

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-Macías², 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

ABSTRACT

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.

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: jalmaral@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, Chihuahua, 31136, México.

de PET, para reducirlas a hojuelas [1]. 2) Reciclaje químico, se refiere a la degradación de estas hojuelas al mínimo peso molecular, mediante el proceso de glicólisis, que es uno de los más comunes [2–4], donde el PET reacciona con glicoles y un catalizador por transesterificación para producir oligómeros tereftálicos de bajo peso molecular, que reaccionan con anhídrido maléico u otros ácidos dibásicos y con monómeros vinílicos, para sintetizar resina de poliéster insaturada (RPI) [5-10], la cual presenta mayor dureza y resistencia a la tensión cuando se utiliza el propilenglicol (PG) que al emplear etilenglicol en su síntesis [5]. La RPI tiene distintas aplicaciones, dentro de las que se destaca su uso como aglutinante en la elaboración de concretos y morteros poliméricos (MP) [11].

Los MP son materiales compuestos elaborados a partir de un polímero (aglutinante) y rellenos inorgánicos (agregado fino) [12]. Sus propiedades dependen del contenido de aglutinante, granulometría del agregado, naturaleza, contenido del relleno adicional, tipo de agente reductor de contracción utilizado y condiciones de polimerizado, entre otros [13]. Generalmente, la zona de transición interfacial es su parte más débil, pero es muy importante en la determinación de sus propiedades mecánicas [14]. Los efectos adhesivos interfaciales surgen de la unión de grupos orgánicos a la superficie de la fase inorgánica, a través de un agente de acoplamiento, que puede mejorar las propiedades mecánicas del mortero polimérico, por lo que su elección es muy importante [13]. Los agentes de acoplamiento de silano tienen la capacidad de formar enlaces entre moléculas orgánicas e inorgánicas, además de modificar químicamente las superficies, para combinar sus propiedades físicas o químicas [15]. El acoplante permite la interacción química, por medio de la formación de enlaces débiles o fuertes entre sus cadenas orgánicas y las del polímero orgánico, donde el número de sitios de acoplamiento y su localización son también uno de los parámetros más importantes para la unión química entre el agente acoplante y la fase inorgánica [16, 17]. El mecanismo de acoplamiento dirige a un enlace fuerte resultante entre las dos fases y se produce y propaga una fractura dentro del polímero, en contraste al no incluir acoplante, la fractura es usualmente iniciada y propagada a través de las fallas en las interfaces débiles de partículas orgánicas-inorgánicas [14].

En la Figura 1, se presenta la estructura química general de un agente de acoplamiento de silano que muestra dos clases de grupos funcionales, donde X es

un grupo hidrolizable (típicamente alcoxi, aciloxi, halógeno o amina) y el grupo R es un radical orgánico no hidrolizable que puede poseer una funcionalidad que imparte las características deseadas para el material híbrido final [18].

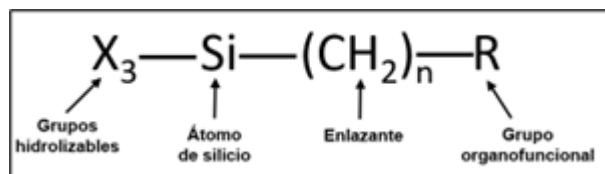


Figura 1. Estructura química general de los agentes acoplantes de tipo silano.

Se elaboraron composites híbridos de RPI reforzada con nanosílice tratada con diferentes agentes acoplantes (aminopropil-trietoxisilano, vinil-trietoxisilano y γ -cloro-propil trimetoxisilano) [19] y con polvo de sílice, acoplados con viniltrialiloxisilano [20], en ambos casos se mejoró la fuerza del enlace químico entre sus interfases e incrementaron sus propiedades mecánicas. El agente acoplante 3-aminopropiltriethoxisilano se utilizó en la elaboración del concreto cementicio para modificar superficialmente los agregados gruesos de coral y mejorar la adherencia interfacial entre la fase orgánica (agregado de coral) y la inorgánica (pasta de mortero cementicio), con lo cual se incrementó 35 % su resistencia a la compresión [21].

Concretos poliméricos de RPI han incrementado su resistencia a la compresión de 13 y 23.5 % al utilizar acoplantes 3-aminopropiltriethoxisilano y 7-metacriloxipropiltrimetoxisilano, respectivamente [22] y de resina epóxica, el 36 %, con TMSPM [23]. Morteros poliméricos fueron fabricados con los siguientes sistemas aglutinante-acoplante: fenol-formaldehído-aminopropiltriethoxisilano [24], resina de vinil éster- metilacriloxipropiltrimetoxisilano [25] y RPI-trimetoxisililvinilbencilamina [26], los cuales incrementaron su resistencia a compresión en 18, 15 y 36 %, respectivamente. comparadas contra el mortero polimérico convencional.

En revisión exhaustiva de la literatura, no se encontraron trabajos referentes a la implementación de RPI reciclada a partir de PET modificada con acoplante para uso en morteros poliméricos. En este trabajo

se estudió el mortero polimérico elaborado con resina de poliéster insaturado (a partir de reciclaje de botellas de PET post-consumo) adicionada con nanoacoplante silano.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Materiales

En el reciclaje mecánico se usaron botellas de PET, hidróxido de sodio (NaOH) y agua destilada. En la síntesis de bis(2-hidroxipropil) tereftalato (BHPT) se utilizaron hojuelas de PET, propilenglicol (PG) como solvente en la despolimerización y acetato de zinc (AZn) como catalizador, ambos marca Sigma-Aldrich con pureza mayor a 95%. En la síntesis de poliéster insaturado (PI), se emplearon BHPT (previamente sintetizado) y anhídrido maleico (AM), que proporciona insaturaciones, marca Sigma-Aldrich con pureza mayor a 95%. En la síntesis de RPI, se utilizaron PI (sintetizado previamente), estireno (St), como solvente reactivo, NaOH como desinhibidor y peróxido de benzoilo (PBO), como iniciador, todos marca Sigma-Aldrich con pureza mayor a 95%. En la hidrólisis del TMSPM, los reactivos empleados fueron TMSPM, etanol (EtOH), agua destilada y NaOH como desinhibidor, todos marca Sigma-Aldrich con pureza mayor a 95%. En la elaboración de morteros poliméricos con acoplante se empleó agregado fino (AF) de la región, RPI y TMSPM hidrolizado.

2.2. Equipo

2.2.1. Reciclaje mecánico para la obtención de hojuelas de PET y reciclaje químico para la despolimerización de PET y síntesis de PI y RPI.

Para la obtención de hojuelas de PET se utilizó un molino triturador, sin marca y para el reciclaje químico (despolimerización de PET y síntesis de PI y RPI), un reactor tipo Vessel, modelo CEIMX-020110606-GLOBE y horno de secado, marca Controls para polimerización de muestras.

2.2.2. Identificación de enlaces moleculares por FT-IR

Para identificar los enlaces moleculares de las muestras, se empleó un equipo Nicolet iS50 con accesorio para transmisión y reflectancia total atenuada. La preparación de las muestras consistió en condensarlas a 120 °C por 24 h en un horno de secado, ense-

guida se trituraron con mortero de ágata, para obtener una pequeña fracción pulverizada, después se depositaron en una superficie de diamante y fueron analizadas en el intervalo de medición de 4000 a 400 cm^{-1} .

2.2.3. Resistencia a compresión

Para determinar la resistencia a compresión de los MP y MPM se llevaron a cabo ensayos en una prensa universal marca INSTRON modelo 600DX, conforme a las especificaciones que establece la norma ASTM C109/C109M-02. La velocidad de carga empleada fue de 1200 N/s.

2.3 Desarrollo del experimento

2.3.1. Reciclaje mecánico de botellas de PET post-consumo

Las botellas de PET post-consumo fueron recicladas mecánicamente con un molino triturador para obtener hojuelas de tamaño máximo de 1 cm, las cuales fueron lavadas en solución acuosa de hidróxido de sodio (NaOH) al 10% y agua destilada (en tres repeticiones) para eliminar impurezas y después secadas en horno a 50 °C por 24 h.

2.3.2. Reciclaje químico parcial de botellas de PET post-consumo

Las hojuelas de PET, obtenidas en el reciclaje mecánico, fueron sometidas a un parcial reciclaje químico (por glicólisis) para obtener por despolimerización del PET, el bis(2-hidroxipropilo) (BHPT). Ésta síntesis se llevó a cabo en un reactor Vessel, al cual se le depositaron hojuelas de PET con adición de PG (75 % en peso de PET) y después se añadió AZn al 3 % en peso de PET como catalizador, enseguida se procedió a mezclar los tres componentes en el reactor por agitación, con rampas de temperatura de 20 °C hasta alcanzar 180 °C y permaneció la reacción por 3 h, una vez transcurrido este tiempo se sintetizó el BHPT, se enfrió hasta temperatura ambiente y se almacenó para utilizarse posteriormente como materia prima en la síntesis del poliéster insaturado.

2.3.3 Síntesis de poliéster insaturado

El poliéster insaturado (PI) se sintetizó mediante la mezcla de BHPT y AM al 17 % en peso de BHPT, en el reactor Vessel, bajo las mismas condiciones experimentales de la síntesis del BHPT.

2.3.4 Síntesis de resina de poliéster insaturado

Para sintetizar la RPI se mezcló el PI con estireno, al 30 % en peso de PI y PBO como iniciador, al 1% en peso de PI-St, por 30 min y se obtuvo RPI pre-polimerizada.

2.3.5 Hidrólisis de agente acoplante (TMSPM)

La hidrólisis del TMSPM, consistió en mezclar este reactivo con EtOH y H₂O, al 50 y 25% vol. de TMSPM, respectivamente, y finalmente se agitó durante 30 min. a temperatura ambiente.

2.3.6 Síntesis de RPI híbrida (RPI-H)

La síntesis de RPI-H, consistió en mezclar RPI y TMSPM al 5% en peso de RPI durante 30 min. a temperatura ambiente.

2.3.7 Elaboración de especímenes de mortero polimérico convencional (MP) y modificado (MPM)

Los especímenes de mortero polimérico y mortero polimérico modificado se elaboraron como se describe a continuación; el agregado fino al 80% vol. total de la muestra para cada MP y MPM, se mezcló con RPI pre-polimerizada al 20% vol. total de la muestra y RPI-H al 20 % vol. total de la muestra, para obtener mortero polimérico y mortero polimérico modificado, respectivamente. Especímenes cúbicos de 5 cm por lado fueron elaborados conforme a lo establecido en la norma ASTM C109/C109M-05. Posteriormente, se polimerizaron a 120 °C por 24 h, en horno con circulación de aire.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR)

3.1.1. Formación de RPI

En la Figura 2 se presentan los espectros FT-IR de PET, BHPT, PI, St y RPI, que se desplazaron arbitrariamente a lo largo del eje de transmitancia y en la Tabla 1, la información de las bandas identificadas correspondientes a sus enlaces característicos [27]. En la figura referida se observa que el espectro del BHPT presenta un cambio con respecto al del PET, que consiste en la aparición de una banda amplia a 3350 cm⁻¹ atribuido a la presencia de grupos OH y mayor intensidad en las bandas 2972, 2936, 2877 cm⁻¹, correspondiente a los grupos CH₃, CH₂ y CH, lo cual indica que se llevó a cabo la despolimerización del PET por glicólisis, por medio de la transesterifica-

ción entre el grupo saliente (–OCH₂CH₂–) del PET y el grupo entrante (–CH₃CH(OH)CH₂O–) del PG. En el espectro del PI, se observa la incorporación de una banda a 1643 cm⁻¹, atribuida al enlace C=C (señalada con la ampliación), esto confirma la policondensación entre el BHPT y el AM, este último proporciona las insaturaciones detectadas [28-34]. En el espectro del St se presenta una banda en 1601 cm⁻¹, (señalada con la ampliación), de estiramiento del C=C que representa sus sitios de insaturación. En el espectro de RPI no se observan bandas en la región de 1600 a 1643 cm⁻¹, correspondientes a sitios de insaturación que aparecen, tanto en PI como en St, lo cual confirma que ocurrió el entrecruzamiento entre estos dos polímeros para la formación de RPI.

3.1.2. Formación de RPI-H

En la Figura 3 se presentan los espectros FT-IR de la RPI-H y sus precursores (PI, St y TMSPM), que se desplazaron arbitrariamente a lo largo del eje de transmitancia y en la Tabla 2, las bandas de sus enlaces característicos [27]. En la figura referida, es importante destacar que el PI, St y TMSPM presentan una banda a 1643, 1601 y 1640 cm⁻¹, respectivamente (señaladas con las ampliaciones respectivas), atribuidas a la presencia de enlaces C=C, [28-30, 33] que son sus sitios de insaturación. En el espectro de RPI-H no se observan bandas en la región de 1600 a 1643 cm⁻¹ (señalada con la ampliación), correspondientes a sitios de insaturación que aparecen, tanto en PI, St y TMSPM, lo cual confirma que ocurrió el entrecruzamiento entre los tres precursores para la formación de RPI-H. Además de la identificación de las bandas atribuidas a los grupos inorgánicos del TMSPM, a 3507 cm⁻¹, correspondiente a enlaces Si-OH, producto de su hidrólisis y enlaces Si-O-Si a 1099 cm⁻¹, producto de la condensación de los grupos silanoles (Si-OH) formados [35-39]. Por lo tanto, esto nos indica la formación exitosa de la RPI-H.

3.1.3. Propuesta de mecanismo de reacción del MPM

En la Figura 4, con base en los análisis de espectroscopía por infrarrojo anteriores, se propone el mecanismo de reacción del MPM, se presenta la propuesta de la formación del mortero polimérico elaborado con RPI de PET reciclado y nanoacoplante organo(alcoxi)silano, TMSPM. En a) se observa la superficie del AF la cual presenta grupos OH, en b), el acoplante TMSPM hidrolizado, en c), la RPI pre-polimerizada y

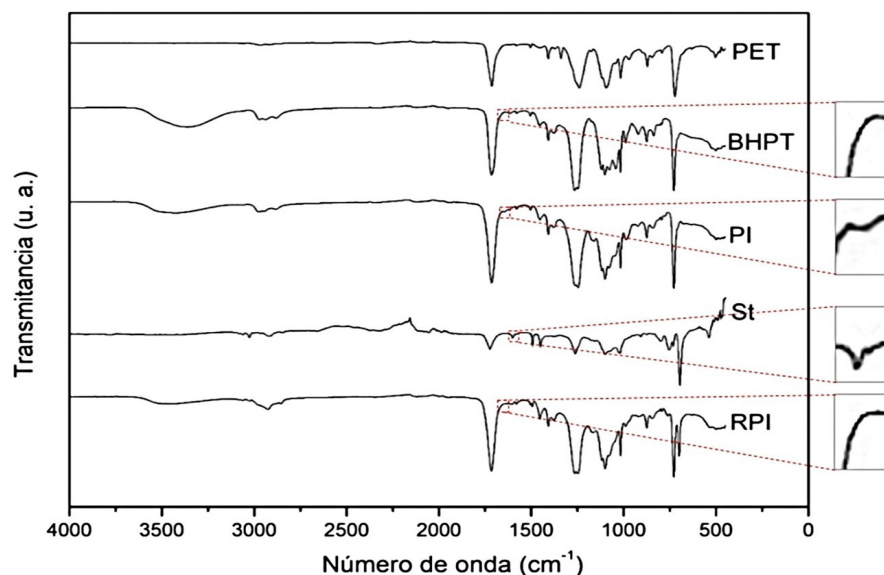


Figura 2. Espectros FT-IR del PET, BHPT, PI, St y RPI.

Tabla 1. Información de las bandas del PET, BHPT, PI, St y RPI.

Enlace	Número de onda (cm-1)					Tipo de vibración
	PET	BHPT	PI	St	RPI	
C-O	1240	1265	1263	-	1263	Estiramiento
C=O	1713	1716	1715	-	1716	Estiramiento
C=C	-	-	1643	1601	-	Estiramiento
C=Carom	1504	1504	1504	1493	1504	Estiramiento
CHarom	872-723	876-727	875-726	795-695	876-699	Flexión fuera del plano
CH3	-	2972	2975	-	2977	Estiramiento simétrico
CH2	2918	2936	2944	2918	2954	Estiramiento asimétrico
CH	-	2877	2881	2844	2852	Estiramiento simétrico
OH	-	3350	-	-	-	Estiramiento

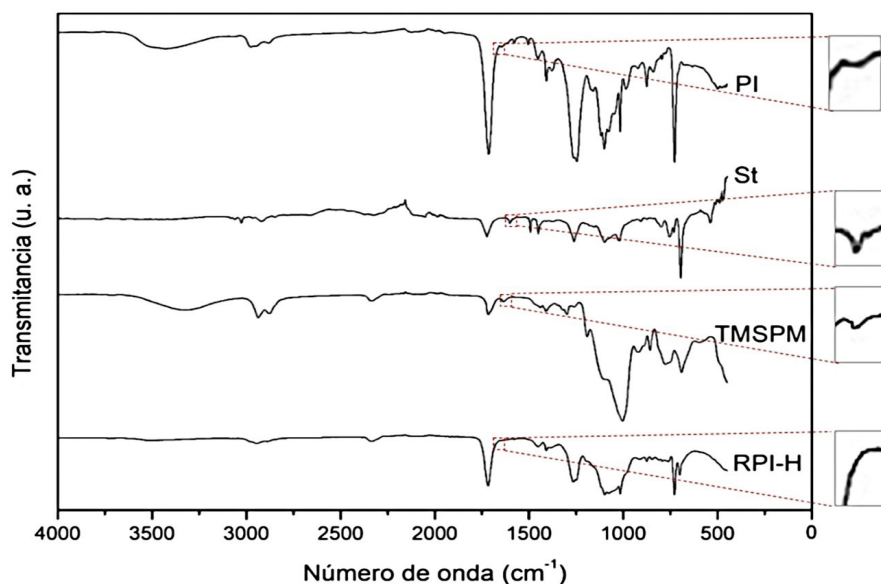


Figura 3. Espectros FT-IR de la RPI-H y sus precursores (PI, St y TMSPM).

Tabla 2. Información de las bandas de la RPI-H y sus precursores (PI, St y TMSPM).

Enlace	Número de onda				Tipo de vibración
	PI	St	TMSPM	RPI-H	
C-O	1263	-	1298	1265	Estiramiento
C=O	1715	-	1714	1716	Estiramiento
C=C	1643	1601	1640	-	Estiramiento
C=Carom.	1504	1493	-	1452	Estiramiento
CHarom.	875-726	795-695	-	876-700	Flexión fuera del plano
CH3	2975	-	2936	2943	Estiramiento simétrico
CH2	2944	2918	2877	2888	Estiramiento asimétrico
CH	2881	2844	-	2842	Estiramiento simétrico
Si-C	-	-	1259	1195	Flexión simétrica
Si-O	-	-	1105	1115	Estiramiento asimétrico
Si-OH	-	-	3323	-	Estiramiento

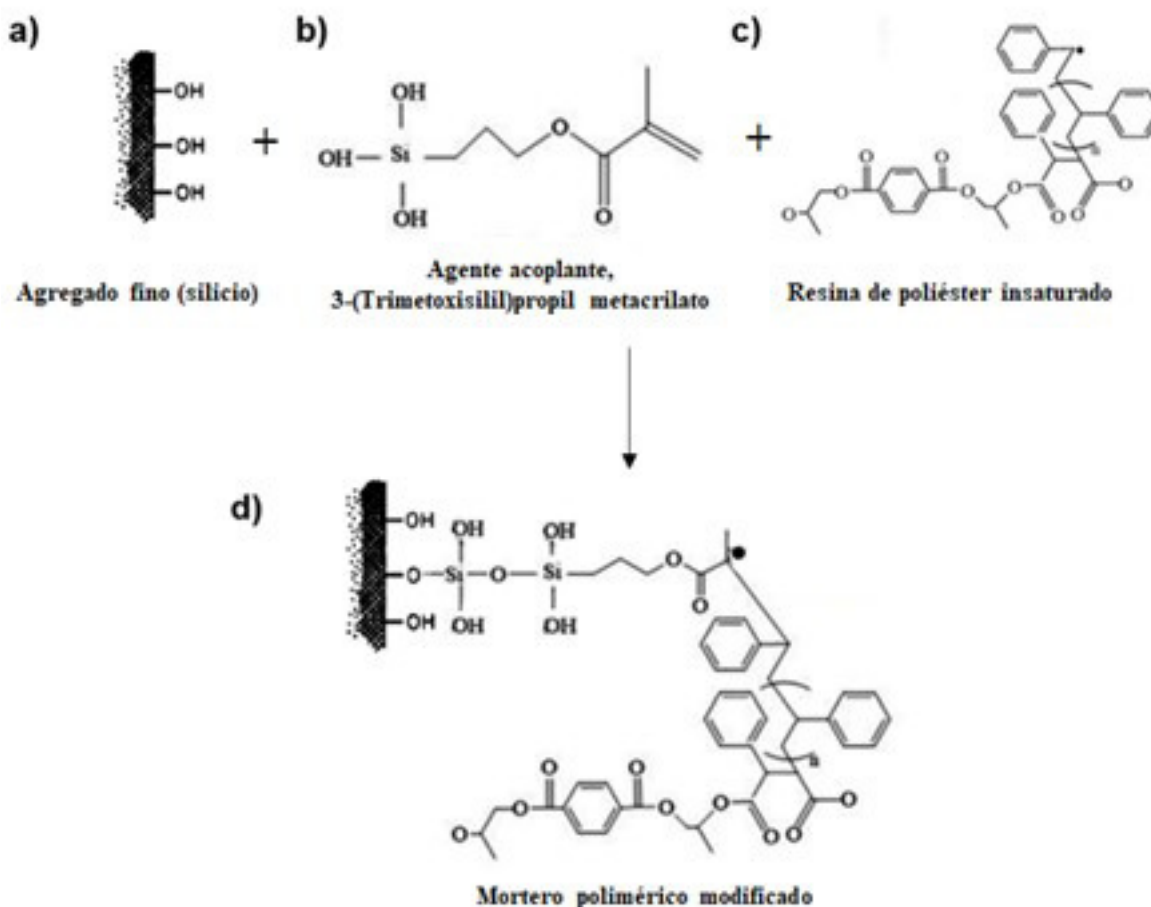


Figura 4. Propuesta de formación del MPM con AF-TMSPM-RPI

en d) la formación del mortero polimérico que se lleva a cabo, por un lado, por la policondensación entre los grupos hidroxilo (OH) del acoplante TMSPM (producto de la hidrolización de sus grupos alcoxi) y los del agregado fino para formar un enlace covalente (Si-O) entre ellos y por otro lado, ocurre la polimerización por radicales libres, reacción originada por el ataque de los radicales libres presentes en la RPI pre-polimerizada al grupo organo-funcional no hidrolizable del TMSPM ($C=CH_2$) [40, 41].

3.2. Propiedades físicas del AF

En la Figura 5 se presenta la curva granulométrica del AF, donde se muestran los límites superior e inferior según la norma ASTM C33/C33M-18, y se ob-

serva que cumple con los límites granulométricos establecidos, localizada muy cercana al límite superior.

En base a los datos de la curva granulométrica, se calculó el módulo de finura del AF, que resultó con valor de 2.3, el cual cumple con los límites recomendados (2.3 a 3.1) de la norma ASTM C33/C33M-18. Además, se obtuvo la densidad de AF, con un valor de 1.84 g/cm³, de acuerdo a la norma ASTM C128-15.

3.2. Resistencia a compresión

En la Figura 6 se presenta el diagrama de barras de la resistencia a compresión (F'_c) de MPM y MP. Se observa que la F'_c fue de 7.77 MPa para MPM y de 5.37 MPa para MP, por lo que, de acuerdo a la

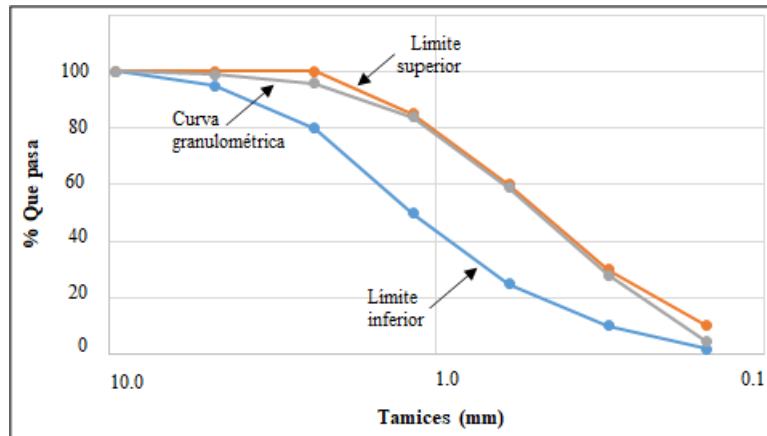


Figura 5. Curva granulométrica del AF

NMX-C-486-ONNCCE-20, estos morteros se clasifican como tipo II y tipo III, respectivamente.

El F'_c del MPM incrementó 45 % con respecto al MP, esto se puede atribuir a la interacción química

entre el AF y la RPI por medio del agente acoplante silano, TMSPM, que pudiera proporcionar mayor rigidez, por el mejoramiento de la adhesión en toda su zona de transición interfacial [13, 21, 42].

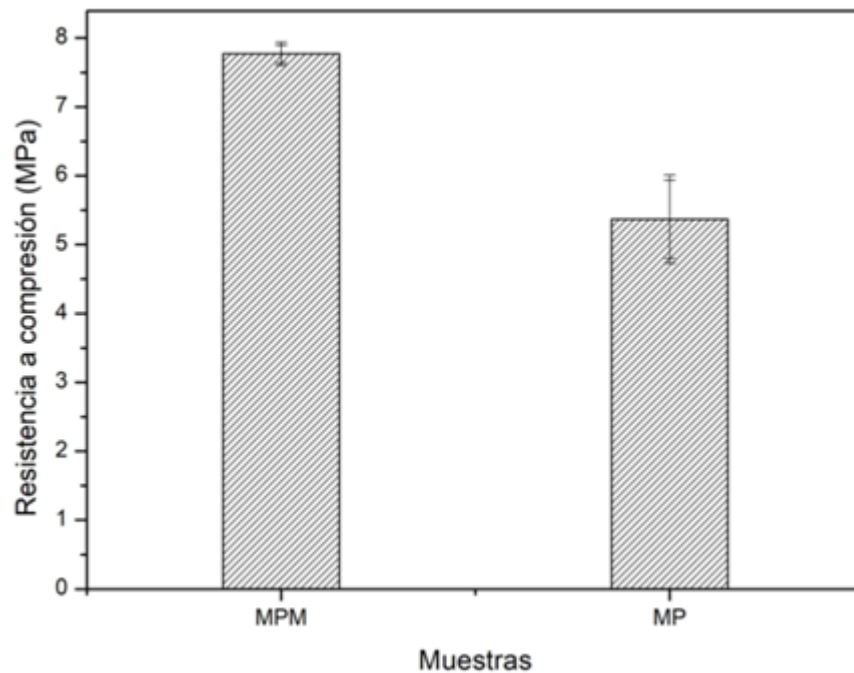


Figura 6. Diagrama de barras de la resistencia a compresión de MP y MPM

4. CONCLUSIONES

Se elaboró mortero polimérico modificado con agregado fino y resina de poliéster insaturado con adición de nanoacoplante silano TMSPM.

Se sintetizó la resina de poliéster insaturado, comprobado por el entrecruzamiento de las insaturaciones presentes en el poliéster insaturado y el estireno, en base a la síntesis del poliéster insaturado mediante la policondensación del BHPT con anhídrido maleico, en el cual se utilizó el BHPT, que fue sintetizado a partir del reciclaje químico de las hojuelas del PET (recicladas mecánicamente) con adición de propilenglicol, corroborado en cada etapa por medio del FT-IR.

Se sintetizó la resina de poliéster insaturado híbrida por medio de la interacción química entre las insaturaciones de la RPI pre-polimerizada y el grupo organo-funcional, $C=CH_2$, del agente acoplante silano, TMSPM, lo cual fue corroborado por FT-IR.

Se elaboró mortero polimérico, a partir de agregado fino/resina de poliéster insaturado, con relación 80%/20%, en peso, respectivamente y mortero polimérico modificado, a partir de agregado fino/resina de poliéster insaturado híbrida, con relación 80%/20%, en peso, respectivamente, donde la resina de poliéster insaturado híbrida contiene 5% de agente acoplante silano, TMSPM.

Se propuso un mecanismo de reacción para la elaboración del mortero polimérico modificado, donde se mostró la interacción del agente acoplante, TMSPM, tanto con el agregado fino, por medio de su grupo funcional inorgánico hidroxilo (OH) y con la resina de poliéster insaturado, por medio de su grupo funcional orgánico $C=CH_2$.

La resistencia a compresión del mortero polimérico modificado fue 45% mayor que la del mortero polimérico, debido a la interacción química entre el agregado fino y la resina de poliéster insaturado, por medio del agente acoplante silano, TMSPM, la cual pudo proporcionar mayor rigidez, por el mejoramiento de la adhesión en toda la zona de transición interfacial entre el agregado fino y la resina de poliéster insaturado, al proporcionar enlaces químicos entre los grupos inorgánicos del TMSPM y la superficie del agregado fino y entre los grupos organofuncionales del TMSPM y la resina de poliéster insaturado.

La resistencia a compresión de mortero polimérico modificado y mortero polimérico fue equivalente a la de los morteros cementicios tipo II y III de la NMX-C-486-ONNCE-20.

5. RECONOCIMIENTOS

Los autores otorgan reconocimiento al CONACYT por su apoyo en la beca No. 924109 y al personal del Centro de investigación en Materiales Avanzados, S.C., México, por la caracterización de muestras, especialmente al soporte técnico de R. P. Talamantes-Soto.

6. REFERENCIAS

- [1] A. Ravve, Principles of Polymer Chemistry, Niles, IL, USA: Springer Science+Business Media, LLC, 2012.
- [2] D. R. Askeland y P. P. Phulé, Ciencia e ingeniería de los materiales, Missouri: Thomson, 2004.
- [3] A. Kurmar y R. K. Gupta, Fundamentals of Polymer Engineering, Revised and Expanded, Kanpur, India: Marcel Dekker, Inc., 2003.
- [4] C. Artur, G. Barbara, P. Beata, G. Martav y P. Przemyslaw, Composites of unsaturated polyester resins with microcrystalline cellulose and its derivatives, Materials, vol. 13, n° 1, pp. 1-13, 2020.
- [5] P. Przemyslaw, P. Andrzej y G. Barbara, Green composites based on unsaturated polyester resin from recycled PET with wood flour as filler—synthesis, characterization and aging effect, Polymers, vol. 12, n° 12, pp. 1-11, 2020. [6] P. Daniel y S. Tadeusz, Chemical Recycling of Poly(ethylene terephthalate), Industrial and Engineering Chemistry Research, vol. 36, n° 4, pp. 1373-1383, 1997.
- [7] S. Thomas, A. Rane, K. Kanny, A. V.K. y M. George Thomas, Recycling of Polyethylene Terephthalate Bottles, Kerala, India: William Andrew, 2019.
- [8] A. Luis, N. Rendón y M. E. Korody, Diseños de mezcla de tereftalato de polietileno (PET) – cemento, Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela, vol. 23, n° 1, pp. 1-16, 2008.
- [9] S. Vigneshwaran, D. Oisik, N. Rasoul Esmaeely, B. Karthik, S. Sunpreet, H. Mikael S., B. Filippo y R. Seeram, Polymer Recycling in Additive Manufacturing: An Opportunity for the Circular Economy, Materials Circular Economy, vol. 2, n° 1, pp. 1-11, 2020.

[10] J. Reis, R. Chianelli-Junior, J. Cardoso y F. Marinho, Effect of recycled PET in the fracture mechanics of polymer mortar, *Construction and Building Materials*, vol. 25, n° 6, pp. 2799-2804, 2011.

[11] Y. Gao, P. Romero, H. Zhang, M. Huang y F. Lai, Unsaturated polyester resin: A review, *Construction and Building Materials*, vol. 228, pp. 116709, 2016.[12] K. Rebeiz, D. Fowler y D. Paul, Polymer concrete and polymer mortar using resins based on recycled poly(ethylene terephthalate), *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 44, n° 9, pp. 1649-1655, 1992.

[13] A. Gupta, P. Mani y S. Krishnamoorthy, Interfacial adhesion in polyester resin concrete, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 3, n° 3, pp. 149-154, 1983.

[14] H. Akil, J. Lily, H. Razak y A. Zainal, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Effect of Various Coupling Agents on Properties of Alumina-filled PP Composites, vol. 25, n° 7, pp. 744-759, 2006.

[15] K. Mittal y D. O'Kane, Vapor deposited silanes and other coupling agents, *The Journal of Adhesion*, vol. 8, n° 1, pp. 93-97, 1976.

[16] B. Chmielewska y J. Sustersic, The influence of silane coupling agents on the polymer mortar, *Cement and Concrete Composites*, vol. 28, n° 9, pp. 803-810, 2006.

[17] M. Hussain, A. Nakahira, S. Nishijima y K. Niihara, Effects of coupling agents on the mechanical properties improvement of the TiO₂ reinforced epoxy system, *Elsevier Science B.V.*, vol. 26, pp. 299-303, 1996.

[18] Elsevier, Chapter 8 Chemical modification of silica: Applications and procedures, *Studies in Surface Science and Catalysis*, vol. 93, n° 8, pp. 149-192, 1995.

[19] W. Luo, X. Wang, R. Huang y P. Fang, Interface enhancement of glass fiber/ unsaturated polyester resin composites with nano-silica treated using silane coupling agent, *Wuhan University Journal of Natural Sciences*, vol. 19, n° 1, pp. 34-40, 2014.

[20] S. Widad, Synthesis and polymerization of new silane coupling agent and used it as impact modifier of silica filled unsaturated polyester, *Asian Journal of Applied Sciences*, vol. 4, n° 2, pp. 370-378, 2016.

[21] L. Jinming, J. Boyu, Y. Qing, X. Wei, X. Haiying, D. Shanliang y Y. Wenshu, Properties of concrete prepared with silane coupling agent-impregnated coral aggregate and coral concrete, *Materials*, vol. 14, n° 21, pp. 1-15, 2021.

[22] P. Mani, A. Gupta y S. Krishnamoorthy, Efficiency of some silane coupling agents and of the method of their application in polyester resin concrete, *Journal of Materials Science*, vol. 18, n° 12, pp. 3599-3605, 1983.

[232] P. Mani, A. Gupta y S. Krishnamoorthy, Comparative Study of Epoxy and Polyester Resin-Based Polymer Concretes, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 7, n° 3, pp. 157-163, 1987.[24] R. Sood, S. Krishnamoorthy y B. Khandelwal, The effect of silane coupling agent and microfiller on the strength of phenol-formaldehyde resin concrete, *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, vol. 6, n° 2, pp. 93-98, 1984.

[25] B. Chmielewska, L. Czarnecki, J. Sustersic y A. Zajc, The influence of silane coupling agents on the polymer mortar, *Cement and Concrete Composites*, vol. 28, n° 9, pp. 803-810, 2006.

[26] M. Ribeiro, A. Fiúza, A. Castro, F. Silva, M. Dinis, J. Meixedo y M. Alvim, Mix design process of polyester polymer mortars modified with recycled GFRP waste materials, *Composite Structures*, vol. 105, pp. 300-310, 2013.

[27] B. Stuart, *Infrared Spectroscopy: Fundamentals and Applications*, John Wiley & Sons, Ltd, 2004.

[28] E. Rodriguez, The effect of free radical initiators and fillers on the cure of unsaturated polyester resins, *Polymer Engineering & Science*, vol. 31, n° 14, pp. 1022-1028, 1991.

[29] M. Carmen Matías, A. Larena, M. De La Ulagaes Orden y J. Martinez, Application of FTIR spectroscopy to the study of curing of glass reinforced polyester composites, *Macromolecular Symposia*, vol. 94, n° 1, pp. 273-282, 1995.

[30] J. Grenet, S. Marais, M. T. Legras, P. Chevalier y J. M. Saiter, DSC and TSDC study of unsaturated polyester resin: Influence of the promoter content, *Journal of*

Thermal Analysis and Calorimetry, vol. 61, n° 3, pp. 719-730, 2000.

[31] M. E. Tawfik, Preparation and characterization of water-extended polyester based on recycled poly(ethylene terephthalate), Journal of Applied Polymer Science, vol. 89, n° 13, pp. 3693-3699, 2003.

[32] K. Suyama, M. Kubota, M. Shirai y H. Yoshida, Chemical recycling of networked polystyrene derivatives using subcritical water in the presence of an aminoalcohol, Polymer Degradation and Stability, vol. 95, n° 9, pp. 1588-1592, 2010.

[33] J. Purohit, G. Chawada, B. Choubisa, M. Patel y B. Dholakiya, 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, Chemical sciences journal, vol. 2012, n° CSJ-76, pp. 1-17, 2012.

[34] J. D. Rusmirović, K. T. Trifković, B. Bugarski, V. B. Pavlović, J. Džunuzović, M. Tomić y A. D. Marinković, High performance unsaturated polyester based nanocomposites: Effect of vinyl modified nanosilica on mechanical properties, Express Polymer Letters, vol. 10, n° 2, pp. 139-159, 2016.

[35] D. Soriano, A. Mazo, J. Rubio, F. Rubio y J. L. Oteo, Degradación térmica de nanocomposites TEOS/resol y γ -APS/resol, Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, vol. 45, n° 6, pp. 379-388, 2006.

[36] C. M. Zheng, X. D. Li, H. Wang, D. F. Zhao y T. J. Hu, Evolution of crystallization and its effects on properties during pyrolysis of Si-Al-C-(O) precursor fibers,

Journal of Materials Science, vol. 43, n° 9, pp. 3314-3319, 2008.

[37] N. A. Rangel-Vázquez y T. Leal-García, Spectroscopy analysis of chemical modification of cellulose fibers, Journal of the Mexican Chemical Society, vol. 54, n° 4, pp. 192-197, 2010.

[38] A. H. Mohammed, M. B. Ahmad, N. O. R. A. Ibrahim y N. Zainuddin, Synthesis and monomer reactivity ratios of [3(trimethoxysilyl) propyl methacrylate/N-vinyl pyrrolidone] copolymer, International Journal of Chemical Sciences, vol. 14, n° 4, pp. 2279-2291, 2016.

[39] R. Salgado-Delgado y A. 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, International Journal of Engineering Research and Applications, vol. 6, n° 2, pp. 04-07, 2016.

[40] A.H. Mohammed, M.B. Ahmad, N.A. Ibrahim y N. Zainuddin, Effect of crosslinking concentration on properties of 3- (trimethoxysilyl) propyl methacrylate/N-vinyl pyrrolidone gels, Chemistry Central Journal, vol. 12, n° 15, 2018.

[41] X. Fan, S. Gu, L. Wu y L. Yang, Preparation and characterization of thermoresponsive poly(N-isopropylacrylamide) copolymers with enhanced hydrophilicity, E-Polymers, vol. 20, pp. 561-570, 2020.

[42] G. Li, Z. Wang, C.K.Y. Leung, S. Tang, J. Pan, W. Huang y E. Chen, Properties of rubberized concrete modified by using silane coupling agent and carboxylated SBR, Journal of Cleaner Production, vol. 112, Part 1, pp. 797-807, 2016.