

Influencia De Partículas Trituradas De PET En La Permeabilidad De Los Morteros Estructurales

Influence Of PET Crushed Particles On The Permeability Of Structural Mortars

Autores

Joaquín Raúl Cuetara Ricardo¹, Dayron Uranga Rodríguez², Maikel Alfredo Bello Miranda³

¹ MSc. Ingeniero Civil, Director de Proyecto de la Asociación Económica Internacional UCM-BBI, Profesor Instructor Adjunto de la Universidad Tecnológica de La Habana (CUJAE), ircuetara@gmail.com,

² Ingeniero Civil Especialista B en la Oficina de Investigación y Patrimonio, Artemisa, dayronuranga@gmail.com,

³ Ingeniero Civil Especialista B Aeródromo UEB Aeropuerto José Martí, La Habana, maikelbello95@gmail.com

RESUMEN

Este trabajo reporta los resultados de ensayos de durabilidad realizados a muestras de morteros estructurales elaborados a partir del uso de partículas trituradas de PET, como un material adicionado en función del peso del cemento o como reemplazo del árido fino. Las partículas de PET se obtuvieron a partir de triturar mecánicamente el plástico con una finura inferior a 4,76 mm. Los valores obtenidos de resistencia a la compresión en los morteros fabricados a partir del empleo de partículas de PET, en cualquiera de su forma de empleo, decrecieron entre 10 y 23 MPa con respecto al mortero de control. Se demostró que en los morteros elaborados con 5 y 10% de PET, para ambas formas de uso, pasa la misma cantidad de corriente que por la del mortero de control; en el caso del 5%, la resistividad eléctrica aumentó 2,4 y 2,1 k Ω ·cm respectivamente. Exceptuando la adición de un 15% de PET, la capilaridad respecto al mortero de control es menor. Los valores de absorción capilar obtenidos para el 5 y 10% de PET como adición fueron de 0,40 y 0,33 g/cm², sin embargo, cuando se utilizó como reemplazo fue de 0,34 y 0,31 g/cm². Se concluye que, de las formas en que se empleó el PET triturado, cuando se reemplaza por una parte del árido fino se obtienen mejores resultados que cuando se adiciona a la mezcla en función del peso del cemento. En ambos casos los valores obtenidos fueron inferiores al mortero de control.

Palabras clave: Reciclaje; Adición y sustitución de PET; Permeabilidad, durabilidad y resistencia a la compresión

ABSTRACT

This work reports the results of durability tests carried out on samples of structural mortars made from the use of crushed PET particles, as a material added based on the weight of the cement or as a replacement for fine aggregate. The PET particles were obtained by mechanically grinding the plastic with a fineness of less than 4.76 mm. The compressive strength values obtained in the mortars manufactured from the use of PET particles, in any of their forms of use, decreased between 10 and 23 MPa with respect to the control mortar. It was shown that in the mortars made with 5 and 10% PET, for both forms of use, the same number of current passes through that of the control mortar; in the case of 5%, the electrical resistivity increased by 2.4 and 2.1 k Ω ·cm, respectively. Except for the addition of 15% PET, the capillarity compared to the control mortar is lower. The capillary absorption values obtained for the 5 and 10% PET as an addition were 0.40 and 0.33 g/cm², however, when used as a replacement it was 0.34 and 0.31 g/cm². It is concluded that, of the ways in which the crushed PET was used, when it is replaced by a part of the fine aggregate, better results are obtained than when it is added to the mixture based on the weight of the cement. In both cases the values obtained were lower than the control mortar.

Keywords: Recycling; Addition and substitution of PET; Permeability, durability and compressive strength

Nota Editorial: Recibido: Marzo 2022 Aceptado: Junio 2022

1. INTRODUCCIÓN

Entre los años 2015 y 2016, la producción mundial de plásticos ascendió respectivamente a 322 y 335 millones de toneladas [1], muy superior a la producción mundial de acero que fue de 125 y 130 millones de toneladas [2], respectivamente. La situación que presentan los plásticos, especialmente las botellas de PET, es que en una escala de evaluación, después del sedal de pesca, es el material menos sostenible (≈ 450 años) y, una vez que se ha utilizado adecuadamente, son arrojados a vertederos o a los océanos donde durarán todo este tiempo hasta que se desintegren en micropartículas [3]. El reciclaje de PET se realiza desde hace aproximadamente 40 años. Fue en Estados Unidos donde la empresa Saint Jude Polymers inició el proceso de reciclaje de botellas de PET que se ha continuado parcialmente hasta la fecha [4]. Otras empresas, como Wellman Incorporated, entre los años 1980 y 1990 se dedicaron al reciclaje de plásticos, especialmente PET. En la década de 1990, con la tecnología de reciclaje adecuada disponible, se inició el uso de PET reciclado en la fabricación de envases para alimentos, inducido por la Administración de Drogas y Alimentos de EE. UU. [5].

En los últimos años se han desarrollado proyectos con excelentes resultados a escala internacional. En los países más desarrollados, especialmente en Europa, se practica la valorización energética, donde a partir de procesos tecnológicos térmicos (gasificación, pirólisis y despolimerización térmica) y no térmicos (digestión anaerobia, fermentación y tratamiento biológico mecánico) se obtiene gas, metanol, ácido láctico, entre otros [6]. En 2016, los principales exponentes europeos en este sentido fueron Suiza, Austria y Alemania, entre otros [1]. Por otro lado, ciudades como San Francisco han aplicado proyectos como Zero Waste para reducir la fuente de generación; donde se ha evitado llevar el 80% de la basura a los vertederos [7], así mismo, se ha prohibido la venta de botellas de agua PET, siendo la primera ciudad en hacerlo.

En Cuba se han tomado medidas y se han propuesto proyectos de ley para reducir la fuente, reutilizar y reciclar el PET. En 1975 se instituyó la Ley 1288, que obliga a todas las personas jurídicas que en sus procesos productivos o de prestación de servicios generen residuos, que no vayan a ser reutilizados por sí mismos, a entregarlos al reciclaje. Falta cultura del reciclaje, tanto en la población como en el sector estatal [8], pero últimamente los intereses se han dirigido hacia una actividad prometedora que sustituye a las importaciones. Tanto es así que la actividad de reciclaje reportó en el año 2014 un ahorro de 212 millones de dólares por el efecto combinado de

sustitución de importaciones y exportaciones [9].

Todas las medidas tomadas para reducir la fuente, reutilizar y reciclar los plásticos han sido insuficientes. A nivel mundial, el plástico es considerado uno de los materiales más demandados por la sociedad para su uso en las industrias de empaques, construcción y edificación, automotriz, agricultura, entre otras. Considerando el plástico que llega a los océanos anualmente y en promedio un 27% a los vertederos en los países de la Unión Europea, surge la pregunta que los ingenieros deben responder ¿Qué haremos con ellos?

Recientemente, el fin de las investigaciones ha tenido como objetivo encontrar nuevas formas de aprovechamiento de los residuos plásticos para eliminar la cantidad de los mismos, especialmente en los vertederos. La construcción es una de las industrias que mejor adapta este material a sus requerimientos al poder adherirse eficientemente al concreto a pesar de tener una superficie lisa [10-12]. Diferentes estudios han demostrado que el uso de fibras de PET de botellas de agua post-consumo puede ser una solución viable en determinadas construcciones [13-15], ya que además de reducir los residuos de PET, también reduce los costes de producción del hormigón.

En un estudio de caso [16], se combinó PET con materiales puzolánicos para evaluar las propiedades mecánicas y de durabilidad del hormigón autocompactante. Durante los ensayos se percataron que las adiciones de PET reducían el módulo de elasticidad de los hormigones y aumentaban la absorción de agua de estos, contrario a los resultados obtenidos por Dora Fotti en otras investigaciones [16-18], sin embargo, el efecto de los materiales puzolánicos fue contrario al del plástico.

También se han investigado las propiedades mecánicas de los hormigones [19-21]. El objetivo ha sido obtener ecuaciones que predigan con la mayor precisión posible el comportamiento de dichos hormigones, ya que su empleo se ha vuelto más común en los últimos tiempos, lo que permitirá realizar diseños más reales y puntuales. Cuetara [22], fabricó hormigones con la adición de escamas de PET cortadas manualmente en 0,5 y 1% en peso de cemento Portland. En este estudio se analizaron diferentes propiedades del hormigón a partir de ensayos no destructivos (pulso ultrasónico y resistividad eléctrica) y destructivos (resistencia a la compresión y porosidad total). Se concluyó que la adición de hasta 1% de PET durante la fabricación del hormigón no influye en la calidad del hormigón en cuanto a su resistencia a la compresión y porosidad.

En otros estudios [23] se evaluó la influencia de la adición de 1, 3, 5, 7 y 10% de PET en morteros estructurales, concluyendo que el porcentaje óptimo de adición que no compromete las resistencias a compresión y la tensión es del 1%, mientras que las mezclas con 7% incrementaron la resistencia a la flexión en 37,93%. Por otro lado, Frigione [24] analizó, pero sustituyendo hasta un 5% de árido fino por PET, las muestras de hormigón a los 28 días y un año de edad. La investigación concluyó que al año de edad, el concreto no presentó diferencias significativas con respecto a los concretos estándar de la misma edad, siempre que la relación agua/cemento (a/c) sea menor a 0,45; de lo contrario, la apariencia de los poros crece exponencialmente debido, en parte, a la forma plana del PET.

Otra tendencia, como se ha mostrado anteriormente, es la utilización del PET como árido fino en la fabricación de morteros y hormigones. Rahmania [25], estudió el potencial de los residuos de PET para mejorar algunas propiedades del hormigón. Lucolano y Cioffi [26], evaluaron el efecto de la sustitución de residuos de PET por árido fino sobre las propiedades físicas y mecánicas de los morteros fabricados. La cantidad sustituida fue entre el 10-50% en peso del árido fino para obtener seis morteros con diferentes composiciones. Se registró que la conductividad térmica cayó más del 50% con respecto a los morteros tradicionales, sin embargo, las propiedades mecánicas de los morteros con árido fino sustituido por residuos de PET disminuyeron; sin embargo, los resultados concluyeron que pueden ser utilizados especialmente en aplicaciones no estructurales.

Otros autores [26-29], investigaron el comportamiento de hormigones fabricados con 25, 50 y 75 % en volumen de reemplazo de árido fino por residuos de PET frente a esfuerzos de compresión y tracción por flexión, y también se evaluó el módulo de elasticidad, consistencia, trabajabilidad y densidad. Se observó que la densidad disminuyó con el aumento del plástico, al igual que las resistencias a la tracción, a la compresión y a la flexión, que disminuyeron en un 33%. En otros trabajos [30-33], se han mostrado los estudios realizados sobre las propiedades de los áridos a partir de residuos plásticos y como estos contribuyen a la trabajabilidad del hormigón. Los resultados han indicado una disminución del adensidad aparente con el aumento del plástico, ya que en varios casos también disminuyó la absorción de agua, ya que el plástico no absorbe agua como el árido fino que más absorbe. Las resistencias disminuyeron con el aumento del plástico, como en todos los casos vistos. En cuanto a la conductividad térmica, se observó que el coeficiente disminuye al aumentar el plástico, por lo que puede ser un buen aislante térmico.

El presente trabajo compara la influencia de las formas de empleo de las partículas trituradas de PET en forma de escamas sobre en la permeabilidad de los morteros estructurales. Para ello se fabricarán morteros con diferentes porcentajes de adición en función del peso del cemento Portland y en sustitución en función del peso del árido fino, y se evaluará la influencia que tienen el empleo de PET en la permeabilidad de los morteros a partir de ensayos realizados a escala de laboratorio, así como la influencia que tiene el uso de ambos tipos sobre dichas propiedades.

2. MÉTODOS Y MATERIALES

Para la fabricación de los morteros se utilizó un cemento Portland (CP), que responde a la designación P-35 (similar tipo I) de la fábrica Cementos Curaçao N.V, en el municipio de Mariel, en la provincia de Artemisa. Este responde a las características especificadas en la NC 1340 de 2021 (tabla 1).

Tabla 1: Propiedades físicas del cemento (P-35)

Propiedades	Valores	Aceptación NC 1340: 2020
Superficie específica (cm ² /g)	3317	≥ 2800
Tiempo de fraguado inicial (min)	102:00:00	≥ 45
Tiempo de fraguado final (h)	3:02:00	≤ 10
Peso volumétrico (kg/m ³)	1168	
Densidad (g/cm ³)	3,15	
Consistencia normal (%)	24,5	

Se empleó un árido fino de la cantera La Molina con un retenido del 7% en el tamiz No. 4 (malla de abertura de 4,76 mm). En la tabla 2 se muestran sus principales características así como la del PET.

Tabla 2: Propiedades físicas de áridos finos y PET

Propiedades	Árido fino	PET
Peso específico corriente (g/cm ³)	2,61	1,34
Peso específico saturado (g/cm ³)	2,65	-
Peso específico aparente (g/cm ³)	2,72	-
Absorción de agua (%)	1,80	0,08
Masa volumétrica suelta (g/cm ³)	1,48	0,43
Masa volumétrica compactada (g/cm ³)	1,66	0,2
Porcentaje de vacíos (%)	37,00	-
Material más fino tamiz 200 (%)	9,90	-
Conductividad (cal/cm·s·°C)	-	3,36 x 10 ⁻⁴

Las partículas de PET fueron trituradas mecánicamente en el taller de la UEB Reciclaje No. 2 de la Empresa de Materias Primas, luego tamizadas y la fracción pasada por el tamiz de 4,76 mm fue separada, como se detalla en la figura 1. Este fue el tamaño de partícula que se utilizó para la elaboración de los morteros, similar al tamaño de la partícula del árido fino propuesto por la NC 656 de 2008 para un mortero tipo III-2.



Figura 1: Partículas de PET

2.1. Métodos experimentales

El interés del estudio es evaluar la influencia sobre la permeabilidad del tipo de uso que se le puede dar a los residuos de PET para su empleo en la construcción en la fabricación de morteros estructurales, basándose principalmente en las medidas de resistividad eléctrica y la absorción de agua por capilaridad. Asimismo se evaluó su principal propiedad mecánica.

Para estudiar en detalle la resistencia a compresión, porosidad y propiedades eléctricas de los morteros elaborados con adición en función del peso del cemento y reemplazo parcial por el árido fino en los niveles de 5, 10 y 15% de acuerdo con la experiencia internacional. Se optó por utilizar un diseño factorial multinivel con el fin de realizar comparaciones entre los niveles de cada factor (tabla 3). A cada tratamiento se le asignaron dos bloques a ensayar, es decir, se realizó un experimento y una réplica por cada tratamiento y por cada bloque a ensayar, y se fabricaron tres briquetas de mortero. La comparación entre los niveles de cada factor se determinó a partir del análisis de varianza (ANOVA), herramienta estadística fundamental para este tipo de análisis de varianza. Este es un procedimiento estadístico que descompone la variabilidad de un experimento en componentes independientes que pueden asignarse a diferentes causas. En el caso en cuestión, el uso de este procedimiento implica documentar si el valor esperado cambia o no cuando la variable de respuesta se somete a diferentes niveles de un factor documentado. En el presente trabajo se determinaron experimentalmente los niveles de cada factor que lleva a obtener una respuesta óptima con la ayuda del software estadístico StatGraphics Centurion XV.

Tabla 3: Niveles de cada factor

Nivel de adición reemplazo (%)	Tipo de empleo del PET	
	Adición en peso del cemento	Reemplazo en peso de la arena
5	Mortero _{Ad;5}	Mortero _{Ree;5}
10	Mortero _{Ad;10}	Mortero _{Ree;10}
15	Mortero _{Ad;15}	Mortero _{Ree;15}

2.2. Descripción del procedimiento

Se consideró un mortero de control con una resistencia, según norma cubana NC 656 de 2008, superior a 45 MPa a los 28 días. En el caso de la absorción de agua por capilaridad, cuyos criterios de evaluación no están especificados en ninguna norma, se determinó según norma cubana [31], aun así se tomará como parámetro comparativo para evaluar la influencia del PET sobre la permeabilidad de los morteros estructurales. Además, la resistividad eléctrica se determinó según la UNE-83988-2 [37]. Las dosificaciones y la cantidad de materiales a utilizar para cada tipo de mortero se muestran en la tabla 4.

Tabla 4: Dosis y cantidad de materiales

Materiales	MC	Adición de PET basada en peso de cemento			Reemplazo de árido fino por PET		
		AM_5%	AM_10%	AM_15 %	RM_5%	RM_10%	RM_15%
Relación a/c	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41
Cemento P-35 (g)	711	760	809	858	805	902	1024
Agua (g)	290	210	230	250	330	370	420
Árido fino (g)	1180	1180	1180	1180	1121	1062	1003
PET (g)	0	76	78	119	59	118	177

Leyenda:

CM: Mortero de control

AM: Mortero elaborado con adición de PET en función del peso del cemento Portland en los porcentajes especificados

RM: Mortero fabricado con sustitución de árido fino por PET en los porcentajes especificados

3. RESULTADO Y DISCUSIÓN

En el apartado anterior se justificaron y relacionaron las pruebas a realizar para determinar las propiedades de interés de la presente investigación. Con el fin de caracterizar el material final, diseñado para su uso en la fabricación de morteros estructurales, ya sea en adición o sustitución de árido fino. A continuación se enumeran las pruebas realizadas y se comentan los resultados obtenidos.

3.1. Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión en los morteros se determinó a las edades de 3, 7 y 28 días con el fin de evaluar su incremento en el tiempo. Su comportamiento se muestra en la figura 2. En todos los casos los valores de resistencia a la compresión de los morteros con las partículas de adición y reposición de PET, a los 28 días de edad, no superan los 45 MPa, lo que exige la norma cubana para este tipo de mortero estructural.

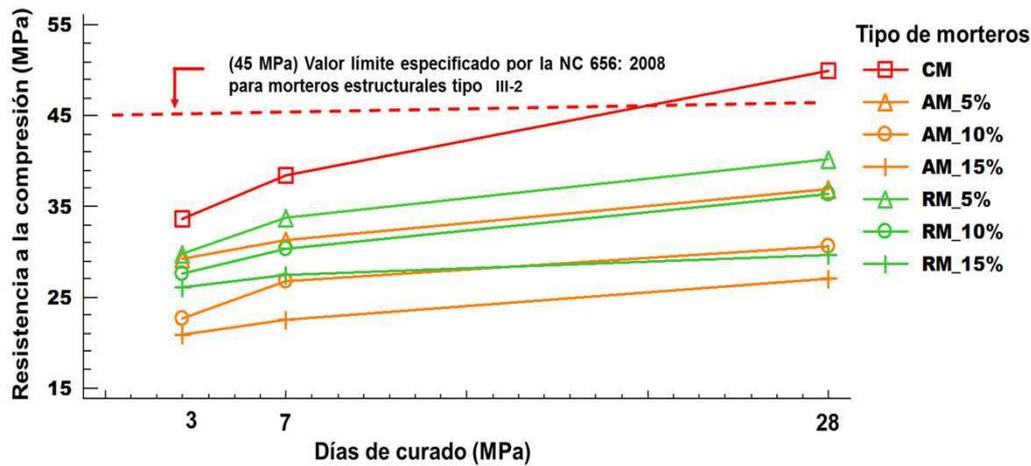


Figura 2: Evolución de la resistencia a la compresión con el tiempo de curado (días)

El análisis de varianza indicó que existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias de las variables en estudio, sin embargo, la prueba multirango reveló que entre los morteros con 5 y 15% de adición y reemplazo de partículas de PET, respectivamente, no existen diferencias entre ellos. Por otro parte, existe una gran diferencia entre los morteros fabricados a partir del uso de PET con respecto al mortero de control. En ninguno de los casos, adición o reemplazo, el valor de resistencia a la compresión superó el establecido por la norma cubana NC 656 de 2008. Sin embargo, se infiere que los valores de resistencia a la compresión de los morteros fabricados con reemplazo de árido fino por partículas de PET son superiores a los valores obtenidos en los morteros que se fabricaron con partículas de PET adicionado en peso del cemento, mostrando así diferencias estadísticamente significativas entre las medias de las variables.

3.2. Resistividad eléctrica

Para determinar los valores de resistividad eléctrica se empleó el método de los cuatro puntos (Wenner) descrito en la norma española [32]. En todos los casos, de los valores de resistividad eléctrica medidos en los morteros se infiere que sus velocidades de corrosión son moderadas según [33] (ver figura 3). Los resultados obtenidos en los morteros elaborados con partículas de PET como aditivo en peso del cemento no muestran diferencias estadísticamente significativas respecto a los elaborados con partículas de PET empleadas como material de reemplazo del árido fino. Solo los morteros AM_15% y RM_15% son un 1,22% y un 4,40% inferiores al mortero de control, respectivamente. La tendencia de los valores es a incrementarse para los niveles de 5 y 10% en el caso de que se utilice como aditivo, en cambio, cuando se utiliza como reemplazo de árido fino, la tendencia es a incrementar hasta en un 5%, entonces, el mortero elaborado con 10% de reposición mantiene valores de resistividad eléctrica sin diferencia estadísticamente significativa con el mortero de control. Para el reemplazo del 15%, la resistividad eléctrica mostrada es 1,8 kΩ·cm menor que el mortero estándar, sin embargo, la prueba de rango múltiple identifica ambos morteros en el mismo grupo, lo que significa que no existen diferencias estadísticamente significativas entre ellos.

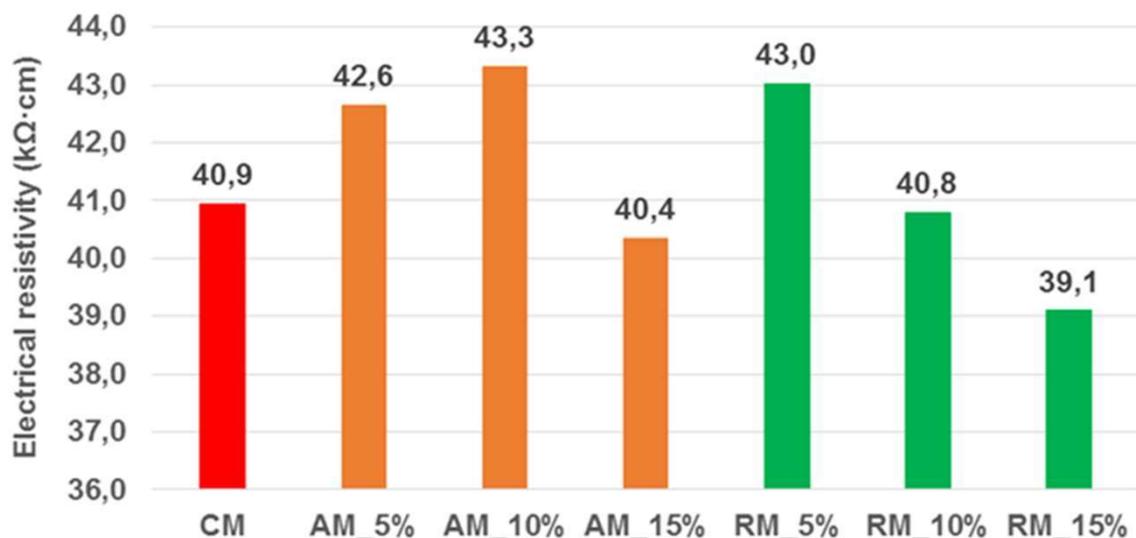


Figura 3: Promedio de los valores de resistividad eléctrica de los morteros curados hasta 28 días

3.3. Absorción de agua capilar

Para la prueba de absorción de agua capilar se realizaron 48 especímenes, entre el experimento y la réplica, y a los 28 días de curado como lo especifica la NC 171 de 2002. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 4; que muestra como los valores de absorción de agua por capilaridad disminuyen en función de las proporciones de partículas de PET empleadas durante la fabricación de los morteros. El uso de PET en cualquiera de las formas que se ha empleado en la investigación ha provocado la disminución de los valores de resistencia a la compresión de los morteros estructurales, sin embargo, al aumentar el contenido de partículas de PET en la mezcla, provoca el truncamiento de los poros capilares, lo que explica la reducción de los valores de absorción de agua por capilaridad. El ensayo multirango realizado demuestra que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los diferentes morteros fabricados y que todos los valores son inferiores al mortero de control, excepto el mortero AM_15%. La misma prueba concluyó que el valor de absorción capilar obtenido en el mortero AM_15% es atípico, pues los resultados infieren que no pertenece a la misma distribución que el resto de la muestra. Por tal razón, se procedió con el análisis de la influencia de los efectos principales en la absorción de agua por capilaridad, tal cual se detalla a continuación.

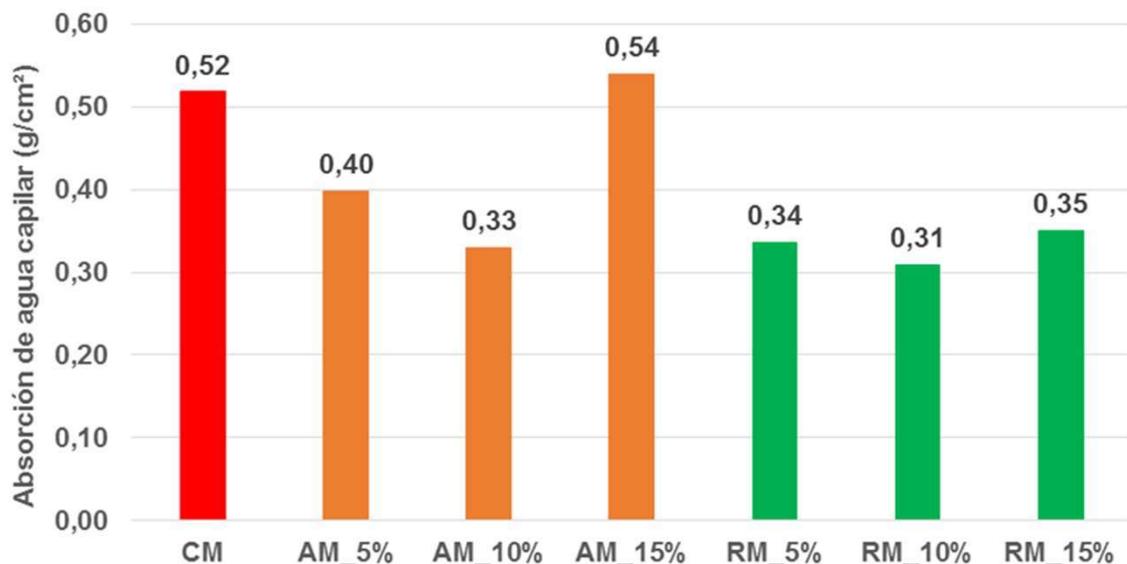


Figura 4: Promedio de los valores de absorción de agua capilar de los morteros curados hasta 28 días

Los análisis realizados sobre los valores de absorción capilar, independientemente del tipo de mortero fabricado, la curva muestra un comportamiento convexo, sin embargo, en el caso de los valores de resistividad eléctrica, el comportamiento de la curva es cóncavo (ver figura 5a y 5b). La relación indirectamente proporcional que muestran ambas propiedades en los morteros estructurales fabricados a partir del uso de partículas de PET en forma de escamas, deduce la capacidad de las mismas para reducir la permeabilidad de los morteros, lo que se traduce en una mayor durabilidad. Los resultados confirman que el uso de PET triturado en forma de escamas no solo reduce la permeabilidad de los morteros estructurales sino que también los hace más tortuosos, especialmente para el uso de la proporción del 10% independientemente de la forma en que se utilice. Los ensayos de absorción de agua capilar y de resistividad eléctrica, que se sabe que están relacionados con la tortuosidad de la microestructura [34], indican que los morteros fabricados con PET en sustitución del árido fino son menos porosos y más tortuosos que los fabricados con PET como una adición. En el caso en que las partículas de PET se usaron para reemplazar el árido fino, los resultados de reducción de la permeabilidad fueron más significativos que cuando se usó como una adición en función del peso del cemento Portland.

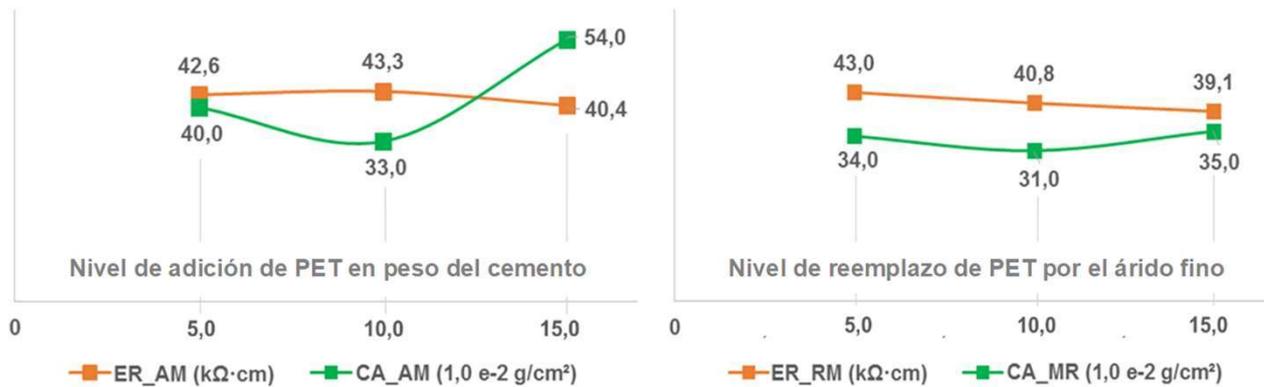


Figura 5: Comportamiento de las curvas ER y AC. a) Morteros estructurales elaborados con partículas de PET adicionadas en base al peso del cemento Portland y b) Morteros estructurales elaborados con partículas de PET en sustitución del árido fino

Leyenda:

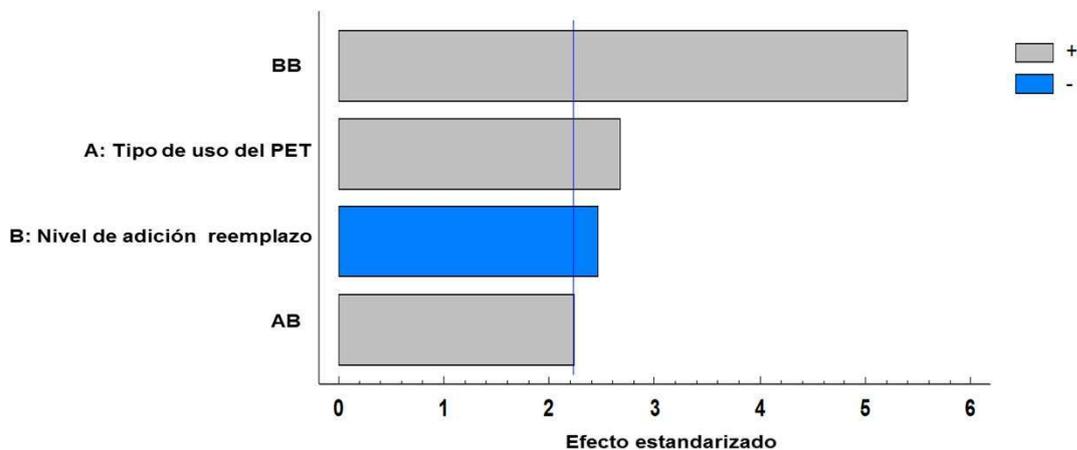
ER_AM: Resistividad eléctrica de morteros con adición de PET

ER_RM: Resistividad eléctrica de morteros con sustitución de árido fino por PET

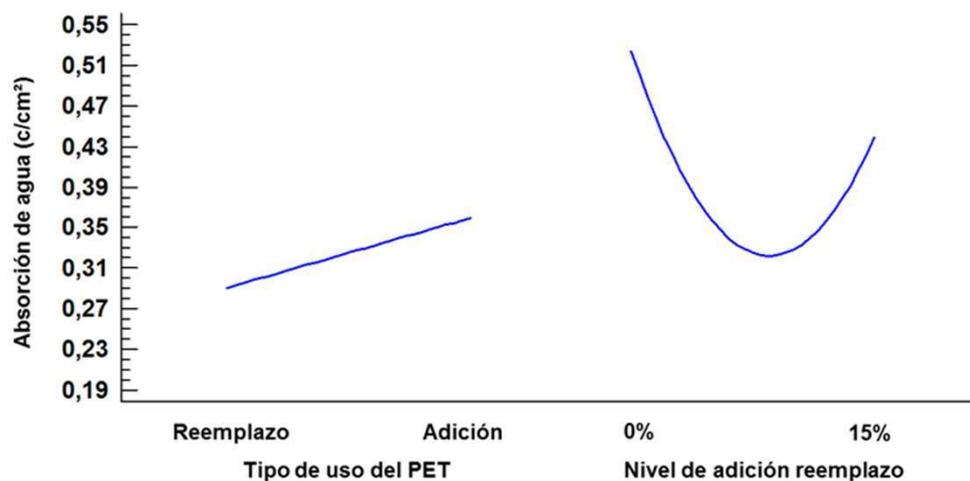
CA_AM: Absorción capilar de morteros con adición de PET

CA_RM: Absorción capilar de morteros con sustitución de árido fino por PET

Para confirmar los criterios concluidos anteriormente, se diseñó un experimento factorial multinivel para medir la influencia de los efectos principales (tipo de uso del PET y nivel de adición y sustitución) de los morteros curados hasta 28 días sobre la resistencia a la compresión y la absorción de agua por proceso de capilar. En el caso de la absorción capilar de agua (ver figura 6a y 6b) el efecto principal (nivel de adición y reposición) influye positivamente, es decir, cuando aumenta el nivel de adición y/o reposición, los valores de absorción capilar disminuyen hasta el proporción del 10% y luego aumenta del 15%, sin embargo, el efecto principal (tipo de uso de PET) tiene una influencia negativa, es decir, cuando se utiliza PET triturado en escamas para reemplazar el árido. Los valores de absorción por capilaridad fina son más bajos que cuando se tritura el PET se utiliza como complemento. En términos de durabilidad, el efecto de la sustitución del árido fino por PET triturado en la fabricación de morteros estructurales hace que el agua, por superficie, suba más lentamente que con el uso de PET como aditivo.



a)



b)

Figura 6: Influencia de los efectos principales en la absorción de agua por capilaridad: a) Diagrama de Pareto y b) Diagrama de efectos principales

4. CONCLUSIONES

Las conclusiones responden al cumplimiento de los objetivos principales que han guiado el desarrollo de este estudio. Estos han tenido como objetivo estudiar la permeabilidad de los morteros fabricados a partir del uso de PET en dos tipos de empleo y a diferentes niveles, así como evaluar la influencia de los factores antes mencionados en la resistencia a la compresión y absorción de agua por capilaridad. Del análisis de los resultados de la presente investigación se puede concluir que:

Todos los morteros fabricados a partir del uso de PET, en cualquiera de sus formas de empleo, son menos resistentes que el mortero de control. Los valores obtenidos para la resistencia a la compresión a los 28 días de curado de los morteros fabricados con PET son inferiores entre 10 y 23 MPa a los morteros de control a base únicamente de cemento portland y árido fino.

Las medidas de resistividad eléctrica, en el caso de los niveles de adición y reposición del 5 y 10%, para ambos tipos de uso de PET, se comportaron superiores al mortero control con valores que superaron los 42 y 43 kΩ·cm. Por otro lado, la absorción de agua por capilaridad tendió a disminuir según el tipo de uso del PET y los niveles de reposición, salvo el 15% de adición, este resultado fue mayor que el mortero estándar. Asimismo, se demostró que existe una correlación entre ambas propiedades, ya que los valores de resistividad eléctrica tendieron a aumentar contrario a los valores de absorción de agua por capilaridad tendieron a disminuir. La combinación de tales medidas demuestra la capacidad del PET triturado, en cualquiera de sus tipos de uso, para modificar la estructura interna de los morteros, haciéndolos más tortuosos y menos impermeables.

Del análisis experimental, diseñado para determinar la influencia de factores como el uso de PET y el nivel de adición y sustitución, sobre la resistencia a la compresión y la porosidad, se deduce que los morteros fabricados con PET en reemplazo del árido fino son más resistentes y paralelamente absorben menos cantidad de agua que los morteros fabricados con PET como adición en peso del cemento. Sin embargo, a medida que aumenta el nivel de reemplazo disminuye la resistencia a la compresión. En el caso de la absorción de agua por capilaridad, los valores mostraron el comportamiento de una función convexa, tendiendo a disminuir hasta el 10% y aumentar para el nivel del 15%.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al equipo del laboratorio de materiales de construcción del Centro de Estudios de la Construcción y Arquitectura Tropical (CECAT) de la Universidad Tecnológica de La Habana.

1. PlasticEurope. Plásticos – Situación en 2017. Un análisis de los datos sobre producción, demanda y residuos de plásticos en Europa y el mundo. 2017; Available from: www.plasticseurope.org.
2. WSA, Steel statistical tearbook 2021: A cross-section of steel industry statistics, in Anual. 2021, World Steel Association.
3. A.B. Acebedo, J. E. Posada, Polietileno tereftalato como reemplazo parcial del agregado fino en mezclas de concreto. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 18 (34) • Enero-Junio 2019 • pp. 45-56 • ISSN (en línea): 2248-4094
4. C.E. Carraher, J., *Polymer chemistry*. VI ed. 2003, 270 Madison Avenue, New York, NY 10016: Marcel Dekker Inc.
5. Nicholson, J.W., *The chemistry of polymers*. v ed. 2017: Royal Society of Chemistry.
6. NOAA and WHSG, Marine debris is everyone's problem. 2018, NOAA Marine Debris Program; Ocean Conservancy; Woods Hole Sea Grant: EUA.
7. Forrest, M., *Recycling of polyethylene terephthalate*. First Published ed. Vol. I. 2016, Shawbury, Shrewsbury, Shropshire, SY4 4NR, UK: Smithers Rapra Technology Ltd. 348.
8. Hurd, D.J. Best practices and industry standards. in *PET plastic recycling*. 1997. Bronx, NY, USA: Bronx 2000 Associates Inc.
9. Book, W., *Waste to energy in Austria*, in *Waste to energy in Austria*. 2010: Austria.
10. Choi, Y.W., et al., Effects of waste PET bottles aggregate on the properties of concrete. *Cement and Concrete Research*, 2005. 35: p. 6.
11. Marzouk, O.Y., R.M. Dheilly, and M. Queneudec, Valorization of post-consumer waste plastic in cementitious concrete composites. *Waste Management*, 2007. 27: p. 9.
12. Foti, D., Use of recycled waste pet bottles fibers for the reinforcement of concrete. *Composite Structures*, 2013. 96: p. 9.
13. Ávila, C. et. al., PET de desecho y su uso en el concreto. Capítulo 6: *Materiales sustentables y reciclados en la construcción*. 2da Edición, 2019, ISBN: 978-84-943418-0-9.
14. León, D., Fernández, D., Influencia de las fibras de PET en la velocidad de corrosión del acero en el concreto reforzado [Tesis de Maestría, Universidad Católica de Colombia]. Repositorio Institucional – Universidad Católica, repository.ucatolica.edu.co, 2020.
15. Ochi, T., S. Okubo, and K.C.C.C. K. Fukui, Development of recycled PET fiber and its application as concrete-reinforcing fiber. *Cement & Concrete Composites*, 2007. 29: p. 448-455.
16. Sadrmomtazi, A., et al., The combined effects of waste PET particles and pozzolanic materials on the properties of self-compacting concrete. *Journal of Cleaner Production*, 2016.
17. Foti, D. and F. Paparella, Impact behavior of structural elements in concrete reinforced with PET grids. *Mechanics Research Communications*, 2014. 57: p. 10.
18. Soroushian, P., J. Plasencia, and S. Ravanbakhsh, Assessment of reinforcing effects of recycled plastic and paper in concrete. *ACI Materials Journal*, 2003. 100(3): p. 203-207.
19. Mohammed, A.A., Modelling the mechanical properties of concrete containing PET waste aggregate. *Construction and Building Materials*, 2017. 150: p. 595-605.
20. Rodríguez, L., Chávez, M., Lartategui de Roshardt, F., Letona, A. P., Factibilidad del uso del PET Reciclado en elementos de cubierta y envolventes. *Ingeniería* 27 (2): 40-55, ISSN: 2215-2652; 2017. San José, Costa Rica.
21. Saucedo, J., Atoche, J., Muñoz, S., Uso de los agregados PET en la elaboración del concreto: Revisión de la literatura. *Rev. Avances Investigación en Ingeniería*. Vol. 18 Núm. 2, 2021 <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.2.6942>
22. Cuetara, J.R., Empleo de residuos de botellas de polietileno de tereftalato triturados en forma de escama como adición en la fabricación del hormigón. *Ciencia & Futuro*, 2018. 8(4): p. 29-48.
23. Hameed, A.M. and B.A.-F. Ahmed, Employment the plastic waste to produce the light weight concrete. *Energy Procedia*, 2019. 157: p. 30-38.
24. Frigione, M., Recycling of PET bottles as fine aggregate in concrete. *Waste Management*, 2010. 30: p. 6.
25. Rahmani, E., et al., On the mechanical properties of concrete containing waste PET particles. *Construction and Building Materials*, 2013. 47: p. 1302-1308.

26. Lucolano, R. and R. Cioffi, Recycled plastic aggregate in mortars composition: Effect on physical and mechanical properties. *Materials & Design*, 2013. 52: p. 916-922.
27. Umasabor, R., Daniel, S., The effect of using polyethylene terephthalate as an additive on the flexural and compressive strength of concrete, *Heliyon*. 2020 Aug; 6(8): e04700 doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e04700
28. da Silva, T.R.; Cecchin, D.; de Azevedo, A.R.G.; Valadão, I.; Alexandre, J.; da Silva, F.C.; Marvila, M.T.; Gunasekaran, M.; Garcia Filho, F.; Monteiro, S.N. Technological Characterization of PET—Polyethylene Terephthalate—Added Soil-Cement Bricks. *Materials* 2021, 14, 5035
29. Kolhapure B.K., Chavan A., Irshad A., Amar B., Patel H. Eco friendly concrete by partial replacement of sand by shredded pieces of PET plastic bottles. *Int. Res. J. Eng. Tech.* 2018; 5 (5):1259–1263. [Google Scholar]
30. Saikia, N. and J.d. Brito, Mechanical properties and abrasion behaviour of concrete containing shredded PET bottle waste as a partial substitution of natural aggregate. *Construction and Building Materials*, 2014. 52: p. 236-244.
31. S. Shahidan, et. al. Concrete incorporated with optimum percentages of recycled polyethylene terephthalate (PET) bottle fiber, *Int. J. Integr. Eng.*, Vol. 10, Núm. 1, pp. 1–8, 2018
32. Kolhapure et. al., Eco friendly concrete by partial replacement of sand by shredded pieces of PET plastic bottles. *Int. Res. J. Eng. Tech.*, Vol. 5 Núm. 5, 2018, pp. 1259-1263
33. Brahim, S., Mohamed, S., Adjamila, A., et al. The use of plastic waste as fine aggregate in the self-compacting mortars: Effect on physical and mechanical properties., *Construction and Building Materials* Vol. 43, pp. 436-442, Jun. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.049>
34. J.Bard, A. and L.R. Faulkner, *Electrochemical Methods. Fundamentals and Applications*. 1980: Jon Wiley & Sons Ed.