




Evaluation of the compressive behavior and physical properties of recycled PET fibers reinforced cement mortars

Evaluación del comportamiento a compresión y propiedades físicas de morteros de cemento reforzados con fibras recicladas PET

J. Cárdenas-Pulido , S. Rodríguez-Loaiza , C. Higuera-Flórez 

Abstract— Polyethylene terephthalate (PET) fibers in concrete are a breakthrough in the construction sector since these fibers contribute to the reduction of cracking due to tensile stresses and plastic shrinkage. PET fibers also increase the durability of cement-based composites. However, information on the positive effect of recycled PET fibers on the physical and mechanical performance of cement-based composites are still scarce. In order to strengthen the state of the art in this regard, the present study assesses the physical and mechanical properties of cement mortars modified with PET fibers in dosages of 0 kg/m³, 1,33 kg/m³, 2,66 kg/m³, 4,0 kg/m³ and, 5,33 kg/m³ through compressive strength, elastic modulus, open porosity, specific gravity, and water absorption tests. The straight PET fibers had a length of 25 mm and a diameter of 0,68 mm (aspect ratio equal to 36). As a result, PET fibers generate reductions up to 17%, 10%, 22%, 7% and, 26% on the compressive strength, elastic modulus, porosity, volumetric density and water absorption mortars properties, respectively. This study highlights the improvement in the physical mortar properties by the addition of PET fibers, despite the slight reduction in mechanical properties, which contributes to improving the volumetric stability and durability of cementing compounds. Based on the experimental results, equations are proposed for the prediction of physical and mechanical properties of the mortars as a function of the PET fibers dosages used.

Index Terms— Compressive strength, Mechanical properties, Mortar, PET fibers, Physical properties, Polyethylene terephthalate.

Resumen— El uso de fibras de tereftalato de polietileno (PET) en el concreto representa un gran avance en la industria de la construcción ya que estas fibras contribuyen a la disminución de la fisuración por esfuerzos de tensión y por fenómenos de retracción plástica, además de incrementar la durabilidad de los compuestos basados en cemento. Sin embargo, a la fecha aún existe información limitada sobre el efecto positivo de las fibras PET recicladas en el desempeño físico y mecánico de compuestos basados en cemento. Con el fin de fortalecer el estado del arte actual en tal aspecto, este estudio evalúa el comportamiento físico

y mecánico de morteros de cemento adicionados con fibras PET en dosificaciones de 0 kg/m³, 1,33 kg/m³, 2,66 kg/m³, 4,0 kg/m³ y 5,33 kg/m³, mediante ensayos de resistencia a la compresión, módulo de elasticidad, porosidad abierta, densidad volumétrica y absorción al agua. Las fibras PET lisas utilizadas presentaban una longitud 25 mm y diámetro 0,68 mm (relación de aspecto igual a 36). Como resultado, la utilización de fibras PET genera reducciones en hasta 17%, 10%, 22%, 7% y 26% respectivamente sobre las propiedades de resistencia a compresión, módulo elástico, porosidad, densidad volumétrica y absorción al agua de los morteros evaluados. El estudio permite destacar el mejoramiento en las propiedades físicas del mortero por la adición de fibras PET, no obstante, la ligera reducción en las propiedades mecánicas, lo cual contribuye a mejorar la estabilidad volumétrica y la durabilidad de compuestos basados en cemento por la utilización de fibras PET recicladas como material de reforzamiento. Con base en los resultados experimentales del estudio finalmente se proponen ecuaciones para la predicción de las propiedades físicas y mecánicas evaluadas de los morteros en función de las dosificaciones de fibras PET utilizadas.

Palabras claves— Resistencia a compresión, Propiedades mecánicas, Morteros, Fibras PET, Propiedades físicas, Tereftalato de polietileno.

I. INTRODUCCIÓN

EL empleo de fibras como refuerzo de materiales frágiles ha sido contemplado por muchas décadas [1]. Por ejemplo, a principios del siglo XX ya se habían desarrollado algunos estudios experimentales sobre la utilización de elementos discontinuos de acero para reforzamiento, tales como clavos, segmentos de alambres y chips metálicos [2]. Con el paso del tiempo, una amplia gama de materiales ha sido empleada para fibras, incluyendo cerámicos, plásticos, yeso, acero, fibras naturales, entre otros. Dentro de la clasificación de materiales plásticos utilizados para la fabricación de fibras se encuentran el polipropileno, nylon poliuretano, cloruro de polivinilo, tereftalato de polietileno, entre otros [3].

This manuscript was sent on Feb 26, 2020 and accepted on June 24, 2020. This work was supported by research center of Faculty of Engineering at the Universidad Católica de Colombia, Colombia, through the project: "Evaluación del coeficiente de migración del ion cloruro en concretos de diferentes características"

Jhon Cárdenas-Pulido is professor and researcher at the Universidad Católica de Colombia, Diagonal 46 A # 15B-10, Bogotá, Colombia (jwcardenas@ucatolica.edu.co).

Said Rodríguez-Loaiza is professor and researcher at the Universidad Católica de Colombia, Diagonal 46 A # 15B-10, Bogotá, Colombia (ssrodriguez@ucatolica.edu.co).

Camilo Higuera is professor and researcher at the Universidad Católica de Colombia, Diagonal 46 A # 15B-10, Bogotá, Colombia (hchiguera@ucatolica.edu.co).



El Tereftalato de Polietileno (PET) es un material derivado del plástico convencional, que es producido a partir del petróleo crudo, gas y aire. Se caracteriza por su resistencia mecánica a la compresión y tensión, y por ser un material 100% reciclable; esto permite que sea reutilizado no solo para la fabricación de empaques en la industria alimentaria (bebidas y alimentos) sino también en la industria de la construcción, como por ejemplo para la fabricación de tubería en PVC. Por otra parte, el problema de los residuos sólidos del Tereftalato de Polietileno ha aumentado, debido a que es un tipo de plástico que se utiliza en altas masas a nivel mundial, a causa del rápido incremento de la utilización de botellas PET en el mundo desde el año 1980 (función del incremento de la población mundial) [4]. Desde entonces el uso masivo de PET ocasiona una serie de problemáticas relacionadas con la disposición final. Lo anterior obedece a que millones de toneladas de residuos de PET requieren ser eliminados anualmente por incineración, o bien, reutilizados para una nueva aplicación, considerando la cada vez más pronunciada limitación en la disponibilidad espacios físicos para la evacuación de estos materiales. En la actualidad gran cantidad de sus residuos PET se arroja a vertederos y fuentes de agua, acciones que causan serios problemas de contaminación al entorno. La acumulación de estos residuos además está generando la conformación de pequeñas islas de basura en zonas adyacentes a mares y océanos, donde diferentes ecosistemas presentes en esas zonas se ven afectados directamente ocasionando su destrucción. También se debe considerar que el tereftalato de polietileno (PET) resiste a la degradación natural a corto plazo dada su alta cristalinidad y la naturaleza de sus moléculas, por lo que el proceso de degradación natural puede generarse en una ventana de tiempo de 600 años [3].

El proceso de eliminación por incineración de los residuos PET genera a la atmósfera gran cantidad de gases de efecto invernadero que contribuye a procesos de calentamiento global y no se considera una solución sustentable. Una alternativa amigable ambientalmente para la disposición de estos materiales consiste en el reciclaje del PET y su reutilización para la fabricación de nuevos materiales. En particular el uso de residuos PET para la fabricación de morteros y concretos está ganando gran aceptación en la comunidad mundial, mediante utilización de las fibras PET para el reforzamiento de esos materiales, o, vía sustitución parcial del agregado fino por agregado sintético triturado PET. Para el aprovechamiento del tereftalato de polietileno como fibras para producir morteros y concretos reforzados, el contenido volumétrico o fracción de volumen de fibras comúnmente utilizado varía entre 0,3% a 1,5% [5,6]. Estudios han demostrado que el desempeño de concreto reforzado con fibras plásticas es considerablemente fortalecido incluyendo su resistencia a la tensión y su ductilidad. Las fibras plásticas producen un efecto de “puenteo” a lo largo de las fisuras y previenen su propagación en el concreto [7]. Kim, S. et al. [8] evaluaron el desempeño estructural del concreto reforzado con fibras recicladas PET y encontraron que las fisuras de retracción por secado del concreto fueron retrasadas en los especímenes reforzados con fibras PET, en comparación a los de control sin refuerzo de fibras PET.

El uso de fibras PET en el concreto representa un gran avance en la industria de la construcción ya que estas fibras contribuyen

a la disminución de la fisuración por esfuerzos de tensión y por fenómenos de retracción plástica. También las fibras PET contribuyen a incrementar la durabilidad de los compuestos basados en cemento. A la fecha, sin embargo, aún existe información limitada en la literatura sobre el efecto positivo de las fibras PET recicladas en el desempeño mecánico y de durabilidad de compuestos basados en cemento [7]. En adición no han sido propuestos suficientes modelos o ecuaciones en la literatura para la predicción de las propiedades físicas y mecánicas de morteros y concretos en función de las dosificaciones de fibras PET adicionadas.

Con el fin de fortalecer el estado del arte actual sobre la comprensión del efecto de las fibras PET en el desempeño compuestos cementantes, este estudio evalúa el comportamiento físico y mecánico de morteros de cemento adicionados con fibras PET en diferentes dosificaciones, mediante ensayos de resistencia a la compresión, módulo de elasticidad, porosidad abierta, densidad volumétrica y absorción al agua. Una comparación entre las propiedades de los morteros adicionados con fibras PET y las propiedades del mortero de control es establecida en orden de validar el efecto que tienen las fibras PET sobre el comportamiento de los morteros basados en cemento. Los resultados obtenidos en este estudio también se comparan con resultados de modelos e investigaciones similares. Finalmente, con base en los resultados experimentales obtenidos se proponen ecuaciones para predicción de las propiedades físicas y mecánicas de los morteros en función de las dosificaciones de fibras PET adicionadas. Wang et al. [9] indicaron que el uso de fibras recicladas a partir de residuos industriales puede ofrecer ventajas económicas, ambientales y técnicas para la industria de la construcción.

De este modo, con el uso de fibras PET para la fabricación de compuestos cementantes, se pretende dar manejo propicio a un material que es comúnmente arrojado a vertederos y fuentes de agua y que se resiste a la degradación natural, lo que causa contaminación al entorno y grandes problemas de disposición. Los resultados de esta investigación se presentan en las siguientes secciones.

II. PROGRAMA EXPERIMENTAL

El programa experimental de este estudio comprendió la elaboración de 5 mezclas de mortero constituidas por 1 mezcla de mortero de control sin adición de fibras y 4 mezclas de mortero con adición de diferentes dosificaciones de fibras PET. Posteriormente, se efectuó el ensayo de 75 especímenes cúbicos y cilíndricos.

A. Materiales

En este estudio se utilizó cemento de uso general Tipo UG de acuerdo con la clasificación del estándar ASTM C1157-17 [10]. El cemento utilizado cuenta con una densidad $2,95 \text{ g/cm}^3$. La caracterización del cemento utilizado se realizó mediante ensayos de fluorescencia y su composición química se resume en la Tabla I.

TABLA I
COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LOS MATERIALES CEMENTANTES EMPLEADOS

Compuesto	Cemento UG, %
SiO ₂	21,46
Al ₂ O ₃	5,58
Fe ₂ O ₃	3,83
CaO	60,42
MgO	1,41
Na ₂ O	0,62
K ₂ O	0,72
P ₂ O ₅	0,18
TiO ₂	0,36
MnO	0,05
SO ₃	4,65

Para todas las mezclas de mortero fabricadas se utilizó agregado fino tipo arena de río con módulo de finura 3,10. La apariencia física del agregado fino utilizado puede observarse mediante caracterización por imagen MEB (Microscopía Electrónica de Barrido) con una ampliación de 34X mostrada en la Fig. 1. También a partir de caracterización por pruebas de fluorescencia de rayos X sobre muestras del agregado fino, se determinó que estaba compuesto principalmente de un contenido 97,8% de SiO₂.

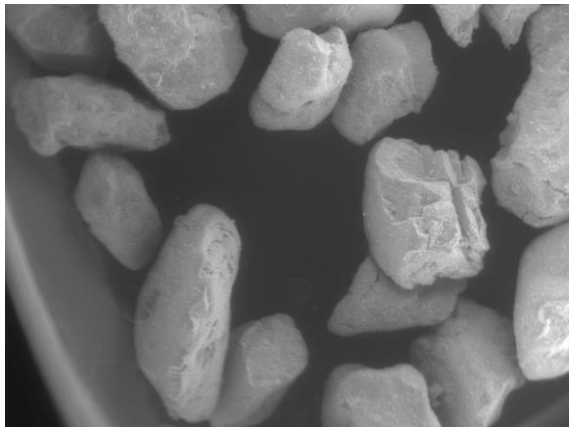


Fig 1. Imagen MEB del agregado fino utilizado.

La distribución granulométrica de tamaños para el agregado fino utilizado en este estudio se muestra en la Fig. 2. El agregado fino utilizado cumple con los límites de distribución granulométrica que se indican en el estándar ASTM C33-18 [11].

En este estudio se utilizaron fibras plásticas comerciales tipo PET (tereftalato de polietileno) (ver Fig. 3) con extremos sin gancho y relación de aspecto de aproximadamente 36. Se empleó un solo tipo de mezcla de mortero con diferentes dosificaciones de fibras: mortero simple sin adición de fibras y mortero reforzado con fibras PET con dosificaciones hasta 5,33 kg/m³. Aunque el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10) [12] indica que la dosificación mínima de fibras de acero para proporcionar el refuerzo mínimo por cortante en vigas corresponde a 60 kg/m³, en este estudio fue posible utilizar dosificaciones de fibras PET mucho menores (hasta 5,33 kg/m³) debido a una menor densidad de las fibras PET (1260 kg/m³) hasta 6 veces menor en comparación

con la densidad de fibras de acero (7850 kg/m³). Dosificaciones mayores a 5,33 kg/m³ desmejoraban la trabajabilidad de las mezclas de mortero con una fluidez inferior a 90% característica a morteros de consistencia seca [13]. Las características de las fibras PET utilizadas en este estudio se muestran en la Tabla II.

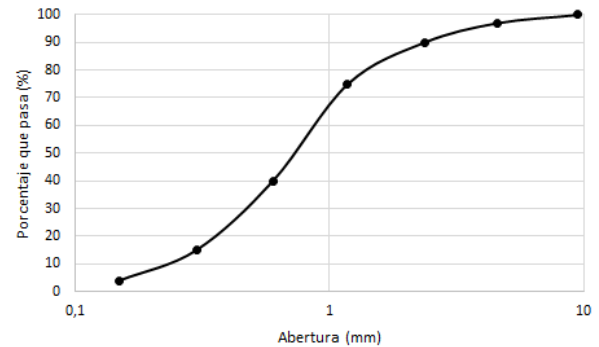


Fig. 2. Distribución granulométrica de tamaños para el agregado fino.

TABLA II
CARACTERÍSTICAS DE LAS FIBRAS PET EMPLEADAS

Parámetro	Valor
Diámetro (mm)	0,68
Longitud (mm)	25,0
Densidad (kg/m ³)	1260
Resistencia a tensión (MPa)	385
Módulo de elasticidad (MPa)	4405

Adicionalmente, en la Fig. 3 se muestra la configuración de las fibras PET utilizadas.

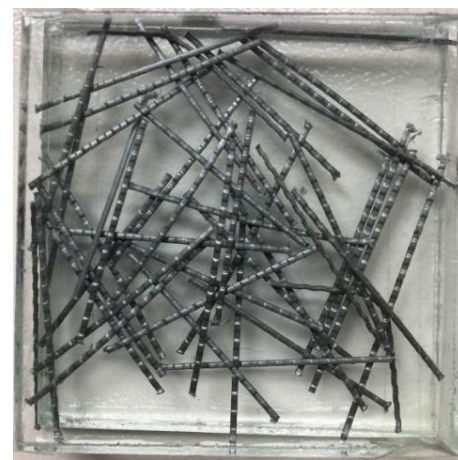


Fig. 3. Fibras de tereftalato de polietileno (PET) utilizadas.

B. Mezclas de mortero

El diseño de la mezcla de mortero de control se realizó de acuerdo a especificaciones de la norma ASTM C109-16 [14], por lo cual se trabajó con un contenido de material cementante de 535 kg/m³, relación constante cemento: agregado de 1:2,75 y relación agua/cemento constante a/c=0,485. El agregado fino se utilizó en condición saturada y superficialmente seca (SSS)

con la finalidad de evitar problemas de interacciones de humedad y absorción con las mezclas de mortero. De este modo, se preparó 1 mezcla de mortero de control y 4 mezclas de mortero con adición de fibras PET en dosificaciones $D_f = 1,33, 2,66, 4,00$ y $5,33$ kg por metro cúbico de volumen de mezcla. Las dosificaciones de fibra seleccionadas correspondían a porcentajes de adición de 0, 0,25%, 0,5%, 0,75% y 1,0% por peso de material cementante principal, también a fracciones de volumen de fibras 0%, 0,11%, 0,21%, 0,32% y 0,42% respectivamente. Al-Tulail [7] afirman que para reducir el costo de la disposición de residuos de plástico, se recomienda adicionar fracciones de volumen de fibras PET (longitud 50 mm) de 1,5% en orden de mejorar la ductilidad de morteros de cemento y restringir la formación de las fisuras. Sin embargo, en este estudio no fueron utilizadas fracciones de volumen de fibras mayores a 0,42% ya que desmejoraban radicalmente la trabajabilidad de las mezclas de mortero. Estudios preliminares también han indicado que la presencia de fracciones de volumen de fibras mayores a 0,3% en el concreto causa serios problemas relacionados con la trabajabilidad y la homogeneidad de la mezcla incluso con el uso de aditivos superplastificantes [1]. Las proporciones de los materiales para cada mezcla se resumen en la Tabla III. Para la identificación de las mezclas, fueron introducidos los porcentajes de adición de fibras PET utilizadas: por ejemplo, 0 PET representa la mezcla de mortero de control sin adición de fibras; 133 PET representa la mezcla de mortero con adición de fibras 1,33 kg/m^3 ; 400 PET representa la mezcla de mortero con adición de fibras 4,0 kg/m^3 ; 533 PET representa la mezcla de mortero con adición de fibras 5,33 kg/m^3 .

TABLA III
PROPORCIONES DE LAS MEZCLAS DE MORTERO FABRICADAS.

Id.	Cemento (kg/m^3)	Agua (kg/m^3)	Agregado Fino (kg/m^3)	Fibra PET (kg/m^3)
0 PET	536,5	260,2	1475,4	0,00
133 PET	535,9	259,9	1473,8	1,33
266 PET	535,4	259,6	1472,2	2,66
400 PET	534,8	259,4	1470,7	4,00
533 PET	534,2	259,1	1469,1	5,33

En el proceso de fabricación de las mezclas de mortero, el cemento y el agregado fino fueron mezclados en una olla mezcladora durante un tiempo de cinco minutos. Sobre los materiales secos se agregó la cantidad correspondiente agua para continuar con el proceso de mezclado a una velocidad de 240 rpm durante otros cinco minutos. A continuación las fibras PET fueron adicionadas a las mezclas de mortero a una tasa constante de 1,7 kg/min y el tiempo de mezclado fue de 5 minutos adicionales para todas las dosificaciones de fibra utilizadas, lo que cumple con las recomendaciones de mezclado para concreto con fibras de acero; es decir, tasa máxima de adición de fibras de 60 kg/min y tiempo mínimo de mezclado de 5 minutos, en orden de evitar aglomeración de fibras en la bachada y lograr una adecuada distribución de las mismas [15]. Cada mezcla de mortero en estado fresco fue vertida en moldes,

apisonada y compactada siguiendo los procedimientos descritos en el estándar ASTM C109-16 [14]. Los especímenes se desmoldaron luego de 24 horas de su fabricación y a continuación fueron curados en un régimen de curado bajo inmersión en agua con cal hasta el día del ensayo, con el fin de garantizar el desarrollo de las resistencias mecánicas.

C. Procedimientos experimentales

Se llevaron a cabo ensayos de caracterización de las propiedades de los morteros fabricados. Estos ensayos se realizaron con el objeto de determinar el efecto de las adiciones de fibras PET sobre las propiedades del mortero, es decir, modificación de su resistencia mecánica y propiedades físicas. Los ensayos realizados fueron: resistencia a la compresión uniaxial (f'_c), módulo de elasticidad (E), porosidad abierta (Φ), densidad volumétrica "bulk" (ρ_b) y absorción al agua (Abs). La descripción y cantidad de los ensayos se muestra en la Tabla IV.

TABLA IV
DESCRIPCIÓN Y CANTIDAD DE ENSAYOS REALIZADOS.

Id.	f'_c	E	Φ	ρ_b	Abs	Total
0 PET	3	3	3	3	3	
133 PET	3	3	3	3	3	
266 PET	3	3	3	3	3	75
400 PET	3	3	3	3	3	
533 PET	3	3	3	3	3	

1) Resistencia a compresión

La resistencia a compresión de los especímenes de mortero se determinó a partir de cubos con dimensiones de $5 \times 5 \times 5$ cm, a la edad de 28 días, siguiendo el procedimiento del estándar ASTM C109-16 [14]. La carga se aplicó utilizando una prensa hidráulica controlada por un sistema automatizado y la velocidad de aplicación de carga fue de 0,25 MPa/s. Para una adecuada aplicación de la carga sin excentricidades, se contempló la utilización de discos metálicos.

2) Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad secante o módulo de Young, fue determinado a partir de especímenes cilíndricos de mortero con dimensiones de 10×20 cm con el procedimiento de la norma ASTM C469-14 [16]. En este ensayo se utilizó un dispositivo compresómetro que está constituido por dos anillos articulados por pivotes para mantener las distancias entre cada anillo. Un transductor de desplazamiento se acoplaba al dispositivo y se encargaba de registrar los cambios en la longitud (desplazamiento longitudinal) del espécimen cuando se sometía a esfuerzos de compresión mediante una fuerza axial. La carga fue aplicada por una prensa hidráulica controlada por un sistema automatizado, y fue aplicada a una velocidad de 0,25 MPa/s. Para determinar el módulo de elasticidad, se aplicó una carga equivalente al 40% de la resistencia máxima en compresión.

3) Porosidad abierta, densidad volumétrica y absorción al agua

La porosidad abierta y la densidad volumétrica “bulk” se calcularon mediante el método del desplazamiento de agua en discos con dimensiones 10 cm de diámetro y 5 cm de espesor (extraídos de cilindros de mortero previamente fabricados) para cada mezcla de mortero, siguiendo las recomendaciones del estándar ASTM C642-13 [17]. Para discos de cada bachada de mortero, fueron caracterizados parámetros de masa seca, masa saturada después de la inmersión, masa saturada después de la ebullición y masa aparente inmersa hasta lograr una estabilidad en las mediciones. En la determinación de las masas fueron empleados procedimientos que comprendieron: secado al horno de los morteros a $110 \pm 5^\circ\text{C}$ durante 24 horas, inmersión en agua durante un periodo de 48 horas, calentamiento en agua hasta el punto de ebullición por un periodo de 5 horas y suspensión al aire de los especímenes. Como resultado, fueron calculadas las propiedades de porosidad abierta, densidad volumétrica aparente y absorción al agua para cada tipo de mortero, y una comparación de sus valores fue realizada.

Para evaluar la confiabilidad de los resultados obtenidos en la experimentación, se utilizaron parámetros estadísticos tales como la media aritmética (X), desviación estándar (σ) y el coeficiente de variación (CV), los cuales determinan el promedio y la dispersión de los resultados medidos, respectivamente. Adicionalmente se utilizó el coeficiente de correlación (R^2) el cual permitió medir el grado de intensidad de relación entre los valores medidos y los calculados mediante las ecuaciones propuestas en este estudio.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presentan los resultados de los ensayos realizados sobre los especímenes de mortero fabricados. A partir de los resultados obtenidos se examinaron las tendencias correspondientes y se formularon ecuaciones de predicción del comportamiento de los morteros como función de la dosificación de fibras utilizada. Para lograr un mejor entendimiento sobre la influencia de las fibras PET en el desempeño de los morteros, los resultados de este estudio se comparan con modelos e investigaciones similares.

A. Resistencia a compresión

Los resultados de los ensayos de resistencia a compresión, f_c , sobre los especímenes cúbicos para cada mezcla de mortero a edad de 28 días se muestran en la Tabla V y las tendencias obtenidas se esquematizan en la Fig. 4.

Como se observa en la Tabla V y en la Fig. 4, el incremento en la dosificación de fibras PET provoca una reducción gradual de la resistencia a compresión de los morteros de hasta 17% comparación con el mortero de control 0 PET: cuando dosificaciones de fibra 1,33, 2,66, 4,0 y 5,33 kg/m^3 fueron adicionadas al mortero de control, reducciones en la resistencia a compresión de 2%, 1%, 7% y 17% fueron obtenidas.

TABLA V
RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN.

Especímen	0 PET	133 PET	266 PET	400 PET	533 PET
1	26,49	27,11	26,49	23,21	21,82
2	27,17	26,48	26,83	27,11	23,49
3	26,59	25,26	26,23	24,32	21,45
X , MPa	26,75	26,28	26,52	24,88	22,25
CV , %	1,1	2,9	0,9	6,6	4,0

Esta reducción gradual de la resistencia a compresión de los morteros puede ser debida al incremento del contenido de aire de la mezcla en estado fresco por una mayor inclusión de fibras PET. Como consecuencia se puede generar una reducción en la trabajabilidad de las mezclas y un incremento en el tamaño de poros de los morteros en estado endurecido. Al incremento del tamaño de poros de los morteros por el incremento del contenido de aire se atribuyen las reducciones de resistencia a compresión de los morteros por la inclusión de un mayor contenido de fibras PET.

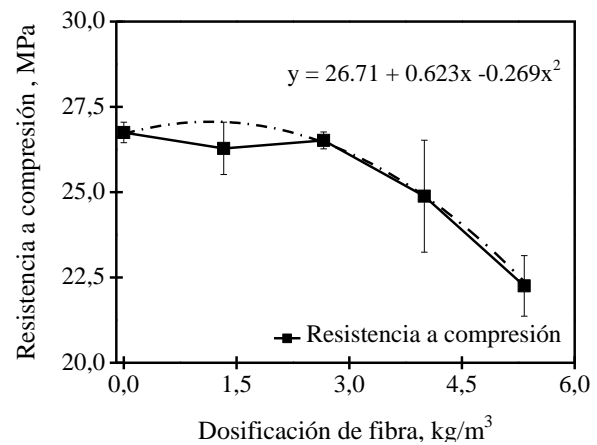


Fig. 4. Tendencias de resistencia a compresión para los morteros fabricados.

Estudios realizados por Naaman et al. [18], Schembri [19], Pereira de Oliveira y Castro-Gomes [20] sobre morteros y concretos no evidenciaron mejoramiento de la resistencia a compresión con adición de fibras PET. Pelisser et al. [21] reportaron un estudio experimental del concreto reforzado con fibras recicladas PET y caracterizaciones mecánicas y físicas del concreto tales como resistencia a compresión, módulo elástico y porosimetría por intrusión de mercurio fueron desarrolladas. Como resultado ningún efecto significativo de la adición de fibras PET en la resistencia a compresión del concreto fue observado. Kim, S. et al. [8] evaluaron el desempeño estructural del concreto reforzado con fibras recicladas PET y sus resultados indicaron que la resistencia a compresión del concreto disminuía hasta 9% en la medida que el contenido de fibras incrementaba hasta 1%. Asimismo, Silva et al. [5] y Soroushian et al. [22] indicaron que la adición de fibras sintéticas no incrementa la resistencia a compresión a concretos y morteros. Borg et al. [23] observaron una reducción de la resistencia a compresión del concreto variando de 0,5% a 8,5% por la adición de fibras recicladas PET lisas y corrugadas.

Borg et al. [23] encontraron que el incremento en la fracción de volumen de las fibras PET genera una reducción de la resistencia a compresión del concreto (debido a un efecto de alteración estérica) que incrementa con una mayor dosificación de fibras adicionadas por lo que Borg et al. [23] afirman que la adición de fibras PET no tienen un efecto benéfico en la resistencia a compresión del concreto.

Algunos autores observaron ligeros incrementos en la resistencia a compresión del concreto por la inclusión de fibras PET [24,25]. Ochi et al. [6] reportaron un moderado incremento en la resistencia a compresión (de 6% a 13%) para fracciones de volumen de hasta 1% adicionadas al concreto: Ochi et al. [6] observaron que fracciones de volumen de fibras PET mayores a 1% adicionadas al concreto disminuyen la resistencia a compresión.

Ha sido establecido que la incorporación de fracciones de volumen de fibras sintéticas bajas (0,05% a 0,5%), como las utilizadas en este estudio, no provocan incremento en la resistencia mecánica del concreto; sin embargo, estos bajos contenidos de fibras son capaces de fortalecer las propiedades de fisuración la tenacidad y la resistencia al impacto del concreto [26]. Los resultados de Silva et al. [5], Kim, S. et al. [8], Naaman et al. [18], Schembri [19], Pelisser et al. [21], Soroushian et al. [22] y Borg et al. [23] coinciden con los resultados del presente estudio.

B. Módulo de elasticidad

Los resultados de los ensayos de módulo de elasticidad, E , sobre especímenes cilíndricos para cada mezcla de mortero a la edad de 28 días se muestran en la Tabla VI y las tendencias obtenidas se esquematizan en la Fig. 5.

TABLA VI
RESULTADOS DE ENSAYOS DE MÓDULO DE ELASTICIDAD PARA MORTEROS.

Especimen	0 PET	133 PET	266 PET	400 PET	533 PET
1	24787	23969	23938	21609	25132
2	25131	24787	24652	23423	21969
3	25257	24107	23567	22987	21456
X, MPa	25058	24288	24052	22673	22582
CV, %	0,8	1,5	1,9	3,4	7,1

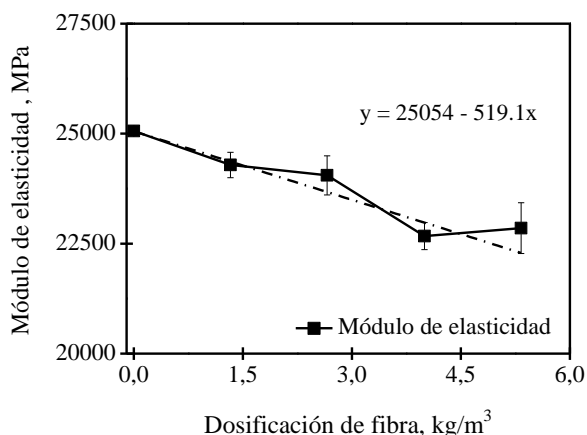


Fig. 5. Tendencias obtenidas en módulo de elasticidad para los morteros.

De acuerdo con los resultados de módulo de elasticidad de los morteros adicionados con fibras PET presentados en la Tabla VI y en la Fig. 5, se observó que en la medida que se incrementaba la dosificación de fibras PET se generaban ligeras reducciones del módulo de elasticidad de hasta 10% de los morteros cementantes. En particular, la inclusión de dosificaciones de fibra 1,33, 2,66, 4,0, y 5,33 kg/m³ generó respectivamente reducciones de 3%, 4%, 10% y 10% en el módulo elástico de los morteros. La tendencia de reducción del módulo elástico de los morteros por el incremento en la dosificación de fibras PET coincide con la tendencia de reducción observada de la resistencia a compresión. De hecho es bien sabido que todas las propiedades del concreto están relacionadas de alguna manera con la resistencia a compresión [27]. En este sentido, la reducción del módulo elástico de los morteros adicionados con fibras PET puede ser asimismo atribuible al incremento del contenido de aire de los morteros que provoca un incremento del tamaño de poros de los especímenes en estado endurecido. Como consecuencia la reducción ligera en la capacidad de deformación longitudinal de los morteros fue observada. Silva et al. [5] indicaron que la adición de fibras PET no tiene influencia significativa en el módulo elástico de morteros de cemento. Pelisser et al. [21] evidenciaron que el módulo elástico del concreto disminuía en la medida que la fracción de volumen de fibras PET incrementaba. Ochi et al. [6] y Kim, S. et al. [8] evaluaron el desempeño estructural del concreto reforzado con fibras PET recicladas y sus resultados indicaron que el módulo elástico del concreto disminuía hasta 9% en la medida que el contenido de fibras incrementaba. Los resultados de Ochi et al. [6], Kim, S. et al. [8] y Pelisser et al. [21] coinciden con los resultados del presente estudio.

Posibles razones para la reducción del módulo de elasticidad de los materiales cementantes adicionados con fibras de plástico también pueden ser los defectos internos de estos materiales, tales como baja adherencia entre las fibras plásticas y la matriz cementante, o las fisuras alrededor de las fibras plásticas, debido a la diferencia entre el módulo de elasticidad de las fibras y el módulo de elasticidad de la pasta cementante [28,29]. La ausencia de productos de hidratación del cemento en la interface pasta – fibras plásticas también se debe considerar para la reducción en la resistencia a compresión y el módulo elástico [30]. Otros estudios concluyen que la reducción de la resistencia a compresión y del módulo elástico de los materiales cementantes se debe al bajo módulo elástico de las partículas PET (módulo de elasticidad en el orden de 2900 MPa) [31], y que la reducción en el módulo de elasticidad de los compuestos cementantes está relacionada con el incremento de la dosificación de partículas PET [32,33]. Lo anterior se atribuye a la alta capacidad deformable de las partículas o fibras PET que disminuye la capacidad de carga y la rigidez axial del compuesto cementante. En consecuencia, se disminuye la resistencia a compresión y el módulo de elasticidad por el incremento en la dosificación de fibras PET para los morteros que se evaluaron en este estudio.

C. Porosidad abierta y densidad volumétrica

Los resultados de los ensayos de porosidad abierta, Φ , y densidad volumétrica (bulk), ρ_b , sobre especímenes de cada mezcla de mortero medidos a la edad de 28 días se muestran en las Tablas 7 y 8, y sus tendencias se esquematizan en Fig. 6 y 7 respectivamente.

TABLA VII
RESULTADOS DE POROSIDAD ABIERTA DE LOS MORTEROS.

Especímen	0 PET	133 PET	266 PET	400 PET	533 PET
1	14,01	12,86	12,81	12,67	12,15
2	17,01	12,15	12,87	12,81	12,68
3	16,99	12,27	12,50	12,22	12,01
X, %	16,00	12,43	12,73	12,57	12,28
CV, %	8,8	2,5	1,3	2,0	2,3

Los resultados de la Tabla VII y Fig. 6 indican que por la inclusión de dosificaciones de fibra 1,33%, 2,66%, 4,0% y 5,33% se generan reducciones de 22%, 20%, 21% y 23% en la porosidad abierta de los morteros. De acuerdo con los resultados se evidenció que ligeras inclusiones en la dosificación de fibras (0,5 wt.%) generan una reducción de la porosidad o volumen (cantidad) de poros permeables de los morteros cementantes. Sin embargo, dosificaciones de fibra mayores a 0,5 wt.% no tienen efecto en reducir marginalmente la porosidad de los morteros como se observa en la Fig. 5: la porosidad de los morteros con la dosificación de fibras 5,33 kg/m³ ($\Phi=12,28\%$) es similar a la porosidad de los morteros con la dosificación de fibras 1,33 kg/m³ ($\Phi=12,43\%$). La reducción en la porosidad abierta de los morteros por la inclusión de fibras PET puede deberse al efecto de “puenteo” que aportan las fibras interrumpiendo las fisuras y las porosidades de la matriz cementicia y reduciendo el volumen (cantidad) de los poros permeables de los morteros. Pereira de Oliveira y Castro-Gomes [20] afirman que la adición de fibras PET modifican la porosidad del mortero reduciendo el número de poros capilares especialmente alrededor de la zona de transición interfacial entre las fibras y la matriz cementante.

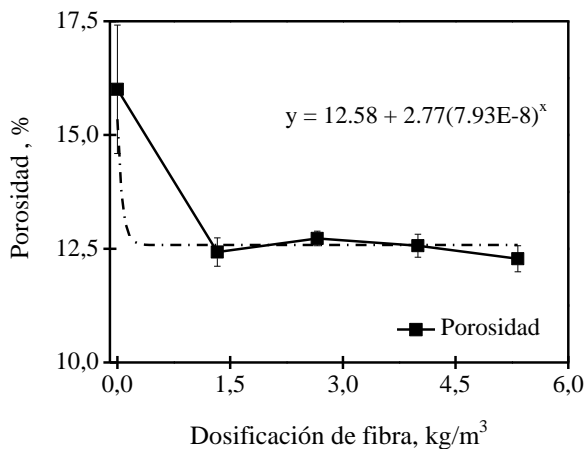


Fig. 6. Tendencias obtenidas en porosidad abierta para los morteros.

Con base en los resultados de porosidad abierta de este estudio, y como también fue argumentado en las Secciones B y C de este documento, la inclusión de fibras PET parece

disminuir la cantidad o volumen de poros permeables en la matriz cementante, pero asimismo incrementa el tamaño de los poros remanentes. Para las propiedades de resistencia a compresión y módulo elástico de los morteros cementantes, parece gobernar más el efecto de incremento del tamaño de los poros que el efecto de reducción de la cantidad de poros. En consecuencia, las propiedades de resistencia a compresión y módulo elástico de los morteros son moderadamente reducidas.

TABLA VIII
RESULTADOS DE DENSIDAD VOLUMÉTRICA APARENTE PARA LOS MORTEROS.

Especímen	0 PET	133 PET	266 PET	400 PET	533 PET
1	24,07	23,33	23,17	23,05	22,87
2	25,35	23,45	23,18	22,97	22,70
3	24,25	23,71	23,02	23,10	22,99
X, kN/m³	24,56	23,50	23,12	23,04	22,85
CV, %	2,3	0,7	0,3	0,2	0,5

En cuanto al efecto de las fibras PET sobre la propiedad de densidad volumétrica para los morteros fabricados en este estudio, como se muestra en la Tabla VIII y en la Fig. 7, el incremento en la dosificación de fibras PET disminuye ligeramente la densidad volumétrica o peso específico de los morteros. En este sentido, utilizar dosificaciones de fibras PET de 1,33, 2,66, 4,0 y 5,66 kg/m³ genera reducciones en la densidad volumétrica de los morteros de 4%, 6%, 6%, y 7% respectivamente. Fue reportado que la adición de fibras PET no afectó significativamente de gravedad específica o densidad del concreto [1], lo cual coincide con los resultados del presente estudio para las dosificaciones de fibras estudiadas. Por su parte, Pereira de Oliveira y Castro-Gomes [20] investigaron el reforzamiento de morteros de cemento con fibras PET y encontraron que la adición continua de esas fibras en hasta una fracción de volumen de 1,5% ocasiona ligeras reducciones de la densidad volumétrica del mortero que no exceden un umbral del 5%. Por lo tanto, Pereira de Oliveira y Castro-Gomes [20] afirman que la incorporación de fibras PET al mortero no cambia significativamente la densidad de morteros.

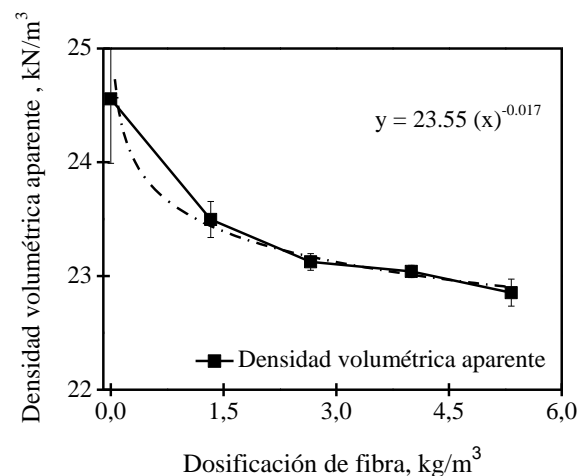


Fig. 7. Tendencias obtenidas en densidad volumétrica para los morteros.

La reducción en la densidad volumétrica de los morteros de este estudio se debe a que, para un mayor contenido de fibras PET incluidas con una baja densidad (1260 kg/m³, ver Tabla

II), se requiere el ajuste (reducción) de las proporciones del diseño de la mezcla reduciendo en partes iguales el peso de los componentes pasta y agregados para garantizar un volumen constante de un metro cúbico de mezcla. Como consecuencia, un mayor contenido de fibras PET, por su baja densidad, incrementa ligeramente el peso de los morteros. Sin embargo, el efecto de ajuste en las proporciones de los demás componentes de la mezcla, con una mayor densidad, gobiernan la modificación del peso de los morteros, en consecuencia, disminuyendo la densidad volumétrica de los mismos. La reducción de la densidad volumétrica de los morteros con adición de fibras PET representa una ventaja importante para la conformación de estructuras portantes y no portantes por causa de un aligeramiento en su propio peso. Esta disminución podría conducir a menores demandas sísmicas en sistemas de construcción basados en ese tipo de materiales. De igual forma, Akçaözoglu et al. [4] adicionaron tereftalato de polietileno triturado reemplazo del agregado fino convencional y observaron una reducción en el peso de los elementos de mortero fabricados. Akçaözoglu et al. [4] afirman que morteros y concretos con adición de PET triturado como agregado fino permiten la fabricación estructuras de peso ligero debido al bajo peso específico de estos materiales. También Akçaözoglu et al. [4] afirman que materiales cementantes adicionados con PET triturado como agregado fino contribuyen a reducir el riesgo sísmico de una estructura construida con estos materiales debido a que las fuerzas sísmicas actuantes en edificaciones dependen de la carga muerta de los elementos. Los resultados de Akçaözoglu et al. [4] coinciden con los resultados del presente estudio. Por otro lado, Ganjian et al. [34] reportaron una reducción en la densidad y en el módulo de elasticidad del concreto por la adición de fibras de caucho, cuyos resultados coinciden con los resultados del presente estudio, esto es, por la adición de fibras PET a morteros se genera reducciones en las propiedades de densidad volumétrica y módulo elástico de los mismos.

D. Absorción al agua

Los resultados para los ensayos de absorción al agua de los morteros a la edad de 28 días, *Abs*, sobre los especímenes de cada mezcla de mortero, se relacionan en la Tabla IX, y sus tendencias se esquematizan en la Fig. 8.

TABLA IX
RESULTADOS DE ABSORCIÓN AL AGUA DE LOS MORTEROS.

Especímen	0 PET	133 PET	266 PET	400 PET	533 PET
1	8,35	6,81	6,25	6,22	6,12
2	8,36	5,82	6,25	6,26	6,23
3	8,37	6,45	6,36	6,27	6,15
X, %	8,36	6,36	6,29	6,25	6,17
CV, %	0,1	6,5	0,8	0,3	0,7

Como es observado en la Tabla IX y Fig. 8, la capacidad de absorción al agua de los morteros cementantes disminuye de forma exponencial por el incremento de la adición de fibras PET al mortero. La inclusión de las dosificaciones de fibras 1,33, 2,66, 4,0, y 5,33 kg/m³ provoca reducciones de 24%, 25%,

25% y 26% respectivamente en la capacidad de absorción al agua de los morteros con respecto al mortero de control. Fue reportado que la adición de fibras PET no afectó significativamente la propiedad de absorción al agua del concreto [1,20]. Sin embargo, en el presente estudio se observó una reducción moderada de hasta 26% en la propiedad de absorción al agua de morteros por la utilización de fibras PET como reforzamiento. La reducción en la absorción al agua de los morteros por el incremento de las fibras PET coincide con la reducción de su porosidad: la reducción en la absorción al agua de los morteros es una consecuencia de la reducción de la porosidad abierta o cantidad de poros permeables en el mortero. En consecuencia, la reducción de la absorción al agua de los morteros puede ser también atribuible al efecto de “puenteo” de las fibras PET cruzando fisuras y porosidades de la matriz cementante permitiendo almacenar menores contenidos de agua en la microestructura de los morteros. De acuerdo con los resultados de reducción de la porosidad abierta y reducción de la absorción al agua obtenidos en este estudio, se evidencia que las fibras PET generan refinamiento de la matriz cementante de los morteros y proporcionan una resistencia adicional para el ingreso de agentes perjudiciales. Esto se traduce en un incremento de la durabilidad de los morteros por la inclusión de las fibras PET.

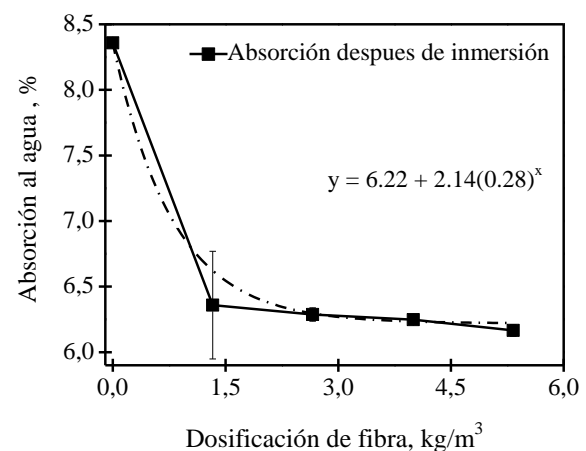


Fig. 8. Tendencias obtenidas en absorción al agua de los morteros.

Kim et al. [8] encontraron que una fracción de volumen de 0,5% de fibras PET incrementa la ductilidad y la tenacidad del concreto en flexión en hasta 10 veces y hasta 1,3 veces respectivamente, siendo esta la fracción de volumen más indicada para incrementar más el desempeño a flexión del concreto. En este estudio a pesar que la fracción de volumen de fibras PET de 0,42% (dosificación de fibra 5,33 kg/m³) disminuye las propiedades de resistencia a compresión y módulo elástico del mortero en hasta 17% y 10%, reducciones importantes de 22%, 7% y 26% en la porosidad, densidad volumétrica y absorción al agua respectivamente pudieron ser logradas lo que fortalece la durabilidad de los morteros cementantes debido a la inclusión de fibras PET como material de reforzamiento. Además, estudios preliminares también indicaron que la presencia de fracciones de volumen de fibras mayores a 0,3% en el concreto causa serios problemas

relacionados con la trabajabilidad y la homogeneidad de la mezcla incluso con el uso de aditivos superplastificantes [1].

A partir de las tendencias de los resultados medidos, en la Tabla X se proponen ecuaciones para la predicción de las propiedades de resistencia a compresión, módulo de elasticidad, porosidad abierta, densidad volumétrica y absorción al agua de morteros cementantes, en función de las dosificaciones de fibras adicionadas a los morteros. La dispersión de estos parámetros fue evaluada mediante el coeficiente de correlación R^2 , definido como un indicador de la intensidad de la relación lineal entre los valores calculados y los resultados experimentales. Con base en los valores R^2 obtenidos, se puede afirmar que los modelos de predicción propuestos son adecuados, ya que estos valores varían entre 0,40 y 0,99; es decir, son cercanos a 1. Lo anterior indica que existe una estrecha relación entre los parámetros observados y los calculados.

TABLA X
ECUACIONES PROPUESTAS PARA LA DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE MORTEROS CON ADICIÓN DE FIBRAS PET.

Propiedad	Ecuación Propuesta	Coefficiente de correlación
Resistencia a compresión, MPa	$f'c = f'c_{\text{mortero control}} + 0,623 (D_f) - 0,269 (D_f^2)$	$R^2 = 0,91$
Módulo de elasticidad, MPa	$E = E_{\text{mortero control}} - 519,1 (D_f)$	$R^2 = 0,95$
Porosidad, %	$\Phi = [26,75 / f'c_{\text{mortero control}}] [12,58 + 2,77 (7,93E-8)^{D_f}]$	$R^2 = 0,40$
Densidad volumétrica, kN/m^3	$\rho_b = [f'c_{\text{mortero control}} / 26,75] [23,55 (D_f)^{0,017}]$	$R^2 = 0,87$
Absorción al agua, %	$Abs = [26,75 / f'c_{\text{mortero control}}] [6,22 + 2,14 (0,28)^{D_f}]$	$R^2 = 0,99$

IV. CONCLUSIONES

En este artículo se llevaron a cabo ensayos de caracterización de las propiedades físicas y mecánicas de morteros de cemento adicionados con fibras lisas recicladas tipo PET de longitud 25 mm y diámetro 0,68 mm (relación de aspecto 36). Las fibras PET fueron adicionadas a los morteros en dosificaciones de 0 kg, 1,33 kg, 2,66 kg, 4,0 kg y 5,33 kg por metro cúbico de mezcla (kg/m^3). Los resultados del estudio permiten concluir lo siguiente:

El incremento en la dosificación de fibras PET provoca una reducción gradual de la resistencia a compresión de los morteros de hasta 17% comparación con el mortero de control 0 PET: esta reducción se generó cuando una dosificación de fibras PET de $5,33 kg/m^3$ fue adicionada al mortero de control. La reducción de la resistencia a compresión de los morteros puede ser atribuida al incremento del contenido de aire de la mezcla en estado fresco por una mayor inclusión de fibras PET. Como consecuencia se puede generar la reducción en la trabajabilidad de las mezclas y un incremento en el tamaño de poros de los especímenes en estado endurecido.

El módulo de elasticidad de los morteros disminuye en hasta 10% por la adición de fibras PET en dosificaciones de hasta $5,33 kg/m^3$. La tendencia de reducción del módulo elástico de los morteros por el incremento en la dosificación de fibras PET coincide con la tendencia de reducción observada de la resistencia a compresión. La reducción del módulo elástico de los morteros adicionados con fibras PET puede también ser atribuible al incremento del contenido de aire de los morteros por la baja trabajabilidad que provoca un incremento del tamaño de poros de los especímenes en estado endurecido. También el bajo módulo de elasticidad del tereftalato de polietileno genera una reducción en el módulo elástico de los morteros.

Las propiedades de porosidad abierta y densidad de los morteros disminuyen en hasta 22% y 7% respectivamente por la utilización de dosificación de fibras PET de hasta $5,33 kg/m^3$. La reducción en la porosidad abierta de los morteros por la inclusión de fibras PET podría ser atribuible al efecto de "punteo" que aportan estas fibras interrumpiendo las fisuras y las porosidades de la matriz cementicia reduciendo la cantidad de los poros permeables en la microestructura. La reducción de la densidad volumétrica de los morteros con adición de fibras PET representa una ventaja importante para la fabricación de estructuras portantes y no portantes por causa de un aligeramiento en su propio peso conducente a menores demandas sísmicas en sistemas de construcción basados en estos materiales.

La capacidad de absorción al agua de los morteros cementantes disminuye con la inclusión de fibras PET. Dosificaciones de fibras PET de hasta $5,33 kg/m^3$ reducen la capacidad de absorción al agua de los morteros en hasta 26%. La reducción en la absorción al agua de los morteros por el incremento de las fibras PET coincide con la reducción de su porosidad. De acuerdo con la reducción de la porosidad y la reducción de la absorción al agua, se evidencia que las fibras PET generan refinamiento de la matriz cementante y proporcionan resistencia adicional para el ingreso de los agentes perjudiciales al mortero. Esto se traduce en un incremento de la durabilidad de los morteros por la inclusión de las fibras PET.

A partir de las tendencias de los resultados experimentales, en este estudio se han propuesto ecuaciones que permiten describir el efecto de las fibras PET en diferentes dosificaciones sobre las propiedades de resistencia a compresión, módulo de elasticidad, porosidad, densidad volumétrica y absorción al agua de morteros de cemento de resistencia normal. Las ecuaciones propuestas aplican para morteros con relación agua/cemento de 0,485, resistencias a compresión entre 20 MPa y 28 MPa, adiciones de fibras PET lisas en hasta $5,5 kg/m^3$ con longitud 25 mm y diámetro 0,68 mm (relación de aspecto 36).

Finalmente, se destaca el mejoramiento en las propiedades físicas del mortero por la adición de fibras PET, no obstante, la ligera reducción en las propiedades mecánicas, lo cual contribuye a mejorar la estabilidad en volumen y la durabilidad de estos compuestos basados en cemento por la utilización de fibras PET recicladas como material de reforzamiento. Se recomiendan estudios futuros sobre la degradación de las fibras

PET en el medio alcalino de la matriz cementante, así como estudios de durabilidad de la resistencia al ion cloruro y la resistencia a la carbonatación de morteros y concretos reforzados con fibras PET.

AGRADECIMIENTOS

Al Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería - Universidad Católica de Colombia por el financiamiento del proyecto "Evaluación del coeficiente de migración del ion cloruro en concretos de diferentes características" adscrito a la Convocatoria Interna de Proyectos del año 2019.

REFERENCIAS

- [1] American Concrete Institute, ACI 544.1R-96, Detroit, MI, 1996.
- [2] A. E. Naaman, "Fiber reinforcement for concrete" *Concrete International: Design and Construction*, vol. 7, n° 3, pp. 21-25, 1985.
- [3] A. Badache, A. Benosman, Y. Senhadji y M. Mouli, "Thermophysical and mechanical characteristics of sand-based lightweight composite mortars with recycled high-density polyethylene (HDPE)," *Construction and Building Materials*, vol. 163, p. 40-52, 2018. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.069
- [4] S. Akcaozoglu, C. Atis y K. Akcaozoglu, "An investigation on the use of shredded waste PET bottles as aggregate in lightweight concrete," *Waste Management*, pp. 285 - 290, 2010. DOI: 10.1016/j.wasman.2009.09.033
- [5] D. Silva, A. Bettioli, P. Gleize, H. Roman, L. Gomez y J. Ribeiro, "Degradation of recycled PET fibers in Portland cement-based materials" *Cement and Concrete Research*, vol. 35, p. 1741-1746, 2005. DOI: 10.1016/j.cemconres.2004.10.040
- [6] T. Ochi, S. Okubo y K. Fukui, "Development of recycled PET fiber and its application as concrete-reinforcing fiber" *Cement and Concrete Composites*, vol. 29, p. 448-455, 2007. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2007.02.002
- [7] B. Al-Tulaian, M. Al-Shannag y A. Al-Hozaimy, "Recycled plastic waste fibers for reinforcing Portland cement mortar" *Construction and Building Materials*, vol. 127, p. 102-110, 2016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.09.131
- [8] S. Kim, N. Yi, H. Kim, J. Kim y Y. Song, "Material and structural performance evaluation of recycled PET fiber reinforced concrete," *Cement and Concrete Composites*, vol. 32, p. 232-240, 2010. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2009.11.002
- [9] Y. Wang, H. Wu y V. Li, "Concrete reinforcement with recycled fibers," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 12, n° 4, p. 314-319, 2000. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2000)12:4(314)
- [10] American Society of Testing and Materials (ASTM), ASTM C-1157M, vol. 4, Philadelphia, 2017.
- [11] American Society of Testing and Materials (ASTM), ASTM C-33M, vol. 4, Philadelphia, 2018.
- [12] Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), Reglamento colombiano de construcción sismo-resistente, 2010, p. 1536.
- [13] D. Sánchez de Guzmán, Tecnología del concreto y del mortero. 5ta ed., Bogotá D.C: Bhandar Editores, 2001.
- [14] American Society of Testing and Materials (ASTM), ASTM C-109M, vol. 4, Philadelphia, 2016.
- [15] Bekaert S.A., Product Data Sheet Dramix RC-65/35-BN, Zwevegum, 2005.
- [16] American Society of Testing and Materials (ASTM), ASTM C 469, vol. 4, Philadelphia (EE.UU.), 2014.
- [17] American Society of Testing and Materials (ASTM), ASTM C 642, vol. 4, Philadelphia, 2013.
- [18] A. Naaman, S. Garcia, M. Korkmaz y V. Li, "Investigation of the use of carpet waste PP fibers in concrete" Fourth Materials Engineering Conference, Washington, D.C., 1996.
- [19] J. Schembri, "Recycled Polyethylene Terephthalate Fibres in Concrete" University of Malta, 2011.
- [20] L. de Oliveira y J. Castro-Gomes, "Physical and mechanical behaviour of recycled PET fibre reinforced mortar" *Construction and Building Materials*, vol. 25, p. 1712-1717, 2011. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.11.044
- [21] F. Pelisser, O. Montedo, P. Gleize y H. Roman, "Mechanical properties of recycled PET fibers in concrete" *Materials Research*, vol. 15, p. 679-686, 2012. DOI: 10.1590/S1516-14392012005000088
- [22] P. Soroushian, A. Khan y J. Hsu, "Mechanical properties of concrete materials reinforced with polypropylene or polyethylene fibers" *ACI Material Journal*, vol. 89, n° 6, pp. 535-540, 1992.
- [23] R. Borg, O. Baldacchino y L. Ferrara, "Early age performance and mechanical characteristics of recycled PET fibre reinforced concrete" *Construction and Building Materials*, vol. 108, p. 29-47, 2016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.01.029
- [24] F. Fraternali, V. Ciancia, R. Chechile, G. Rizzano, L. Feo y L. Incarnato, "Experimental study of the thermo-mechanical properties of recycled PET fiber-reinforced concrete" *Composite Structures*, vol. 93, pp. 2368-2374, 2011. DOI: 10.1016/j.compstruct.2011.03.025
- [25] V. Malagaveli, N.R. Paturu. "Strength characteristics of concrete using solid waste an experimental investigation" *International Journal of Earth Sciences*, vol. 4, p. 937-940, 2011.
- [26] B. Massicotte, y B. Bischoff, "Fibre Reinforced Concretes: A Structural Perspective" Proceedings of the Fifth International RILEM Symposium - BEFIB 2000, Lyon, France, 2000.
- [27] J. Waddell y J. Dobrowolski, Concrete Construction Handbook. 3rd Ed, McGraw-Hill, 2002.
- [28] C. Albano, N. Camacho, M. Hernandez, A. Matheus y A. Gutierrez, "Influence of content and particle size of PET waste bottles on concrete behaviour at different w/c ratios" *Waste Management*, vol. 29, p. 2707-2716, 2009. DOI: 10.1016/j.wasman.2009.05.007
- [29] N. Segre y I. Joekes, "Use of tyre rubber particles as addition to cement paste" *Cement and Concrete Research*, vol. 30, p. 1421-1425, 2000. DOI: 10.1016/S0008-8846(00)00373-2
- [30] A. Bentur y I. Older, "Development and nature of interfacial microstructure" de Interfacial Transition Zone in Concrete, London, 1996.
- [31] D. Van Krevelen, Properties of Polymers, Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 1990.
- [32] E. Rahmani, M. Dehestani, M. Beygi, H. Allahyari y I. Nikbin, "On the mechanical properties of concrete containing waste PET particles" *Construction and Building Materials*, vol. 47, p. 1302-1308, 2013. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.06.041
- [33] A. Benosman, H. Taïbi, Y. Senhadji, M. Mouli, M. Belbachir y M. Bahlouli, "Plastic waste particles in mortar composites: sulfate resistance and thermal coefficients" *Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology*, vol. 33, n° 3, pp. 171-202, 2017. DOI: 10.1177/147776061703300304
- [34] E. Ganjian, M. Khorami y A. Maghsoudi, "Scrap tyre rubber replacement for aggregate and filler in concrete" *Construction and Building Materials*, vol. 23, p. 1828-1836, 2009. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2008.09.020



Jhon Cárdenas-Pulido received the degree of Civil Engineering in 2013 from the Universidad Militar Nueva Granada, UMNG, Colombia, and Master in Civil Engineering (area of structures and earthquakes) in 2017 from the Universidad de los Andes, Colombia. He is currently professor and researcher in the Faculty of Engineering at Universidad Católica de Colombia.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4698-4896>
 CvLAC: https://scienti.minciencias.gov.co/cvllac/visualizador/gerarCurriculoCv.do?cod_rh=0001554523

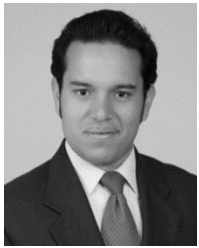


Said Rodríguez Loaiza received the degree of Civil Engineering in 2005 from Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, and Master in Structural Engineering in 2015 from Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. He is currently professor and researcher in the Faculty of Engineering at Universidad

Catolica de Colombia.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6246-6645>

CvLAC: http://scienti.colciencias.gov.co:8081/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0001424763



Camilo Higuera Flórez received the degree of Civil Engineering in 2012 from Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, and Master in Structural Engineering in 2017 from Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. He is currently professor and researcher in the Faculty of Engineering at Universidad

Catolica de Colombia.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1952-7983>

CvLAC: https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0001547642