

Polietileno tereftalato como reemplazo parcial del agregado fino en mezclas de concreto*

Ana Beatriz Acevedo Jaramillo**

Juan Esteban Posada Franco***

Recibido: 03/02/2017 • Aceptado: 25/05/2018

<https://doi.org/10.22395/rium.v18n34a3>

Resumen

Este artículo de investigación, financiado por la Universidad Eafit, presenta resultados experimentales en los que se evaluó la resistencia a la compresión y la manejabilidad de un concreto hecho con un reemplazo parcial del agregado fino por polietileno tereftalato (PET) reciclado. El reemplazo se realizó por volumen de modo que el espacio ocupado por las partículas de arena extraída lo ocuparan las partículas de PET. Se realizaron mezclas de concreto con reemplazo de arena de 0 % (referencia), 5 %, 10 %, 15 % y 20 %. Los resultados indican que aumentar el porcentaje de arena reemplazada disminuye la resistencia a la compresión, sin embargo, la manejabilidad no se ve afectada al conservar la curva granulométrica de los agregados. Se determinó el porcentaje de reemplazo del 15 % como el más adecuado ya que la manejabilidad es apropiada, se reemplaza una cantidad alta de arena y se presenta una disminución aceptable de resistencia a la compresión.

Palabras clave: polietileno tereftalato (PET); resistencia a la compresión; agregado fino; manejabilidad; concreto; reemplazo.

* Artículo derivado de la investigación financiada por la Universidad Eafit.

*** Ph.D. y M.Sc. en Ingeniería Sísmica (Reducción del riesgo sísmico). Profesora del Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Eafit, Medellín, Colombia. Correo electrónico: aaceved14@eafit.edu.co. Orcid: <http://orcid.org/0000-0002-3869-4373>

*** Ingeniero civil, Universidad Eafit, Medellín, Colombia. Correo electrónico: jposadaf@eafit.edu.co. Orcid: <http://orcid.org/0000-0003-0224-3105>

Polyethylene terephthalate as a partial replacement for the fine aggregate in concrete mixes

Abstract

This research paper, financed by the Eafit University, presents the experimental results in which resistance to compression and manageability of a concrete mix made with a partial replacement for the fine aggregate with polyethylene terephthalate (PET) was assessed. The replacement was made by volume, thus the space occupied by the extracted sand particles will be occupied by the PET. Different concrete mixes with sand replacement were made going from 0 % (reference), 5 %, 10 %, 15 % and 20 %. The results indicate that increasing the replaced sand percentage decreases the resistance to compression, nonetheless, the manageability is not affected by keeping the granulometric curvature of the aggregates. The replacement percentage of 15 % was determined as the more adequate given its appropriate manageability, a great amount of sand is replaced and an acceptable resistance to compression is obtained.

Keywords: polyethylene terephthalate; resistance to compression; fine aggregate; manageability; concrete, replacement.

Polietileno tereftalato como substituto parcial do agregado fino em mesclas de concreto

Resumo

Este artigo de pesquisa apresenta resultados experimentais nos quais foi avaliada a resistência à compressão e o manejo de um concreto feito com um substituto parcial do agregado fino por polietileno tereftalato (PET) reciclado. A substituição foi realizada por volume de modo que o espaço ocupado pelas partículas de areia extraída foi ocupado pelas partículas de PET. Foram realizadas mesclas de concreto com substituição de areia de 0 % (referência), 5 %, 10 %, 15 % e 20 %. Os resultados indicam que aumentar a porcentagem de areia substituída diminui a resistência a compressão, contudo o manejo não é afetado ao conservar a curva granulométrica dos agregados. Foi determinada a porcentagem de substituição de 15 % como a mais adequada, já que o manejo é apropriado; substituiu-se uma quantidade alta de areia e apresenta-se uma diminuição aceitável de resistência à compressão.

Palavras-chave: polietileno tereftalato (PET); resistência à compressão; agregado fino; maneabilidade; concreto; substituição.

INTRODUCCIÓN

El concreto es el material más usado en la construcción, cada año se producen cerca de diez billones de toneladas a nivel mundial. Según información obtenida del Departamento Administrativo Nacional de Estadística [1] a partir de información suministrada por empresas productoras de concreto, en el periodo entre julio de 2017 y junio de 2018 la producción de concreto en Colombia fue de 6,666 mil metros cúbicos. La sencilla fabricación del concreto, la buena resistencia a la compresión en relación a su costo, su larga vida de servicio en comparación con otros materiales, entre otras características, hacen que sea un material de gran preferencia. A pesar de las bondades del concreto, es bien conocido que su fabricación es uno de los mayores generadores de contaminación debido principalmente a la gran cantidad de agregados pétreos necesarios para su producción, los cuales ocupan aproximadamente tres cuartas partes del volumen del concreto. Adicionalmente, la producción del cemento genera emisiones importantes de dióxido de carbono (CO_2), que corresponden a aproximadamente el 7 % del CO_2 generado a nivel mundial [2, 3].

Por otro lado, el polietileno tereftalato (PET), material que pertenece al grupo de los polímeros, se caracteriza principalmente por tener una gran tenacidad y excelente resistencia a la fatiga y al desgarramiento. Adicionalmente, tiene un excelente comportamiento ante presencia de humedad, ácidos, grasas, aceites y disolventes. Gracias a sus propiedades es ampliamente utilizado en diversas industrias, desde la fabricación de cintas para grabación magnetofónica hasta para la fabricación de envases para bebidas [4]. Desde los años 70 el PET se ha venido utilizando ampliamente para la fabricación de envases de diversos productos, lo cual lleva a que se generen abundantes residuos de este material, de los cuales solo un pequeño porcentaje está siendo reciclado. Según [5] se estima que, si el costo de fabricación de una botella de PET es del 100 %, el de la recolección sería de 12,7 % y del reprocesado de 54,5 %, para un total de 67,2 % en la producción de botellas recicladas, lo que resulta en un 32,8 % menos que el costo de fabricación.

Usar PET reciclado como sustitución del agregado en el concreto mejoraría tanto el impacto en la huella ecológica de la producción de concreto como de la industria del PET. Reemplazar parte de los agregados por PET produciría concretos con un menor impacto ambiental en su proceso de fabricación, o de otra manera podría ser una metodología muy útil en lugares donde exista poca disponibilidad de agregados. Diversos autores han explorado el uso del PET reciclado en mezclas de concreto, los cuales se mencionan brevemente a continuación. La mayoría de estas investigaciones se han realizado por fuera de Colombia, por lo tanto, han utilizado materiales diferentes a los que se encuentran en la región. Es adecuado entonces realizar una investigación con

materiales locales, que permita identificar el impacto de la inclusión del PET reciclado en mezclas realizadas con los materiales disponibles.

Frigione [6] realizó mezclas de concreto reemplazando el 5 % de la arena en peso por PET molido sin ningún tratamiento, garantizando que la arena reemplazada tuviera la misma granulometría del PET. En las mezclas se varió el contenido de cemento y la relación agua-cemento. Los resultados indican una disminución significativa de la resistencia al aumentar la relación agua-cemento, en cuanto al comportamiento en estado fresco, se obtuvieron valores de fluidez y consistencia muy cercanos a los de la referencia.

Ismail y Al-Hashmi [7] realizaron mezclas de concreto con reemplazos del 0 %, 10 %, 15 % y 20 % de arena por residuos plásticos consistentes en 80 % de polietileno y 20 % de poliestireno. Los resultados indicaron una disminución importante en el asentamiento y la resistencia a la compresión, debida posiblemente a la poca adherencia entre las partículas plásticas y la pasta de cemento. Bandodkar *et al.* [8] investigaron el comportamiento del concreto al reemplazar la arena en porcentajes del 1 %, 5 % y 10 % con respecto al peso del agregado fino por tres tipos de plásticos: plástico de moldeado por inyección rayado/pulverizado, residuo plástico obtenido a partir de bolsas de polietileno rayado/pulverizado y botellas PET rayadas/pulverizadas. Para todos los tipos de plástico se observó una disminución en la resistencia a la compresión, debida principalmente a la falta de unión entre el plástico y el cemento.

Choi *et al.* [9] estudiaron la microestructura superficial del PET como agregado liviano en el concreto, examinando el comportamiento de la mezcla al recubrir las partículas plásticas con escoria de alto horno. Los autores realizaron mezclas de concreto en las que reemplazaron 0 %, 25 %, 50 % y 75 % del volumen del agregado fino; adicionalmente se utilizó un aditivo reductor de agua. Se encontró una disminución de las propiedades estructurales a medida que se incrementaron las proporciones de PET y, contrariamente, un aumento de la manejabilidad, lo cual pudo atribuirse no solo a la forma esférica y lisa de los agregados sino también a la absorción de estos.

En la presente investigación se optó por realizar un reemplazo parcial del agregado fino, con la intención de conservar la curva granulométrica del material original, por lo que los porcentajes de reemplazo están ligados directamente con las características granulométricas de la arena reemplazada. Se estudió la fluidez del concreto en estado fresco midiendo el asentamiento con el cono de Abrams, y se determinó la resistencia a la compresión a edades de 3, 7 y 28 días.

1. MATERIALES Y MÉTODOS

Conociendo que el PET tiene una densidad menor a la de la arena, se comenzó por analizar si el reemplazo se debía realizar por peso o por volumen. Dado que el PET

tiene una densidad más baja que la arena, reemplazar por peso implica una alteración en la curva granulométrica del agregado fino, pues se aumenta el número de partículas de PET para cierta cantidad de arena. Por lo tanto, se tomó la decisión de realizar el reemplazo por volumen, para lo cual se comparó la densidad del PET con la de la arena, obteniendo una relación de densidades PET/arena de 0,52.

1.1 Metodología

Los porcentajes de reemplazo se definieron de acuerdo a resultados experimentales de investigaciones previas, teniendo como limitante el máximo porcentaje de reemplazo posible que permitía la arena, el cual está relacionado con el tamaño de las partículas del PET. La gran mayoría de las partículas de PET utilizadas son retenidas por el tamiz n.º 8 (2,36 mm), como se observa en la figura 1. La granulometría de la arena utilizada indica que el porcentaje de partículas retenidas en el tamiz n.º 8 es de 21,66 %, por lo cual no se puede reemplazar una cantidad mayor. Por lo tanto, los porcentajes de reemplazo de la arena por PET definidos fueron: 0 % (mezcla de referencia), 5 %, 10 %, 15 % y 20 % del peso de la arena.

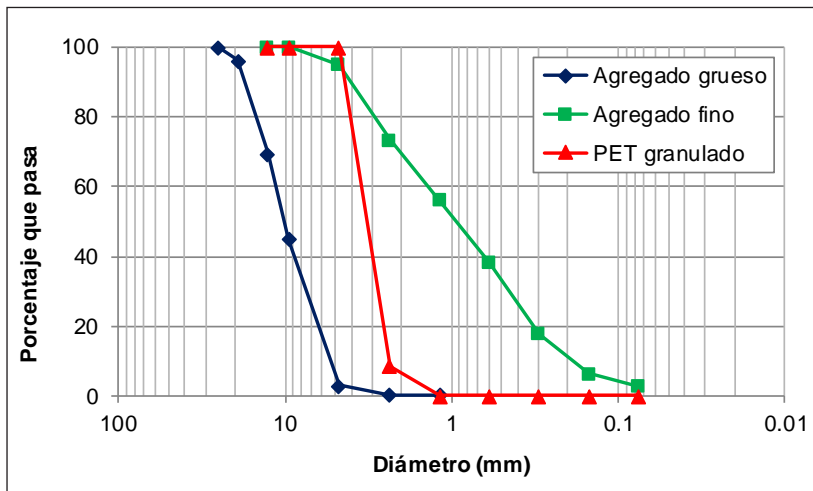


Figura 1. Curva granulométrica de los agregados y el PET

Fuente: elaboración propia.

Inicialmente se procedió a diseñar la mezcla de referencia, buscando una resistencia a la compresión de 28 MPa y un asentamiento de 75 ± 25 mm. El diseño se realizó siguiendo el procedimiento adaptado del manual ACI.211 por [10]. Posteriormente, para el diseño de las mezclas de concreto con alteraciones en el agregado fino, se establecieron como constantes el contenido de agua, cemento y agregado grueso, para de esta manera tener como única variable el porcentaje de arena reemplazado por PET.

El asentamiento se midió mediante el ensayo del cono de Abrams. Para cada mezcla se fabricaron nueve cilindros de concreto, con altura de 20 cm y diámetro de 10 cm para realizar ensayos de resistencia a la compresión a los 3, 7 y 28 días. Las mezclas que incluyeron PET se realizaron dos veces para obtener una mayor confiabilidad en los resultados.

La nomenclatura de las mezclas que se presenta en este informe se estableció de la siguiente manera: REF corresponde a la mezcla de referencia, las demás mezclas comienzan por las siglas PET, separado por un guion sigue el porcentaje reemplazado y separado por un nuevo guion continúa el número 1 o 2, pues estas mezclas se realizaron dos veces. Las dosificaciones de mezcla en kg/m^3 en condición saturada y superficialmente seca (SSS) se muestran en la tabla 1, el volumen utilizado para cada mezcla fue de $0,0245 \text{ m}^3$. Cabe recordar que como el reemplazo se hace por volumen, el PET incluido en la mezcla pesa 0,52 veces la arena extraída.

Tabla 1. Dosificaciones de mezclas (condición SSS)

<i>Mezcla</i>	<i>Agua (kg/m^3)</i>	<i>Cemento (kg/m^3)</i>	<i>Agregado grueso (kg/m^3)</i>	<i>Agregado fino (kg/m^3)</i>	<i>PET (kg/m^3)</i>
REF	216	400	930,62	815,08	0,00
PET-5	216	400	930,62	774,33	21,19
PET-10	216	400	930,62	733,57	42,38
PET-15	216	400	930,62	692,82	63,58
PET-20	216	400	930,62	652,06	84,77

Fuente: elaboración propia.

1.2 Materiales

Los materiales que hacen parte de esta investigación son: cemento tipo I de uso general (Argos), agregado grueso (triturado $\frac{3}{4}$ "), agregado fino (arena lavada aluvial) y PET reciclado.

1.2.1 Cemento

Se utilizó cemento gris de uso general (tipo I) fabricado por Argos. Se seleccionó debido a la disponibilidad de este cemento en el medio, siendo usado comúnmente para la producción de concretos para cimentaciones, muros, preparación de morteros para mampostería y todo tipo de obra en general. Este cemento tiene una resistencia mínima a los 28 días de 26 MPa. Las propiedades del cemento se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Propiedades del cemento según especificaciones del fabricante

<i>Propiedad</i>	<i>Valor</i>
Óxido de magnesio MgO (%)	6,00
Trióxido de azufre, SO (%)	3,50
Fraguado final (minutos)	90
Fraguado final (minutos)	320
Resistencia a 3 días (MPa)	9
Resistencia a 7 días (MPa)	16
Resistencia a 28 días (MPa)	26

Fuente: elaboración propia.

1.2.2 Agregados

El agregado grueso utilizado corresponde a un triturado de tamaño máximo de 19 mm (¾”) de color gris; el agregado fino corresponde a una arena lavada de color gris. Ambos agregados provienen de una donación de la empresa *Agregados y Prefabricados del Norte* ubicada en Girardota, Antioquia. Las propiedades de ambos agregados se muestran en la tabla 3, las curvas granulométricas se muestran en la figura 1.

Tabla 3. Propiedades de los agregados pétreos

<i>Propiedad</i>	<i>Agregado fino</i>	<i>Agregado grueso</i>
Densidad aparente (g/cm ³)	2,648	2,732
Densidad S.S.S* (g/cm ³)	2,696	2,776
Densidad nominal (g/cm ³)	2,781	2,858
Absorción (%)	1,792	1,610
M.U.S** suelta (g/cm ³)	1,520	1,550
M.U.S** compacta (g/cm ³)	1,790	1,660

* S.S.S: Saturado Superficialmente Seco

** M.U.S: Masa Unitaria Seca

Fuente: elaboración propia.

1.2.3 PET

El PET utilizado fue adquirido en la empresa *Codesarrollo* ubicada en La Estrella, Antioquia, y es obtenido a partir de botellas PET transparentes. El proceso al cual es sometido consiste en un lavado inicial del material, luego es peletizado (proceso de moldeo termoplástico) y por último cortado, por lo cual se obtiene una textura

lisa y en forma de pequeños cilindros. Presenta una mala gradación, ya que es casi completamente del mismo tamaño (2,36 mm). La curva granulométrica se muestra en la figura 1. En la figura 2 se muestra una imagen del PET y su comparación con partículas de agregado fino de igual tamaño.



a) Partículas de PET granulado



b) Comparación de arena (2.36 mm) y PET

Figura 2. PET granulado

Fuente: elaboración propia.

2. RESULTADOS

En total se realizaron nueve mezclas de concreto. La mezcla de referencia corresponde a una mezcla sin reemplazo de arena por PET. Para las demás mezclas se reemplazó parcialmente el agregado fino en porcentajes del 5 %, 10 %, 15 % y 20 % con respecto al peso del agregado. El volumen de arena extraído se reemplazó por PET reciclado. Como se mencionó anteriormente, el reemplazo se hizo por volumen buscando mantener la granulometría de la arena, con la intención de obtener similar manejabilidad en la mezcla, es decir, buscando alterar en lo menor posible la facilidad de colocación del concreto fresco. Para tal fin se seleccionó el porcentaje de arena a reemplazar retirando de la arena de la mezcla el peso correspondiente en partículas retenidas en el tamiz n.º 8 (2,36 mm). Debido a la diferencia de densidades del PET y de la arena, la cantidad de PET en peso a incluir en la mezcla corresponde a 0,52 veces el peso de la arena extraída. A manera de ejemplo considerar la mezcla PET-10 de la tabla 1, donde se reemplazó el 10 % del peso de la arena. El peso de la arena de la mezcla de referencia es de 815,08 kg/m³, el 10 % de dicho peso es 81,51 kg/m³; por lo tanto, la cantidad de arena de la mezcla PET-10 es de 733,57 kg/m³ y el peso del PET es de 0,52 x 81,51 kg/m³ = 42,38 kg/m³.

Los resultados de asentamiento y resistencia a la compresión para cada edad de curado se resumen en la tabla 4. Estos resultados corresponden a los promedios

obtenidos a partir de los tres especímenes fabricados para cada edad. La densidad corresponde a las muestras con un tiempo de curado de 28 días. La tabla incluye los resultados para cada una de las dos mezclas realizadas para cada porcentaje de reemplazo, al igual que su promedio. Se observan resultados similares para cada par de mezclas, lo que implica confiabilidad en los resultados.

Tabla 4. Resultados

Mezcla	Resistencia a la compresión (MPa)						Asentamiento (mm)	Densidad (kg/m ³)
	3 días		7 días		28 días			
REF	13,5		20,9		29,9		75	2437
PET-5-1	10,3	9,7	19,1	19,2	28,1	28,8	80	2393
PET-5-2	9,1		19,4		29,5		70	2413
PET-10-1	6,7	8,6	16,2	16,4	25,9	26,2	75	2377
PET-10-2	10,6		16,6		26,5		65	2370
PET-15-1	10,5	10,2	19,3	18,9	25,5	25,7	95	2357
PET-15-2	9,9		18,6		25,9		85	2353
PET-20-1	11,7	10,2	17,6	16,8	24,7	24,7	40	2340
PET-20-2	8,6		16,0		24,7		90	2343

Fuente: elaboración propia.

3. DISCUSIÓN

Los resultados de asentamiento fueron satisfactorios, pues todos se mantuvieron en el rango especificado para la mezcla de referencia de 75 ± 25 mm, con lo que se permite confirmar que el asentamiento se mantiene estable al realizar un reemplazo de la arena por PET, siempre y cuando se respete la curva granulométrica del agregado. En la figura 3 se representan gráficamente los asentamientos para cada mezcla. En cuanto a los resultados de resistencia a la compresión, al igual que en otras investigaciones, se encontró que a medida que se aumenta el porcentaje de arena reemplazada, la resistencia tiende a disminuir, sin embargo, esta disminución no fue demasiado alta. En la figura 4 se aprecia este comportamiento para cada edad analizada. A los 28 días, para un reemplazo del 5 % la disminución de resistencia es mínima (3,7 %), para los reemplazos del 10 % y 15 %, la disminución de resistencia es más considerable, siendo similar para ambos reemplazos (12,4 % y 14,0 %, respectivamente). Por último, para el reemplazo del 20 %, la resistencia disminuye un poco más que las anteriores (17,4 %), siendo ésta la mayor caída de resistencia presentada.

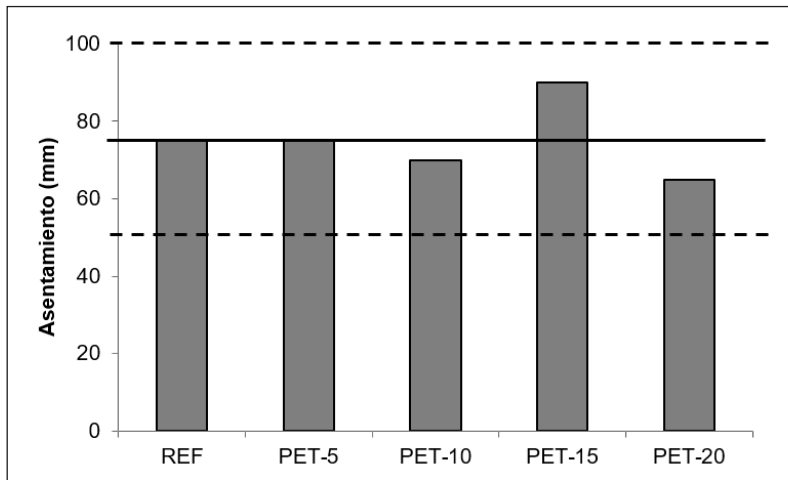


Figura 3. Asentamientos con el cono de Abrams

Fuente: elaboración propia.

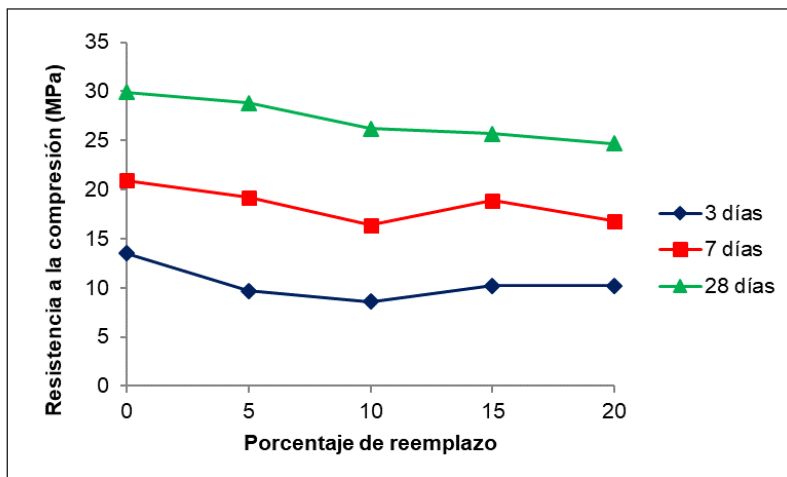


Figura 4. Resistencia a la compresión en función del porcentaje reemplazado

Fuente: elaboración propia

Cabe resaltar que todas las resistencias a los 28 días son mayores de 21 MPa (valor usual en las construcciones) y por lo tanto mayores que la resistencia mínima requerida para un concreto estructural (17 MPa) según el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 [11]. La disminución de la densidad fue muy poco significativa: la referencia tuvo una densidad de 2437 kg/m³, y la mezcla con el porcentaje más alto de PET (20 %) tuvo una densidad de 2342 kg/m³, por lo tanto, la máxima reducción de la densidad fue de 3,9 %.

4. CONCLUSIONES

En este artículo se presentan los resultados de un ensayo experimental en el cual se reemplazó parcialmente el agregado fino de una mezcla de concreto por polietileno tereftalato (PET). El reemplazo se realizó en cuatro porcentajes diferentes con respecto al peso de la arena (5 %, 10 %, 15 % y 20 %) y se compararon los valores de resistencia a la compresión y asentamiento (medida indirecta de la manejabilidad) de dichas mezclas con una mezcla de referencia (sin reemplazo de agregado por PET).

Los resultados obtenidos indican un buen comportamiento de las mezclas que incluyeron PET en términos de manejabilidad, puesto que no se alteró el valor del asentamiento especificado para la mezcla de referencia: 75 ± 25 mm. Lo anterior se logró al realizar el reemplazo del agregado fino por PET buscando conservar la curva granulométrica de la arena. Para lo anterior se tuvo en cuenta la relación de densidades entre el PET y el agregado fino, de modo que el PET ocupara el espacio de la arena reemplazada.

En términos de resistencia a la compresión, este valor disminuyó –como era de esperarse– al reemplazar el agregado fino por PET. La resistencia a la compresión de la mezcla de referencia a los 28 días fue de 29,9 MPa, con una disminución del 4 %, 12 %, 14 % y 17 % para las mezclas con reemplazo de arena por PET en porcentajes de 5 %, 10 %, 15 % y 20 % del peso de la arena, respectivamente. Es importante tener en cuenta que los valores de resistencia a la compresión obtenidos en las mezclas con PET son satisfactorios, pues están por encima del límite inferior que define un concreto estructural.

La mejor resistencia de las mezclas con PET corresponde obviamente al reemplazo del 5 %, sin embargo, no quiere decir que este sea el reemplazo más adecuado, pues también es conveniente observar la manejabilidad de las mezclas y el beneficio ambiental que se está ofreciendo. El mejor asentamiento obtenido corresponde a la mezcla con un reemplazo del 15 % a pesar de que dicha mezcla presentó una disminución de resistencia del 14 % con respecto a la mezcla de referencia. En este trabajo se considera el reemplazo por volumen del 15 % del peso del agregado fino por PET como el más adecuado, puesto que se logra reemplazar una mayor cantidad de arena, la resistencia a la compresión no se ve mayormente afectada (sigue siendo un concreto estructural) y disminuye muy poco con respecto al reemplazo del 10 %, y la manejabilidad tiende a aumentar en comparación con la mezcla de referencia.

Para la densidad, se concluye que la variación es mínima, pasa de 2437 kg/m³ para la referencia a 2343 kg/m³ para la mezcla con 20 % de PET.

REFERENCIAS

- [1] Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), *Estadísticas de Concreto Premezclado*, 2018.
- [2] J. McCormac y R. Brown. *Diseño de concreto reforzado*, 8.^a ed., Ciudad de México: Alfaomega, 2011, 724 p.
- [3] C. Meyer, “The greening of the concrete industry,” *Cement and Concrete Composites*, vol. 31, pp. 601-605, 2009.
- [4] W. D. Callister. *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales*, 2.^a ed., Ciudad de México: Limusa Wiley, 2009, 834 p.
- [5] A. Strong. *Plastics: materials and processing*, 3.^a ed., Nueva Jersey: Pearson Prentice Hall, 2006, 829 p.
- [6] M. Frigione, “Recycling of PET bottles as fine aggregate in concrete,” *Waste Management*, vol. 30, n.º 6, pp. 1101-1106, 2002.
- [7] Z.Z Ismail y E.A Al-Hashmi, “Use of waste plastic in concrete mixture as aggregate replacement”, *Waste Management*, vol. 28, n.º11, pp. 2041-2047, 2008.
- [8] L.R Bandodkar, *et al.*, “Pulverised PET bottles as partial replacement for sand,” *International Journal of Earth Sciences and Engineering*, vol. 4, n.º 6, pp. 1009-1012, 2011.
- [9] Y.W Choi *et al.*, “Effects of waste PET bottles aggregates on the properties of concrete,” *Cement and Concrete Research*, vol. 35, n.º 4, pp. 776-781, 2005.
- [10] S. Mindess y J.F Young, *Concrete*, Nueva Jersey: Prentice-Hall, 1981, 671 p.
- [11] Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10*, AIS, 2010.