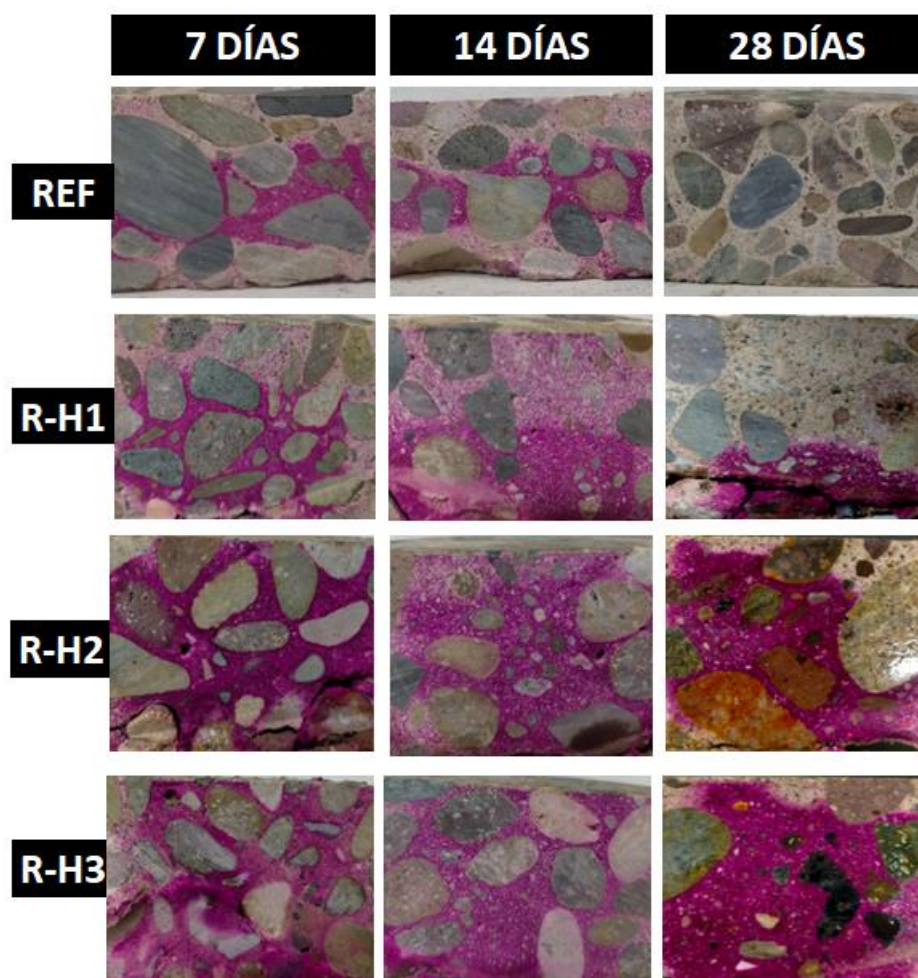


Figura 4-24. Profundidad de carbonatación de muestras de concreto hidráulico REF, R-H1, R-H2 y R-H3 a los 7, 14 y 28 días de exposición al CO_2 .

La Tabla 4-4 muestra las mediciones de la profundidad de carbonatación para REF, R-H1, R-H2 y R-H3. La tendencia de los valores de profundidad de carbonatación para REF de 7 a 28 días presenta un alto incremento progresivo. Los valores de profundidad de carbonatación para R-H1 presentan un alto incremento progresivo de 7 a 28 días, sin presentar una total carbonatación, esto indica que R-H1 ofrece una débil protección al concreto. Los valores de profundidad de carbonatación para R-H2 y R-H3 presentan valores nulos a 7 y 14 días y un ligero incremento de 14 a 28 días, lo que indica un buen comportamiento de protección ante la carbonatación para ambos casos. Esto se puede deber a la baja reactividad química entre el CO_2 y la RPIH, explicado anteriormente [4.6.3.1]

Tabla 4-4. Mediciones de profundidad de carbonatación para REF, R-H1, R-H2 y R-H3 a 7, 14 y 28 días de exposición al CO₂.

Tiempo de exposición/muestras	Profundidad de carbonatación (mm)			
	REF	R-H1	R-H2	R-H3
7 días	18	12	0	0
14 días	21	20	0	0
28 días	50	28	11	6

4.6.4 Comparación de resultados de durabilidad con literatura reportada

En la Tabla 4-5 se presenta la comparación entre los resultados de reducción contra la carbonatación de recubrimientos reportados en la literatura y los recubrimientos desarrollados en este trabajo. Se observa que los recubrimientos R-P2, R-H3 y R-R3 presentan mejores resultados de reducción de penetración de carbonatación que los reportados en la literatura.

Tabla 4-5. Comparación entre los resultados de reducción contra la carbonatación de recubrimientos reportados en la literatura y los recubrimientos desarrollados en este trabajo.

Recubrimientos	Reducción (%)	Referencia
R-P2	100	Este trabajo
R-H3	88	Este trabajo
R-R3	86	Este trabajo
Nanosílice híbrida	79	[75]
Nanosílice (NS)	69	[75]
Pintura interior comercial	63	[79]
Fluorosilicato de magnesio	63	[78]
Pintura exterior comercial	56	[79]
Silicato de sodio	51	[80]
Alquilalcoxilano	50	[76]
Trietoxisilano	35	[76]
Resina epóxica	34	[75], [174]
Acrílico	12	[74]

En la Tabla 4-6 se presenta la comparación entre los resultados de reducción contra el ion cloruro de recubrimientos reportados en la literatura y los recubrimientos desarrollados en este trabajo. Se observa que el recubrimiento R-P3 presentó mejores resultados que los

reportados en la literatura, sólo por debajo de recubrimientos de NS-arcilla y resina epóxica/grafeno. Por su parte R-H3 y R-R3 presentó mejores resultados que la resina epóxica e isobutiltrietoxisilano y fue superado por recubrimientos de NS-arcilla, resina epóxica/grafeno, poliuretano y caucho clorado.

Tabla 4-6. Comparación entre los resultados de reducción contra ion cloruro de recubrimientos reportados en la literatura y los recubrimientos desarrollados en este trabajo.

Recubrimientos	Reducción (%)	Referencia
NS-arcilla	90	[82]
Resina epóxica/grafeno	86	[81]
R-P3	84.76	Este trabajo
Poliuretano	75	[83]
Caucho clorado	67	[83]
R-H3	45.31	Este trabajo
R-R3	42.61	Este trabajo
Resina epóxica	35	[75], [174]
Isobutiltrietoxisilano	23	[86]

En la Tabla 4-7 se presenta la comparación entre los resultados de reducción contra el ion cloruro de recubrimientos reportados en la literatura y los recubrimientos desarrollados en este trabajo. Se observa que los recubrimientos R-P3, R-H3 y R-R3 presentaron mejores resultados que los reportados en la literatura, sólo por debajo del recubrimientos de resina epóxica/grafeno.

Tabla 4-7. Comparación entre los resultados de reducción contra absorción de agua de recubrimientos reportados en la literatura y los recubrimientos desarrollados en este trabajo.

Recubrimientos	Reducción (%)	Referencia
Resina epóxica/grafeno	80	[81]
R-P3	72.43	Este trabajo
R-H3	72.06	Este trabajo
R-R3	67.28	Este trabajo
Alquilalcoxisilano	68	[84]
Fluoroalquilsilano/ceniza de cascarilla de arroz	47	[87]
Resina epóxica	40	[75], [174]

4.7 Envejecimiento de R-P por intemperismo acelerado (ASTM G154-16), R-PE

4.7.1 Esquema de envejecimiento de R-PE

La Figura 4-25 muestra esquemas representativos de los posibles mecanismos de envejecimiento del PPT basados en reacciones de Norrish. En a), la luz UV descompone el PPT en especies como el tereftalato de dihidroxilo, grupos terminales de ácido carboxílico y grupos vinilo. En b) se presenta una posible reticulación entre tereftalato de dihidroxilo y grupos terminales de ácido carboxílico en los que los grupos vinilo presentes no participan; así, las especies de tereftalato polimerizados se producen con residuos de agua producida y la permanencia de grupos vinilo [175], [176].

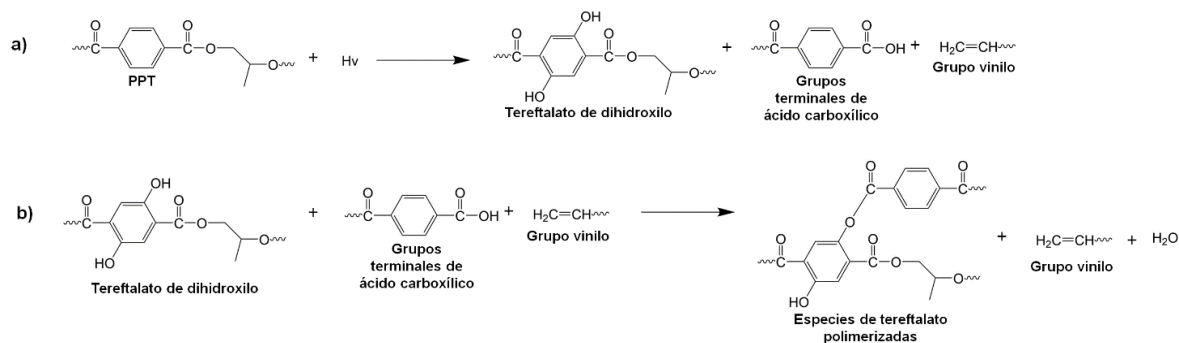


Figura 4-25. Esquemas representativos de los posibles mecanismos de envejecimiento del PPT basados en mecanismos de tipo Norrish.

4.7.2 FT-IR de R-PE

La Figura 4-26 se presentan los espectros de FT-IR de R-PE0, R-PE24, R-PE48 y R-PE72 en el rango de 4000 a 500 cm^{-1} . Los espectros fueron desplazados arbitrariamente en el mismo eje de transmitancia con una previa normalización a sus valores máximos de transmitancia. Se observa disminución en la intensidad de las bandas de absorción, C-H₃ a 2981 cm^{-1} y C-H₂ a 2952 y 2882 cm^{-1} (indicados con líneas discontinuas). Conforme aumentó el tiempo de exposición a la luz UV, se aprecia que esas bandas desaparecieron en R-PE72. Se muestran los enlaces C=O a 1712 cm^{-1} , C=C aromático a 1574 y 1408 cm^{-1} y C-H₃ a 1452 y 1377 cm^{-1} , donde se observa una disminución en la intensidad de todas las bandas de absorción a medida que aumenta la duración de la exposición a la luz ultravioleta, en el caso de C-H₃, la banda desapareció en R-PE72. Además, se observa una gran disminución en la intensidad de todas las bandas de absorción conforme se incrementó la exposición a la luz UV; estas bandas incluyeron C-H aromático en 793 y 632 cm^{-1} y C-H₃ en 987 y 916 cm^{-1} , que desaparecieron en R-PE72.

La disminución en el número de bandas atribuidas a los enlaces C-H resulta por su escisión durante la fotooxidación del PPT por la radiación UV. Durante este proceso, se generan radicales libres en la etapa de iniciación debido a la eliminación de hidrógeno [177].

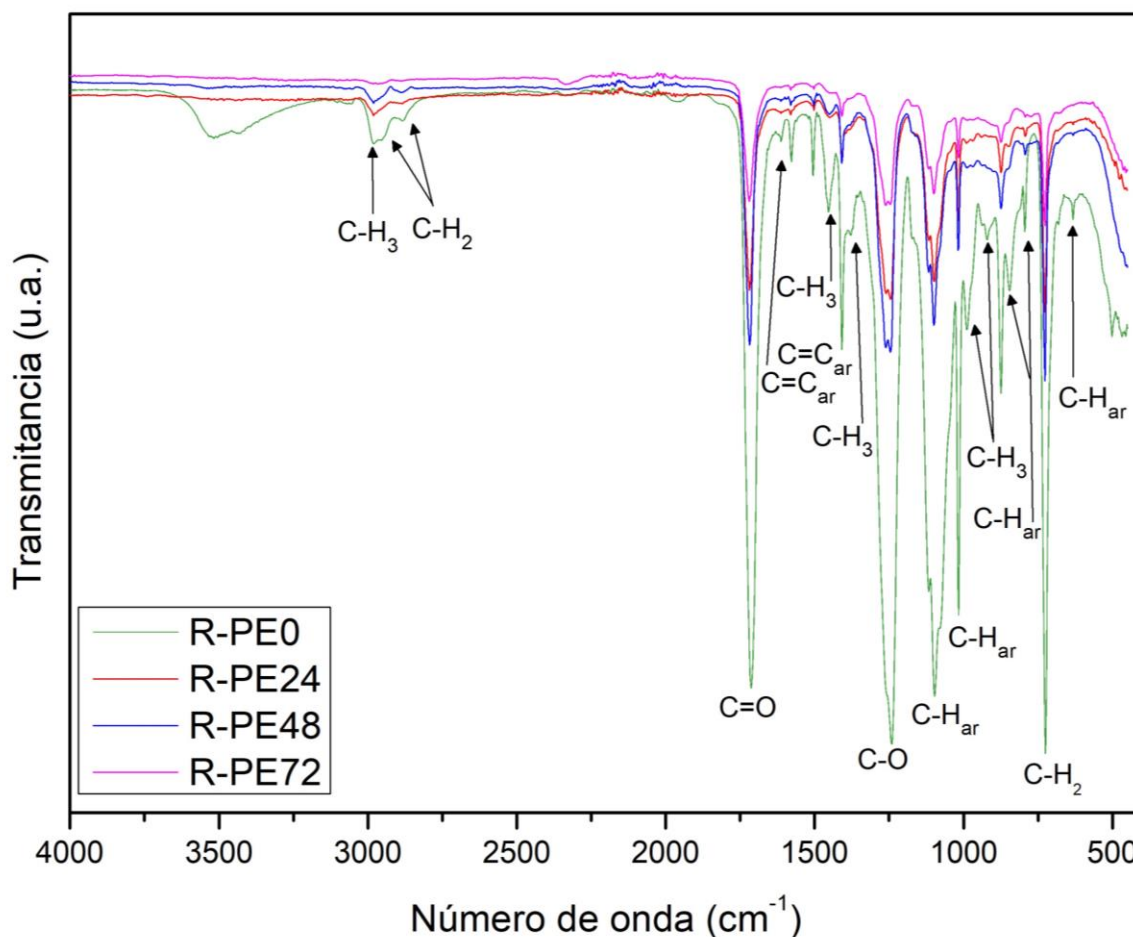


Figura 4-26. Espectros FT-IR de (a) R-PE0, R-PE24, R-PE48 y R-PE72 en la región del número de onda de 4000–400 cm^{-1} y aumentos de las regiones espectrales R-PE0, R-PE24, R-PE48 y R-PE72 de (b) 3050 a 2850 cm^{-1} , (c) 2000 a 1300 cm^{-1} y (d) 1250 a 400 cm^{-1} .

4.7.3 Propiedades mecánicas por nanoindentación de R-PE

La Figura 4-27 muestra la profundidad de penetración por nanoindentación en R-PE de R-PE0, R-PE24, R-PE48 y R-PE72, donde se presentan 4 curvas de carga-profundidad de penetración para cada muestra. Para R-PE0 se obtuvo la profundidad de penetración máxima, h_{max} de 224 nm, coincidente para los 4 puntos evaluados, lo que indica que su comportamiento mecánico fue muy homogéneo. Para R-PE24 se obtuvo la profundidad de penetración máxima, h_{max} de 127, 155, 155 y 170 nm para los 4 puntos evaluados, lo que indica que su comportamiento mecánico fue heterogéneo, con promedio de 151.75 nm, por lo que R-PE24 fue más resistente a la penetración que R-PE0, a pesar de tener envejecimiento, se puede inferir que el recubrimiento obtuvo una mayor polimerización

[178]; se observa también que las curvas presentan el efecto pop-in, relacionado con la transición del régimen elástico al régimen plástico [179], [180]. Para R-PE48 se obtuvo la profundidad de penetración máxima, $h_{\max}$ de 405, 505, 555 y 710 nm, con comportamiento mecánico heterogéneo, promedio de 544 nm, esto indica que R-PE48 tuvo menor resistencia a la penetración que R-PE0 y R-PE24, por efecto del envejecimiento, que degradó las cadenas del polímero [181]. Para R-PE72 se obtuvo la profundidad de penetración máxima, $h_{\max}$ de 460, 550, 660 y 720 nm, esto indica que R-PE72 presentó menor resistencia que R-PE0, R-PE24 y R-PE72, por efecto del envejecimiento, que degradó las cadenas del polímero [181].

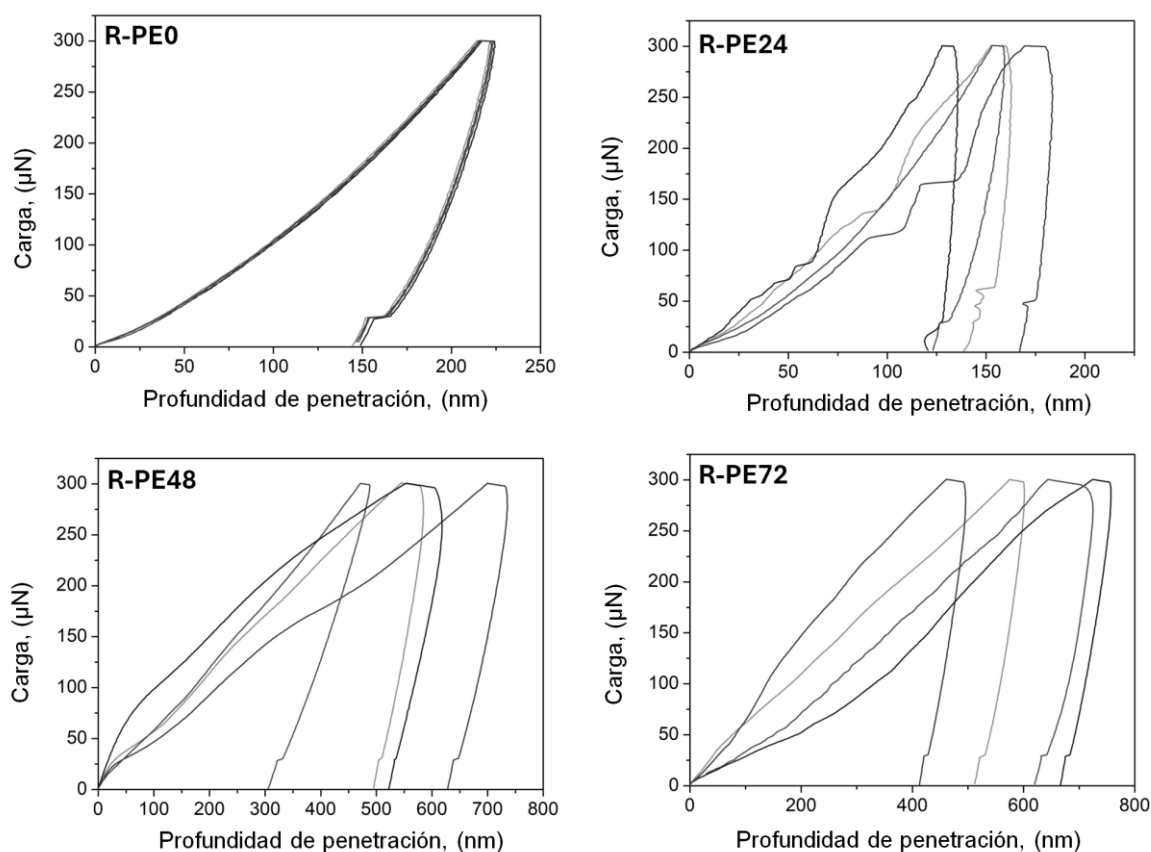


Figura 4-27. Profundidad de penetración por nanoindentación en R-PE de R-PE0, R-PE24, R-PE48 y R-PE72.

La Figura 4-28 presenta el comportamiento mecánico de R-PE0, R-PE24, R-PE48 y R-PE72, en a) dureza (H), b) módulo elástico (E) y c) rigidez (S). En a) se observa que los valores de H fueron 200 ± 5 , 260 ± 30 , 45 ± 13 y 32 ± 18 MPa para R-PE0, R-PE24, R-PE48 y R-PE72, respectivamente. En b) se observa que los valores de E fueron 5.1 ± 0.1 , 19.98 ± 2.35 , 1.23 ± 0.29 y 1.05 ± 0.23 para R-PE0, R-PE24, R-PE48 y R-PE72, respectivamente. En c) se

observa que los valores de S fueron 8017 ± 67 , 29944 ± 932 , 4356 ± 1062 y 5853 ± 1051 para R-PE0, R-PE24, R-PE48 y R-PE72, respectivamente. Se observa claramente que para R-PE24 hay un aumento en las propiedades mecánicas y que a medida que el tiempo de tratamiento de envejecimiento aumentó, se observa que en R-PE48 y R-PE72, los valores de las propiedades disminuyeron y permanecieron relativamente constantes.

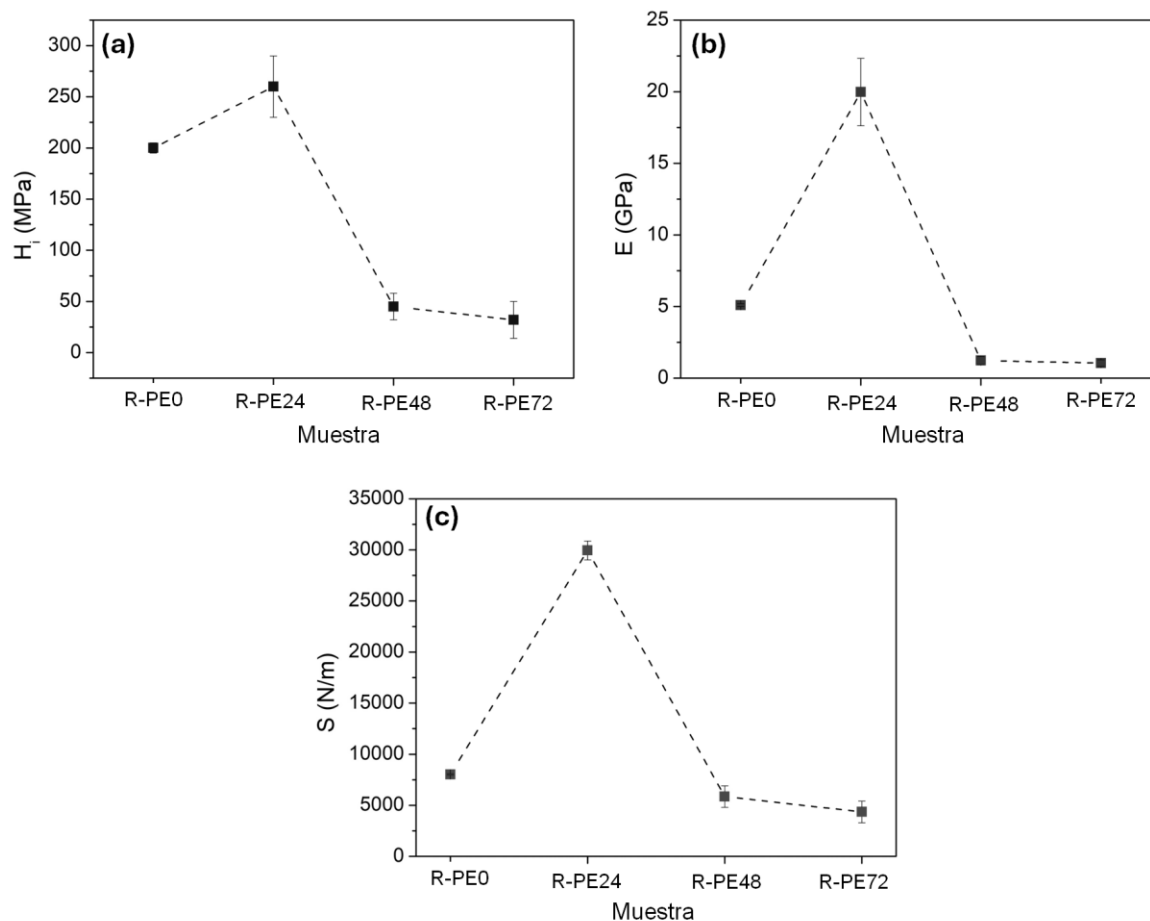


Figura 4-28. Comportamiento mecánico de R-PE0, R-PE24, R-PE48 y R-PE72, en a) dureza (H), b) módulo elástico (E) y c) rigidez (S).

El aumento de las propiedades mecánicas de R-PE24 se puede atribuir a procesos de relajación a pequeña escala, inducidos por el envejecimiento físico, que ocurren principalmente en las regiones amorfas del PPT y a la reticulación entre monómeros, que ocurre en las primeras horas de envejecimiento, lo que conduce a la contracción del volumen y la densificación de la muestra y provoca una disminución de la movilidad entre ellos y una

mayor rigidez [178]. La disminución de las propiedades mecánicas, en R-PE48 y R-PE72, se puede asociar al aumento de la cristalinidad del PPT producida por la irradiación UV [181].

4.7.4 Propiedades de adhesión de R-PE (nanorasgado/SEM)

En la Figura 4-29 se presenta la evaluación de la adhesión por nanorasgado/SEM de R-PE0, R-PE24, R-PE48 y R-PE72 sobre sustrato de vidrio, con cargas de 0.3, 0.4 y 0.5 mN. En R-PE0 no se observa delaminación ni desprendimiento de material ni grietas alrededor de las ranuras. En R-PE24 no se observa delaminación (DL) y se puede ver un ligero desprendimiento de material (DP). En R-PE72 se observa cierta deformación (DF) y DP en PC48. Se observan grandes cantidades de DP y DF, de modo que las ranuras no son claramente visibles en ciertos puntos. La morfología de las ranuras corresponde a una falla dúctil para recubrimientos blandos sobre sustratos duros. Además, se observó una buena adhesión para todos los recubrimientos incluso cuando envejecieron por intemperismo artificial. La deformación de las ranuras se atribuye a la presencia de poros que interfieren con el movimiento del interior durante la prueba.

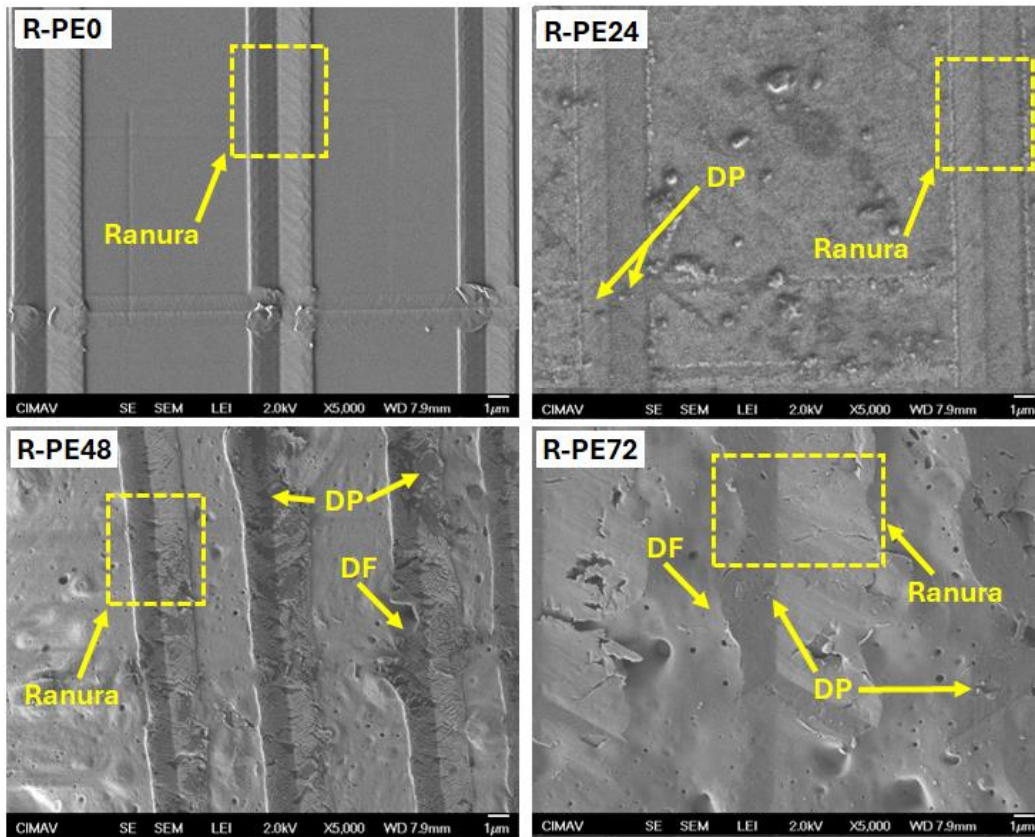


Figura 4-29. Evaluación de la adhesión por nanorastreo/SEM de R-PE0, R-PE24, R-PE48 y R-PE72 sobre sustrato de vidrio, con cargas de 0.3, 0.4 y 0.5 mN.

4.7.5 Rugosidad de R-PE (AFM)

La Figura 4-30 presenta imágenes de AFM de R-PE0, R-PE24 y R-PE48. La rugosidad promedio de R-PE0, R-PE24, R-PE48 y R-PE72 fue 6.05, 54.1, 141.8 y 746.5 nm. Podemos observar una tendencia de incremento notorio de la rugosidad conforme aumenta el tiempo de envejecimiento del espécimen.

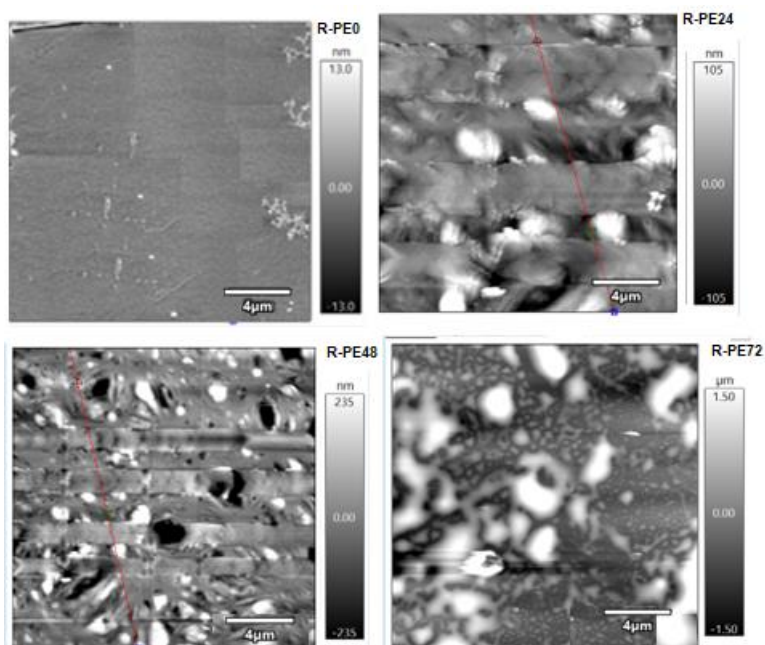


Figura 4-30. Imágenes de AFM de R-PE0, R-PE24, R-PE48 y R-PE72.

4.7.6 Morfología de recubrimientos de PPT-E (SEM)

La Figura 4-31 muestra micrografías de SEM obtenidas con electrones secundarios de R-PE0, R-PE24, R-PE48 y R-PE72. En R-PE0 se observa una superficie lisa y con pequeñas imperfecciones. En R-PE24 se observan cambios en su morfología, con aparición de poros. En R-PE48 se observa un desarrollo considerable de poros distribuidos sobre la superficie. En R-PE72 se aprecia un mayor desarrollo de poros que en R-PE48 y de mayor diámetro. Se puede afirmar que, la morfología del R-PE cambia conforme aumenta el tiempo al que es expuesto en condiciones de envejecimiento. El incremento de poros y grietas observados afectarían la capacidad del recubrimiento para proteger al concreto hidráulico [182].

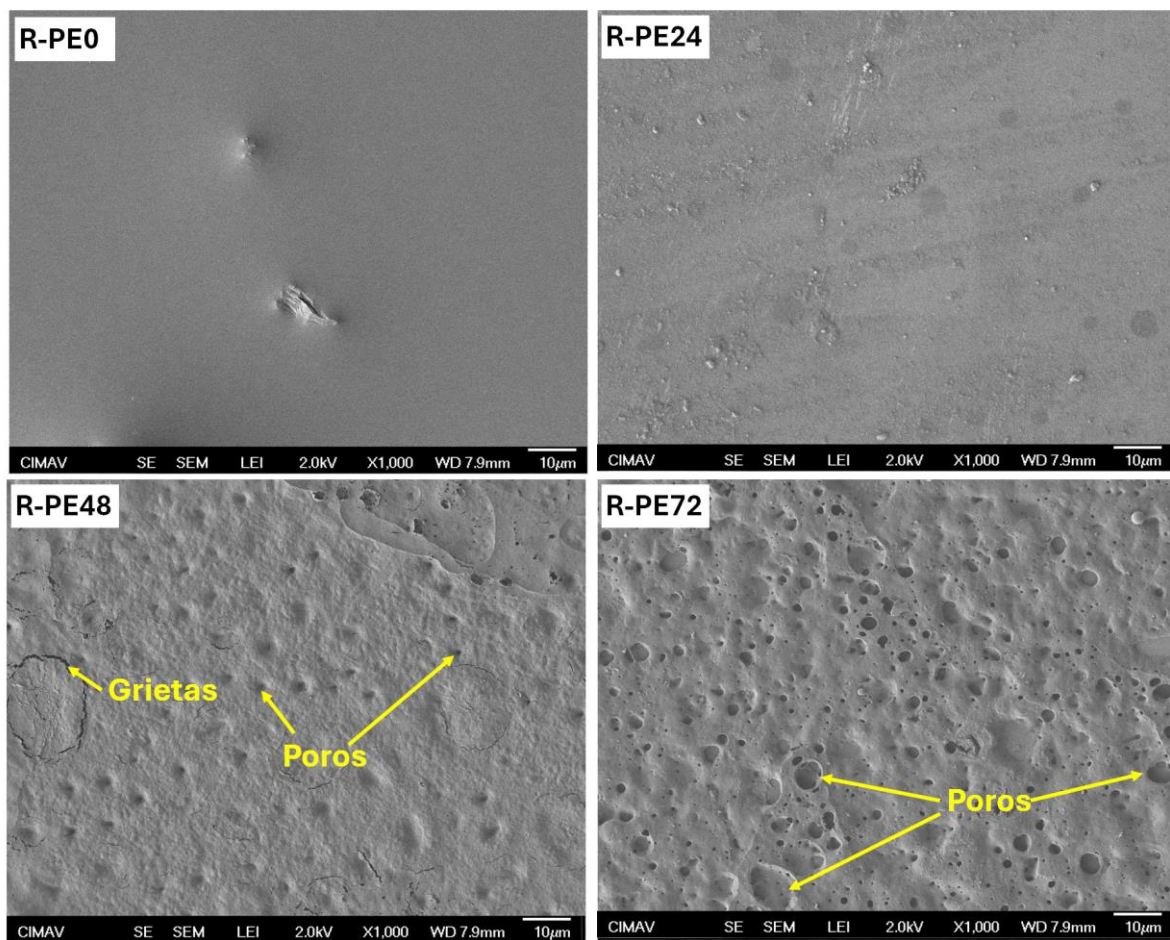


Figura 4-31. Micrografías SEM obtenidas con electrones secundarios de los R-PE0, R-PE24, R-PE48 y R-PE72.

5 CONCLUSIONES

Se obtuvieron los recubrimientos de tereftalato de polipropileno y de SiO₂-resina de poliéster insaturado basados en PET reciclado para mejorar la durabilidad del concreto hidráulico, confirmado por las conclusiones que se describen a continuación:

- Se sintetizaron PPT, RPI y RPIH a partir de la síntesis del BHPT (sintetizado a partir del reciclaje mecánico y químico del PET posconsumo), confirmado por FT-IR; para PPT por la incorporación de grupos CH₃ y una reducción significativa de OH, para RPI por la reducción de bandas atribuidas a los enlaces C=C presentes en PI y St, y para RPIH por la reducción de bandas atribuidas a los enlaces C=C presentes en PI y St, así como la aparición de bandas asociadas a enlaces Si-O-Si.
- Se aplicaron con brocha los R-P, R-R y R-H sobre sustratos de vidrio y concreto, con espesor promedio de 2.50, 10.8 y 8.9 μm, respectivamente (SEM), muy buena adhesión (5B, ASTM D3359-17), comportamiento hidrofílico (ángulo de contacto), similar al del PET.
- R-P presentó mejores propiedades mecánicas que R-R y R-H (nanoindentación, dureza y módulo elástico), debido a la naturaleza semicristalina del PET (utilizado en su síntesis) y a la naturaleza amorfa de la RPI (empleada en la síntesis de R-R y R-H). Por su parte, la R-H, mejoró sus propiedades mecánicas respecto a R-R debido a la incorporación de SiO₂ en la RPI, proveniente del acoplante TSMPM añadido en su síntesis.
- La durabilidad del concreto hidráulico fue mejorada con diferente impacto por los recubrimientos aplicados:
- Se requirieron 2 capas de R-P (R-P2) y 3 capas de R-H (RH-3) y de R-R (R-R3) para obtener muy buenas propiedades de barrera contra la carbonatación con reducción de 100, 88 y 86 % respectivamente, debido a la baja reactividad química entre el PPT, RPI y RPIH y el CO₂,
- Se requirieron 2 capas de R-P (R-P2) y 3 capas de R-H (RH-3) y de R-R (R-R3) para obtener muy buena protección contra la absorción de agua con reducción de 72.43,

72.06 y 67.28 %, respectivamente, con lo cual se logró la disminución de poros capilares en la superficie del concreto.

- El R-P3 presentó buen comportamiento para la protección contra la penetración de iones de cloruro al reducir la permeabilidad del concreto hidráulico de alta a baja. R-R3 y R-H3 presentaron mal comportamiento, porque no funcionaron como barrera protectora contra la penetración de iones de cloruro, atribuido a canales de difusión microporosos formados durante su polimerización.
- El recubrimiento R-P presentó las mejores propiedades mecánicas y de durabilidad por lo que fue sujeto a un estudio de envejecimiento por intemperismo acelerado (R-PE) para conocer su resistencia a agentes atmosféricos y presentó los siguientes efectos:
- En sus propiedades mecánicas (dureza y módulo de elasticidad), provocó el incremento a 24 h en 30%, debido a la reticulación entre monómeros de PPT y posterior decremento sustancial a 48 (83 % respecto a 24 h) y 72 h (29 % respecto a 48 h), debido a la escisión de cadenas, con la desaparición de bandas de CH₃ (FT-IR).
- En su morfología mostró mayor rugosidad (AFM), desarrollo de poros y grietas (SEM) conforme aumentó el tiempo de envejecimiento y su adherencia al sustrato también disminuyó con el tiempo, al observarse desprendimiento, agrietamiento y deformación en las ranuras (nanorasgado/SEM).

TRABAJOS A FUTURO

El presente trabajo de investigación ofrece perspectivas de trabajo a futuro, que se pudieran convertir en temas de investigación independientes, los cuales se relacionan enseguida:

- Durabilidad del concreto hidráulico en función al envejecimiento de los recubrimientos, R-P, R-R y R-H, por intemperismo acelerado.
- Recubrimientos R-P, R-R y R-H para protección contra la corrosión en sustratos metálicos.
- Reforzamiento de los recubrimientos R-P, R-R y R-H para proteger la acción de la luz UV, agente que favorece en gran medida su deterioro.
- Propiedades de auto-recuperación de los recubrimientos, R-P, R-R y R-H, lo que ayudaría a prolongar su tiempo de servicio.
- Síntesis de plásticos bio-basados a partir del reciclaje químico del PET.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] E. De Rosa, J. Fernandez-Moure y E. Tasciotti, “Polymer Coatings”. en *Encyclopedia of Nanotechnology*. B. Bhushan, Ed. Springer International Publishing, 2167–2174, 2012.
- [2] A. Simões, “Organic Coatings”. en *Materials for Construction and Civil Engineering*. Cham: Springer International Publishing, 773-798, 2015.
- [3] Y. C. Ching, TMS U. Gunathilake, K. Y. Ching, et al, “Effects of high temperature and ultraviolet radiation on polymer composites”. en *Durab. Life Predict. Biocomposites, Fibre-Reinforced Compos. Hybrid Compos.* 407–426, 2018.
- [4] S. Thomas y J. S. George, “Polymer-Based Nanoscale Materials for Surface Coatings”. en *Polym. Nanoscale Mater. Surf. Coatings*. 1–657, 2023.
- [5] M. Szociński y K. Darowicki, “Performance of organic coatings upon cyclic mechanical load”. *Prog. Org. Coatings*. 146 105718, 2020.
- [6] J. Malzbender, J. M. J. Den Toonder, A. R. Balkenende, et al, “Measuring mechanical properties of coatings: A methodology applied to nano-particle-filled sol-gel coatings on glass”. *Mater. Sci. Eng. R Reports*. 36(2–3) 47–103, 2002.
- [7] S. Zak, C. O. W. Trost, P. Kreiml, et al, “Accurate measurement of thin film mechanical properties using nanoindentation”. *J. Mater. Res.* 37(7) 1373–1389, 2022.
- [8] W. C. Oliver y G. M. Pharr, “An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments”. *J. Mater. Res.* 7(6) 1564–1583, 1992.
- [9] X. Wang, P. Xu, R. Han, et al, “A review on the mechanical properties for thin film and block structure characterised by using nanoscratch test”. *Nanotechnol. Rev.* 8(1) 628–644, 2019.
- [10] P. A. Sørensen, S. Kiil, K. Dam-Johansen, et al, “Anticorrosive coatings: A review”. *J. Coatings Technol. Res.* 6(2) 135–176, 2009.
- [11] K. Zhang, A. H. Hamidian, A. Tubić, et al, “Understanding plastic degradation and microplastic formation in the environment: A review”. *Environ. Pollut.* 274 116554, 2021.
- [12] M. Zhang, G. M. Biesold, W. Choi, et al, “Recent advances in polymers and polymer composites for food packaging”. *Mater. Today*. 53 134–161, 2022.
- [13] A. Gupta, N. Kumar y A. Sachdeva, “Factors affecting the ageing of polymer composite: A state of art”. *Polym. Degrad. Stab.* 221 110670, 2024.
- [14] S. E. Gad, “Polymers”. en *Encyclopedia of Toxicology*. Elsevier, 1045–1050, 2014.
- [15] S. Bhatia, “Natural Polymers vs Synthetic Polymer”. en *Natural Polymer Drug Delivery Systems*. Cham: Springer International Publishing, 95–118, 2016.
- [16] K. Naka, “Inorganic Polymers: Overview”. en *Encyclopedia of Polymeric Nanomaterials*. S. Kobayashi and K. Müllen, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin

- Heidelberg, 995–1000, 2015.
- [17] G. Kickelbick, “Introduction to Hybrid Materials”. en *Hybrid Materials Synthesis, Characterization and Application*. 1-6, 2007.
 - [18] K. L. Mittal y D. F. O’kane, “Vapor Deposited Silanes and other Coupling Agents,” *J. Adhes.* 8(1) 93–97, 1976.
 - [19] E.F. Vansant, P. Van Der Voort y K.C. Vrancken, “Chapter 8 Chemical modification of silica: applications and procedures”. en *Studies in Surface Science and Catalysis*. 149–192, 1995.
 - [20] A. Zare, A. K. Boukalfa, A. Nogalska, et al, “Modified polyethyleneimine as additive for enhanced direct air capture via membrane contactors”. *J. CO2 Util.* 78 102629, 2023.
 - [21] J. C. Tapia-Picazo, J. G. Luna-Bárcenas, A. García-Chávez, et al, “Polyester fiber production using virgin and recycled PET”. *Fibers Polym.* 15(3) 547–552, 2014.
 - [22] H. Chandara, Sunjoto y Sarto, “Plastic Recycling In Indonesia By Converting Plastic Wastes (PET, HDPE, LDPE, and PP) Into Plastic Pellets”. *AJSE.* 3(2) 65–72, 2015.
 - [23] Y. Celik, M. Shamsuyeva y H. J. Endres, “Thermal and Mechanical Properties of the Recycled and Virgin PET—Part I,” *Polymers (Basel)*., 14(7) 1326, 2022.
 - [24] S. Shirazimoghaddam, I. Amin, J. A. Faria Albanese, et al, “Chemical Recycling of Used PET by Glycolysis Using Niobia-Based Catalysts”. *ACS Eng. Au*, 3(1), 37–44.
 - [25] J. K. Fink, “Unsaturated Polyester Resins”. en *Reactive Polymers: Fundamentals and Applications*. Elsevier, 1-69, 2018.
 - [26] M. Vieira, “Concrete” en *Materials for Construction and Civil Engineering*. Cham: Springer International Publishing, 185–236, 2015.
 - [27] S. M. Chiew, I. S. Ibrahim, M. A. Mohd Ariffin, et al, “Development and properties of light-transmitting concrete (LTC) – A review”. *J. Clean. Prod.* 284 124780, 2021.
 - [28] C. Li, J. Li, Q. Ren, et al, “Durability of concrete coupled with life cycle assessment: Review and perspective”. *Cem. Concr. Compos.* 139 105041, 2023.
 - [29] R. Rumman, M. S. Bari, T. Manzur, et al, “A Durable Concrete Mix Design Approach using Combined Aggregate Gradation Bands and Rice Husk Ash Based Blended Cement”. *J. Build. Eng.*, 30 101303, 2020.
 - [30] C. Zanella y M. Fedel, “Surface Treatments on Al Alloys and Composites”. en *Encyclopedia of Materials: Metals and Alloys*. Elsevier, 170–178, 2022.
 - [31] A. Bórquez-Mendivil, C. P. Barrios-Durstewitz, R. E. Núñez-Jáquez, et al, “A New Sustainable PPT Coating Based on Recycled PET to Improve the Durability of Hydraulic Concrete”. *Polymers (Basel)*. 16(9) 1297, 2024.
 - [32] Y. Gao, P. romero, H. Zhang, et al, “Unsaturated polyester resin concrete: A review”. *Constr. Build. Mater.* 228 116709, 2019.
 - [33] K. Kirshanov, R. Toms, P. Melnikov, et al, “Unsaturated Polyester Resin

- Nanocomposites Based on Post-Consumer Polyethylene Terephthalate”. *Polymers (Basel)*. 14(8) 1602, 2022.
- [34] N. A. Wilson García, J. L. Almaral-Sánchez, R. A. Vargas-Ortiz, et al, “Physical and mechanical properties of unsaturated polyester resin matrix from recycled PET (based PG) with corn straw fiber”. *J. Appl. Polym. Sci.* 138(44) 51305, 2021.
 - [35] J. M. Mendivil-Escalante, J. M. Gómez-Soberón, J. L. Almaral-Sánchez, et al, “Metamorphosis in the porosity of recycled concretes through the use of a recycled polyethylene terephthalate (PET) additive. Correlations between the porous network and concrete properties”. *Materials (Basel)*. 10(2) 176, 2017.
 - [36] D. Rubeš, J. Vinklár, Š. Podzimek, et al, “Bio-based unsaturated polyester resin from post-consumer PET”. *RSC Adv.* 14(12) 8536–8547, 2024.
 - [37] N. E. Ikladios, J. N. Asaad, H. S. Emira, et al, “Alkyd resins based on hyperbranched polyesters and PET waste for coating applications”. *Prog. Org. Coatings*. 102 217–224, 2017.
 - [38] K. Bal, K. C. Ünlü, I. Acar, et al, “Epoxy-based paints from glycolysis products of postconsumer PET bottles: synthesis, wet paint properties and film properties”. *J. Coatings Technol. Res.* 14(3) 747–753, 2017.
 - [39] E. Silva, M. Fedel, F. Deflorian, et al, “Properties of post-consumer polyethylene terephthalate coating mechanically deposited on mild steels”. *Coatings*. 9(1) 28, 2019, doi: 10.3390/coatings9010028.
 - [40] M. A. Shohide, “Enhancing concrete performance using protective coating fabricated by recycled waste material”. *J. Adhes. Sci. Technol.* 38(10) 1629–1643, 2024.
 - [41] C. A. Hernández-Barrios, C. A. Cuao, M. A. Jaimes, et al, “Effect of the catalyst concentration, the immersion time and the aging time on the morphology, composition and corrosion performance of TEOS-GPTMS sol-gel coatings deposited on the AZ31 magnesium alloy”. *Surf. Coatings Technol.* 325 257–269, 2017.
 - [42] H. Yan, W. Yuanhao y Y. Hongxing, “TEOS/silane coupling agent composed double layers structure: A novel super-hydrophilic coating with controllable water contact angle value”. *Appl. Energy*. 185 2209–2216, 2017.
 - [43] U. Tiring, I. Milošev, A. Durán, et al, “Hybrid sol–gel coatings based on GPTMS/TEOS containing colloidal SiO₂ and cerium nitrate for increasing corrosion protection of aluminium alloy 7075-T6”. *J. Sol-Gel Sci. Technol.* 85(3) 546–557, 2018.
 - [44] H. Costenaro, A. Lanzutti, Y. Paint, et al, “Corrosion resistance of 2524 Al alloy anodized in tartaric-sulphuric acid at different voltages and protected with a TEOS-GPTMS hybrid sol-gel coating”. *Surf. Coatings Technol.* 324 438–450, 2017.
 - [45] T. S. Hamidon y M. H. Hussin, “Susceptibility of hybrid sol-gel (TEOS-APTES) doped with caffeine as potent corrosion protective coatings for mild steel in 3.5 wt.% NaCl”. *Prog. Org. Coatings*. 140 105478, 2020.
 - [46] Y. Liu y J. Liu, “Fabrication of TEOS/PDMS/F127 hybrid coating materials for

- conservation of historic stone sculptures”. *Appl. Phys. A Mater. Sci. Process.* 122(8) 743, 2016.
- [47] K. Hermange, S. Yuan, S. Yu, et al, “Effect of hydrophobicity in hybrid sol-gel coating for enhanced barrier property on mild steel”. *Surf. Coatings Technol.* 485 130876, Jun. 2024.
 - [48] Y. Bautista, A. Gozalbo, S. Mestre, et al, “Thermal degradation mechanism of a thermostable polyester stabilized with an open-cage oligomeric silsesquioxane”. *Materials (Basel)*. 11(1) 22, 2018.
 - [49] J. Zhou, M. Xu, X. Zhang, et al, “Preparation of highly efficient flame retardant unsaturated polyester resin by exerting the fire resistant effect in gaseous and condensed phase simultaneously” *Polym. Adv. Technol.* 30(7) 1684–1695, 2019.
 - [50] Y. Cheng, A. Khlyustova, P. Chen, et al, “Kinetics of All-Dry Free Radical Polymerization under Nanoconfinement”. *Macromolecules*. 53(24) 10699–10710, 2020.
 - [51] H. Zhang, X. Liu y N. Wang, “Nano-SiO₂/polyurethane modified unsaturated polyester resin mortar for thin layer repairing on airport pavement”. *J. Reinf. Plast. Compos.* 0(0) 1–17, 2024.
 - [52] Z. A. A. Halim, M. A. M. Yajid, M. H. Idris, et al, “Effects of Rice Husk Derived Amorphous Silica on the Thermal-Mechanical Properties of Unsaturated Polyester Composites”. *J. Macromol. Sci. Part B Phys.* 57(6) 479–496, 2018.
 - [53] V. Morote-Martínez, V. Pascual-Sánchez y J. M. Martín-Martínez, “Improvement in mechanical and structural integrity of natural stone by applying unsaturated polyester resin-nanosilica hybrid thin coating”. *Eur. Polym. J.* 44(10) 3146–3155, 2008.
 - [54] V. Morote-Martínez, R. Torregrosa-Coque y J. M. Martín-Martínez, “Addition of unmodified nanoclay to improve the performance of unsaturated polyester resin coating on natural stone” *Int. J. Adhes. Adhes.* 31(3) 154–163, 2011.
 - [55] J. L. Almaral-Sánchez, E. Rubio, A. Mendoza-Galván, et al, “Red colored transparent PMMA-SiO₂ hybrid films”. *J. Phys. Chem. Solids*. 66(10) 1660–1667, 2005.
 - [56] P. H. Dao, T. C. Nguyen, T. L. Phung, et al, “Assessment of Some Characteristics and Properties of Zirconium Dioxide Nanoparticles Modified with 3-(Trimethoxysilyl) Propyl Methacrylate Silane Coupling Agent” *J. Chem.* 2021 9925355, 2021.
 - [57] T. C. Nguyen, T. D. Nguyen, D. T. Vu, et al., “Modification of Titanium Dioxide Nanoparticles with 3-(Trimethoxysilyl)propyl Methacrylate Silane Coupling Agent”. *J. Chem.* 2020 1281407, 2020.
 - [58] A. Bórquez-Mendivil, J. A. Verdugo-Sánchez, A. Hurtado-Macías, et al, “Mortero polimérico elaborado con resina híbrida de poliéster insaturado (a partir de reciclaje de botellas de PET post- consumo) con nanoacoplante silano”. 5 17–27, 2023.
 - [59] ASTM D3359-17; Standard Test Methods for Rating Adhesion by Tape Test. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2017.
 - [60] B. Pang, Y. Jia, Y. Zhang, et al,r “Effect of the combined treatment with inorganic and

- organic agents on the surface hardening and adhesion properties of cement-based materials,” *Mater. Des.* 169 107673, 2019.
- [61] E. Rubio, J. L. Almaral, R. Ramiírez-Bon, et al, “Organic-inorganic hybrid coating (poly(methyl methacrylate)/monodisperse silica)”. *Opt. Mater. (Amst)*. 27(7) 1266–1269, 2005.
 - [62] M. Li, R. Zhao, S. Ma, et al, “Scale Deposition Inhibiting Composites by HDPE/Silicified Acrylate Polymer/Nano-Silica for Landfill Leachate Piping”. *Materials (Basel)*. 13(16) 3497, 2020.
 - [63] J. D. Rusmirović, K. T. Trifkovic, B. Bugarski, et al, “High performance unsaturated polyester based nanocomposites: Effect of vinyl modified nanosilica on mechanical properties”. *Express Polym. Lett.* 10(2) 139–159, 2016.
 - [64] B. D. Beake, S. R. Goodes, J. F. Smith, et al, “Nanoscale repetitive impact testing of polymer films”. *J. Mater. Res.* 19(1) 237–247, 2004.
 - [65] A. K. Sikder, R. Kleppinger, Z. Bashir, et al, “The splitting tendency of uniaxially-oriented PET tapes investigated with nano-indentation, nano-scratch, differential scanning calorimetry, and X-ray”. *Polym. Eng. Sci.* 60(11) 2685–2701, 2020.
 - [66] L. León-Boigues, A. Flores, M. A. Gómez-Fatou, et al, “PET/Graphene Nanocomposite Fibers Obtained by Dry-Jet Wet-Spinning for Conductive Textiles”. *Polymers (Basel)*. 15(5) 1245, 2023.
 - [67] H. Zhang, X. Li, W. Qian, et al, “Characterization of mechanical properties of epoxy/nanohybrid composites by nanoindentation”. *Nanotechnol. Rev.* 9(1) 28–40, 2020.
 - [68] M. A. Alam, U. A. Samad, M. Alam, et al, “Enhancement in nanomechanical, thermal, and abrasion properties of SiO₂ nanoparticle-modified epoxy coatings”. *Coatings*. 10(4) 310, 2020.
 - [69] M. A. Alam, U. A. Samad, A. Anis, et al, “Effects of SiO₂ and ZnO nanoparticles on epoxy coatings and its performance investigation using thermal and nanoindentation technique”. *Polymers (Basel)*. 13(9) 1490, 2021.
 - [70] S. Das, S. Halder, A. Sinha, et al, “Assessing nanoscratch behavior of epoxy nanocomposite toughened with silanized fullerene”. *ACS Appl. Nano Mater.* 1(7) 3653–3662, 2018.
 - [71] A. Medina, A. López-Villa y C. A. Vargas, “Functional Acrylic Surfaces Obtained by Scratching” *Fluids*. 6(12) 463, 2021.
 - [72] H. Ghermezcheshme, M. Mohseni y H. Yahyaei, “Use of nanoindentation and nanoscratch experiments to reveal the mechanical behavior of POSS containing polyurethane nanocomposite coatings: The role of functionality”. *Tribol. Int.* 88 66–75, 2015.
 - [73] S. Y. Lee, W. Y. Jung, J. B. Shin, et al, “Influence of nano-silica and polyethylene wax on the scratch behavior of acrylic-based polyurethane coatings”. *J. Coatings Technol. Res.* 16(5) 1295–1303.

- [74] A. Merah, M. M. Khenfer y Y. Korichi, “The effect of industrial coating type acrylic and epoxy resins on the durability of concrete subjected to accelerated carbonation”. *J. Adhes. Sci. Technol.* 29(22) 2446–2460, 2015.
- [75] K. Xia, Y. Gu, L. Jiang, et al, “Carbonation resistance of surface protective materials modified with hybrid nanoSiO₂”. *Coatings.* 11(3) 269, 2021.
- [76] P. Zhang, P. Li, H. Fan, et al, “Carbonation of Water Repellent-Treated Concrete”. *Adv. Mater. Sci. Eng.* 2017 1343947, 2017.
- [77] Y. L. Nashed, F. Zahran, M. A. Youssef, et al, “Performance evaluation of acrylate terpolymer based coating on anti-carbonation”. *Pigment Resin Technol.* 53(3) 394–405, 2022.
- [78] X. Pan, C. Shi, J. Zhang, et al, “Effect of inorganic surface treatment on surface hardness and carbonation of cement-based materials”. *Cem. Concr. Compos.* 90 218–224, 2018.
- [79] T. Y. Lo, W. Liao, C. K. Wong, et al, “Evaluation of carbonation resistance of paint coated concrete for buildings”. *Constr. Build. Mater.* 107 299–306, 2016.
- [80] H. Y. Moon, D. G. Shin y D. S. Choi, “Evaluation of the durability of mortar and concrete applied with inorganic coating material and surface treatment system”. *Constr. Build. Mater.* 21(2) 362–369, 2007.
- [81] W. Zheng, W. C. Chen, T. Feng, et al, “Enhancing chloride ion penetration resistance into concrete by using graphene oxide reinforced waterborne epoxy coating”. *Prog. Org. Coatings.* 138 105389, 2020.
- [82] M. R. Sakr y M. T. Bassuoni, “Effect of Nano-Based Coatings on Concrete under Aggravated Exposures”. *J. Mater. Civ. Eng.* 32(10), 2020.
- [83] P. Zhang, W. Wang, Y. Lv, et al, “Effect of Polymer Coatings on the Permeability and Chloride Ion Penetration Resistances of Nano-Particles and Fibers-Modified Cementitious Composites”. *Polymers (Basel).* 14(16) 3258, 2022.
- [84] M. Medeiros y P. Helene, “Efficacy of surface hydrophobic agents in reducing water and chloride ion penetration in concrete”. *Mater. Struct. Constr.* 41(1) 59–71, 2008.
- [85] J. Bao, S. Li, P. Zhang, et al, “Influence of exposure environments and moisture content on water repellency of surface impregnation of cement-based materials”. *J. Mater. Res. Technol.* 9(6) 12115–12125, 2020.
- [86] J. Li, P. Chen, H. Cai, et al, “Investigation of Silane Impregnation for Protection of Alkali-Activated Slag Mortar”. *Adv. Mater. Sci. Eng.* 2021 9970753, 2021.
- [87] H. Husni, M. R. Nazari, H. M. Yee, et al, “Superhydrophobic rice husk ash coating on concrete”. *Constr. Build. Mater.* 144 385–391, 2017.
- [88] A. F. B. Carneiro, P. A. Daschevi, E. A. Langaro, et al, “Effectiveness of surface coatings in concrete: chloride penetration and carbonation”. *J. Build. Pathol. Rehabil.* 6(1) 1–8, 2021.
- [89] M. Cichecka, B. Pałys, B. Wilbik-Hałgas, et al, “Accelerated aging studies of the

- selected commercial films”. *Polimery/Polymers*. 66(6) 350–356, 2021.
- [90] M. Philip y F. Al-Azzawi, “Effects of Natural and Artificial Weathering on the Physical Properties of Recycled Poly(ethylene terephthalate)”. *J. Polym. Environ.* 26(8) 3139–3148, 2018.
 - [91] R. N. Manjunath, V. Khatkar y B. K. Behera, “Investigation on Seawater Ageing of PET-Epoxy Composites: An Ecological and Sustainable Approach for Marine Applications”. *J. Polym. Environ.* 28(8) 2289–2300, 2020.
 - [92] Y. C. Chiou, M. Y. Shen, C. L. Chiang, et al, “Effects of Environmental Aging on the Durability of Wood-Flour Filled Recycled PET/PA6 Wood Plastic Composites”. *J. Polym. Environ.* 30(4) 1300–1313, 2022.
 - [93] M. Vasylius, A. Tadžijevs, D. Šapalas, et al, “Degradation of Mechanical Properties of A-PET Films after UV Aging”. *Polymers (Basel)*. 15(20) 4166, 2023.
 - [94] A. Gok, D. K. Ngendahimana, C. L. Fagerholm, et al, “Predictive models of poly(ethylene-terephthalate) film degradation under multi-factor accelerated weathering exposures”. *PLoS One*. 12(5) e0177614, 2017.
 - [95] M. Funabashi, F. Ninomiya, A. Oishi, et al, “Highly Accelerated Aging Method for Poly(ethylene terephthalate) Film Using Xenon Lamp with Heating System”. *J. Polym.* 2016 8547524, 2016.
 - [96] M. M. Ferreira, E. A. da Silva, F. Cotting, et al, “UV weathering and performance of a novel corrosion protective coating on steel made from recycled polyethylene terephthalate (PET)”. *Corros. Eng. Sci. Technol.* 56(3) 199–209, 2021.
 - [97] B. Arkles, “Tailoring Surfaces with Silanes”. *Chemtech*. 7(12) 766–777, 1977.
 - [98] J. Wei, F. Kong, J. Liu, et al, “Effect of Sisal Fiber and Polyurethane Admixture on the Strength and Mechanical Behavior of Sand,” *Polymers (Basel)*. 10 (10) 1121, 2018.
 - [99] H. Nourizadeh, A. Mirzaghorbanali, K. McDougall, et al, “Characterization of mechanical and bonding properties of anchoring resins under elevated temperature”. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 170 105506, 2023.
 - [100] E. Kiely, R. Zwane, R. Fox, et al, “Density functional theory predictions of the mechanical properties of crystalline materials”. *CrystEngComm*. 23(34) 5697–5710, 2021.
 - [101] J. Tomastik y R. Ctvrtlik, “Nanoscratch test — A tool for evaluation of cohesive and adhesive properties of thin films and coatings”. *EPJ Web Conf.* 48 00027, 2013.
 - [102] Anvita Sheel y Deepak Pant, “4 - Chemical Depolymerization of PET Bottles via Glycolysis”. en *Recycling of Polyethylene Terephthalate Bottles*, S. Thomas, K. Kanny, M. G. Thomas, A. Rane y V. K. Abitha, 1st. Edición, Elsevier, 2019, 61-84.
 - [103] S. R. Shukla y A. M. Harad, “Glycolysis of polyethylene terephthalate waste fibers”. *J. Appl. Polym. Sci.* 97(2) 513–517, 2005.
 - [104] M. Kazemi, S. Faisal, y E. H. Fini, “State of the art in recycling waste thermoplastics

- and thermosets and their applications in construction”. *Resour. Conserv. Recycl.* 174 105776, 2021.
- [105] V. Sinha, M. R. Patel y J. V. Patel, “Pet waste management by chemical recycling: A review”. *J. Polym. Environ.* 18(1) 8–25, 2010.
 - [106] U. R. Vaidya y V. M. Nadkarin, “Unsaturated polyester resins from poly(ethylene terephthalate) waste. I. synthesis and characterization”. *Ind. Eng. Chem. Res.* 26 194–198, 1987.
 - [107] Y. S. Yang y J. P. Pascault, “Modeling of unsaturated polyester prepolymer structures. II. Hydroxyl and carboxyl functionalities”. *J. Appl. Polym. Sci.* 64(1) 147–156, 1997.
 - [108] J. M. Salla y X. Ramis, “A kinetic study of the effect of three catalytic systems on the curing of an unsaturated polyester resin”. *J. Appl. Polym. Sci.* 51(3) 453–462, 1994.
 - [109] A. Ravve, *Principles of Polymer Chemistry*, 3er Ed. New York, NY: Springer New York, 2012, 412-419.
 - [110] M. J. Ungsson-Nieblas, E. Rubio-Rosas, R. A. Vargas-Ortiz, et al, “Polycarboxylate-based superplasticizer with added silica sub-microspheres for use in Portland cement materials”. *Rev. Mex. Ing. Química.* 22(3) 1–19, 2023.
 - [111] A. H. Mohammed, M. B. Ahmad, N. A. Ibrahim, et al, “Effect of crosslinking concentration on properties of 3-(trimethoxysilyl) propyl methacrylate/N-vinyl pyrrolidone gels”. *Chem. Cent. J.* 12(1) 1–9, 2018.
 - [112] X. Fan, S. Gu, L. Wu, et al, “Preparation and characterization of thermoresponsive poly(N-isopropylacrylamide) copolymers with enhanced hydrophilicity”. *E-Polymers.* 20(1) 561–570, 2020.
 - [113] D. Liu, C. Wang, J. Gonzalez-Libreros, et al, “A review of concrete properties under the combined effect of fatigue and corrosion from a material perspective,” *Constr. Build. Mater.* 369 130489, 2023.
 - [114] V. Mechtcherine, "Durability of Structures Made of or Strengthened Using Textile-Reinforced Concrete". en *Textile Fibre Composites in Civil Engineering*. T. Triantafillou, Elsevier Ltd., 2016, 151-168.
 - [115] ACI (American Concrete Institute), “Results for permeability of concrete”. Consultado el 28/10/2024 en <https://www.concrete.org/topicsinconcrete/topicdetail/permeabilityofconcrete?search=permeabilityofconcrete>.
 - [116] ASTM C1202, “Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete’s Ability to Resist Chloride Ion Penetration”. *Am. Soc. Test. Mater.* C 1–8, 2012. /C1202-12.2.
 - [117] Y. Wang, L. Tang, Y. Jia, et al, “Scheme Design and Experimental Study of Selective Thermal Stimulation for Concrete Microcracks Based on IR Thermography”. *J. Nondestruct. Eval.* 40(1) 32, 2021.
 - [118] Y. Wang, L. Li, M. An, et al, “Factors Influencing the Capillary Water Absorption Characteristics of Concrete and Their Relationship to Pore Structure”. *Appl. Sci.* 12(4) 2211, 2022.

- [119] ASTM C 1585-20, "Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes". *Am. Soc. Test. Mater.* 1–6, 2007.
- [120] R. B. Figueira, J. M. de Almeida, B. Ferreira, et al, "Optical fiber sensors based on sol–gel materials: design, fabrication and application in concrete structures". *Mater. Adv.* 2(22) 7237–7276, 2021.
- [121] H. A. Y. Alshaeer, J. M. Irwan, A. F. Alshalif, et al, "Review on Carbonation Study of Reinforcement Concrete Incorporating with Bacteria as Self-Healing Approach". *Materials (Basel)*. 15(16) 5543, 2022.
- [122] Rilem Recommendations, "CPC-18 Measurement of hardened concrete carbonation depth". *Mater. Struct.* 21(6) 453–455, 1988.
- [123] T. Sang, C. J. Wallis, G. Hill, et al, "Polyethylene terephthalate degradation under natural and accelerated weathering conditions". *Eur. Polym. J.* 136 109873, 2020.
- [124] ASTM G154-23, "Operating Fluorescent Light Apparatus for UV Exposure of Nonmetallic Materials". *Am. Soc. Test. Mater.* 1–11, 2023.
- [125] M. Frigione y A. Rodríguez-Prieto, "Can Accelerated Aging Procedures Predict the Long Term Behavior of Polymers Exposed to Different Environments?". *Polymers (Basel)*. 13(16) 2688, 2021.
- [126] ASTM C192/C192M-14, "Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory". *Am. Soc. Test. Mater.* 04 1–8, 2014.
- [127] NACE International, "Joint Surface Preparation Standard Surface Preparation of Concrete" 4906(21066) 2–9, 2003.
- [128] S. H. Chen, L. Liu y T. C. Wang, "Small scale, grain size and substrate effects in nano-indentation experiment of film-substrate systems". *Int. J. Solids Struct.* 44(13) 4492–4504, 2007.
- [129] A. Kumar y R. K. Gupta, *Fundamentals of Polymer Engineering*. Third edition. | Boca Raton, FL : CRC Press/Taylor & Francis Group, 2018, 188-200.
- [130] S. Park, S. Thanakkasaranee, H. Shin, et al, "Pet/bio-based terpolyester blends with high dimensional thermal stability" *Polymers (Basel)*. 13(5) 728, 2021.
- [131] N. D. Pingale, V. S. Palekar y S. R. Shukla, "Glycolysis of Postconsumer Polyethylene Terephthalate Waste". *J. Appl. Polym. Sci.* 115 249–254, 2010.
- [132] M. E. Tawfik, "Preparation and characterization of water-extended polyester based on recycled poly(ethylene terephthalate)". *J. Appl. Polym. Sci.* 89(13) 3693–3699, 2003.
- [133] B. H. Stuart, *Infrared Spectroscopy: Fundamentals and Applications*. Wiley, 2004, 71-93.
- [134] M. Gall, P. J. Freudenthaler, J. Fischer, et al, "Characterization of composition and structure–property relationships of commercial post-consumer polyethylene and polypropylene recyclates". *Polymers (Basel)*. 13(10) 1574, 2021.
- [135] R. O. Ebewele, *Polymer Science and Technology*. CRC Press, 2000.

- [136] E. L. Rodriguez, “The effect of free radical initiators and fillers on the cure of unsaturated polyester resins”. *Polym. Eng. Sci.* 31(14) 1022–1028, 1991.
- [137] M. Carmen Matías, A. Larena, M. De La Ulagaes Orden, et al, “Application of ftir spectroscopy to the study of curing of glass reinforced polyester composites”. *Macromol. Symp.* 94(1) 273–282, 1995.
- [138] J. Grenet, S. Marais, M. T. Legras, et al, “DSC and TSDC study of unsaturated polyester resin: Influence of the promoter content”. *J. Therm. Anal. Calorim.* 61(3) 719–730, 2000.
- [139] K. Suyama, M. Kubota, M. Shirai, et al, “Chemical recycling of networked polystyrene derivatives using subcritical water in the presence of an aminoalcohol”. *Polym. Degrad. Stab.* 95(9) 1588–1592, 2010.
- [140] J. Purohit, G. Chawada, B. Choubisa, et al, “Polyester Polyol Derived From Waste Poly (Ethylene Terephthalate) for Coating Application on Mild Steel Polyester Polyol Derived From Waste Poly (Ethylene Terephthalate) for Coating Application on Mild Steel” *Chem. Sci. J.* 2012 (CSJ-76) 1–7, 2012.
- [141] V. Hermán, H. Takacs, F. Duclairoir, et al, “Core double-shell cobalt/graphene/polystyrene magnetic nanocomposites synthesized by in situ sonochemical polymerization”. *RSC Adv.* 5(63) 51371–51381, 2015.
- [142] D. Soriano, A. Mazo, J. Rubio, F. Rubio, and J. L. Oteo, et al, “Degradación térmica de nanocomposites TEOS/resol y γ -APS/resol”. *Bol. la Soc. Esp. Ceram. y Vidr.* 45(6) 379–388, 2006.
- [143] C. M. Zheng, X. D. Li, H. Wang, et al, “Evolution of crystallization and its effects on properties during pyrolysis of Si-Al-C-(O) precursor fibers”. *J. Mater. Sci.* 43(9) 3314–3319, 2008.
- [144] N. A. Rangel-Vázquez y T. Leal-García, “Spectroscopy analysis of chemical modification of cellulose fibers”. *J. Mex. Chem. Soc.* 54(4) 192–197, 2010.
- [145] A. H. Mohammed, M. B. Ahmad, N. O. R. A. Ibrahim, et al, “Synthesis and monomer reactivity ratios of [3(trimethoxysilyl) propyl methacrylate/N-vinyl pyrrolidone] copolymer”. *Int. J. Chem. Sci.* 14(4) 2279–2291, 2016.
- [146] R. Salgado-Delgado y A.M. Salgado-Delgado, “Theoretical and experimental spectroscopic analysis by FTIR in the effect of the silanes on the chemical modification of the surface of rice husk”. *Int. J. Eng. Res. Appl.* 6(2) 04–07, 2016.
- [147] R. Miandad, M. Rehan, M. A. Barakat, et al, “Catalytic pyrolysis of plastic waste: Moving toward pyrolysis based biorefineries”. *Front. Energy Res.* 7(27) 1–17, 2019.
- [148] T. Chowdhury y Q. Wang, “Study on Thermal Degradation Processes of Polyethylene Terephthalate Microplastics Using the Kinetics and Artificial Neural Networks Models”. *Processes.* 11(2) 496, 2023.
- [149] B. T. I. Ali, C. Nareswari, T. Gunawan, et al, “Utilization of plastic bottle waste of polyethylene terephthalate as a low-cost membrane and its modifications for gas separation”. *J. Ind. Eng. Chem.* 127 378–389, 2023.

- [150] Y. Chen, Z. Wang, G. Chen, et al, “Synergistic effects and products yield analyses based on co-pyrolysis of poplar tree and rape stalks with polyethylene terephthalate and polypropylene”. *J. Energy Inst.* 112 101461, 2024.
- [151] S. Ducoli, S. Federici, M. Cocca, et al, *et al.*, “Characterization of polyethylene terephthalate (PET) and polyamide (PA) true-to-life nanoplastics and their biological interactions ☆,” vol. 343, no. September 2023, 2024.
- [152] J. K. Kim, Y. S. Jeong, J. W. Kim, and J. S. Kim, “Two-stage thermochemical conversion of polyethylene terephthalate using steam to produce a clean and H₂- and CO-rich syngas,” *Energy*. 276 123150, 2024.
- [153] Y. Lin, B. Yu, X. Jin, L. Song, et al, “Study on thermal degradation and combustion behavior of flame retardant unsaturated polyester resin modified with a reactive phosphorus containing monomer”. *RSC Adv.* 6(55) 49633–49642, 2016.
- [154] E. Kandare, B. K. Kandola, D. Price, et al, “Study of the thermal decomposition of flame-retarded unsaturated polyester resins by thermogravimetric analysis and Py-GC/MS”. *Polym. Degrad. Stab.* 93(11) 1996–2006, 2008.
- [155] K. Ren y Y. Tsai, “Thermal hazard characteristics of unsaturated polyester resin mixed with hardeners,” *Polymers (Basel)*. 13(4) 522, 2021.
- [156] M. Criado, I. Sobrados y J. Sanz, “Polymerization of hybrid organic-inorganic materials from several silicon compounds followed by TGA/DTA, FTIR and NMR techniques”. *Prog. Org. Coatings*. vol. 77(4) 880–891, 2014.
- [157] M. Kazemi, S. Faisal Kabir y E. H. Fini, “State of the art in recycling waste thermoplastics and thermosets and their applications in construction”. *Resour. Conserv. Recycl.* 174 105776, 2021.
- [158] M. Hanson y A. Wypych, “Introduction”. en *Databook of Curatives and Crosslinkers*. Elsevier, 2019, 1–2.
- [159] L. F. Francis y C. C. Roberts, “Dispersion and Solution Processes”. en *Materials Processing*. Elsevier, 2016, 415–512.
- [160] A. Benke, J. Sonnenberg, K. Oelschlägel, et al, “Wettability after Artificial and Natural Weathering of Polyethylene Terephthalate”. *Environments*. 9(11) 34, 2022.
- [161] T. Demir Caliskan, L. Wei y I. Luzinov, “Perfluoropolyether-based oleophobic additives: Influence of molecular weight distribution on wettability of polyethylene terephthalate films”. *J. Fluor. Chem.* 244 109747, 2021.
- [162] A. Vesel, R. Zaplotnik, G. Primc, et al, “Evolution of the surface wettability of PET polymer upon treatment with an atmospheric-pressure plasma jet”. *Polymers (Basel)*. 12(1) 87, 2020.
- [163] Z. Jia, X. Li y Q. Zhao, “Effect of artificial weathering on surface properties of unsaturated polyester (UP) resin”. *Mater. Chem. Phys.* 121(1–2) 193–197, 2010.
- [164] B. Xu y Q. Zhang, “Preparation and Properties of Hydrophobically Modified Nano-SiO₂ with Hexadecyltrimethoxysilane”. *ACS Omega*. 6(14) 9764–9770, 2021.

- [165] L. Silvia, I. Hasanah y M. Zainuri, “Hydrophobic of polyethylene/SiO₂ modified coating for self cleaning material”. *AIP Conference Proceedings*. 2202 020004, 2019.
- [166] N. Dusunceli y O. U. Colak, “Modelling effects of degree of crystallinity on mechanical behavior of semicrystalline polymers”. *Int. J. Plast.* 24(7) 1224–1242, Jul. 2008.
- [167] B. M. Gorelov, A. M. Gorb, O. I. Polovina, et al, “Filler’s impact on structure and physical properties in polyester resin–oxide nanocomposites”. *Adsorpt. Sci. Technol.* 36(1–2) 549–570, 2018.
- [168] C. Yang, X. Xing, Z. Li, et al, “A Comprehensive Review on Water Diffusion in Polymers Focusing on the Polymer–Metal Interface Combination”. *Polymers (Basel)*. 12(1) 138, 2020.
- [169] F. Korkees, R. Swart y I. Barsoum, “Diffusion mechanism and properties of chemical liquids and their mixtures in 977-2 epoxy resin”. *Polym. Eng. Sci.* 62(5) 1582–1592, 2022.
- [170] B. Pigino, A. Leemann, E. Franzoni, et al, “Ethyl silicate for surface treatment of concrete - Part II: Characteristics and performance”. *Cem. Concr. Compos.* 34(3) 313–321, 2012.
- [171] K. Marsh y B. Bugusu, “Food packaging - Roles, materials, and environmental issues: Scientific status summary”, *J. Food Sci.* 72(3) R39-R55, 2007.
- [172] R. Nisticò, “Polyethylene terephthalate (PET) in the packaging industry”. *Polym. Test.* 90 106707, 2020.
- [173] L. Ansaloni, B. Alcock y T. A. Peters, “Effects of CO₂ on polymeric materials in the CO₂ transport chain: A review”. *Int. J. Greenh. Gas Control.* 94 102930, 2020.
- [174] A. Merah, M. M. Khenfer y Y. Korichi, “The effect of industrial coating type acrylic and epoxy resins on the durability of concrete subjected to accelerated carbonation”. *J. Adhes. Sci. Technol.* 29(22) 2446–2460, 2015.
- [175] F. J. Horne, J. J. Liggat, W. A. MacDonald, et al, “Photo-oxidation of poly(ethylene terephthalate) films intended for photovoltaic backsheet”. *J. Appl. Polym. Sci.* 137(17) 48623, 2020.
- [176] A. Bórquez-Mendivil, J. L. Almaral-Sánchez, J.E. Leal-Perez, et al, “Artificial weathering aging of PPT coatings made from recycled PET to protect concrete: Nanomechanical properties evaluation”. *J. Mater. Res. Technol.* 35 1419–1428, 2025.
- [177] H. Cui, R. Hanus y M. R. Kessler, “Degradation of ROMP-based bio-renewable polymers by UV radiation,” *Polym. Degrad. Stab.*, 98(11) 2357–2365, 2013.
- [178] R. Panowicz, M. Konarzewski, T. Durejko, et al, “Properties of Polyethylene Terephthalate (PET) after Thermo-Oxidative Aging”. *Materials (Basel)*. 14(14) 3833, 2021.
- [179] H. Irschik y H. J. Holl, “Mechanics of variable-mass systems - Part 1: Balance of mass and linear momentum”. *Appl. Mech. Rev.* 57 (1–6) 145–160, 2004.

- [180] M. V. Swain y J. T. Hagan, “Indentation plasticity and the ensuing fracture of glass,” *J. Phys. D. Appl. Phys.* 9(15) 2201–2214, 1976.
- [181] K. Aljoumaa y M. Abboudi, “Physical ageing of polyethylene terephthalate under natural sunlight: correlation study between crystallinity and mechanical properties”. *Appl. Phys. A.* 122(6) 1-10, 2016
- [182] H. Wang, P. Feng, Y. Lv, et al, “A comparative study on UV degradation of organic coatings for concrete: Structure, adhesion, and protection performance”. *Prog. Org. Coatings.* 149 105892, 2020.

ANEXOS

REQUISITOS DE TITULACIÓN	
REQUISITO	PRODUCCIÓN
Artículo científico publicado en revista indexada en Journal Citation Reports (JCR)	Artificial weathering aging of PPT coatings made from recycled PET to protect concrete: nanomechanical properties evaluation, <i>Journal of Materials Research and Technology</i> , 2025 . https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.01.135 (Figura 5-1).
	A New Sustainable PPT Coating Based on Recycled PET to Improve the Durability of Hydraulic Concrete, <i>Polymers</i> , 2024 . https://doi.org/10.3390/polym16091297 (Figura 5-2).
	Hybrid Coatings of SiO ₂ -Recycled PET Unsaturated Polyester Resin by Sol-Gel Process, <i>Polymers</i> , 2022 . https://doi.org/10.3390/polym14163280 (Figura 5-3).
Estancia de investigación con duración mínima de 6 meses	Estancia de investigación en el Centro de Investigación en Materiales Avanzados S.C. (CIMAV), sede Chihuahua. Inicio: 11 de marzo de 2024. Fin: 13 de septiembre de 2024. Asesor: Dr. Abel Hurtado Macías (Figura 5-4).
Examen Test of English as a Foreign Language (TOEFL) con puntaje mínimo de 475	Examen TOEFL con puntaje de 490 (Figura 5-5).
Congreso nacional	- Reunión Interinstitucional para la Divulgación de la Ciencia de Materiales (RIDCM 2024), Universidad de Autónoma de Sinaloa, 2024 (Figura 5-6). - XXVI Reunión Universitaria de Investigación en Materiales (RUIM) 2023, Universidad de Sonora, 2023 (Figura 5-7).
Congreso internacional	- VIII Coloquio Internacional de Investigación Universitaria, Universidad de Guadalajara, 2024 (Figura 5-8). - Conferencia internacional LatinXChem, 2024 (Figura 5-9). - XV Coloquio Bienal en Ciencia de Materiales 4ta. Edición Internacional, Universidad de Sonora, 2023 (Figura 5-10).

	- Conferencia internacional LatinXChem 2023 (Figura 5-11). - VI Coloquio Internacional de Investigación Universitaria, Universidad de Guadalajara, 2022 (Figura 5-12). - International Virtual Conference on Materials Science, Engineering and Technology, 2022 (Figura 5-13). - XV International Conference on Surfaces, Materials and Vacuum, Sociedad Mexicana de Ciencia y Tecnología de Superficies y Materiales, 2022 (Figura 5-14). - Conferencia internacional, LatinXChem 2022 (Figura 5-15).
Profesor adjunto	Profesor adjunto de los cursos a nivel maestría: - Temas Selectos de Materiales (Figura 5-16). - Materiales cementicios modificados con polímeros (Figura 5-17). - Tecnología avanzada del concreto y nuevos materiales (Figura 5-18).

PRODUCCIÓN COMPLEMENTARIA	
PRODUCTO	INFORMACIÓN
Artículo científico publicado en revista arbitrada	Mortero polimérico elaborado con resina híbrida de poliéster insaturado (a partir de reciclaje de botellas de PET postconsumo) con nanoacoplante silano, <i>Revista Ingeniería y Tecnología UAS</i> , 2023 (Figura 5-19).
	Evaluación de la permeabilidad por el método de ion cloruro en concreto cementicio recubierto con resinas de poliéster insaturado basadas en PET reciclado y óxido de silicio. XXXVIII <i>Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de Electroquímica</i> , 2023 (Figura 5-20).
Direcciones de tesis	Estudiante: Yamilet Viridiana Moreno Rubio. Tesis: Reciclaje de botellas de PET para la elaboración de recubrimientos a partir de bis(2-hidroxipropilo)-tereftalato (subproducto de reciclaje del PET). Fecha de obtención de grado: 25/06/2024 (Figura 5-21).
	Estudiante: Adilene Margarita Torres Beltrán. Tesis: Carbonatación en concreto hidráulico recubierto con bis-2-hidroxipropil-tereftalato (subproducto de

	reciclaje del PET). Fecha de obtención de grado: 21/06/2024 (Figura 5-22).
	Resistencia a compresión de mortero polimérico elaborado con resina de poliéster insaturado a partir de PET reciclado y nanoacoplante 3-trimetoxisilil propil metacrilato. Fecha de obtención de grado: 21/06/2022 (Figura 5-23).
Distinciones	Investigador por el Sistema Sinaloense de Investigadores y Tecnólogos: Folio: SSIT 2024-2026-1409 (Figura 5-24).
	1er lugar en concurso de trabajos de investigación terminados: VIII Coloquio Internacional de Investigación Universitaria 2024 organizado por la Universidad de Guadalajara (Figura 5-25).
Divulgación	Conferencias impartidas a nivel bachillerato y licenciatura durante las ediciones 2021, 2022, 2023 y 2024 de la Jornada Universitaria de la Ciencia-UAS (JUC-UAS), Ciclo de conferencias 2024 en Centro de Estudios Superiores en Ciencias Jurídicas y Tecnológicas (CESCIJUC) y Día de la Ingeniería Industrial 2024 en Universidad Hispana campus Los Mochis (UNHI-Los Mochis) (Figura 5-26 y Figura 5-27).
	Carteles presentados a nivel licenciatura durante las ediciones 2021, 2022, 2023 y 2024 de la JUC-UAS (Figura 5-28).
	Talleres impartidos en la edición 2024 de la JUC-UAS: 1) Mecanismos de deterioro en el concreto hidráulico: Identificación y Prevención y 2) Tecnología de polímeros: Desde la Teoría a la Práctica de Laboratorio (Figura 5-29).



Contents lists available at ScienceDirect

Journal of Materials Research and Technology

journal homepage: www.elsevier.com/locate/jmrt

Artificial weathering aging of PPT coatings made from recycled PET to protect concrete: Nanomechanical properties evaluation

Adrián Bórquez-Mendivil^a, Jorge Luis Almaral-Sánchez^a, Jesus Eduardo Leal-Perez^a, César Modesto-Acosta^b, Joaquín Flores-Valenzuela^a, Orlando Auciello^c, Blanca Alicia García-Grajeda^a, José Miguel Mendivil-Escalante^a, Sergio G. Flores-Gallardo^d, Roberto P. Talamantes-Soto^d, Abel Hurtado-Macías^{d,*}

^a Universidad Autónoma de Sinaloa, Facultad de Ingeniería Mochis, Gral. Ángel Flores S/N, Fracc. Las Fuentes, Los Mochis, Sinaloa, C.P. 81223, México

^b Tecnológico Nacional de México, Campus Chihuahua, Av. Tecnológico 2909, Chihuahua, C.P. 31200, México

^c University of Texas at Dallas, Departments of Materials Science and Engineering and Bioengineering, 800 W. Campbell Rd., RL10, Richardson, TX, 75080-3021, USA

^d Centro de Investigación en Materiales Avanzados S.C., Department of Materials Engineering and Chemistry, Chihuahua, México

ARTICLE INFO

Handling Editor: M Meyers

Keywords:

PPT coating
Recycled PET
Artificial weathering
Nanomechanical properties
Nanoindentation
Nanoscratching

ABSTRACT

The objective of this work was to artificial weathering age polypropylene terephthalate (PPT) coatings obtained from polyethylene terephthalate (PET) recycled for the evaluation of their nanomechanical properties, which are proposed for the protection of hydraulic concrete. PPT was polymerized by transesterification from recycled PET containers using glycolysis. Besides, PPT used to produce coatings on glass substrates via the dip coating method. The morphology and microstructure were analyzed by scanning electron microscopy (SEM) and atomic force microscopy (AFM); with these techniques, it was possible to identify the deterioration of the coating (porosity and origin of cracks) and the increase in roughness (6 ± 1 nm to 746 ± 5 nm), respectively. Likewise, the nanomechanical properties, such as hardness by indentation (H_i), hardness by scratching (H_s), and elastic modulus (E), of the PPT coatings were evaluated by the depth sensing indentation method depending on their aging treatment. The analysis of the molecular degradation of the PPT coatings was performed by Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR), which revealed that the rupture of C–H bonds caused the nanomechanical properties of the coatings to decrease; $H_i = 200 \pm 5$ MPa to $H_i = 32 \pm 18$ MPa, $H_s = 125 \pm 12$ MPa to $H_s = 12 \pm 5$ MPa and $E = 5.1 \pm 1.01$ GPa to $E = 1.05 \pm 0.23$ GPa.

1. Introduction

The global production of plastic waste represents an increase in the environmental challenges and problems that society faces [1]. In daily life, polymers, including polyvinyl chloride, polypropylene, polystyrene, acrylic, and polyethylene terephthalate, among others, have become very common materials used to satisfy human needs [2,3]. PET can be recycled mechanically to reduce its size and obtain flakes and chemically to obtain glycolized PET products [4]. These glycolized products have been used as primal matter for the manufacture of alkyd resins [5], epoxy resins [6], and hybrid resins of unsaturated polyesters

for the production of coatings [7].

The coatings can be used for protection, decorative purposes or specific functions [8], and their performance depends strongly on their structural and mechanical properties and their adhesive properties to the substrate [9]. Nanoindentation has become an integral method to evaluate nanomechanical properties, for instance hardness and elastic modulus, in the field of coatings through their deformation at very small scales [10,11] using the well-known equations established by Oliver-Pharr [12]. For this technique, the penetration depth produced must not exceed 10% of the coating thickness to ensure only the measurement of the mechanical properties of the coating without the

* Corresponding author.

E-mail addresses: adrian.borquez.fim@uas.edu.mx (A. Bórquez-Mendivil), jalmaral@uas.edu.mx (J.L. Almaral-Sánchez), eduardo.leal@uas.edu.mx (J.E. Leal-Perez), cesar.ma@chihuahua.tecnm.mx (C. Modesto-Acosta), jflores@uas.edu.mx (J. Flores-Valenzuela), orlando.auciello@utdallas.edu (O. Auciello), blanca.garcia@uas.edu.mx (B.A. García-Grajeda), miguel.mendivil@uas.edu.mx (J.M. Mendivil-Escalante), sergio.flores@cimav.edu.mx (S.G. Flores-Gallardo), roberto.talamantes@cimav.edu.mx (R.P. Talamantes-Soto), abel.hurtado@cimav.edu.mx (A. Hurtado-Macías).

<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.01.135>

Received 6 November 2024; Received in revised form 31 December 2024; Accepted 17 January 2025

Available online 18 January 2025

2238-7854/© 2025 Published by Elsevier B.V. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Figura 5-1. Artículo científico publicado en revista indexada en JCR, Journal of Materials Research and Technology, con el título "Artificial weathering aging of PPT coatings made from recycled PET to protect concrete: Nanomechanical properties evaluation" en 2025.

Article

A New Sustainable PPT Coating Based on Recycled PET to Improve the Durability of Hydraulic Concrete

Adrián Bórquez-Mendivil ¹, Carlos Paulino Barrios-Durstewitz ¹, Rosa Elba Núñez-Jáquez ¹, Abel Hurtado-Macias ², Jesús Eduardo Leal-Pérez ¹, Joaquín Flores-Valenzuela ¹, Blanca Alicia García-Grajeda ¹, Francisca Guadalupe Cabrera-Covarrubias ¹, José Miguel Mendivil-Escalante ^{1,*} and Jorge Luis Almaral-Sánchez ^{1,*}

- ¹ Facultad de Ingeniería Mochis, Universidad Autónoma de Sinaloa, Ángel Flores S/N, Las Fuentes, Los Mochis 81223, Sinaloa, Mexico; adrian.borquez.fim@uas.edu.mx (A.B.-M.); durstewitz@uas.edu.mx (C.P.B.-D.); ronunez@uas.edu.mx (R.E.N.-J.); eduardo.leal@uas.edu.mx (J.E.L.-P.); jlflores@uas.edu.mx (J.F.-V.); blanca.garcia@uas.edu.mx (B.A.G.-G.); guadalupe.cabrera@uas.edu.mx (F.G.C.-C.)
- ² Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C., Miguel de Cervantes #120, Complejo Industrial Chihuahua, Chihuahua 31136, Mexico; abel.hurtado@cimav.edu.mx
- * Correspondence: miguel.mendivil@uas.edu.mx (J.M.M.-E.); jalmaral@uas.edu.mx (J.L.A.-S.)



Citation: Bórquez-Mendivil, A.; Barrios-Durstewitz, C.P.; Núñez-Jáquez, R.E.; Hurtado-Macias, A.; Leal-Pérez, J.E.; Flores-Valenzuela, J.; García-Grajeda, B.A.; Cabrera-Covarrubias, F.G.; Mendivil-Escalante, J.M.; Almaral-Sánchez, J.L. A New Sustainable PPT Coating Based on Recycled PET to Improve the Durability of Hydraulic Concrete. *Polymers* **2024**, *16*, 1297. <https://doi.org/10.3390/polym16091297>

Academic Editor: Chenggao Li

Received: 27 March 2024

Revised: 22 April 2024

Accepted: 25 April 2024

Published: 6 May 2024



Copyright: © 2024 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Abstract: A new, sustainable polypropylene terephthalate (PPT) coating was synthesized from recycled polyethylene terephthalate (PET) and applied onto a hydraulic concrete substrate to improve its durability. For the first step, PET bottle wastes were ground and depolymerized by glycolysis using propylene glycol (PG) in a vessel-type reactor (20–180 °C) to synthesize bis(2-hydroxypropyl)-terephthalate (BHPT), which was applied as a coating to one to three layers of hydraulic concrete substrate using the brushing technique and polymerized (150 °C for 15 h) to obtain PPT. PET, BHPT, and PPT were characterized by FT-IR, PET, and PPT using TGA, and the PPT coatings by SEM (thickness), ASTM-D3359-17 (adhesion), and water contact angle (wettability). The durability of hydraulic concrete coated with PPT was studied using resist chloride ion penetration (ASTM-C1202-17), carbonation depth at 28 days (RILEM-CPC-18), and the absorption water ratio (ASTM-C1585-20). The results demonstrated that the BHPT and PPT were synthesized (FT-IR), and PPT had a similar thermal behavior to PET (TGA); the PPT coatings had good adhesion to the substrate, with thicknesses of micrometric units. PPT coatings presented hydrophilic behavior like PET coatings, and the durability of hydraulic concrete coated with PPT (2–3 layers) improved (migration of chloride ions decreased, carbonation depth was negligible, and the absorption water ratio decreased).

Keywords: sustainability; PPT coating; recycled PET; durability; hydraulic concrete

1. Introduction

In recent decades, industrial growth and the expansion of the production of consumables have led to an exponential increase in the generation of polymeric waste, including polyethylene terephthalate (PET) [1]. PET is a thermoplastic polymer widely used in the production of beverage and food containers, which has reached a critical point in its life cycle, a situation that makes it an environmental and economic challenge due to its inadequate final disposal and permanence in the environment [2]. Faced with the urgent need to address the pollution generated by polymeric waste and the transition to more sustainable practices, PET recycling has become a fundamental response [3]. In 2019, an annual production of 30.5 million tons of PET was reported in the world, and by 2024, it is expected to be around 35.3 million tons [4], corresponding to the generation of PET bottles, which would subsequently be wasted, that has generated the interest in exploring alternatives for recycling and converting them into new materials with added value [5].

Article

Hybrid Coatings of SiO₂–Recycled PET Unsaturated Polyester Resin by Sol-Gel Process

Adrián Bórquez-Mendivil ¹, Abel Hurtado-Macias ², Jesús Eduardo Leal-Pérez ¹,
Joaquín Flores-Valenzuela ^{1,*}, Ramón Álvaro Vargas-Ortiz ¹, Francisca Guadalupe Cabrera-Covarrubias ¹,
and Jorge Luis Almaral-Sánchez ^{1,*}

¹ Facultad de Ingeniería Mochis, Universidad Autónoma de Sinaloa, Los Mochis C.P. 81223, Mexico

² Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S. C., National Nanotechnology Laboratory, Department of Metallurgy and Structural Integrity, Chihuahua C.P. 31136, Mexico

* Correspondence: jflores@uas.edu.mx (J.F.-V.); jalmaral@uas.edu.mx (J.L.A.-S.)



Citation: Bórquez-Mendivil, A.; Hurtado-Macias, A.; Leal-Pérez, J.E.; Flores-Valenzuela, J.; Vargas-Ortiz, R.A.; Cabrera-Covarrubias, F.G.; Almaral-Sánchez, J.L. Hybrid Coatings of SiO₂–Recycled PET Unsaturated Polyester Resin by Sol-Gel Process. *Polymers* **2022**, *14*, 3280. <https://doi.org/10.3390/polym14163280>

Academic Editors: Alexander Böker and Dimitrios Bikaris

Received: 13 July 2022

Accepted: 8 August 2022

Published: 12 August 2022

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2022 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Abstract: Hybrid coatings of SiO₂ and recycled unsaturated polyester resin (R-UPR) from recycled polyethylene-terephthalate (PET) were prepared by the sol-gel process on glass substrates. First, SiO₂ was synthesized by the sol-gel process using a tetraethyl orthosilicate (TEOS) solution. Next, bis(2-hydroxypropyl-terephthalate) (BHPT) was synthesized from mechanical and chemical recycling (glycolysis) of post-consumer PET bottles in propylene glycol (PG) using ZnA as catalyst, in a Vessel-type reactor (20–200 °C); maleic anhydride (MA) was added and, following the same procedure, the unsaturated polyester (UP) was synthesized, which was cooled to room temperature. Next, styrene (St) and benzoyl-peroxide (PBO)-initiator were added to obtain R-UPR. TEOS (T) and three hybrid solutions were synthesized, with molar ratios of 0:1:0 (T), 1:2:0.25 (H1), 1:1:0.25 (H2), and 1:0:0.25 (H3) for R-UPR:TEOS:3-trimethoxy-(silyl)-propyl-methacrylate (TMSPM), respectively, with which TC, HC1, HC2, and HC3 coatings were elaborated using the immersion technique and polymerized (120 °C for 24 h). The solutions were characterized by FT-IR and TGA, and the coatings by SEM, nanoindentation, AFM, adhesion, and contact angle. The results showed that SiO₂ enhanced mechanical (hardness and Young's modulus) and thermal properties of the R-UPR. The coatings adhered perfectly to the substrate, with thicknesses of micrometer units and a flat surface; in addition, hydrophilicity decreased as SiO₂ decreased.

Keywords: hybrid-coating; recycled PET; unsaturated polyester resin; SiO₂; sol-gel process

1. Introduction

The recycling of polyethylene terephthalate (PET) is carried out in two stages: mechanical and chemical. The first concerns PET bottle recollection, sorting, checking, grinding, washing, and impurity removal, to produce PET flakes [1]. The second concerns the degradation of the PET flakes at minimum molecular weight; the glycolysis process is one of most common [2–4], in which the PET reacts with glycols and a catalyst by transesterification to produce low-molecular weight terephthalic oligomers that react with maleic anhydride or other dibasic acids, and with vinyl monomer to synthesize unsaturated polyester resin (UPR) [5,6]. UPRs synthesized with PG have higher hardness and tensile strength than the same resins synthesized with ethylene glycol [5]. Various studies on the synthesis of recycled UPR from PET waste have been published [7–10].

Hybrid materials are molecular scale compounds which generally consist of organic and inorganic phases, combining their properties (flexibility and stiffness/strength, respectively) to improve their performance [11]. Some hybrid systems have been synthesized by sol-gel from tetraethyl orthosilicate (TEOS) with a coupling agent [12–14] as 3-glycidoxypropyltrimethoxysilane [15] and 3-aminopropyltriethoxysilane [16], which were used as anti-corrosion coatings, and with poly-dimethylsiloxane, used for the protection coating of historic stone sculptures [17]. 3-(trimethoxysilyl)propyl methacrylate



GOBIERNO DE
MÉXICO



CONAHCYT
CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES
CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS



Coordinación de estudios de Posgrado
Oficio PO - 2484/2024
Chihuahua, Chih., a 12 de septiembre de 2024.

A quien corresponda
Presente.

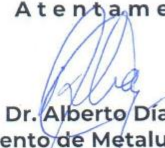
Por medio de la presente hago constar que el alumno **Adrián Bórquez Mendivil**, de la carrera de **Doctorado en Ciencias de la Ingeniería (Acentuación en materiales)** perteneciente a **Universidad Autónoma de Sinaloa** y con número de control **12104371** realizó **Tesista Doctorado**, dentro del periodo comprendido del **11 de marzo de 2024 al 13 de septiembre de 2024** cubriendo un total de **960** horas en este Centro de Investigación, desarrollando las siguientes actividades:

- Caracterización estructural y nanomecánica de recubrimientos de PET
- Análisis de conductividad térmica
- Estudio de morfología y medición de espesores por MEB
- Medición de rugosidad por AFM
- Medición de ángulo de contacto

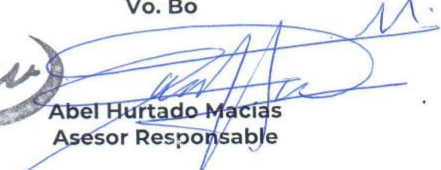
Que nos reporta con resultados muy satisfactorios el asesor **Abel Hurtado Macías**, una puntuación de **100**, por lo que no tenemos reserva alguna en felicitarlo por su excelente formación.

Se extiende la presente constancia en la ciudad de Chihuahua, Chihuahua el día 12 del mes de septiembre de 2024, para los fines legales a que haya lugar.

Atentamente


Dr. Alberto Díaz Díaz
Departamento de Metalurgia e Integridad Estructural

Vo. Bo


Abel Hurtado Macías
Asesor Responsable

Miguel de Cervantes No. 120, Complejo Industrial Chihuahua, CP. 31136, Chihuahua, Chih., México.
Tel: (614) 439 1100 www.cimav.edu.mx



Figura 5-4. Constancia de estancia de investigación en CIMAV sede Chihuahua.



OFICIO No. "CEIURN/037/2024"
EXPEDIENTE NUM: SF3.11S.1
ASUNTO: Constancia

A QUIEN CORRESPONDA:

La suscrita LIC. HAYDEÉ FERNÁNDEZ SUÁREZ, Directora del Centro de Estudio de Idiomas Mochis, Unidad Regional Norte, dependiente de la Universidad Autónoma de Sinaloa, HACE CONSTAR que el (la) C. BORQUEZ MENDIVIL ADRIAN, Presentó el examen de Competencias en el idioma Inglés, en la Universidad Autónoma de Sinaloa, a través del Centro de Estudio de Idiomas Mochis, aplicado el día martes 23 de enero de 2024; que acredita comprensión auditiva, lectora y escritura del idioma Inglés, obteniendo 490 puntos en el examen, basados en una escala equivalente al puntaje TOEFL, los cuales se detallan a continuación:

LISTENING COMPREHENSION:	51
STRUCTURE & WRITTEN EXPRESSION:	43
READING COMPREHENSION:	53
TOTAL SCORE:	490

Para los fines legales que más convengan a la parte interesada, se extiende la presente a los 24 días del mes enero de 2024, en la Ciudad de Los Mochis, Sinaloa.

ATENTAMENTE
"Sursum Versus"


LIC. HAYDEÉ FERNÁNDEZ SUÁREZ.
DIRECTORA
CENTRO DE ESTUDIO DE IDIOMAS
LOS MOCHIS, SINALOA

C.C.P. Dirección de Unidad Académica-Lic. Haydeé Fernández Suárez

HFS/llrg

Figura 5-5. Constancia de examen TOEFL con puntaje mayor a 475.



Figura 5-6. Constancia de participación en congreso nacional "Reunión Interinstitucional para la Divulgación en la Ciencia de Materiales" 2024.



Figura 5-7. Constancia de participación en congreso nacional "XXVI Reunión Universitaria de Investigación en Materiales", 2023.



Figura 5-8. Participación en congreso internacional "VIII Coloquio Internacional de Investigación Universitaria" 2024.

Latin Chem

This is to certify that

**Adrián Bórquez-Mendívil, Rosa Elba Nuñez-Jaquez, Abel Hurtado-Macías, Francisca
Guadalupe Cabrera-Covarrubias, Blanca Alicia García-Grajeda,
Jorge Luis Almaral-Sánchez**

participated in the #LatinXChem Conference 2024 on October 14 and 15,
with the poster # Env016 entitled:

***Recycled PET coating for protection of hydraulic concrete against chloride ion
penetration***



Gabriel Merino
on behalf of the
#LatinXChem Organizing Committee



Florent Louis
on behalf of the
#LatinXChemEnv Category

Figura 5-9. Participación en congreso internacional "LatinXChem Conference 2024".



Figura 5-10. Participación en congreso internacional "XV Coloquio Bienal en Ciencia de Materiales 4ta edición internacional", 2023.



Figura 5-11. Participación en congreso internacional "LatinXChem Twitter Conference 2023".



Figura 5-12. Participación en congreso internacional "VI Coloquio Internacional de Investigación Universitaria", 2022.



Figura 5-13. Participación en congreso internacional "International Virtual Conference on Materials Science", 2022.



Figura 5-14. Participación en congreso internacional "LatinXChem Twitter Conference 2022".



Figura 5-15. Participación en congreso internacional "XV International Conference on Surfaces, Materials and Vacuum", 2022.

Los Mochis, Sinaloa, a 15 de junio de 2023.
ASUNTO: Constancia de profesor adjunto.

COMITÉ ACADÉMICO DEL POSGRADO EN
CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA
PRESENTE.

AT'N:
DR. JESÚS ADRIÁN BALDENEBRO LÓPEZ
COORDINADOR DE POSGRADO

Por este conducto los saludo y aprovecho para informar que **Adrián Bórquez Mendivil**, estudiante del Doctorado en Ciencias de la Ingeniería con número de cuenta **1210437-1**, se **desempeñó como profesor adjunto** en el desarrollo de la materia de *Temas Selectos de Materiales*, impartida a los estudiantes del Semestre II de la **Maestría en Ciencias de la Ingeniería**, durante el ciclo escolar 2022-2023.

Adrián Bórquez Mendivil participó en actividades de revisión, asesoría y docencia.

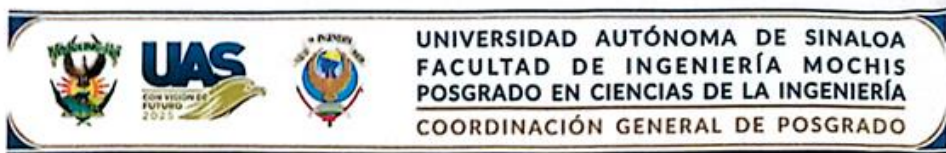
Sin más por el momento, quedo a la orden para cualquier aclaración.

ATENTAMENTE




Dr. Jesús Adrián Baldenebro López
Coordinador General del Posgrado
en Ciencias de la Ingeniería

Figura 5-16. Constancia de profesor adjunto con la materia de maestría "Temas Selectos de Materiales".



Los Mochis, Sin., a 20 de febrero de 2024
con Oficio No. PCI-009/24
ASUNTO: constancia de profesor adjunto

COMITÉ ACADÉMICO DEL POSGRADO EN
CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA
PRESENTE.

Por este conducto los saludo y aprovecho para informar que **Adrián Bórquez Mendivil**, estudiante del Doctorado en Ciencias de la Ingeniería con número de cuenta **12104371**, se desempeñó como profesor adjunto en el desarrollo de la materia de *Materiales cementicios modificados con polímeros*, impartida a los estudiantes del Semestre III de la Maestría en Ciencias de la Ingeniería, durante el ciclo escolar 2023-2024.

Adrián Bórquez Mendivil participó como auxiliar en la impartición de temas específicos, revisión de tareas, exámenes y trabajos.

Sin más por el momento, quedo a la orden para cualquier aclaración.

ATENTAMENTE



Dr. Jesús Adrián Baldenegro López
Coordinador General del Posgrado
en Ciencias de la Ingeniería

Facultad de Ingeniería Mochis, Ciudad Universitaria, Fuente de Poseidón y Prol. Ángel Flores S/N, Frac. Las Fuentes. C.P. 81223.
Los Mochis, Sinaloa, México • Tel/Fax: (668) 812-7641 • Email: pci@uas.edu.mx • <https://uasposing.org>

Escaneado con CamScanner

Figura 5-17. Constancia de profesor adjunto en materia de maestría "Materiales cementicios modificados con polímeros".

Los Mochis, Sin., a 20 de febrero de 2024
con Oficio No. PCI-010/24
ASUNTO: constancia de profesor adjunto

COMITÉ ACADÉMICO DEL POSGRADO EN
CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA
PRESENTE.

Por este conducto los saludo y aprovecho para informar que **Adrián Bórquez Mendivil**, estudiante del Doctorado en Ciencias de la Ingeniería con número de cuenta **12104371**, se desempeñó como profesor adjunto en el desarrollo de la materia de *Tecnología avanzada del concreto y nuevos materiales*, impartida a los estudiantes del Semestre IV de la Maestría en Ciencias de la Ingeniería, durante el ciclo escolar 2023-2024.

Adrián Bórquez Mendivil participó como auxiliar en la impartición de temas específicos, experimentación, interpretación de resultados, revisión de tareas, exámenes y trabajos.

Sin más por el momento, quedo a la orden para cualquier aclaración.

ATENTAMENTE



Dr. Jesús Adrián Baldenebro López
Coordinador General del Posgrado
en Ciencias de la Ingeniería

Figura 5-18. Constancia de profesor adjunto en la materia de maestría "Tecnología avanzada del concreto y nuevos materiales".

Mortero polimérico elaborado con resina híbrida de poliéster insaturado (a partir de reciclaje de botellas de PET post-consumo) con nanoacoplante silano

Polymeric mortar made with unsaturated polyester hybrid resin (from post-consumer PET bottle recycling) with silane nanocoupling

A. Bórquez-Mendivil¹, J.A. Verdugo-Sánchez¹, A. Hurtado-Macias², J.E. Leal-Pérez¹, R.A. Vargas Ortiz¹, J. Flores-Valenzuela¹, F.G. Cabrera-Covarrubias¹, B.A. García-Grajeda¹, J.L. Almaral-Sánchez^{1*}

RESUMEN

Botellas de PET post-consumo fueron recicladas mecánica y químicamente, para sintetizar resina híbrida de poliéster insaturado (RPI-H), con la adición de nanoacoplante silano (AS), utilizadas en la elaboración de morteros poliméricos (MP), que son una mezcla de agregados finos y polímero (aglutinante). La RPI-H es el aglutinante y el AS mejora la interacción química RPI-H/agregado. Se elaboró MP modificado con AS (MPM); la RPI-H fue sintetizada en reactor tipo Vessel, con variación de temperatura ambiente a 180 °C, con adición de propilenglicol, acetato de zinc, anhídrido maleico y estireno y 3-(trimetoxisilil)propil metacrilato (TMSPM), como AS. Se obtuvo el MPM y se caracterizó mediante espectrometría infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR) y resistencia a compresión. Los resultados obtenidos confirmaron la obtención de MPM y la interacción química RPI-H/agregado de los MPM, comprobado por FT-IR y la resistencia a compresión del MPM se incrementó en 45% respecto a la del MP.

Recibido: diciembre 2022
Aceptado: mayo 2023
Publicado: diciembre 2023

Palabras Clave:

Mortero polimérico modificado, acoplante silano, 3-(Trimetoxisilil)propil metacrilato, resina de poliéster insaturado, reciclaje de PET.

Keywords:

Coupling-modified polymeric mortar, silane coupling agent, 3-(trimethoxysilyl)propyl methacrylate, unsaturated polyester resin, PET recycling.

ABSTRACT

Post-consumer PET bottles were mechanically and chemically recycled to synthesize unsaturated polyester hybrid resin (RPI-H), with the addition of silane nanocoupling (AS), used in the preparation of polymeric mortars (PM), which are a mixture of fine aggregates and polymer (binder). The RPI-H is the binder and the AS enhances the RPI-H/aggregate chemical interaction. AS-modified MP (PMM) was made; RPI-H was synthesized in a Vessel-type reactor, varying the temperature from room temperature to 180 °C, with the addition of propylene glycol, zinc acetate, maleic anhydride and styrene and 3-(trimethoxysilyl)propyl methacrylate (TMSPM), as AS. PMM was obtained and characterized by Fourier transform infrared spectrometry (FT-IR) and compressive strength. The results obtained confirmed that the PMM was obtained and the chemical interaction in the ZTI of the PMM was achieved through the coupling agent TMSPM, due to its characteristic molecular bonds found (FT-IR) and the compressive strength of the PMM increased in 45% compared to that of the PM.

1. INTRODUCCIÓN

El tereftalato de polietileno (PET) es procesado por dos tipos de reciclaje, en el siguiente orden: 1) Reciclaje mecánico, que consiste en recolección, clasificación, verificación, trituración, lavado y eliminación de impurezas de botellas

*Autor para correspondencia.
Dirección de correo electrónico: jalmara@uas.edu.mx.

¹Universidad Autónoma de Sinaloa. Gral. Ángel Flores S/N, Fracc. Las Fuentes, Los Mochis, Sin., C.P. 81223, México.

²Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S. C., Miguel de Cervantes #120, Complejo Industrial Chihuahua, Chihuahua, 31136, México.

EVALUACIÓN DE LA PERMEABILIDAD POR EL MÉTODO DE ION CLORURO EN CONCRETO CEMENTICIO RECUBIERTO CON RESINAS DE POLIÉSTER INSATURADO BASADAS EN PET RECICLADO Y ÓXIDO DE SILICIO

A. Bórquez Mendivil¹, C. P. Barrios Durstewitz¹, R. E. Núñez Jaquez¹, J. E. Leal Pérez¹, B. A. García Grajeda¹, J. M. Mendivil Escalante¹, J. L. Almaral Sánchez^{1*}

¹Universidad Autónoma de Sinaloa, Fuente de Poseidón y Prol. Ángel Flores S/N., Los Mochis, Sinaloa, 81223, México.

E-mail: jalmaral@uas.edu.mx

RESUMEN

Este estudio busca mejorar la durabilidad del concreto usando materiales reciclados de tereftalato de polietileno (PET). Se empleó un proceso de reciclaje en dos etapas, con tratamientos mecánicos y químicos, para crear materiales protectores. Se sintetizó tereftalato de bis (2-hidroxipropilo) (BHPT) de residuos de PET, seguido de la formación de resina de poliéster insaturado (R-RPI) mediante la policondensación con anhídrido maleico (AM). También se sintetizó una resina híbrida de poliéster insaturado (RPI-H) al interactuar R-RPI con metacrilato de trimetoxisililpropilo (TMSPM). Estos materiales recubrieron muestras de concreto de alta relación agua-cemento (0.80). La prueba ASTM C1202-19 evaluó la permeabilidad al ion cloruro. Los recubrimientos redujeron la migración de iones cloruro, siendo efectivos. A pesar de la alta permeabilidad inicial debido al diseño de la mezcla, los recubrimientos RPI-H, H1, H2 y H3 disminuyeron el movimiento de iones cloruro en 15.9%, 30.5%, 10.1% y 13.2%, respectivamente, comparado con la muestra sin recubrimiento. Estos resultados fomentan futuras investigaciones para mayor protección con capas adicionales. El estudio mostró el potencial de estos materiales para fortalecer la resistencia a los iones cloruro en el concreto de alta relación agua-cemento, resaltando su relevancia en aumentar la durabilidad y vida útil del material.

1213

Palabras Clave: Recubrimientos, Reciclaje del PET, Permeabilidad, Concreto, Ion cloruro.



Figura 5-20. Artículo científico publicado en memoria del congreso XXXVIII Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de Electroquímica.

**ACTA DE EXAMEN
DE GRADO**





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA

Copia del Acta, inscrita a foja 213 del Libro 1, del Examen final presentado por la C. Yamileth Viridiana Moreno Rubio para obtener el grado de Licenciado en Ingeniería Civil.

En la ciudad de Los Mochis, Sin., a los veinticinco días del mes de junio de dos mil veinticuatro, siendo las 11:00 horas, se reunieron en la Sala de Usos Múltiples de la Facultad de Ingeniería Mochis los miembros del Jurado integrado por: **Dr. José Miguel Mendivil Escalante, Dr. Jorge Luis Almaral Sánchez, Dra. Blanca Alicia García Grajeda**, bajo la presidencia del primero y con el carácter de secretario el último, para proceder a efectuar el examen de réplica de la tesis: **“Reciclaje de botellas de PET para la elaboración de recubrimientos a partir de tereftalato de bis(2-hidroxipropilo)”**, dirigida por el Dr. Jorge Luis Almaral Sánchez y el M.C. Adrián Bórquez Mendivil, que para obtener el grado de Licenciado en Ingeniería Civil sustentó la:

C. Yamileth Viridiana Moreno Rubio

Los miembros del Jurado replicaron a la sustentante y terminada la réplica, después de deliberar entre sí, reservada y libremente la declararon:

APROBADA POR UNANIMIDAD

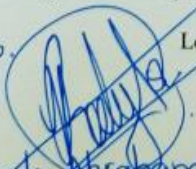
Acto continuo, el presidente del Jurado, le hizo saber a la sustentante, del resultado de su examen y le tomó la protesta de ley.


Dr. José Miguel Mendivil Escalante
PRESIDENTE


Dra. Blanca Alicia García Grajeda
SECRETARIO


Dr. Jorge Luis Almaral Sánchez
VOCAL

El C. Director de la Facultad de Ingeniería Mochis, Dr. Rody Abraham Soto Rojo, que suscribe, certifica que las firmas que aparecen en esta Acta son auténticas y las mismas que usan los miembros del Jurado.

Vo. Bo.  Los Mochis, Sinaloa; a 25 de junio de 2024.

Dr. Rody Abraham Soto Rojo
Director

Figura 5-21. Acta de grado de tesista de licenciatura Moreno Rubio Yamilet Viridiana.

ACTA DE EXAMEN
DE GRADO



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA

Copia del Acta, inscrita a foja 211 del Libro 1, del Examen final presentado por la C. Adilene Margarita Torres Beltrán para obtener el grado de Licenciado en Ingeniería Civil.

En la ciudad de Los Mochis, Sin., a los veintiún días del mes de junio de dos mil veinticuatro, siendo las 11:00 horas, se reunieron en la Sala de Usos Múltiples de la Facultad de Ingeniería Mochis los miembros del Jurado integrado por: **Dr. José Miguel Mendivil Escalante**, **Dr. Jorge Luis Almaral Sánchez**, **Dra. Blanca Alicia García Grajeda**, bajo la presidencia del primero y con el carácter de secretario el último, para proceder a efectuar el examen de réplica de la tesis: "**Carbonatación en concreto hidráulico recubierto con bis-2-hidroxipropil-tereftalato (subproducto de reciclaje del PET)**", dirigida por el Dr. Jorge Luis Almaral Sánchez y el M.C. Adrián Bórquez Mendivil, que para obtener el grado de Licenciado en Ingeniería Civil sustentó la:

C. Adilene Margarita Torres Beltrán

Los miembros del Jurado replicaron a la sustentante y terminada la réplica, después de deliberar entre sí, reservada y libremente la declararon:

APROBADA POR UNANIMIDAD

Acto continuo, el presidente del Jurado, le hizo saber a la sustentante, del resultado de su examen y le tomó la protesta de ley.

Dr. José Miguel Mendivil Escalante
PRESIDENTE

Dra. Blanca Alicia García Grajeda
SECRETARIO

Dr. Jorge Luis Almaral Sánchez
VOCAL

El C. Director de la Facultad de Ingeniería Mochis, Dr. Rody Abraham Soto Rojo, que suscribe, certifica que las firmas que aparecen en esta Acta son auténticas y las mismas que usan los miembros del Jurado.

va. Bo.

Los Mochis, Sinaloa; a 21 de junio de 2024.

Dr. Rody Abraham Soto Rojo
Director.

Figura 5-22. Acta de grado de tesista de licenciatura Torres Beltrán Adilene Margarita.

ACTA DE EXAMEN
DE GRADO



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA

Copia del Acta, inscrita a foja 174 del Libro 1, del Examen final presentado por el C. Jesús Alonso Verdugo Sánchez para obtener el grado de Licenciado en Ingeniería Civil.

En la ciudad de Los Mochis, Sin., a los veintidós días del mes de junio de dos mil veintidós, siendo las 10:00 horas, se reunieron en la Sala polivalente de la Facultad de Ingeniería Mochis los miembros del Jurado integrado por: **Dr. Joaquín Flores Valenzuela, Dr. Jorge Luis Almaral Sánchez, Dr. Ramón Álvaro Vargas Ortiz**, bajo la presidencia del primero y con el carácter de secretario el último, para proceder a efectuar el examen de réplica de la tesis: **"Resistencia a comprensión de mortero polimérico elaborado con resina de poliéster insaturado a partir de PET reciclado y nanoacoplante 3-trimetoxisilil propil metacrilato"**, dirigida por el Dr. Jorge Luis Almaral Sánchez y el M.C. Adrián Bórquez Mendivil, que para obtener el grado de Licenciado en Ingeniería Civil sustentó el:

C. Jesús Alonso Verdugo Sánchez

Los miembros del Jurado replicaron al sustentante y terminada la réplica, después de deliberar entre sí, reservada y libremente lo declararon:

Aprobado por Unanimidad

Acto continuo, el presidente del Jurado, le hizo saber al sustentante, del resultado de su examen y le tomó la protesta de ley.

Dr. Joaquín Flores Valenzuela
PRESIDENTE

Dr. Ramón Álvaro Vargas Ortiz
SECRETARIO

Dr. Jorge Luis Almaral Sánchez
VOCAL

El C. Director de la Facultad de Ingeniería Mochis, Dr. Jesús Adrián Baldenebro López, que suscribe, certifica que las firmas que aparecen en esta Acta son auténticas y las mismas que usan los miembros del Jurado.

Los Mochis, Sinaloa; a 21 de junio de 2022.

Jesús Adrián Baldenebro López
Director

Figura 5-23. Acta de grado de tesista de licenciatura Verdugo Sánchez Jesús Alonso.



Figura 5-24. Distinción de investigador por parte del Sistema Sinaloense de Investigadores y Tecnólogos.



Figura 5-25. 1er lugar en concurso de trabajos de investigación terminados: VIII Coloquio Internacional de Investigación Universitaria organizado por la Universidad de Guadalajara.



Figura 5-26. Constancias de conferencias impartidas (parte 1).



Figura 5-27. Conferencias impartidas (parte 2).



Figura 5-28. Constancias de carteles presentados.



Figura 5-29. Constancias de talleres impartidos.