

Ciencia Nicolaita 87

ISSN: 2007-7068



Universidad
Michoacana
de San Nicolás
de Hidalgo

Reutilización de partículas de PET en la elaboración de morteros para construcción

Reuse of PET particles in the manufacture of mortars for construction

Marcelino Benito Vásquez-López, Prisciliano Felipe de Jesús Cano-Barrita,*
Frank Manuel León-Martínez y Martín Hidalgo-Reyes

Para citar este artículo: Vásquez-López Marcelino Benito, Cano-Barrita Prisciliano Felipe de Jesús, León-Martínez Frank Manuel e Hidalgo-Reyes Martín, 2023. Reutilización de partículas de PET en la elaboración de morteros para construcción. Ciencia Nicolaita no. 87, 134-148. DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi87.664>



Historial del artículo:

Recibido: 26 de mayo de 2022
Aceptado: 22 de noviembre de 2022
Publicado en línea: abril de 2023



Ver material suplementario



Correspondencia de autor: pcano@ipn.mx



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>



Reutilización de partículas de PET en la elaboración de morteros para construcción

Reuse of PET particles in the manufacture of mortars for construction

Marcelino Benito Vásquez-López,^{1,2} Prisciliano Felipe de Jesús Cano-Barrita,^{1,*} Frank Manuel León-Martínez¹ y Martín Hidalgo-Reyes²

¹Instituto Politécnico Nacional-CIIDIR Unidad Oaxaca, Hornos No. 1003, Colonia Noche Buena, Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, México.

²Universidad Autónoma Chapingo, km 38.5 carretera México-Texcoco, Chapingo, Estado de México, México.

Resumen

Partículas de PET reciclado se usaron como reemplazo parcial del agregado fino en morteros de cemento Portland. La relación agua/cemento en peso de los morteros fue 0.50, y el PET reciclado se trituró hasta obtener partículas con tamaños menores a 4.75 mm. Las proporciones de sustitución de arena natural por PET fueron 0, 5, 10, 15 y 20% con base en el volumen. Se elaboraron en triplicado especímenes cúbicos de 5 cm por lado y prismas cuadrangulares de 4 cm x 4 cm x 16 cm. Se evaluaron las propiedades reológicas de los morteros en estado fresco, así como las propiedades mecánicas y de durabilidad en estado endurecido. Los resultados indican que el PET incrementa la viscosidad y el esfuerzo de fluencia de los morteros con respecto al control, mostrando valores similares de ambas propiedades en los morteros conteniendo desde 5 hasta 15% de PET. Con relación a las propiedades en estado endurecido, a medida que se incrementó la cantidad de PET se observó una disminución en la velocidad de pulso ultrasónico, en la resistencia a la compresión, en el módulo de elasticidad y en la resistencia a la flexión. La absorción capilar de agua aumentó en los morteros conteniendo PET.

Palabras clave: PET, mortero, reología, resistencia mecánica, absorción de agua

Abstract

Recycled PET particles were used as a partial replacement for fine aggregate in Portland cement mortars. The water/cement ratio by weight of the mortars was 0.50, and the recycled PET was crushed until obtaining particles with sizes smaller than 4.75 mm. The proportions of substitution of natural sand for PET were 0, 5, 10, 15 and 20% based on volume. Cubic specimens of 5 cm per side and quadrangular prisms of 4 cm x 4 cm x 16 cm were made in triplicate. The rheological properties of the mortars in the fresh state, as well as the mechanical and durability properties in the hardened state, were evaluated. Results indicate that the PET increases the viscosity and the yield stress of the mortars, with respect to the control, showing similar values of both properties in the

mortars containing from 5 to 15% of PET. Regarding the properties in the hardened state, as the amount of PET increased, a decrease was observed in the ultrasonic pulse velocity, in the compressive strength, in the modulus of elasticity and in the flexural strength. The capillary absorption of water increased in the mortars containing PET.

Keywords: PET, mortar, rheology, mechanical strength, water absorption

1. Introducción

Los plásticos tienen beneficios sustanciales en términos de su bajo peso, mayor durabilidad y menor costo en comparación con otros materiales (Andrady & Neal, 2009; Thompson *et al.*, 2009). La producción de polímeros en todo el mundo se estimó en 260 millones de toneladas métricas por año para el 2007 (Plastics Europe, 2009). A causa de toda esta producción y disposición final inadecuada, la contaminación del medio ambiente y los problemas asociados a la vida silvestre son visibles, especialmente en la acumulación de plástico en el hábitat terrestre y marino (Gregory, 2009). Aproximadamente el 50% de los plásticos son usados y desechados después de haber sido utilizados una sola vez, tales como envases, acolchados agrícolas, artículos de consumo desechable, tubos, revestimientos de cable, materiales estructurales, dispositivos electrónicos, mobiliario y vehículos (Plastics Europe, 2009). Esto ha originado un grave problema ambiental, ya que por ejemplo al PET le toma entre 100 a 1000 años para degradarse (D. A. Silva *et al.*, 2005). La reducción de este contaminante es cualquier medida que reduzca el volumen de desechos plásticos producidos, siendo el reciclaje una alternativa que permite elaborar nuevos productos (Abdel-Bary *et al.*, 1998).

En el área de materiales para construcción, una aplicación de los plásticos de desecho ha sido en la sustitución parcial de agregados pétreos, especialmente los finos o su uso como fibras de refuerzo. La reutilización de PET en los materiales base de cemento tiene como ventajas la disminución de la disposición de este material en el medio ambiente, inmovilizando el PET en la matriz cementante, además de incentivar la economía circular al procesar el PET para la producción de un sustituto parcial de arena natural. El PET ha sido uno de los plásticos empleados en materiales base de cemento, y las propiedades estudiadas incluyen trabajabilidad, densidad, propiedades

mecánicas, térmicas y de durabilidad. Otros plásticos como el policarbonato también producen un comportamiento similar al producido por las partículas de PET en morteros (Hannawi *et al.*, 2010).

En estado fresco, el efecto de adicionar las partículas planas e irregulares de PET es la reducción del revenimiento del concreto debido la forma de las partículas (Albano *et al.*, 2009; Ismail & AL-Hashmi, 2008; Meza & Siddique, 2019), así como también se ha reportado un incremento del revenimiento cuando se utilizó en morteros autoconsolidables (Safi *et al.*, 2013). En estado endurecido, las propiedades mecánicas han sido ampliamente estudiadas. Albano *et al.* (2009) investigaron el comportamiento mecánico de morteros conteniendo partículas de PET, en los cuales realizaron sustituciones volumétricas de agregado natural por PET del 10% y 20%, con tamaño promedio de las partículas de PET de 2.6 mm y 11.4 mm. Los resultados mostraron una disminución en la resistencia a la compresión, resistencia a la tracción y módulo de elasticidad. Sin embargo, en el trabajo de Rahmani *et al.* (2013) se observó que la resistencia a la flexión incrementó para porcentajes de reemplazo bajos (5%), aunque disminuye para mayores porcentajes.

Por otra parte, Meza y Salman (2019) utilizaron botellas de PET recicladas para la elaboración de fibras de refuerzo en mezclas de concreto, considerando la cantidad de fibra y la proporción de aspecto de la fibra como factores que afectan la respuesta del concreto a la flexión y su nivel de asentamiento, encontrando que la trabajabilidad disminuye al incluir fibras de refuerzo; asimismo, la tenacidad a la flexión tiende a mejorar cuando se incrementa la cantidad y la proporción de forma de las fibras.

Con relación a la durabilidad, la propiedad evaluada ha sido la absorción capilar de agua. Algunos estudios reportan incremento de la absorción (Albano *et al.*, 2009) debido a la separación que se genera entre las partículas de PET y la pasta de cemento, aunque otros reportan una menor capacidad de absorción por

capilaridad (Marzouk *et al.*, 2007; Safi *et al.*, 2013). En otros trabajos se reportan ambos comportamientos (Silva *et al.*, 2013), dependiendo del tipo de partícula adicionada: pelets, partículas pequeñas y grandes.

Con base en lo antes descrito, el objetivo de esta investigación fue evaluar la influencia que tiene la adición de partículas de PET en la reología de las mezclas y en las propiedades en estado endurecido de morteros, al sustituir parcialmente el agregado fino natural con diferentes porcentajes volumétricos usando partículas de tamaño menores de 4.75 mm y con deficiencia de partículas finas.

Tabla 1
Composición química del cemento
Portland utilizado.

| Óxido | % en peso |
|--------------------------------|-----------|
| SiO ₂ | 21.07 |
| Al ₂ O ₃ | 3.69 |
| Fe ₂ O ₃ | 4.5 |
| CaO | 61.93 |
| TiO ₂ | 0.97 |
| P ₂ O ₅ | 0.1 |
| MgO | 1.83 |
| MnO | 0.08 |
| Na ₂ O | 0.09 |
| K ₂ O | 0.3 |
| PPI a 1000 °C | 4.38 |

2. Materiales y Método

2.1. Materiales

Se utilizó cemento Portland ordinario 30RS (Holcim, México), cuya composición química se muestra en el Tabla 1. El agregado fino fue arena de río con módulo de finura de 2.6, absorción de 2.3% y densidad de 2.6 g/cm³. El PET reciclado seleccionado fue del

tipo cristal transparente, adquirido en forma de hojuelas de tamaño máximo 20 mm y una densidad de 1.3 g/cm³.

2.2. Método

2.2.1. Obtención y caracterización de las partículas de PET y el agregado pétreo fino

Se utilizó una licuadora industrial (International, Estado de México, México) para reducir el tamaño inicial de las hojuelas de PET de un tamaño máximo de 20 mm a uno menor de 4.75 mm (Figura 1). Lo anterior debido a que se consideró que al reducir el tamaño de las partículas de PET, se lograría reducir las pérdidas de resistencia a la compresión a porcentajes de sustitución semejantes a los previamente reportados por otros autores (Meza *et al.*, 2021) donde el PET fue usado en tamaños mayores. Se determinaron las curvas granulométricas del agregado fino y del PET (Figura 2) basados en la Norma ASTM C136 (ASTM C136-01, 2001). La granulometría de la arena estuvo dentro de los límites de la norma ASTM C33 (ASTM C33-03, 2003), mientras que el PET triturado tuvo deficiencia de partículas finas; sin embargo, se decidió utilizar el PET con esta granulometría.

2.2.2. Preparación de los morteros y elaboración de especímenes

Las proporciones utilizadas para la elaboración de los morteros con relación agua/cemento en masa de 0.50 se indican en la Tabla 2. El mortero control fue denominado M0, mientras que los morteros con sustitución de 5, 10, 15 y 20% en volumen de agregado fino natural por partículas de PET fueron denomina-

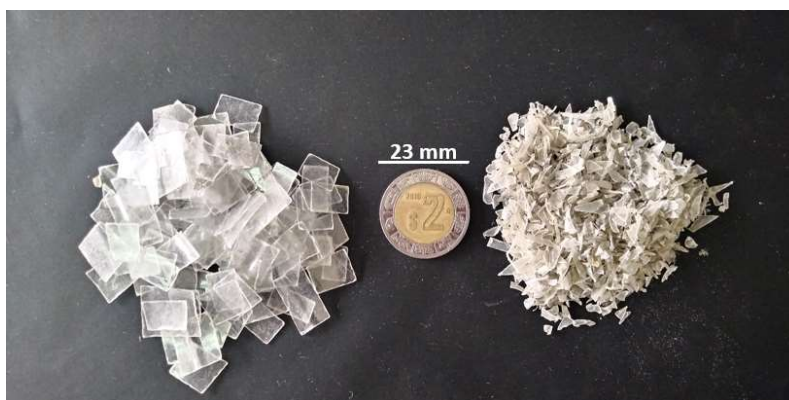


Figura 1. Partículas de PET antes (izquierda) y después (derecha) del proceso de triturado utilizando una licuadora industrial.

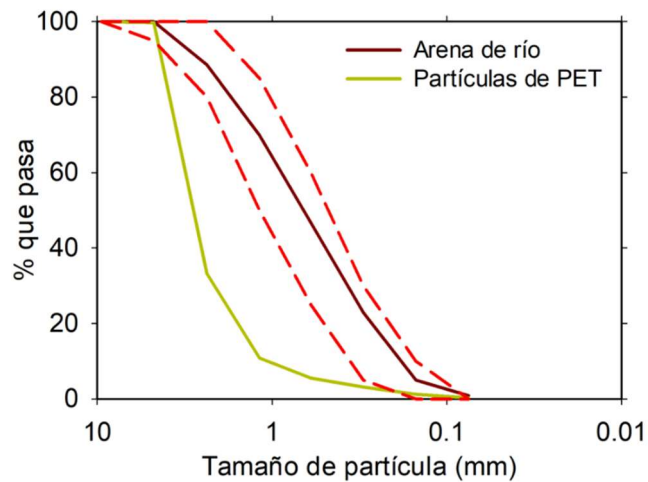


Figura 2. Curva granulométrica del agregado fino natural y del PET triturado. Las líneas discontinuas rojas representan los límites superior e inferior de la ASTM C 33.

dos M1, M2, M3 y M4, respectivamente. La elaboración de los morteros se realizó de acuerdo con la norma ASTM C305 (ASTM C305, 2014), utilizando una mezcladora con movimiento planetario (Economirugo S.A. de C.V., Ciudad de México, México).

Se colaron por triplicado especímenes cúbicos de 5 cm x 5 cm x 5 cm para evaluar la resistencia a la compresión a 28 y 56 días de edad, así como para absorción capilar a 56 días. Los prismas cuadrangulares de 4 cm x 4 cm x 16 cm se elaboraron para determinar la resistencia a la flexión a 56 días. Los moldes se llenaron en dos capas y se vibraron durante 5 s, después se enrasaron en la parte superior. Una vez terminado el llenado de los moldes, se cubrieron con bolsas de plástico para evitar la pérdida de agua por evaporación. Los especímenes se desmoldaron 24 horas después y se curaron dentro de una solución saturada de hidróxido de calcio hasta la edad de prueba.

2.2.3 Caracterización reológica de los morteros

De cada una de las mezclas preparadas se tomó 0.50 L para realizar la caracterización reológica. Las mediciones se realizaron en una sola réplica de cada mortero. Se utilizó un reómetro Physica MCR 301 (Anton Paar, Gaz, Austria) con un sistema de medición de esfera de 8 mm de diámetro para obtener las curvas de flujo a 25 °C. Los datos obtenidos se ajustaron al modelo de flujo de Bingham (Yahia & Khayat, 2001), determinándose los parámetros reológicos de esfuerzo de fluencia y viscosidad plástica de los morteros en estado fresco.

El modelo de flujo de Bingham se expresa por la Ecuación 1:

$$\tau = \tau_0 + \mu_p \gamma \quad (1)$$

Donde τ es el esfuerzo cortante (Pa), τ_0 es el esfuerzo de fluencia (Pa), μ_p es la viscosidad plástica (Pa·s) y γ es la velocidad de corte (s^{-1}).

2.2.4. Caracterización de los morteros en estado endurecido

2.2.4.1 Velocidad de pulso ultrasónico y módulo de elasticidad

La velocidad de pulso ultrasónico (VPU) se determinó a 1, 3, 7, 14, 28 y 56 días de edad, de acuerdo con la norma ASTM C597 (ASTM C597-16, 2016). Se utilizó un equipo PUNDIT 58-E4800 (Controls, Milán, Italia) con transductores a una frecuencia de 54 kHz. Se registró el tiempo de tránsito y la distancia entre las caras paralelas para determinar la velocidad de pulso ultrasónico. El módulo de elasticidad dinámico se estimó de acuerdo con la Ecuación 2 (ASTM C597-16, 2016):

Tabla 2
Proporciones en peso de materiales utilizados para elaborar 1 m³ de mortero con relación a/c = 0.50.

| Mortero | Cemento (kg) | Agua (kg) | Arena (kg) | PET (kg) |
|---------|--------------|-----------|------------|----------|
| M0 | 512 | 256 | 1491 | 0 |
| M1 | 512 | 256 | 1416 | 37 |
| M2 | 512 | 256 | 1342 | 75 |
| M3 | 512 | 256 | 1267 | 112 |
| M4 | 512 | 256 | 1193 | 149 |

$$E = \frac{\rho(1+\mu)(1-2\mu)V^2}{(1-\mu)} \quad (2)$$

Donde E es el módulo de elasticidad dinámico (Pa), ρ es la densidad (kg/m^3), V es la velocidad de pulso ultrasónico (m/s), μ es el módulo de Poisson » 0.18. La densidad de los morteros fue 2301 kg/m^3 , 2217 kg/m^3 , 2188 kg/m^3 , 2083 kg/m^3 y 1999 kg/m^3 para las muestras M0, M1, M2, M3 y M4, respectivamente.

2.2.4.2 Resistencia a compresión uniaxial y a flexión

Se determinó la resistencia a la compresión a 28 y 56 días de edad en los especímenes cúbicos de 5 cm por lado y se realizó de acuerdo con la norma ASTM C109 (ASTM C109M-16a, 2016). Se utilizó una máquina de compresión ELVEC E-654 con capacidad de 120 toneladas (Elvec S.A. de C.V., Ciudad de México, México).

La resistencia a la flexión se determinó a 56 días, siguiendo el procedimiento de la norma ASTM C348 (ASTM C348-02, 2013). Se utilizó una máquina GEOTEST S5830 (Geotest Instrument Corporation, Illinois, USA) con un punto de carga a la mitad de la longitud del espécimen. Se empleó un anillo de carga con capacidad máxima de 2658 kg para registrar la deformación y, finalmente, con la curva de calibración del anillo se determinó la carga aplicada al espécimen.

2.2.4.3 Absorción capilar

La absorción capilar se determinó de acuerdo con la norma ASTM C1585 (ASTM C1585-13, 2013). A los 56 días de curado se extrajeron los especímenes y se secaron durante 24 horas en un horno a temperatura de 80°C . Una vez que los especímenes se enfriaron, se les aplicó resina epóxica 105 con catalizador 206 (Gougeon Brothers, Inc., Bay City, Michigan, USA) en una proporción de 2:1 en las cuatro caras, dejando libres dos caras opuestas. Se curó la resina durante un día a temperatura ambiente. Los especímenes se colocaron dentro de un recipiente que contenía agua destilada, manteniendo una altura de inmersión de los especímenes en el agua de 2 a 3 mm.

Se midió la ganancia de masa de los especímenes durante los tiempos de 5, 10, 15, 30, 60, 240, 480, 1440 y 2880 minutos después de iniciado el contacto con el agua, utilizando una báscula digital con precisión de 0.01 g. Con esta información se determinó la sorptividad (Hall, 1989), la cual es la capacidad de un

material poroso de absorber un fluido a través de capilaridad y está expresada por la Ecuación 3.

$$i = St^{\frac{1}{2}} + A \quad (3)$$

Donde i es el volumen de agua absorbida por unidad de sección transversal (mm^3/mm^2), S es la sorptividad ($\text{mm}/\text{min}^{1/2}$), t es el tiempo (minutos) y A es la intersección de la recta con el eje de las ordenadas (mm^3/mm^2).

2.2.4.4 Análisis SEM

La microestructura de los morteros, específicamente la interfaz pasta de cemento-partículas de PET, se estudió por medio de microscopía electrónica de barrido, para lo cual se utilizó un microscopio JEOL modelo JSM-IT300LV (JEOL, Akishima, Japón).

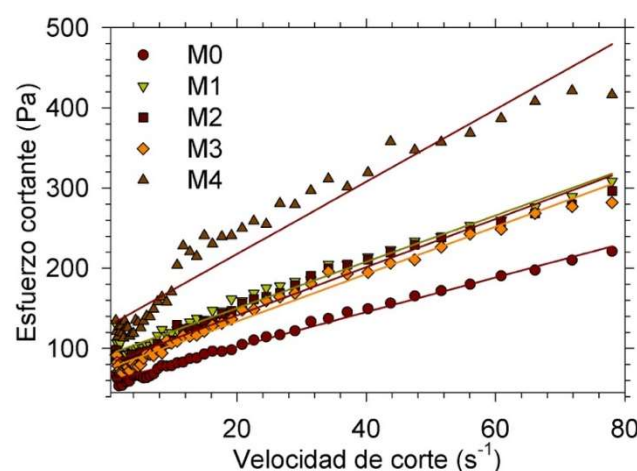


Figura 3. Curvas de flujo de los morteros control y los que contienen distintos reemplazos de agregado fino por PET triturado. Las curvas corresponden a la medición de una sola réplica de cada mortero. Las líneas continuas representan los ajustes de los datos al modelo de flujo de Bingham. El R^2 para los ajustes de datos de los morteros M0, M1, M2 y M3, es de 0.98; y para para el mortero M4 es de 0.94.

3. Resultados y Discusión

3.1. Reología de los morteros en estado fresco

La Figura 3 muestra las curvas de flujo de los morteros, en las cuales se observa que a una misma velocidad de corte los morteros con mayor porcentaje de PET presentaron un mayor esfuerzo cortante, lo que implica una menor trabajabilidad del material. Por

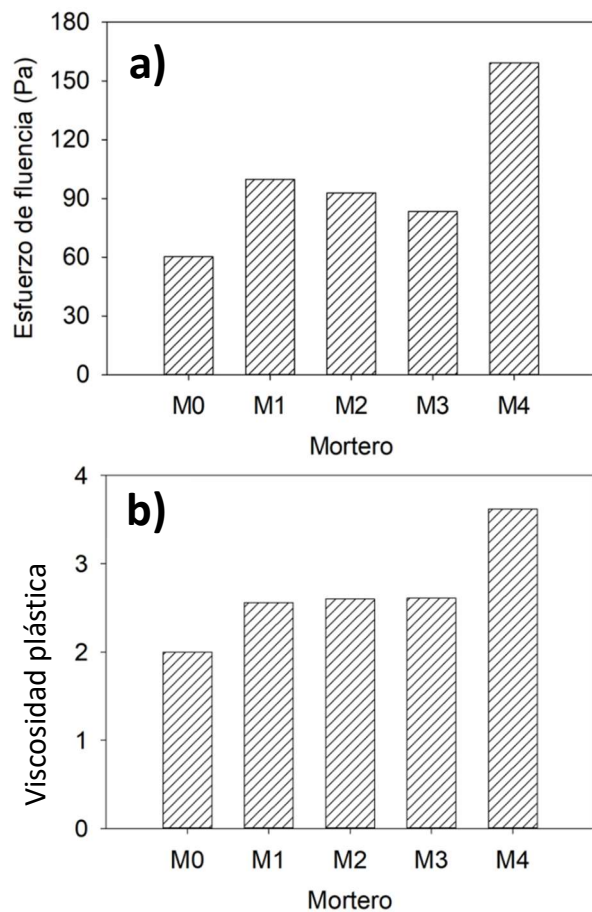


Figura 4. Propiedades reológicas de la mezcla de mortero de acuerdo con el modelo de Bingham, a) Esfuerzo de fluencia, b) Viscosidad plástica. Ambos parámetros estimados de una sola réplica del material.

ejemplo, a la velocidad de 10 s^{-1} se observan valores de esfuerzo de 80 Pa y 170 Pa para M0 y M4, respectivamente, es decir, se duplicó el esfuerzo cortante necesario en M4 con respecto a M0. Sin embargo, el esfuerzo cortante de los morteros M1, M2 y M3 fue semejante entre sí.

Existen dos factores que afectan el comportamiento de flujo de suspensiones de partículas: la fracción de volumen de partículas sólidas en la suspensión y la medida en que las partículas interactúan en la mezcla; también la forma del agregado tiene un efecto importante en la reología de mezclas (Struble *et al.*, 1998).

La Figura 4a muestra el esfuerzo de fluencia de Bingham requerido en las mezclas de mortero para iniciar el flujo. Se observa un incremento mayor a dos veces del esfuerzo de fluencia de M4 con respecto a la mezcla M0, debido al mayor porcentaje de PET, lo cual produjo una mezcla M4 considerablemente menos

trabajable. Los morteros M1, M2 y M3 tuvieron un esfuerzo de fluencia cercano entre ellos, pero intermedio entre los valores de M0 y M4. La Figura 4b muestra la viscosidad plástica de las mezclas, donde se observa un incremento menor que dos veces para la muestra M4 con respecto a la muestra control, por el notable aumento del volumen de PET que produjo una mezcla más viscosa. De la misma manera que en caso del esfuerzo de fluencia, la viscosidad plástica de las mezclas M1, M2 y M3 son similares entre sí, pero intermedias con relación a M0 y M4. La literatura reporta una disminución del revenimiento, estrechamente ligado a un incremento del esfuerzo de fluencia cuando se incluyen partículas de PET (Albano *et al.*, 2009; Meza *et al.*, 2021; Meza & Siddique, 2019; Saikia & De Brito, 2014). Sin embargo, también se ha reportado un incremento del revenimiento (disminución del esfuerzo de fluencia) en concreto autoconsolidable cuando se sustituye desde 10 y hasta 50% (en peso) de arena por partículas de PET (Safi *et al.*, 2013).

3.2. Velocidad de pulso ultrasónico y módulo de elasticidad

La Figura 5 muestra que a una determinada edad la VPU de los morteros disminuye a medida que se incrementa el contenido de PET. Esto se debe, principalmente, a una reducción de la densidad del mortero por la inclusión del PET y por una disminución del módulo de elasticidad, ya que el PET tiene un valor menor comparado con el de la arena y el de la pasta de ce-

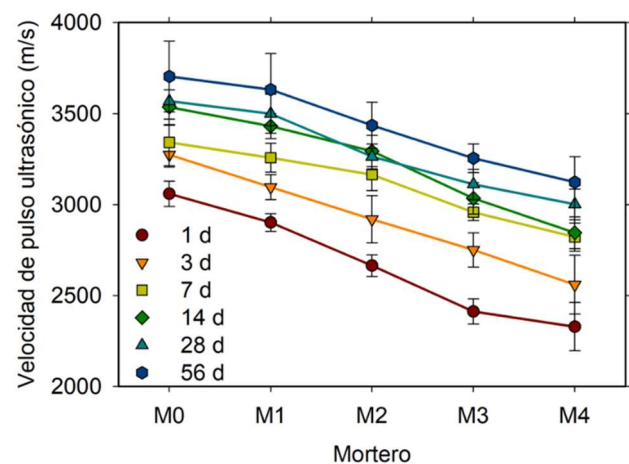


Figura 5. Velocidad de pulso ultrasónico en función de los días de curado de especímenes de mortero con diferentes porcentajes de sustitución de arena natural por PET. Las barras de error representan \pm una desviación estándar.

mento. La densidad y el módulo de elasticidad influyen principalmente en la VPU (Malhotra & Carino, 1991), tal como lo indica la Ecuación 4.

$$V = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (4)$$

Por otra parte, para un determinado mortero y mayor tiempo de hidratación, se reduce la porosidad (mayor densidad) y se incrementa el módulo de elasticidad de la pasta de cemento, lo que produce un incremento en la velocidad de pulso ultrasónico.

Con base en la velocidad de pulso ultrasónico se calculó el módulo de elasticidad dinámico (ASTM C597-16, 2016), además de que se estimó con base en la resistencia a compresión utilizando $E = 4700 (f'c)^{1/2}$ (ACI-318). En la Figura 6 se observa que ambos métodos proporcionan valores similares y, en ambos casos también, existe una disminución final del 33% y 38% del mortero M4 con respecto al control M0. El concreto con menor resistencia a la compresión posee valores pequeños de módulo de elasticidad (Saikia & De Brito, 2014). Albano *et al.* (2009) observaron que para una mezcla con sustitución del 20% (en volumen) de arena por PET con tamaño 11.4 mm y una relación agua/cemento de 0.60, el módulo de elasticidad disminuyó un 51% con respecto al control, esto debido al tamaño de partícula y mayor porcentaje de sustitución. Considerando el módulo de elasticidad dinámico a 56 días de edad, se observa una disminución final del mortero M4 del 38% con respecto al control M0. La reducción en el módulo de elasticidad se debe en parte a la disminución de la densidad del mortero por la inclusión del PET y también al menor módulo de elasticidad del PET, con lo cual se disminuye la velocidad de propagación de la onda ultrasónica (Marzouk *et al.*, 2007).

3.3. Resistencia a la compresión uniaxial y a la flexión

La Figura 7a muestra la resistencia a compresión a 28 y 56 días de edad en función del contenido de PET en los morteros. A medida que aumenta el porcentaje de PET, disminuye la resistencia a la compresión. Existe una disminución final de la resistencia a compresión del mortero M4 del 53% y 56% respecto al control M0 a 28 y 56 días, respectivamente. Esta dis-

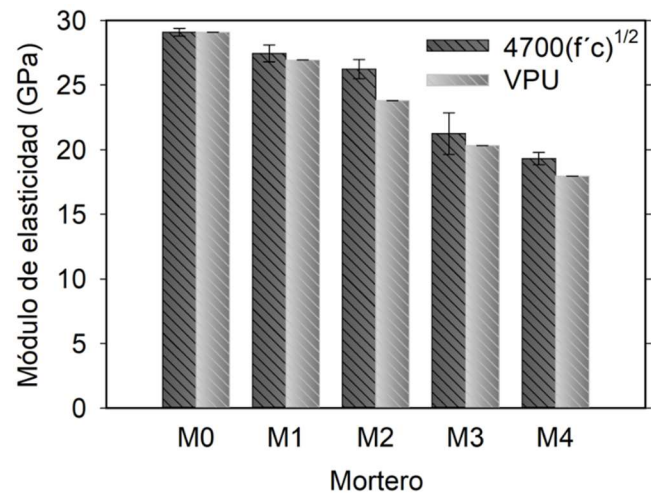


Figura 6. Módulos de elasticidad de los morteros a 56 días de edad calculados con base en el ACI-318 y a partir de la velocidad de pulso ultrasónico. Las barras de error representan \pm una desviación estándar.

minución es consistente con el comportamiento general reportado en la literatura (Albano *et al.*, 2009; da Luz García *et al.*, 2021; Hannawi *et al.*, 2010) y que se muestra en la Figura 7b cuando se normaliza la resistencia con el valor del control. Se observaron dos tendencias en el comportamiento: la primera muestra una mayor disminución de la resistencia con un aumento en el reemplazo de arena (incluye los datos del presente estudio); la segunda corresponde a otras investigaciones donde utilizaron partículas pequeñas o una combinación de partículas pequeñas y grandes, u otras que se agregaron en forma de pélets. Este último grupo posiblemente mejora la adherencia con la pasta de cemento, con lo que se reduce la pérdida de resistencia.

La relación inversamente proporcional entre la resistencia y el contenido de PET en volumen se conserva hasta valores de reemplazo menores a 30% que se ha reportado, ya que para sustituciones superiores al 50%, según Hannawi *et al.* (2010), ya no conserva el comportamiento lineal. La reducción de la resistencia se atribuye a una deficiente unión entre la matriz cementante y las partículas de PET (Hannawi *et al.*, 2010; Saikia & De Brito, 2014). Tratamientos con base de bacterias producen una superficie rugosa y además reducen el ángulo de contacto entre el agua y las partículas de PET (Denaro *et al.*, 2020), lo que implicaría una mejor adherencia con la pasta de cemento.

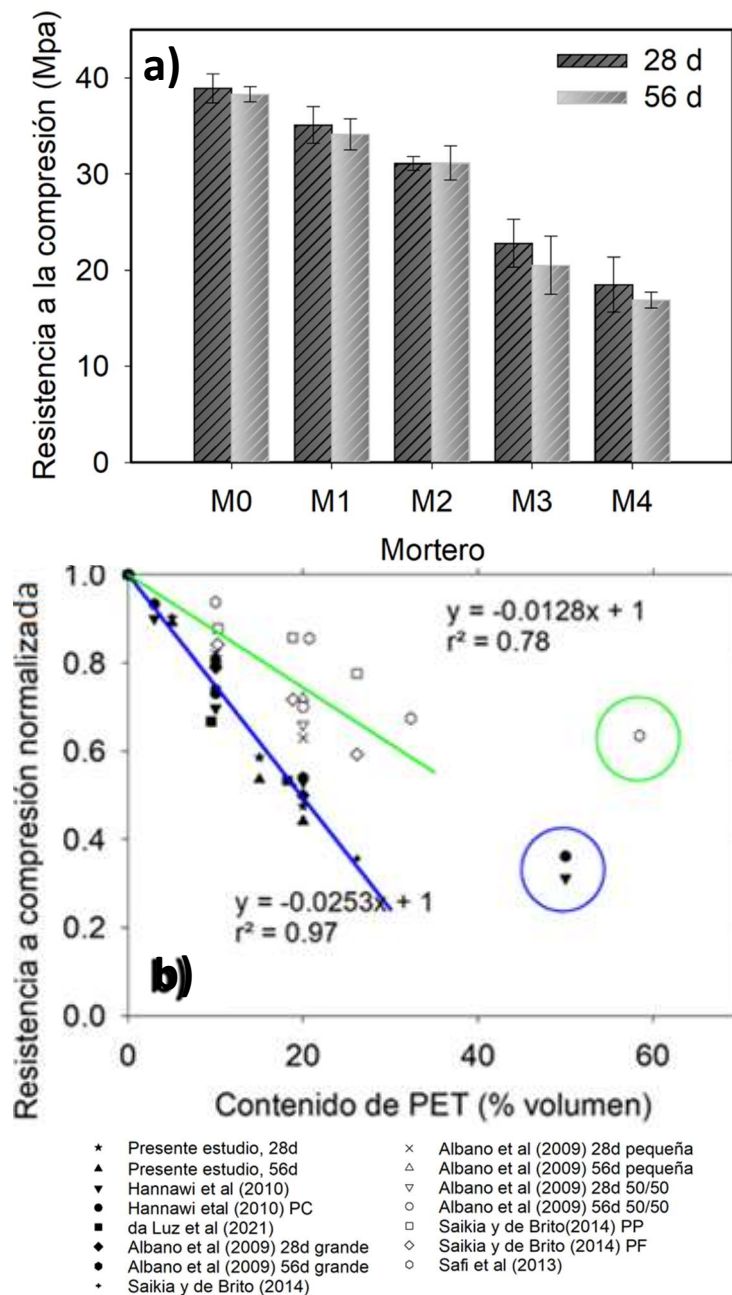


Figura 7. Resistencia a compresión de morteros con sustitución de arena por distintos porcentajes de PET, a) Presente estudio a 28 y 56 días de edad, b) Comportamiento de la resistencia a compresión simple normalizada con respecto al control versus el volumen de sustitución, tanto del presente estudio como en estudios en mortero y concreto reportados en la literatura. Las barras de error indican ± 1 desviación estándar. Hannawi et al (2010): mortero, Da Luz et al (2021): mortero, Albano et al (2009): concreto, Saikia et al (2014): concreto.

La Figura 8a muestra la resistencia a la flexión de los morteros. De manera similar a la resistencia a la compresión, a 56 días de edad se observó en el mortero M4 una disminución de la resistencia a la flexión del 39% con respecto al control M0. Esta disminución fue menor que la observada sobre la resistencia a la compresión, debido a que las partículas de PET redu-

jeron ligeramente la pérdida de resistencia a la tensión del mortero, a pesar del tamaño pequeño de las partículas. Durante los ensayos, se observó una falla dúctil de las probetas y aun estando agrietada toda la sección transversal, las dos partes se mantuvieron unidas. En este mismo sentido, se observó que las probetas del mortero control M0, al agrietarse y fallar, presentaron la típica falla frágil, separándose en dos

partes. Rahmani *et al.* (2013) observaron que cuando la cantidad de partículas de PET aumentan, la resistencia a la flexión tiene una tendencia creciente al principio. Con 5% de sustitución se observó un aumento de 7.5% respecto al control, pero tuvo una disminución final de 13% respecto al control a medida que aumentó el porcentaje de PET.

La disminución de resistencia a la compresión y del módulo de elasticidad afecta la resistencia a la flexión (Saikia & De Brito, 2014). Por su parte, Hannawi *et al.* (2010) observaron una disminución de resistencia a la flexión usando tres tamaños de partícula: 5 mm, 2 mm y 1 mm con relación agua/cemento de 0.50 y diferentes volúmenes de sustitución de agregado fino por agregado ligero PET: 2, 5, 10, 15 y 20%. Obtuvieron

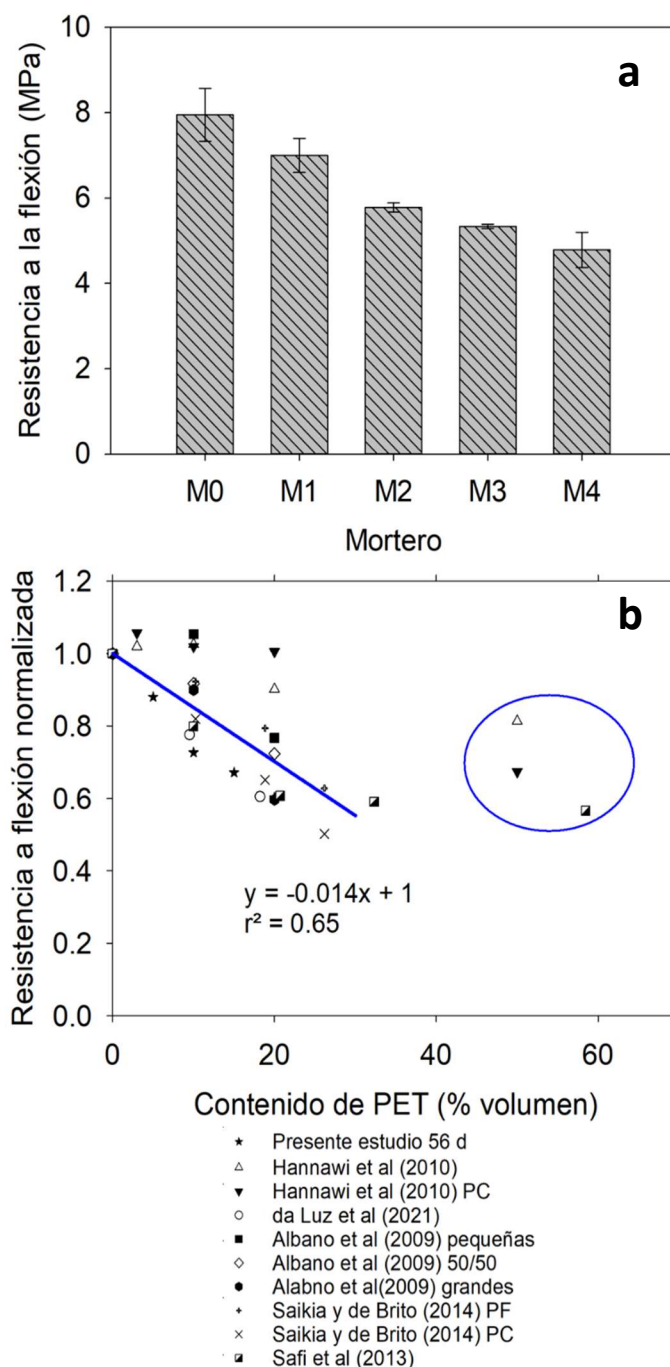


Figura 8. Resistencia a la flexión de morteros con sustitución de arena por distintos porcentajes de PET, a) Presente estudio a 56 días de edad, b) Comparación de resistencia normalizada al control del presente estudio y de estudios reportados en la literatura. Las barras de error indican ± 1 desviación estándar.

resultados iniciales de 4% de incremento de la resistencia a la flexión en 5% y 10% de sustitución, después tuvo una disminución de 10% y 30% respecto a las sustituciones de 10% y 20%. Sakr & El-hakim (2005) indicaron que las variaciones en las propiedades analizadas pueden atribuirse a la forma y textura de las partículas de PET, ya que son planas y lisas, a diferencia del agregado fino natural que son partículas redondas y rugosas.

La Figura 8b muestra el comportamiento general de resistencia a la flexión reportada por otros investigadores, normalizado con respecto a la resistencia del control (incluyendo los resultados del presente estudio) a razón del volumen de sustitución. Esencialmente corresponden a los mismos estudios donde se reportó la resistencia a compresión presentados en la Figura 7b. En principio se observó una mayor dispersión de los resultados y un menor coeficiente de correlación comparado con los calculados para la resistencia a compresión. La pendiente de la recta ajustada a los datos es similar a la que presentaron los datos de resistencia a compresión cuando las partículas de PET fueron pequeñas o una combinación de pequeñas y grandes, o cuando se peletizaron. Sin embargo, la pendiente es menor que la recta donde se encuentran los valores encontrados en el presente estudio, lo que indica que la resistencia a la flexión disminuye menos que la resistencia a compresión para un reemplazo específico de arena por partículas de PET.

3.4. Absorción capilar

La sorptividad se considera un indicativo de la durabilidad del concreto (Basheer *et al.*, 2001; Hall, 1989). La Figura 9a muestra la comparación de las pendientes obtenidas en especímenes M0 y M2, las cuales son las sorptividades o capacidad de un material poroso para absorber un líquido por capilaridad (Hall, 1989). La sorptividad del mortero conteniendo 10% de PET es mayor que el control. La Figura 9b muestra las sorptividades en los morteros con distinto contenido de PET. La adición de PET incrementa la sorptividad en todos los morteros con respecto al control, independientemente del porcentaje de PET. Estos resultados coinciden con lo reportado por otros investigadores, quienes han indicado que existe una separación de entre 5-60 mm entre la partícula de PET y la pasta de cemento que incrementa la porosidad y la permeabilidad del mortero. Sin embargo, también se

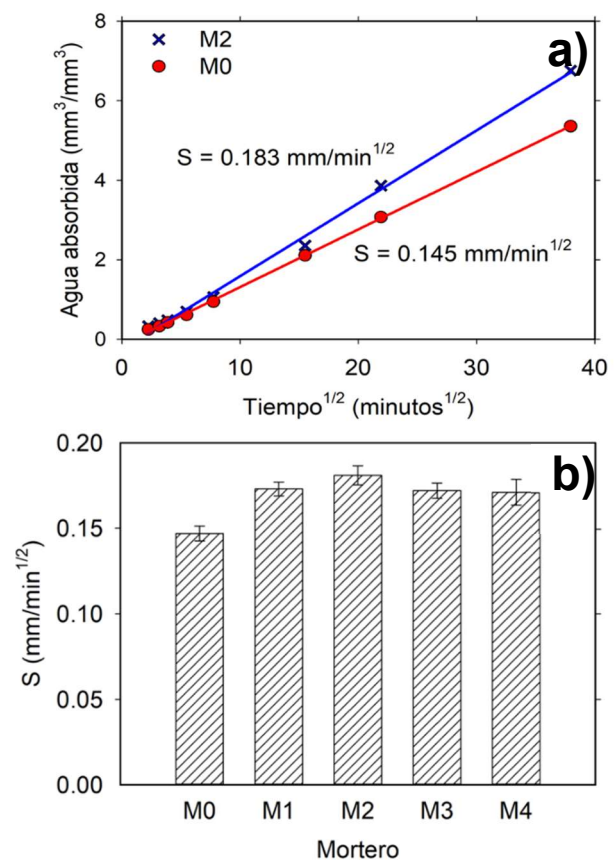


Figura 9. Absorción capilar de especímenes curados en húmedo durante 56 días, a) Comparación de las pendientes (sorptividades) de dos especímenes de mortero (M0 y M2), b) Sorptividad de los morteros con diferentes porcentajes de reemplazo de agregado fino natural por partículas de PET. Las barras de error representan \pm una desviación estándar.

ha reportado que la absorción de agua disminuye con la inclusión de partículas de PET (Safi *et al.*, 2013).

3.5. Microscopía electrónica de barrido

La Figura 10a muestra la superficie de una partícula de PET triturada. Se observa una superficie rugosa a causa del rozamiento de las cuchillas de la trituradora con el PET, lo que mejoraría la adherencia con el mortero. En la Figura 10b se muestra la sección lateral del PET donde se observa mayor rugosidad y desprendimiento de capas por el proceso de triturado.

La Figura 11 muestra la interfaz entre la partícula de PET y la pasta de cemento, con una separación que incrementaría la permeabilidad del mortero y explicaría el incremento en sorptividad reportado en la sección 3.4, al funcionar dicha separación como un capilar. Hannawi *et al.* (2010) han estimado que la separación entre el agregado de PET y la pasta de cemento

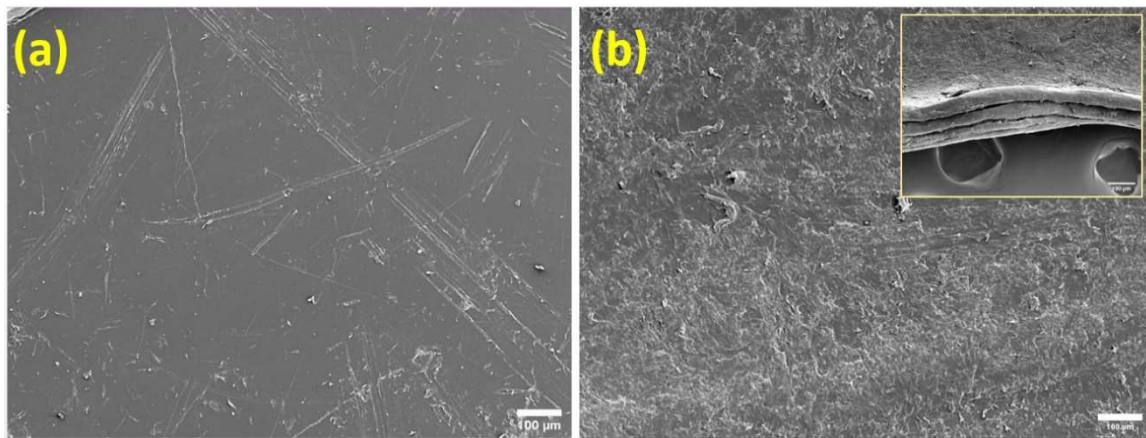


Figura 10. Imágenes de SEM de electrones secundarios (voltaje de aceleración de 5 kV) de las superficies de partículas de PET, a) hojuela PET reciclada, b) partícula de PET triturada. La micrografía insertada sobre la figura (b) presenta una vista transversal de una partícula de PET triturada.

es 5-60 mm. Esta separación también tendría influencia en la reducción del módulo de elasticidad y la resistencia a la compresión.

La Figura 12a muestra la parte superficial de una partícula de PET que estuvo inmersa en el mortero, en el cual se indican tres zonas de donde se adquirieron espectros de composición elemental por EDS para estimar el producto de hidratación que se adhirió en dichas zonas (Figura 12b). Debido a las proporciones y abundancia elemental, según se indica en las tablas insertadas dentro de los espectros, se trata de partículas de hidróxido de calcio.

Hannawi *et al.* (2010) mostraron imágenes de microscopía electrónica de barrido que resaltan la calidad de contacto entre la matriz y agregados plásticos

en comparación con la matriz y arena natural. La adherencia entre los materiales fue débil utilizando un tamaño máximo de PET de 10 mm, observando que la unión entre matriz-PET aumenta la porosidad del espécimen. A su vez, Marzouk *et al.* (2007) obtuvieron imágenes de SEM pero utilizando PET con tamaño menor de 5 mm y notaron un alto nivel de compactación en los materiales compuestos cuando el volumen sustituido es menor o igual al 50%. Sin embargo, una vez que este volumen supera ese porcentaje, la estructura parece más porosa, lo cual implica disminución de densidad y propiedades mecánicas.

Conclusiones

En el presente trabajo se investigó las propiedades en estado fresco y endurecido de mortero de cemento Portland, con sustitución del 0 al 20% de agregado fino por partículas de PET triturado con tamaño máximo de partícula similar al agregado fino natural, aunque con deficiencia de partículas finas producto del tipo de molienda utilizado.

Las principales conclusiones de este trabajo son:

- Las curvas de flujo de los morteros con PET se ajustaron a un modelo de flujo tipo Bingham, observándose un incremento del esfuerzo de fluencia y viscosidad plástica con la incorporación de partículas de PET. Los parámetros reológicos de Bingham indicaron que las mezclas con sustituciones en volumen de PET de 5, 10 y 15%, presentan poca diferencia entre sí y en promedio incrementaron el esfuerzo de fluencia en 52% y la viscosidad plástica en 28%. La

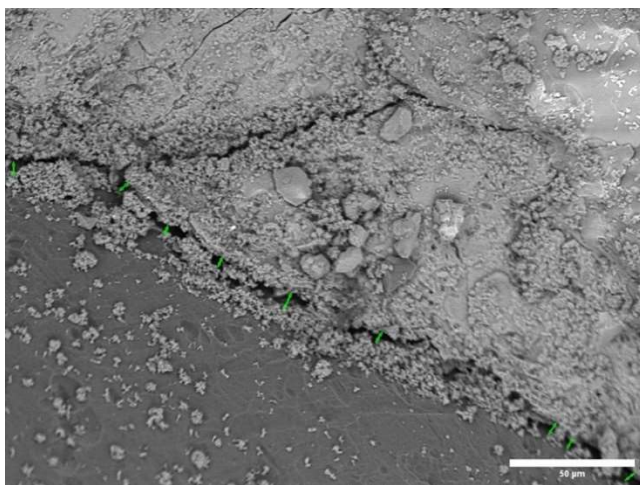


Figura 11. Imagen de SEM de electrones retrodispersados con magnificación de 30X, mostrando la separación entre la pasta de cemento y la partícula de PET. Las flechas verdes son mediciones realizadas para conocer el promedio de ancho de la separación, la cual fue de 5.1 micras.

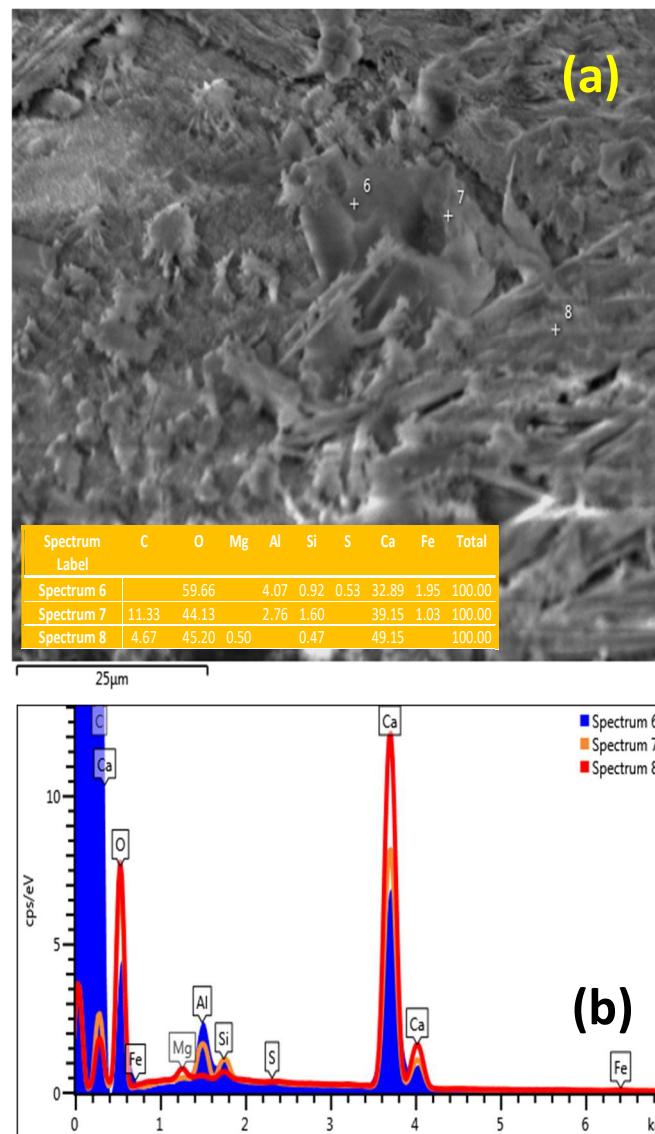


Figura 12. Microscopía electrónica de barrido, a) Imagen de electrones retrodispersados con magnificación de 1500x de la superficie de una partícula de PET que estuvo en contacto con la pasta de cemento dentro de una muestra de mortero, b) Espectros puntuales de EDS correspondientes a los sitios indicados sobre la micrografía. Figura 12a las micro-partículas depositadas sobre la superficie de PET.

- mezcla M4 triplicó el esfuerzo de fluencia y duplicó la viscosidad con respecto a M0.
- Al incrementar el tiempo de hidratación, la velocidad de pulso ultrasónico aumentó, lo que significa que el espécimen incrementó su densidad y el módulo de elasticidad. De igual manera se observó una reducción de VPU conforme incrementaba el contenido de PET, debido a la menor densidad y módulo de elasticidad del material compuesto.
- La resistencia a la compresión, el módulo de elasticidad y la resistencia a la flexión disminuyeron con el aumento de PET en la mezcla.
- La sorptividad de los especímenes de mortero a 56 días de edad tuvo un incremento con respecto al control, siendo de 23% en M2 y de 16% en la M4, debido a la separación observada con SEM entre las partículas de PET y la pasta de cemento, que incrementa la porosidad y permeabilidad del mortero.

Con base en las propiedades observadas en este trabajo, algunas aplicaciones potenciales de los morteros con PET podían ser en la elaboración de elementos de construcción no estructurales como: adoquines, mortero para aplanados en muros y en mortero



para junteo de mampostería. Este último, por ejemplo, aplicable en casos donde se requiera una menor rigidez del mortero de cemento que sea más compatible con bloques de suelo-cemento compactado.

Agradecimientos

Prisciliano Cano agradece a la SIP del IPN por financiar el proyecto con clave 20180029 dentro del cual se desarrolló el presente trabajo, así como al CONACyT por financiar el proyecto CB clave 239727. Marcelino Benito Vásquez López agradece el apoyo financiero brindado por CONACyT para sus estudios de maestría.

Referencias

- Abdel-Bary, E.M., Ismail, M.N., Yehia, A.A. and Abdel-Hakim, A.A., 1998, Recycling of polyethylene films used in greenhouses-development of multilayer plastic films: *Polymer Degradation and Stability*, 62(1), 111-115. [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(97\)00267-X](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(97)00267-X)
- Albano, C., Camacho, N., Hernández, M., Matheus, A. and Gutiérrez, A., 2009, Influence of content and particle size of waste pet bottles on concrete behavior at different w/c ratios: *Waste Management*, 29(10), 2707-2716. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.05.007>
- Andrady, A.L. and Neal, M.A., 2009, Applications and societal benefits of plastics: *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 364, 1977-1984. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0304>
- ASTM C109M-16a, 2016, *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars*. <https://doi.org/10.1520/C0305-06>
- ASTM C136-01, 2001, *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*.
- ASTM C1585-13, 2013, *Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic Cement Concretes*. <https://doi.org/10.1520/C1585-13.2>
- ASTM C305, 2014, *Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency*. <https://doi.org/10.1520/C0305-13.2>
- ASTM C33-03, 2003, *Standard Specification for Concrete Aggregates*.
- ASTM C348-02, 2013, *Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars*.
- ASTM C597-16, 2016, *Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete*. ASTM International.
- Basheer, L., Kropp, J. and Cleland, D.J., 2001, Assessment of the durability of concrete from its permeation properties. A review: *Construction and Building Materials*, 15(2-3), 93-103. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(00\)00058-1](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(00)00058-1)
- Da Luz Garcia, M., Oliveira, M.R., Silva, T.N. and Castro, A.C.M., 2021, Performance of mortars with PET: *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 23(2), 699-706. <https://doi.org/10.1007/s10163-020-01160-w>
- Denaro, R., Aulenta, F., Crisafi, F., Di Pippo, F., Cruz Viggi, C., Matturro, B., Tomei, P., Smedile, F., Martinelli, A., Di Lisio, V., Venezia, C. and Rossetti, S., 2020, Marine hydrocarbon-degrading bacteria breakdown poly(ethylene terephthalate) (PET): *Science of the Total Environment*, 749, 141608. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141608>
- Gregory, M.R., 2009, Environmental implications of plastic debris in marine settings, entanglement, ingestion, smothering, hangers-on, hitch-hiking and alien invasions: *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 364(1526), 2013-2025. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0265>
- Hall, C., 1989, Water sorptivity of mortars and concretes: a review: *Magazine of Concrete Research*, 41(147), 51-61. <https://doi.org/10.1680/mac.1989.41.147.51>
- Hannawi, K., Kamali-Bernard, S. and Prince, W., 2010, Physical and mechanical properties of mortars containing PET and PC waste aggregates: *Waste Management*, 30(11), 2312-2320. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.03.028>
- Ismail, Z.Z. and AL-Hashmi, E.A., 2008, Use of waste plastic in concrete mixture as aggregate replacement: *Waste Management*, 28(11), 2041-2047. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.08.023>
- Malhotra, V.M. and Carino, N.J., 1991, Nondestructive testing of concrete: *Florida, Estados Unidos, CRC Press*.
- Marzouk, O.Y., Dheilily, R.M. and Queneudec, M., 2007, Valorization of post-consumer waste plastic in cementitious concrete composites: *Waste Management*, 27(2), 310-318. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.03.012>
- Meza, A., Pujadas, P., López-Carreño, R.D., Meza, L.M. and Pardo-Bosch, F., 2021, Mechanical optimization of concrete with recycled pet fibres based on a statistical-

- experimental study: *Materials*, 14(2), 1-20.
<https://doi.org/10.3390/ma14020240>
- Meza, A. and Siddique, S., 2019, Effect of aspect ratio and dosage on the flexural response of FRC with recycled fiber: *Construction and Building Materials*, 213, 286-291.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.081>
- Plastics Europe, 2009, The Compelling Facts About Plastics 2009. An analysis of plastics production, demand and recovery for 2008: *Bruselas, Plastics Europe*, 24 pp.
<https://plasticseurope.org/wp-content/uploads/2021/10/2009-Compelling-facts.pdf>
- Rahmani, E., Dehestani, M., Beygi, M.H.A., Allahyari, H. and Nikbin, I.M., 2013, On the mechanical properties of concrete containing waste PET particles: *Construction and Building Materials*, 47, 1302-1308.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.041>
- Safi, B., Saidi, M., Aboutaleb, D. and Maallem, M., 2013, The use of plastic waste as fine aggregate in the self-compacting mortars: Effect on physical and mechanical properties: *Construction and Building Materials*, 43, 436-442.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.049>
- Saikia, N. and De Brito, J., 2014, Mechanical properties and abrasion behaviour of concrete containing shredded PET bottle waste as a partial substitution of natural aggregate: *Construction and Building Materials*, 52, 236-244.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.049>
- Sakr, K. and El-hakim, E., 2005, Effect of high temperature or fire on heavy weight concrete properties: *Cement and Concrete Research*, 35(3), 590-596.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.05.023>
- Silva, D.A., Betioli, A.M., Gleize, P.J.P., Roman, H.R., Gómez, L.A. and Ribeiro, J.L.D., 2005, Degradation of recycled PET fibers in Portland cement-based materials: *Cement and Concrete Research*, 35(9), 1741-1746.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.10.040>
- Silva, R.V., De Brito, J. and Saikia, N., 2013, Influence of curing conditions on the durability-related performance of concrete made with selected plastic waste aggregates: *Cement and Concrete Composites*, 35(1), 23-31.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.08.017>
- Struble, L., Szecsy, R., Lei, W.-G. and Sun, G.-K., 1998, Rheology of Cement Paste and Concrete: *American Society for Testing and Materials*, 20(2), 269-277.
<https://doi.org/10.1520/CCA10421J>
- Thompson, R.C., Swan, S.H., Moore, C.J. and Saal, F.S., 2009, Our plastic age: *Phil. Trans. R. Soc. B.*, 364, 1973-1976. <https://doi.org/10.1098/rstb.2009.0054>
- Yahia, A. and Khayat, K.H., 2001, Analytical models for estimating yield stress of high-performance pseudoplastic grout: *Cement and Concrete Research*, 31(5), 731-738. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00476-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00476-8)