

Empleo de residuos de botellas de polietileno de tereftalato triturados en forma de escama como adición en la fabricación del hormigón*

Joaquín Raúl Cuetara Ricardo

jrcuetara@ceinpet.cupet.cu

Especialidad: Ingeniería Civil

Universidad Tecnológica de La Habana CUJAE (Cuba).

Resumen: Se analizó cómo influye la adición de fragmentos de plástico de polietileno de tereftalato cortados de forma manual en algunas propiedades del hormigón. Para ello se fabricaron hormigones con diferentes porcentajes de adición y se evaluó el desempeño de estos a partir de los ensayos no destructivos (velocidad de pulso ultrasónico y resistividad eléctrica) y ensayos destructivos (resistencia a la compresión y porosidad total). Para el análisis de los resultados se empleó un diseño factorial completamente al azar. En el diseño del programa experimental se concibió la determinación de la resistencia a la compresión a los 7 y 28 días, y el ensayo de porosidad total a los 28 días. Los ensayos no destructivos se concibieron a la edad de 3; 7; 14 y 28 días. El estudio arroja que la adición de hasta 1 % de polietileno de tereftalato durante la fabricación de hormigones no influye en la calidad de estos, en cuanto a su resistencia a la compresión y porosidad.

Palabras clave: Reciclaje; polietileno de tereftalato; polietileno de tereftalato; resistencia a la compresión; porosidad total.

* Recibido: 16 febrero 2018/ Aceptado 18 noviembre 2018.

Use of crushed terephthalate polyethylene bottle waste as an addition in manufacturing concrete

Abstract: The influence of the addition of manually cut terephthalate polyethylene plastic fragments on some concrete properties was analyzed. For this purpose, concretes with different percentages of addition are manufactured and its performance was evaluated from the non-destructive tests (ultrasonic pulse rate and electrical resistivity) and destructive tests (compressive strength and total porosity). For the analysis of the results were using a completely randomized factorial design. On designing the experimental program, the resistance to compression determination was developed between 7 and 28 days, and the total porosity test was conceived at 28 days. Non-destructive tests, electrical resistivity, and ultrasonic pulse velocity, were conceived at the age of 3; 7; 14 and 28 days. The study showed that the addition of up to 1% polyethylene terephthalate during the manufacture of concrete does not influence on its quality, in terms of resistance to compression and porosity.

Key words: Recycling; terephthalate polyethylene; resistance to compression; total porosity.

Introducción

El impacto de los desechos al medio ambiente ha sido tanto que los moradores del planeta llaman contaminación a cualquier manifestación de objetos arrojados a los vertederos, caminos y calles. Hoy día no hay lugar por donde no se vean objetos multicolores, livianos, de múltiples formas y tamaños, regados por doquier, colgando de árboles y hasta dispersos en el aire. Son los “plásticos” los advenedizos, objetos moldeables.

Según Perdomo (2002) la idea de la macromolécula no fue aceptada por la mayoría de los que trabajaban en el tema a principios del siglo XX. Ya entrados los años 20, un gran científico: Hermann Staudinger, laureado luego con el premio Nobel en 1953 por sus trabajos, logró que muchos otros colegas entendieran la idea de que existían compuestos macromoleculares que no eran agregados moleculares ni coloides. Al darse este paso el mundo de la ciencia pudo entonces abrir un área con nombre propio, con sus leyes y principios y, gracias a los descubrimientos del momento, ya se podía hablar de macromoléculas de origen natural y sintético.

Los envases de plásticos, en especial el polietileno de tereftalato (PET), son los menos sostenibles y, una vez que se le haya dado el uso apropiado, son tirados a los vertederos o a los océanos donde perdurarán entre 500 y 1 000 años (Rahmania *et al.*, 2013). Las bacterias no conocen estos materiales y, por lo tanto, no los digieren. Son muy jóvenes y no se han construido programadamente, es por ello la acumulación de estos residuos en los vertederos y océanos.

Aguilera y Jodar (2017) comentan que hasta la fecha se han generado 8 300 millones de toneladas de plásticos, lo que equivale a 822 mil torres Eiffel u 80 millones de ballenas azules. Cada año acaban en los océanos aproximadamente ocho millones de toneladas de plástico y se estima que para el año 2050 el peso de estos en los océanos supere el de los peces. Sumado a ello, investigadores de la Universidad de Alicante encontraron que pueden existir entre 60 y 280 micropartículas de plástico por kilogramo de sal, siendo el PET el compuesto más frecuente para un 83,3 % de presencia (Miller, 2017).

Situación actual del reciclaje y sus beneficios ambientales y económicos

Se han propuesto y desarrollado proyectos con excelentes resultados a escala internacional. En los países más desarrollados se practica lo que se conoce como "Recuperación de Energía", donde a partir de procesos tecnológicos termales (gasificación, pirólisis y depolimerización termal) y no termales (digestión anaerobia, fermentación y tratamiento biológico mecánico) se obtiene gas, metanol, ácido láctico, entre otros (Book, 2010). En este aspecto, los principales exponentes son los países europeos (Gu & Ozbakkaloglu, 2016) y, ciudades como San Francisco, con su proyecto "Cero Residuos" donde se ha evitado llevar a los vertederos el 80 % de la basura (Korosec, 2013) y se ha prohibido la venta de botellas de agua de PET (Muñoz, 2016).

A nivel nacional se han tomado medidas y se han propuesto proyectos para reducir la fuente, reutilizar y reciclar los PET. En 1975 se instauró la Ley 1288 que obliga a todas aquellas personas jurídicas que generan desechos en sus procesos productivos o de prestación de servicios, que no vayan a ser reutilizados por ellos mismos, entregarlos al reciclaje. Falta cultura de reciclaje, tanto en la población como en el sector estatal (Rey, 2014), pero se han dirigido los intereses hacia una actividad que promete y que sustituye importaciones. Tanto es así que la actividad del reciclaje reportó en el 2014 un ahorro de 212 millones de dólares debido al efecto combinado de la sustitución de importaciones y exportaciones (Castro-Morales, 2015).

Acerca del reciclaje de los PET y su reutilización, su principal destino una vez triturados son las industrias locales. Según Castro-Morales (2011) la importación de cada tonelada reciclada de polietileno de alta densidad le cuesta a Cuba más de 840 euros, mientras que la venta en el mercado internacional de una tonelada de envases de PET (pomos de agua, refrescos y otros) le aporta entre 300 y 400 dólares.

Empleo de los plásticos (PET) en la fabricación de hormigones

Todas las medidas tomadas para reducir la fuente, reutilizar y reciclar los plásticos han sido insuficientes. Nuestro país cuenta con empresas que demandan altos niveles de PET, tal y como se muestra en la Tabla 1. Si de este considerable peso, que ronda las 1 368,3 t, solo se recicla el 8 %, ¿qué sucede con el resto de los plásticos?

Tabla 1. Entidades consumidoras y productoras de PET (<http://www.mindus.gob.cu>)

Entidad	Producto	Capacidad (MU)	
		Instalada	Disponible
SUCHEL JOVEL	Frascos de PET	6 764,2	6 057,0
SUCHEL CAMACHO	Frasco PET 500 ml (28,9 g)	4 100,0	3 000,0
	Frasco PET cilíndrico 300 ml (24g)	14 780,0	12 960,0
Los Portales S.A.	Frascos de PET (0,35;0,50 y 1,5 l)	131 400,0	12 420,0
UIM (artículos PET)	Envase de 330 ml (refresco Fiesta) y 750 ml (ron, vinagre y vino seco)	17 280,0	16 722,0
	Preformas de 23, 26, 28, 29 y 35,5 (g)	17 280,0	15 993,0
	TOTAL	73 344,2	67 152,0

El uso de los residuos de PET, triturados con forma de escama y fibras, en la fabricación de hormigón se ha considerado en otras investigaciones (Gu & Ozbakkaloglu, 2016). Recientemente, reconocidas revistas de ingeniería han publicado trabajos donde se demuestra el potencial que presenta usar estos residuos de PET para mejorar algunas propiedades del hormigón, incluso se han usado en sustitución de los áridos (Rahmania *et al.*, 2013).

Foti (2013) estudió los hormigones reforzados con residuos de fibra de PET reciclados y encontraron importantes resultados:

- Mayor desarrollo de la ductilidad del hormigón
- Alta adherencia entre el PET-hormigón.

Foti concluyó que el uso de fibras y tiras recicladas de PET, como refuerzo en los hormigones, representa importantes avances en la reducción de desechos de PET, del costo de producción y de la degradación debido a la corrosión de los aceros.

En otras investigaciones se han estudiado las propiedades de los hormigones fabricados con residuos de PET en forma de escamas como sustituto del árido. Rahmani y otros (2013) demostraron que a pesar de que con el aumento de la cantidad de partículas de PET decrecía la laborabilidad de la mezcla, con la sustitución de hasta un 5 % de partículas de PET por árido fino se alcanzan valores óptimos de resistencia a la compresión, sin embargo, a partir de este nivel de reemplazo los valores medidos decrecieron significativamente. No sucedió de igual manera con el resto de las propiedades que fueron medidas; en el caso de la resistencia a la tracción y las medidas de velocidad de pulso ultrasónico decrecieron ligeramente a partir de que se comenzó con la sustitución de PET por árido fino.

Similares resultados fueron obtenidos por Azhdarpour, Nikoudel & Taheri (2016) cuando estudiaban las propiedades de los hormigones fabricados con fragmentos de PET en sustitución de árido fino, aunque estos lograron reemplazos de hasta un 10 % sin que se afectaran las propiedades bajo estudio. Un trabajo que resultó muy interesante fue el desarrollado por Thorneycroft, Orr, Savoikar & Ball (2018), donde se demostró la influencia que tiene el uso de diferentes plásticos, su forma y finura para su empleo en la fabricación de hormigones. Basados en el estudio concluyeron que los PET con forma de escama y las tiras y fibras de polipropileno son, de entre los plásticos estudiados, los que más influyen en la resistencia a la tracción y compresión del hormigón. Asimismo, en la fabricación de hormigones con plásticos de PET como reemplazo de los áridos finos, que estén bien graduados, influye más que la finura que estos presenten si el fin es obtener hormigones más resistentes.

Esta versátil forma de reusar los residuos de PET ha ganado la atención en los últimos años y así se puede constatar en el estudio desarrollado por Gu y Ozbakkaloglu (2016), el cual hace una revisión crítica de todos los trabajos que han estado dirigido a emplear cualquier tipo de plástico en la fabricación de hormigones, desde las propiedades mecánicas hasta las de durabilidad.

Como consecuencia del estudio de los resultados se consideró el refuerzo del hormigón con fibras recicladas de PET en sustitución del acero en el caso de elementos no sometidos a grandes solicitaciones.

En el presente trabajo se estudió cómo influyó la adición de fragmentos de plástico de PET cortados de forma manual en algunas propiedades del hormigón. Para ello se fabricaron hormigones con diferentes porcentajes de adición y se evaluó el desempeño de estos a partir de los ensayos no destructivos (velocidad de pulso ultrasónico y resistividad eléctrica) y ensayos destructivos (resistencia a la compresión y porosidad total).

Materiales y métodos

Para la fabricación de los hormigones se utilizó un cemento CPO que responde a la denominación P-350 (tipo I) de la fábrica Cementos Curasao, del municipio de Mariel, en la provincia de Artemisa. La Tabla 2 muestra sus principales características y los valores se comparan con los establecidos por la norma cubana (NC-95, 2001).

Tabla 2. Propiedades físicas del cemento (P-350)

Propiedades	Valores	Aceptación NC 95: 2011
Superficie específica (Blaine) (cm ² /g)	3 317	mín. 2 800
Finura (%)	1,7	máx. 10
Tiempo de fraguado inicial (min)	102:00:00	mín. 45
Tiempo de fraguado final (h)	3:02:00	máx. 10
Peso volumétrico (kg/m ³)	1 168	
Densidad (g/cm ³)	3,15	
Consistencia normal (%)	24,5	

Los áridos utilizados en el estudio son de origen natural, de la cantera La Molina, ubicada en el municipio de Mariel, en la provincia de Artemisa. Todos los ensayos se realizaron según establecen las normas cubanas correspondientes (NC-186, 2002), (NC-181, 2002), (NC-177, 2002) y (NC-182, 2002). En la Tabla 3 y 4 se detallan las propiedades físicas de los áridos y su distribución granulométrica.

Tabla 3. Propiedades físicas de los áridos fino y grueso

Propiedades	Arena	Gravilla
Peso específico corriente (g/m ³)	2,61	2,63
Peso específico saturado (g/m ³)	2,65	2,66
Peso específico aparente (g/m ³)	2,72	2,70
Por ciento de absorción (%)	1,8	1,0
Masa volumétrica suelta (kg/m ³)	1477	1371
Masa volumétrica compactada	1663	1510
Por ciento de huecos (%)	37	45
Material más fino tamiz 200 (%)	9,9	1,2

Tabla 4. Distribución granulométrica de los áridos empleados

Áridos	Tamices (mm)								
	19,1	12,7	9,52	4,76	2,38	1,19	0,59	0,295	0,149
Fino	100	100	100	88	57	41	26	14	7
Grueso	98,5	43	4,33	0,83	0	0	0	0	0

Los fragmentos de PET fueron cortados de forma manual con tijeras hasta lograr que su tamaño estuviera entre 2 mm y 4 mm (Figura 1). Se determinó su masa volumétrica, como establece la norma de áridos (NC-181, 2002), y en la Tabla 5 se detallan otras de las propiedades que caracterizan este tipo de plástico.



Figura 1. Fragmentos de PET.

Tabla 5. Propiedades físico-químicas del PET

Densidad específica a 25 °C (g/cm ³)	1,335
Masa volumétrica suelta (g/cm ³)	0,43
Masa volumétrica compactada (g/cm ³)	0,52
Conductividad térmica (cal/cm·s·°C) cal/(cm*s*°C)	3,36 x 10 ⁻⁴
Absorción de humedad (inmersión en agua durante una semana a 25 °C)	0,80

Método experimental

El interés del estudio es conocer cuánto influye la adición de fragmentos de PET en las propiedades mecánicas y de durabilidad. Además, los valores obtenidos de velocidad de pulso ultrasónico (VPU) y resistividad eléctrica (RE) de los hormigones con adición de PET serán comparados con el hormigón de control, o sea, sin adición de PET.

Para estudiar al pormenor la resistencia a la compresión y la porosidad de los hormigones fabricados con adición de PET se decidió usar un diseño completamente al azar. En el factor Adición PET se incluyeron tres niveles: bajo, intermedio y alto. En la Tabla 6 se especifica el factor a estudiar y sus niveles. A cada tratamiento se le asignó tres bloques a ensayar, o sea, se realizó un experimento y dos réplicas por cada tratamiento y por cada bloque a ensayar se fabricaron tres probetas de hormigón.

Tabla 6. Factores bajo estudio y sus niveles

Factores	Bajo (-1)	Medio (0)	Alto (+1)
Adición PET (%)	0	0,5	1,0

El análisis de los datos se realizó a partir de una herramienta estadística fundamental para este tipo de diseño: el análisis de varianza (Montgomery, 2002). Este es un procedimiento estadístico y fue creado por R. A. Fisher en 1925 para descomponer la variabilidad de un experimento en componentes independientes que pueden asignarse a causas distintas, el cual constituye la base de los métodos estadísticos utilizados en

su gran mayoría en el campo del diseño de experimentos (Serpa, Guerra, & Vallina, 2011). En el caso en cuestión el empleo este procedimiento implica docimar si el valor esperado cambia o no cuando la variable de respuesta se somete a distintos niveles de un factor docimado. En el presente trabajo se determinó de forma experimental los niveles del factor que puede conllevar a obtener una respuesta óptima con la ayuda del software estadístico StatGraphicsCenturion XV (Polhemus, 1999).

Conjuntamente se midió la porosidad por el método establecido en la norma ASTM (ASTM-C-642, 2006). Para el estudio los testigos fueron extraídos de las probetas cúbicas de 15 x 15 x 15 cm con el fin de evitar el efecto pared que se produce en las zonas próximas a la superficie. Para determinar la porosidad por el método propuesto se analizaron tres testigos por cada tipo de hormigón, representativos de cada amasada.

Descripción del procedimiento

Se consideró un hormigón patrón con una resistencia característica a la compresión de 30 MPa a los 28 días y, en función del grado de control en el laboratorio, su resistencia media a la compresión será de 32 MPa. Las mezclas analizadas tienen el mismo tipo de árido y dosificados en la misma proporción a manera de obtener una curva granulométrica constante. Se utilizó una proporción de árido fino y grueso de 45/55 %, respectivamente. La relación agua-cemento (0,45) se consideró para un ambiente donde la agresividad es alta, según lo establece la norma cubana (NC-120, 2014).

Para mejorar la laborabilidad del hormigón fresco se utilizó el aditivo Dynamón SRC-20 perteneciente al nuevo sistema de MAPEI. Se trata de un aditivo superfluidificante de base acrílica (segunda generación avanzada), modificado para hormigones premezclados, que se caracterizan por una baja relación agua-cemento, altas resistencias mecánicas y largo mantenimiento de la laborabilidad. El asentamiento deseado medido por el cono de Abrams estará entre 14 cm y 16 cm aproximadamente. La dosis utilizada no varió y la cantidad de materiales a emplear por cada tipo de hormigón a elaborar se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Dosificación y cantidad de materiales

Materiales	PP	PR_0,5 %	PR_1,0 %
Relación a/c	0,45	0,45	0,45
Cemento P-350 (kg)	37,52	37,52	37,52
Agua (L)	15,44	15,44	15,44
Árido grueso (kg)	85,76	85,76	85,76
Árido fino (kg)	72,2	72,2	72,2
PET (kg)	-	0,1876	0,3752
Aditivo (%-ml)	0,70-128	0,70-128	0,70-128

Resultados y discusión

El ensayo de porosidad y resistencia a la compresión del hormigón se aplicó según la metodología establecida por las normas cubanas ASTM-C-642 (2006) y NC-244 (2005), respectivamente, utilizando testigos con dimensiones (diámetro x espesor) de 10x4,5 cm y probetas cilíndricas de 10 cm x 20 cm, respectivamente. En la Figura 2 se muestran los resultados obtenidos de los ensayos antes mencionados y en ambos casos se observa cómo el reemplazo de cemento Portland por puzolana natural influye en la reducción de la porosidad del hormigón y el incremento de la resistencia a su compresión.

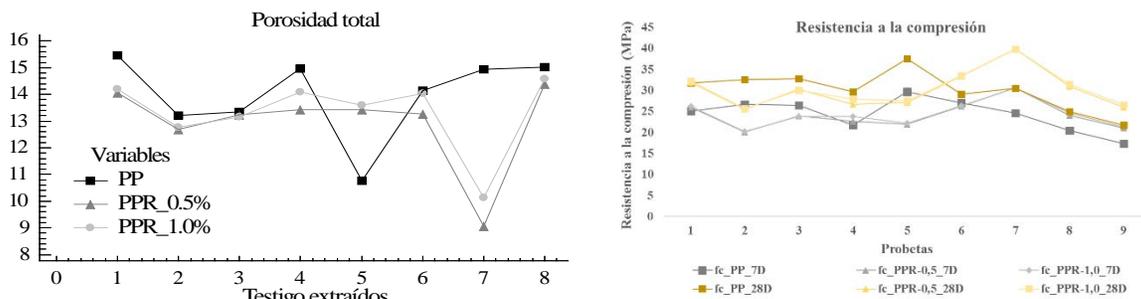


Figura 2. Curvas típicas de porosidad total y resistencia a la compresión.

Análisis de la resistencia a la compresión

Como parte de la investigación, los resultados obtenidos fueron procesados estadísticamente para conocer la influencia que tiene el factor Adición_PET sobre la variable de respuesta, la resistencia a la compresión (RC) del hormigón. El estadígrafo empleado es el análisis de varianza (ANOVA), el cual particiona la variabilidad de la resistencia a la compresión en piezas separadas para cada uno de los efectos, y de esta forma prueba la significancia estadística de sendos factores, comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental (Walpole, Raymond, Myers, Myers & Keying, 2012).

Según Montgomery (2002), el término significancia estadística se define como la probabilidad de tomar la decisión de rechazar la hipótesis nula cuando esta es verdadera (decisión conocida como error de tipo I). Esta decisión a menudo se toma utilizando el valor-P, que no es más que la probabilidad de obtener un resultado al menos tan extremo como el que se ha obtenido. Cuanto menor sea este, más significativo será el resultado.

En el estudio en cuestión el efecto Adición PET tiene un valor-P mayor que 0,05 lo que indica que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias de los valores de resistencia a la compresión a los 7 y 28 días de los niveles de adición de PET con un nivel del 95 % de confianza. Sin embargo, aunque el análisis indique no existir diferencia entre los niveles bajo estudio, la media de los valores para el 1,0 % de adición es ligeramente superior al hormigón patrón, tal como se indica en la Tabla 8, pero no lo suficiente como para crear diferencias significativas. Por tal razón se puede afirmar que el factor Adición PET no influye en la resistencia a la compresión en ninguna de las edades estudiadas. En las Figuras 3 y 4 se detallan los gráficos de las medias muestrales de los valores de resistencia a la compresión.

Tabla 8. Resumen estadístico

Adición_ PET	Recuento	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación	Error Estándar	Sesgo estandarizado	Curtosis estandarizado
1	9	24,3944	3,84879	15,7773	1,28293	-0,798616	-0,036133
2	9	24,0956	3,21906	13,3596	1,07302	1,19032	0,679574
3	9	24,3722	3,13033	12,8438	1,04344	0,992618	0,590618
Total	27	24,2874	3,28338	13,5189	0,631886	0,336886	-0,141048

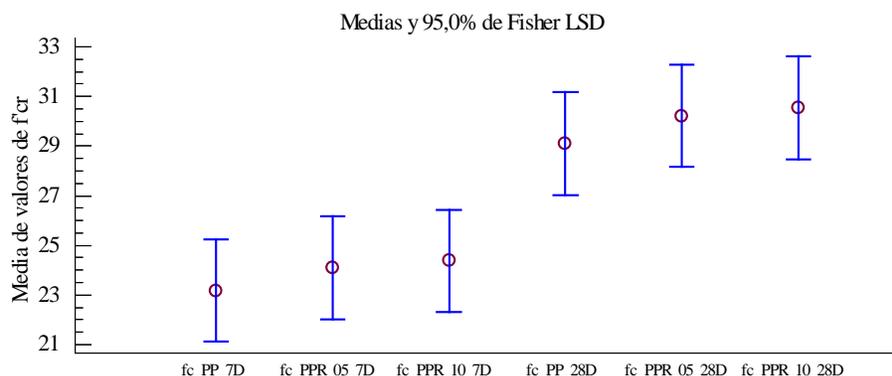


Figura 3. Diagrama de medias muestrales de los valores de RC a los 7 y 28 días.

Análisis de la velocidad de pulso ultrasónico

El carácter heterogéneo del hormigón, y el hecho de que las probetas por lo general no sean construidas con un estricto control, provocan gran variabilidad en sus propiedades físicas. La mención anterior da lugar a que no exista un único valor de VPU en un mismo hormigón. Esta técnica es muy utilizada para evaluar elementos de hormigón debido a su simplicidad, versatilidad y repetibilidad.

Las mediciones se realizaron en los hormigones curados hasta los 3, 7, 14 y 28 días con 0,5 % y 1,0 % de adición de PET, con el objetivo de comparar los valores de VPU con el hormigón patrón. Teniendo en cuenta que estos valores se obtuvieron en probetas saturadas, en las Figura 4, 5 y 6 se muestran los valores medidos en cada probeta.

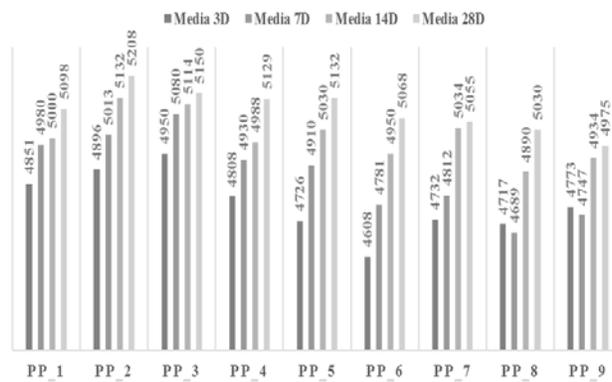


Figura 4. Valores de VPU (m/s) en el hormigón patrón.

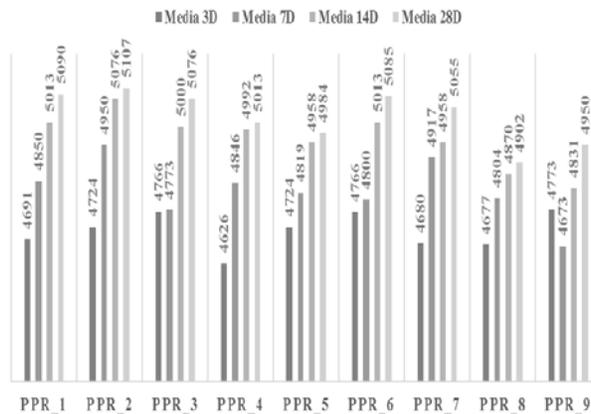


Figura 5. Valores de VPU (m/s) en el hormigón con 0,5 % de adición de PET.

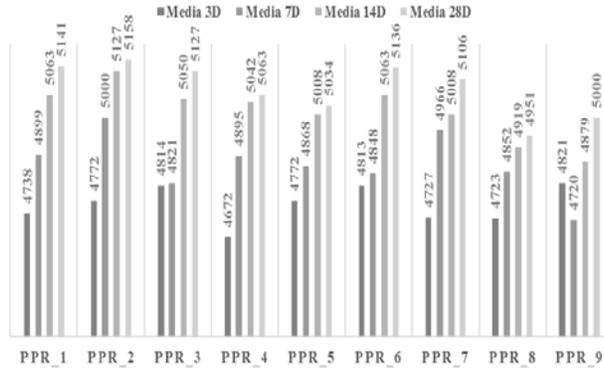


Figura 6. Valores de VPU (m/s) en el hormigón con 1,0 % de adición de PET.

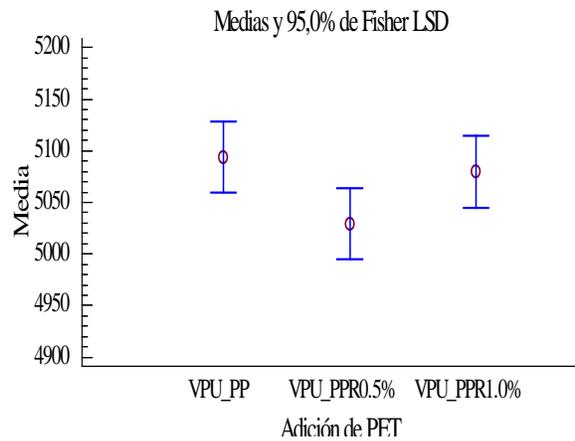


Figura 7. Diagrama de medias muestrales de los valores de VPU (m/s).

Los gráficos de columnas mostrados con anterioridad indican un aumento progresivo en los valores de VPU a medida que evoluciona la hidratación de las partículas de cemento, por tanto, la adición de PET al hormigón no afecta su calidad. Asimismo, según la RED DURAR (RED-DURAR, 2000) y basados en una prueba de hipótesis, donde se tomó como hipótesis nula una VPU de 4 000 m/s, se determinó que en todos los casos la calidad del hormigón es durable.

Con el fin de evaluar la influencia de la adición de PET al hormigón sobre la calidad del hormigón se realizó una comparación simple entre las medias de los valores obtenidos. Según se muestra en la Figura 7, el análisis realizado evidencia que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias muestrales de los valores de VPU, ya que el valor-P es ligeramente mayor que 0,05.

Análisis de la resistividad eléctrica

Para estimar el riesgo de corrosión que pudieran presentar los aceros de refuerzo que sean embebidos en este hormigón, se empleó una medida electroquímica mediante un método de resistencia a la polarización. El método se basa en el principio de la sonda de Wenner, y funciona aplicando corriente a través de las dos sondas exteriores y midiendo el potencial resultante entre las sondas interiores. El contenido de humedad (agua) presente en los poros del hormigón es capaz de transportar la corriente entre las sondas, lo cual hace posible calcular la resistividad del material entre estas, y así determinar la velocidad de corrosión (I_{corr}) teórica.

Para la clasificación del nivel de riesgo y los cálculos de estimación de la velocidad de corrosión se utilizó la recomendación técnica ofrecida por el TC-154 de RILEM (Polder *et al.*, 2000). Para la interpretación de los resultados, el documento establece las consideraciones siguientes:

Tabla 9. Límites de riesgo y velocidad de corrosión

Resistividad (K·ohm cm)	Riesgo de corrosión	I_{corr}	Velocidad de corrosión
>100	Despreciable	<0,1	Despreciable
50–100	Moderado	0,1 –	Moderado
10–50	Bajo	0,5 –	Elevado
<10	Alto	>1,0	Muy elevado

Las mediciones de RE se realizaron conjuntamente con las de VPU en los hormigones curados hasta los 3, 7, 14 y 28 días con 0,5 % y 1,0 % de adición de PET, con el objetivo de conocer el riesgo de corrosión. En las Figuras 7, 8, 9 y 10 se muestran los valores de RE y de I_{corr} medidos solo en los hormigones curados hasta los 28 días.

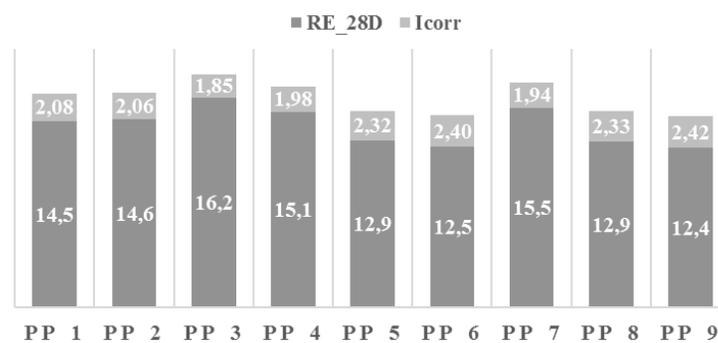


Figura 8. Valores de RE (k·ohm·cm) en el hormigón patrón.



Figura 9. Valores de RE (k·ohm·cm) en el hormigón con 0,5 % de adición de PET.

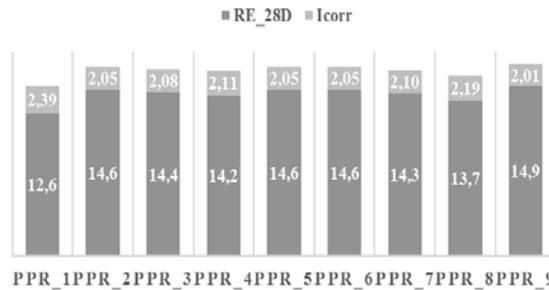


Figura 10. Valores de RE (k·ohm·cm) en el hormigón con 1,0 % de adición de PET.

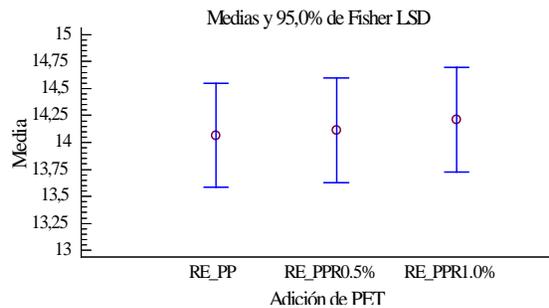


Figura 11. Diagrama de medias muestrales de los valores de RE (k·ohm·cm)

De acuerdo con el TC-154 de la RILEM (Polder *et al.*, 2000), los valores de RE e Icorr muestran un hormigón con un riesgo de corrosión moderado y una velocidad de corrosión muy elevada, respectivamente. Con los resultados obtenidos se pudo inferir, a partir de un análisis estadístico, que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los hormigones con adición de PET y el patrón. Sin embargo, al igual que los valores de resistencia a la compresión, las medias de los valores de RE medidos tienden a mejorar con el incremento de la adición de PET.

Análisis de la porosidad

El ensayo propuesto por la *American Society for Testing Materials* (ASTM-C-642, 2006) es empleado para estipular conformidad de acuerdo con las especificaciones para el hormigón. La Tabla 10 muestra los términos que fueron medidos para determinar el coeficiente de porosidad efectiva.

Tabla 10. Densidades de masa, volumen de vacíos permeables y porosidad total

Muestra	G ₁ (g/m ³)	G ₂ (g/m ³)	G ₃ (g/m ³)	Volumen de vacíos permeables (%)	Porosidad total (%)
CP_341	2,10	2,64	2,48	15,46	20,62
CP_342	2,13	2,64	2,46	13,20	19,19
CP_343	2,16	2,66	2,49	13,35	18,78
CP_344	2,17	2,67	2,56	14,98	18,48
CP_641	2,10	2,65	2,35	10,75	20,81
CP_642	2,10	2,64	2,45	14,13	20,57
CP_643	2,13	2,65	2,51	14,94	19,65
CP_644	2,15	2,66	2,53	15,01	19,26
CR_0,5%_341	2,14	2,65	2,49	14,06	19,28
CR_0,5%_342	2,15	2,65	2,46	12,69	19,09
CR_0,5%_343	2,14	2,65	2,46	13,23	19,44
CR_0,5%_344	2,16	2,66	2,49	13,42	18,90
CR_0,5%_641	2,08	2,63	2,41	13,44	20,78
CR_0,5%_642	2,12	2,63	2,46	14,09	19,70
CR_0,5%_643	2,11	2,64	2,33	9,07	20,03
CR_0,5%_644	2,19	2,66	2,56	14,40	17,45
CR_1,0%_341	2,16	2,68	2,52	14,20	19,47
CR_1,0%_342	2,16	2,67	2,47	12,77	19,21
CR_1,0%_343	2,13	2,64	2,45	13,16	19,34
CR_1,0%_344	2,26	2,79	2,62	14,09	19,85
CR_1,0%_641	2,10	2,66	2,43	13,59	21,01
CR_1,0%_642	2,12	2,65	2,47	14,15	19,78
CR_1,0%_643	2,11	2,64	2,32	9,06	20,01
CR_1,0%_644	2,22	2,69	2,59	14,58	17,66

G1: Densidad aparente seca; G2: Densidad aparente y G3: Densidad absoluta de los testigos

Basado en los pesos seco, luego de inmersión, después de ebullición y sumergido, se determinan las densidades en estado seco, aparente y absoluta de los testigos, y con ello se estima el volumen de vacíos permeables y la porosidad total. El ensayo es usado para establecer requisitos de durabilidad en el diseño de los hormigones.

Los resultados fueron analizados en el mismo software empleado en los análisis anteriores, en la Figura 12 se detallan los valores de porosidad total (PT) acumulada. Se realizó un análisis de varianza para comparar si existe diferencia estadísticamente significativa entre los resultados obtenidos para los hormigones con adición de 0,5 % y 1,0 % con respecto al hormigón patrón. En la Figura 13 se muestra el diagrama de medias muestrales. En contraste con el hormigón patrón, los que tienen reemplazo del

0,5 % y 1,0 % presentan una reducción en la porosidad total del 6,63 % y 5,56 %, respectivamente.

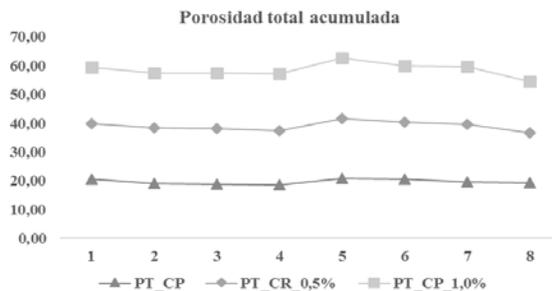


Figura 12. Gráfico de valores de porosidad total acumulada.

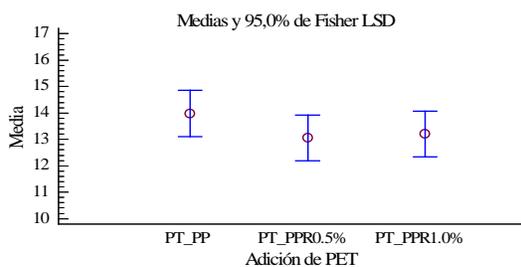


Figura 13. Diagrama de medias muestrales de los valores de PT (%).

A pesar de que las medias de los valores obtenidos indican una reducción en la porosidad total de los hormigones estudiados, el juego de datos es insuficiente para inferir que existen diferencias estadísticamente significativas entre el hormigón patrón y los que tienen adición de PET con un 95 % de confianza. También se realizó la prueba de múltiples rangos y no existen grupos homogéneos.

Conclusiones

Del análisis de los resultados obtenidos durante el estudio que se realizó a los hormigones con adición de PET, se puede concluir que:

No existen diferencias estadísticamente significativas entre los hormigones con adición de PET y los convencionales. Con el actual juego de datos se puede inferir que la adición de fragmentos de residuos de PET no influye en los valores de resistencia a la compresión y la porosidad total de estos.

Los valores de VPU indican un hormigón de calidad durable mientras que los valores de RE un riesgo de corrosión moderado, tanto en el hormigón patrón como en los

hormigones con adición de PET. Los valores de I_{corr} , que se determinaron a partir de la RE, indican una velocidad de corrosión muy elevada en ambos tipos de hormigón.

Aunque los resultados revelan que la adición de fragmentos de PET en la fabricación de hormigones no afecta la porosidad total de estos, se puede deducir que existen ligeras reducciones en el volumen de los vacíos permeables y de la porosidad total.

El estudio realizado propone una solución práctica y con vista al futuro a todos los plásticos de PET que no se reúsan ni se reciclan eficientemente y, por ende, son arrojados a los mares y a los vertederos.

Referencias bibliográficas

- AGUILERA, C. & JODAR, F. 2017. Muy data. *Muy interesante*, 124. Disponible en: <https://www.muyinteresante.es/>
- ASTM-C-642. 2006. Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete. American Society for Testing Materials, West Conshohocken.
- AZHARPOUR, A. M.; NIKOUDEL, M. R. & TAHERI, M. 2016. The effect of using polyethylene terephthalate particles on physical and strength-related properties of concrete; a laboratory evaluation. *Construction and Building Materials* 109: 55-62. doi: [dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.056](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.056)
- BOOK, W. 2010. Waste to Energy in Austria. Paper presented at the Waste to Energy in Austria. Disponible en: http://www.iswa.org/fileadmin/galleries/Pubilcations/White%20Book/Whitebook_20Incineration_2009%5b1%5d.pdf
- FOTI, D. 2013. Use of recycled waste pet bottles fibers for the reinforcement of concrete. *Composite Structures* 96: 396-404. doi: [dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2012.09.019](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2012.09.019)
- GU, L. & OZBAKKALOGLU, T. 2016. Use of recycled plastics in concrete: A critical review. *Waste Management* 51: 19-42. doi: [dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2016.03.005](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.03.005)

- KOROSEC, K. 2013. Las 10 ciudades que lideran la sostenibilidad urbana (2013). *Ecointeligencia*. Disponible en: <https://www.ecointeligencia.com/2013/09/10-ciudades-lideres-sostenibilidad-urbana/>
- MILLER, A. 2017. Sazón plástico. *Muy interesante*, 106. Disponible en: <https://www.muyinteresante.es/>
- MONTGOMERY, D. C. 2002. *Diseño y análisis de experimentos*. Limusa, México. 686 p.
- CASTRO-MORALES, Y. 2011. Reciclar es ahorrar. *Granma*. La Habana, viernes 6 de mayo de 2011, Año 15/Número 126. Disponible en: <http://www.granma.cu/granmad/2011/05/06/nacional/artic03.html>
- CASTRO-MORALES, Y. 2015. Eslabones cuadrados de una cadena redonda. *Granma*. La Habana, 14 de mayo de 2015. Disponible en: <http://www.granma.cu/cuba/2015-05-14/eslabones-cuadrados-de-una-cadena-redonda>
- MUÑOZ, M. 2016. Una ciudad sin botellas de plástico. *Eldiario.es*, 24 de enero de 2016. Disponible en: https://www.eldiario.es/paisajesurbanos/ciudad-botellas-plastico_6_477062296.html
- NC-95. 2001. Cemento Portland. Especificaciones. Oficina Nacional de Normalización, La Habana.
- NC-120. 2014. Hormigón hidráulico. Especificaciones. Oficina Nacional de Normalización, La Habana, p. 74.
- NC-177. 2002. Áridos. Determinación del porcentaje de huecos. Método de ensayo. Oficina Nacional de Normalización, La Habana.
- NC-181. 2002. Áridos. Determinación del peso volumétrico. Método de ensayo. Oficina Nacional de Normalización, La Habana.
- NC-182. 2002. Áridos. Determinación del material más fino que el tamiz de 0.074 mm (No. 200). Método de ensayo. Oficina Nacional de Normalización, La Habana.
- NC-186. 2002. Arena. Peso específico y absorción de agua. Método de ensayo. Oficina Nacional de Normalización, La Habana.

- NC-244. 2005. Hormigón endurecido. Determinación de la resistencia a la compresión en probetas cilíndricas. Oficina Nacional de Normalización, La Habana.
- PERDOMO, G. A. 2002. Plásticos y medio ambiente. *Revista Iberoamericana Polímeros* 3(2): 1-13.
- POLDER, R.; ANDRADE, C.; ELSENER, B.; VENNESLAND, O.; GULIKERS, J.; WEIDERT, R. & RAUPACH, M. 2000. Test methods for on site measurement of resistivity of concrete. *Materials and Structures* 33(10): 603-611.
- POLHEMUS, N. W. 1999. Statistical analysis using StatGraphics Plus. In: S. G. Corporation (Ed.). *Quality control and experimental design*. Vol 2. Englewood Cliffs, NJ.
- RAHMANIA, E.; DEHESTANI, M.; BEYGI, M. H. A.; ALLAHYARI, H. & NIKBIN, I. M. 2013. On the mechanical properties of concrete containing waste PET particles. *Construction and Building Materials* 47: 1302-1308. doi: dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.041
- RED DURAR. 2000. *Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado*. ISBN 980-296-541-3.
- REY, L. 2014. Reciclar el reciclaje. *Trabajadores*, 19 de junio. Disponible en: <http://www.trabajadores.cu/20140619/reciclar-el-reciclaje/>
- SERPA, A. D. C.; GUERRA, E. F. & VALLINA, M. L. B. 2011. Diseño y análisis estadístico de experimentos. La Habana.
- THORNEYCROFT, J.; ORR, J.; SAVOIKAR, P. & BALL, R. J. 2018. Performance of structural concrete with recycled plastic waste as a partial replacement for sand. *Construction and Building Materials* 161: 63-69. doi: doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.127
- WALPOLE, R.; RAYMOND, H.; MYERS, L.; MYERS, S. & KEYING, Y. 2012. *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. 9 ed. G. L. Ballesteros Pearson Education Inc, México. 812 p.