

Ingeniería Verde Mediante el Concreto Reforzado con Fibras Recicladas de PET en Aro: Resistencia a Compresión

Green Engineering Through Concrete Reinforced with Recycled Ring PET Fibers: Compressive Strength

Alejandro Meza-de Luna^a
Tecnológico Nacional de México, México
alejandro.ml@aguascalientes.tecnm.mx

Recibido: 07 marzo 2024
Aceptado: 25 junio 2024

Rodolfo Benjamín Sierra-Ortiz
Tecnológico Nacional de México, México

Fernando Chávez-Valdivia
Tecnológico Nacional de México, México

Rafael Reyes-Cortes
Tecnológico Nacional de México, México

Resumen:

Numerosos materiales de desecho se generan en las labores y prácticas cotidianas desarrolladas por diferentes sectores, por nombrar, fabricas, industrias de servicios y la sociedad. Los alcances crecientes que se han reportado a nivel mundial han contribuido a abordar el tema, buscando la reducción y reciclaje de los desechos generados. Para el caso de la Ingeniería, se ha adoptado tendencias que buscan el desarrollo de la Ingeniería verde. En este artículo se propone la incorporación de fibras en forma de aro a partir de botellas de PET (Poliétileno de Tereftalato) como parte de los residuos sólidos urbanos, este material se utiliza en envases de alimentos y botellas de agua o refrescos, el cual tiene la ventaja de ser 100% reciclable (clasificación 1). El estudio aborda la caracterización mecánica del concreto reforzado con fibras (FRC) analizando sus alcances y limitaciones a compresión. Los resultados muestran una ligera reducción en la resistencia máxima respecto al concreto sin refuerzo, sin embargo, la ductilidad del material compuesto con PET reciclado se aumentó en forma considerable.

Palabras clave: PET, reciclado, concreto reforzado con fibras, resistencia a compresión, ductilidad.

Abstract:

Numerous waste materials are generated in the daily work and practices carried out by different sectors, such as factories, service industries, and society. The growing scope reported worldwide has contributed to addressing the issue, seeking to reduce and recycle waste generated. In the case of Engineering, trends that seek the development of green Engineering have been adopted. This article proposes the incorporation of ring-shaped fibers from PET (Polyethylene Terephthalate) bottles as part of urban solid waste. This material is used in food containers and water or soft drink bottles, which has the advantage to be 100% recyclable (classification 1). The study addresses the mechanical characterization of fiber-reinforced concrete (FRC), analyzing its scope and limitations in compression. The results show a slight reduction in the maximum resistance compared to the unreinforced concrete. However, the ductility of the composite material with recycled PET increased considerably.

Keywords: PET, recycled, fiber reinforced concrete, compression resistance, ductility.

Introducción

La palabra plástico, según el vocablo griego, significa apto para moldear (Almeshal et al., 2020). Este término se refiere a la plasticidad y maleabilidad del material, lo que permite fundirlo, extruirlo o prensarlo en muchas formas. Los plásticos son compuestos de una amplia gama de materiales. Actualmente, la industria manufacturera mezcla diferentes proporciones para obtener diferentes productos y satisfacer las necesidades industriales (Almeshal et al., 2020, Siddiqui y Pandey, 2013). Los plásticos se dividen en dos

Notas de autor

^a Autor de correspondencia. Correo de contacto: alejandro.ml@aguascalientes.tecnm.mx

categorías: termoplásticos y termoestables. Los termoplásticos pueden estar sujetos a procesos repetitivos de calentamiento y enfriamiento, cambiando de viscosos a sólidos. Tales propiedades permiten que los materiales se reciclen y produzcan nuevos materiales (Siddiqui y Pandey, 2013, Bahij et al., 2020). Varios factores han contribuido al rápido crecimiento del consumo de plástico, como la baja densidad, las capacidades de fabricación, la vida útil prolongada, el peso ligero, el bajo costo de producción y la alta relación resistencia-peso (Gu y Ozbakkaloglu, 2016, Siddique et al., 2008, Mohammed y Mohammed, 2021, Adda y Slimane, 2019, Dutta et al., 2016, Rai et al., 2012).

El tereftalato de polietileno (PET) es un material polimérico derivado del tereftalato de metilo, el ácido tereftálico y los monómeros de glicol de metileno (Manaf et al., 2020, Modarres y Hamedi, 2014, Kim et al., 2008). El PET es una resina polimérica termoplástica de la familia de los poliésteres, formada por moléculas de cadena larga con estructura amorfa, según su proceso de fabricación (Meza y Ahmed, 2020, Signorini y Volpini, 2021, Shahidan et al., 2018); se produce por la polimerización de etilenglicol y ácido tereftálico; cuando estos elementos se calientan juntos bajo la influencia de catalizadores químicos, se genera una masa viscosa que se puede hilar directamente en fibras o solidificar para su posterior procesamiento como plástico (Modarres y Hamedi, 2014). Desde 1970, el PET se ha utilizado principalmente para fabricar envases de bebidas, envoltorios de alimentos, ropa, materiales de construcción y cuerdas. Por lo tanto, constituye una proporción importante de los residuos domésticos (Plastic Europe, 2024, Wang et al., 2016, Umasabor y Daniel, 2020, Irwan et al., 2013, Won et al., 2010). Algunas características comunes del PET son su gran resistencia y rigidez en comparación con otros polímeros, además de su resistencia al calor y a los ataques químicos, como el oxígeno y el dióxido de carbono (Siddique et al., 2008, Siddiqui y Pandey, 2013, Bahij et al., 2020). El color del PET depende del pigmento utilizado y de su espesor (Shahidan et al., 2018).

Los desechos plásticos que no se reciclan, reutilizan o reutilizan se liberan al medio ambiente. El problema se complica aún más ya que los residuos plásticos no son degradables y permanecen en el medio ambiente una vez desechados; el plástico tarda entre 100 y 1000 años en descomponerse (De Silva y Prasanthan, 2019, Dutta et al., 2016, Editorial boletín de contaminación marina, 2008). Los desechos plásticos pueden tratarse mediante varios métodos: vertedero, incineración y reciclaje (Gu y Ozbakkaloglu, 2006, Sadat-Shojai M y Bakhshandeh, 2011). Sin embargo, estas soluciones no son deseables: la incineración produce gases tóxicos, que son peligrosos para la salud humana; el reciclaje usa un proceso de calor que causa contaminación del aire; y la eliminación en el agua daña el paisaje marino y la vida acuática (Alfahdawi et al., 2018, De Silva y Prasanthan, 2019, Mohammed y Mohammed, 2021, Albano et al., 2009, Adda y Slimane, 2019, Rai et al., 2012). Desafortunadamente, solo se procesa una pequeña porción de las grandes cantidades de plástico producido y desechado. En el Reino Unido, se estima que actualmente solo se recicla el 7% del total de los desechos plásticos (Siddique et al., 2008). En Irán, el 84 % de los desechos sólidos se enterraron y el 6.0 % se recicló (Bahij et al., 2020). En Uganda, el 50 % se vierte en vertederos (Niyomukiza et al., 2021). En EE. UU. se recupera un 19.5 % y se tira un 80.5 % (Gu y Ozbakkaloglu, 2016). En Europa, el 26 % del total de residuos plásticos se recicla mecánicamente, el 0.3 % se recogió para reciclar materia prima, el 35.6 % se recuperó para obtener energía y el 38.1 % se eliminó (Borg et al., 2016, Yin et al., 2015, Gu L y Ozbakkaloglu, 2016, Bahij et al., 2020, Geyer et al., 2017).

Un parámetro importante por considerar en el diseño de estructuras en la Ingeniería Civil es el conocimiento de las capacidades y limitaciones del concreto a la compresión, enfatizando en materiales compuestos que son de nueva generación basados en la Ingeniería Verde. La literatura indica que se ha estudiado el aumento o la reducción de la resistencia a la compresión del concreto reforzado con fibras de PET recicladas (PFRC) frente a especímenes de control. La media de los datos indica que después de 7, 14, 64 y 128 días, la resistencia a la compresión aumentó en un 14 %, 9 %, 21 % y 8 %, respectivamente. Sin embargo, se observó una caída del 0.1% después de 28 días. Los límites de cada día de curado indicaron un aumento y otros una reducción de la capacidad compresiva por incluir las fibras de PET, atribuido a que las fibras traen

aire encapsulado y porosidad al concreto, más la baja adherencia entre PET (Lopez-Carreno et al., 2017, Giffta and Prabavathy, 2018, Bencardino et al., 2008, Meza et al., 2021).

El presente artículo estudia los alcances y limitaciones mecánicas a compresión del PET como refuerzo en forma de aro en el concreto. Para lo cual se generaron 15 especímenes, los cuales fueron ensayados bajo la norma ASTM C39. Los resultados muestran una ligera reducción en la resistencia máxima a compresión de la matriz de concreto, pero un aumento significativo en la ductilidad, asociada a la contribución de las fibras.

Fundamentos teóricos

Resistencia a compresión.

El diseño de elementos de concreto en términos de capacidad de carga y respuesta deformacional se basa principalmente en la respuesta a compresión (Stephen, et al., 2021). Las estructuras de concreto en el mundo se diseñan utilizando datos mecánicos a compresión como: el módulo elástico, la resistencia, las deformaciones, el comportamiento elástico y plástico. A menudo se supone, en el análisis, que las curvas fuerza-deformación de compresión alcanzan una meseta después del pico (Stephen, et al., 2021). Sin embargo, desde la década de 1980 se sabe que el concreto presenta ablandamiento por deformación, que se manifiesta como una caída gradual de las tensiones una vez alcanzada la carga máxima (Stephen, et al., 2021). La determinación del comportamiento tensión -deformación a compresión es crucial, especialmente para la ingeniería de concretos nuevos. Se ha reportado que en la respuesta carga - desplazamiento obtenida experimentalmente se observan dos tipos de respuesta: 1) El desplazamiento aumenta progresivamente junto con la disminución de la carga y 2) el desplazamiento disminuye después del pico de carga máxima, es decir, ambos, caída de carga y desplazamiento durante un cierto régimen (Stephen, et al., 2021).

También se ha documentado que la curva tensión -deformación determinada experimentalmente podría depender de la forma, tamaño y esbeltez de la muestra (Stephen, et al., 2021). Esto se debe básicamente a la localización del daño en una región de la probeta después del pico de carga, especialmente cuando la esbeltez es grande. Hasta el pico de carga, las deformaciones son uniformes en la mayor parte de la muestra, especialmente en la zona media, pero cuando hay localización, la deformación aumenta sólo en la zona dañada y disminuye en el resto de la muestra. Otro aspecto que puede influir significativamente en la curva tensión - deformación es la manera en que se aplica la carga a la muestra y, más precisamente, las características del contacto entre la muestra y el plato de carga. Los tipos de contacto que se han propuesto en la literatura incluyen láminas de teflón (Stephen, et al., 2021), almohadillas de neopreno (Stephen, et al., 2021) polvo de aluminio, y placas (Stephen, et al., 2021).

La función teórica de las fibras en el concreto es reforzar a la matriz, principalmente, cuando se encuentra bajo cargas de tensión. El cálculo de los esfuerzos para ensayos uniaxiales a compresión y tensión se muestra en la Ecuación 1.

Donde:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad \text{Ecuación 1}$$

σ es el esfuerzo normal (MPa)

P es la carga aplicada (N)

A es el área de la sección transversal (mm.)

Materiales y métodos

Materiales y composición de la mezcla

Se generaron cinco lotes de concreto (cuatro mezclas de FRC y una de control). Cada FRC se analizó utilizando dos dosis de fibra de 2 kg/m. y 10 kg/m., y dos diámetros de aro 100 mm y 180 mm. Los materiales utilizados en la elaboración del concreto fueron los siguientes: i.- cemento Portland ordinario tipo I, gravedad específica 3.15, ii.- arena natural, gravedad específica 2.50, y iii.- agregado grueso de tamaño máximo 20 mm y gravedad específica 2.68. El cemento Portland ordinario utilizado en este estudio satisface los requisitos químicos y físicos de la norma ASTM C150 (2007). El procedimiento de mezclado consistió en agitar manualmente el cemento, los agregados y las fibras durante tres minutos, luego se dispersó el agua y el material se mezcló por otros 3 minutos para obtener homogeneidad. La Tabla I indica las dosificaciones utilizadas en el diseño de la mezcla. En total se fabricaron y probaron bajo compresión axial un total de 15 especímenes, incluidas tres elementos idénticos nominalmente. Los especímenes cilíndricos fueron de 100 mm de diámetro y 200 mm de longitud, de acuerdo con la norma ASTM C39.

TABLA 1.-
Relación de mezcla.

10-180	10-100	2-180	2-100	C	ID
PET reciclado	PET reciclado	PET reciclado	PET reciclado	NA	Fibra
10	10	2	2	0	Dosis (kg/m³)
180	100	180	100	NA	Diámetro (mm)
383	383	383	383	383	Cemento (kg/m³)
672	672	672	672	672	Agregado fino (kg/m³)
1100	1100	1100	1100	1100	Agregado grueso (kg/m³)
0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	W/R

Fibras

Los elementos utilizados para reforzar el concreto en este estudio son aros provenientes de botellas de PET desechadas. El anillo de PET reciclado se elaboró a partir de botellas recolectadas en la unidad de disposición de residuos de Aguascalientes, México. La forma de aro proviene de la forma de la botella, de tal manera, que el diámetro del aro de PET coincide con el de la botella desechada. La única selección de las botellas fue su diámetro (100 y 180 mm). El corte de los aros de PET se realizó con cortes en espesores de 3 mm a lo largo del cuerpo de la botella, con el apoyo de tijeras industriales. La Figura 1 muestra fibras utilizadas para este estudio.



FIGURA 1.-
Aros de PET reciclados a partir de botellas desechadas.

Procedimiento de ensayo

Las pruebas de compresión axial se realizaron según ASTM C39/C39M-16b (2018). Para las pruebas se utilizó una máquina de ensayo universal de 588 kN de capacidad, ilustrada en la Figura 2. La deformación de las probetas se midió mediante un indicador de carátula de émbolo, ubicado en la estructura de la máquina de ensayo universal ya que el desplazamiento de las placas de carga tiene relación directa con la deformación de la muestra. Todas las pruebas se realizaron después de completar el período de curado de 28 días, todos los cilindros se sacaron del tanque de curado y se dejaron secar durante unas horas antes de la prueba.



FIGURA 2.-
Maquina universal, utilizada durante el ensayo de compresión.

Resultados y discusión

Curvas esfuerzo-deformación

La Figura 3 muestra las curvas tensión - deformación a compresión del concreto de control y aquellas con aro de PET reciclado. Para cada combinación de dosis de fibra y relación de aspecto, se creó una curva, la cual representa el promedio de 3 elementos para mostrar visualmente el comportamiento típico de cada concreto. En general, los gráficos muestran que las probetas de concreto reforzado con aro de PET tuvieron una escasa reducción de la resistencia a la compresión última que las muestras de control, pero la incorporación de los elementos de refuerzo en el concreto aumenta la tenacidad a la compresión. La reducción de la resistencia a la compresión última está relacionada con el efecto del material encapsulado, aire y porosidad debido a la incorporación de las fibras al concreto, y su baja adherencia de las fibras rectas recicladas de PET con una matriz (Meza et al., 2021, Meza y Ahmed, 2020, Meza y Siddique, 2019, Bencardino et al., 2008, Gholampour y Ozbakkaloglu, 2018).

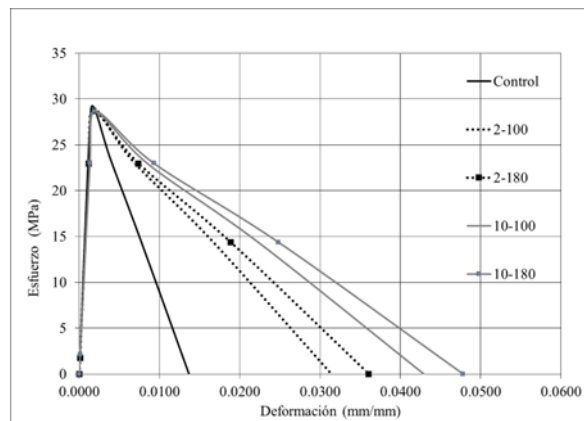


FIGURA 3.-
Gráficos esfuerzo - deformación de los especímenes de concreto reforzado con fibras de PET reciclado y de control.

Resistencia a la compresión máxima

La Figura 4 muestra la resistencia última promedio a la compresión ($f'c$), calculada con la Ecuación 1 para los elementos de control y los reforzados con aros de PET.

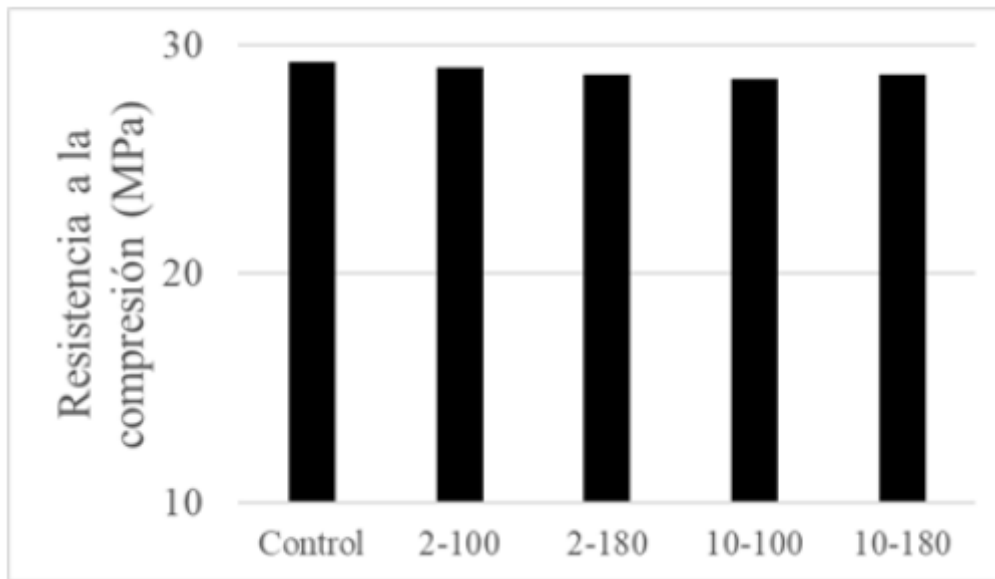


FIGURA 4.-
Resistencia a la compresión de los especímenes de concreto reforzado con fibras de PET reciclado y de control.

Los resultados muestran que los elementos de control tienen una media de 29.3 MPa, que es un 2% superior al promedio de todas las muestras recicladas con PET. El cambio de dosis de fibras o de tamaño no generó una tendencia definida en la respuesta de resistencia a la compresión.

Módulo de elasticidad

La Figura 5 ilustra los resultados del módulo de elasticidad (E), determinado según la norma NMX-C-128-ONNCCE (2013). Los resultados indican que el cambio de la dosis y relación de aspecto de la fibra PET reciclada genera una baja diferencia (menor a 20%). Este efecto produjo que algunos concretos reforzados con aros de PET tengan mayor rigidez, por ejemplo, 10 - 180 aumentó la capacidad de control en 12%, y otros una reducción de hasta 7%, observado entre control y 2 - 180. Aunque no se observó alguna tendencia debido al cambio de dosis en refuerzo o por sus dimensiones. En forma similar, Alfabdawi et al. [42 y Kim y cols. 9) reportaron un comportamiento similar entre elementos de control y los de concreto reforzado con fibras de PET.

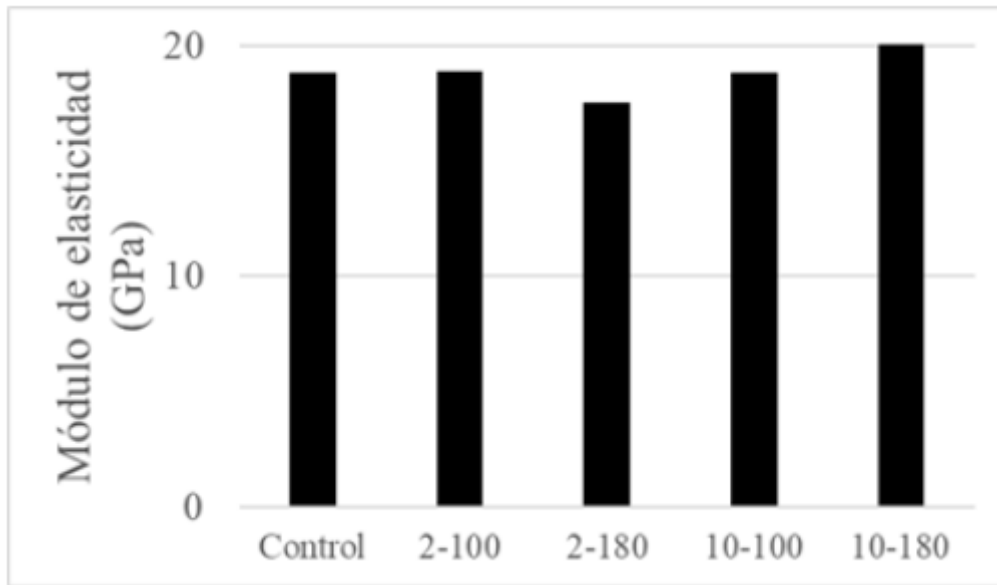


FIGURA 5.-

Módulo de elasticidad de los especímenes de concreto reforzado con fibras de PET reciclado y de control.

Tenacidad

La tenacidad se determinó mediante el área bajo la curva esfuerzo - deformación desde el inicio del gráfico hasta una deformación equivalente a tres veces la deformación correspondiente a la carga máxima, zona donde ocurre la falla del material. La Figura 6 muestra la zona representativa, donde ϵ_0 es la deformación correspondiente a la zona de falla y ϵ_3 es la deformación equivalente a tres veces la deformación a la zona de falla. La Figura 7 muestra la tenacidad a la compresión de los elementos de control (sin fibras) y el concreto reforzado con aros de PET reciclado.

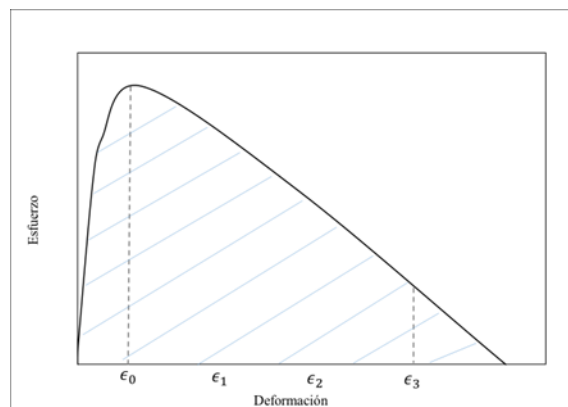


FIGURA 6.-

Representación de la zona de fractura y el cálculo de la tenacidad.

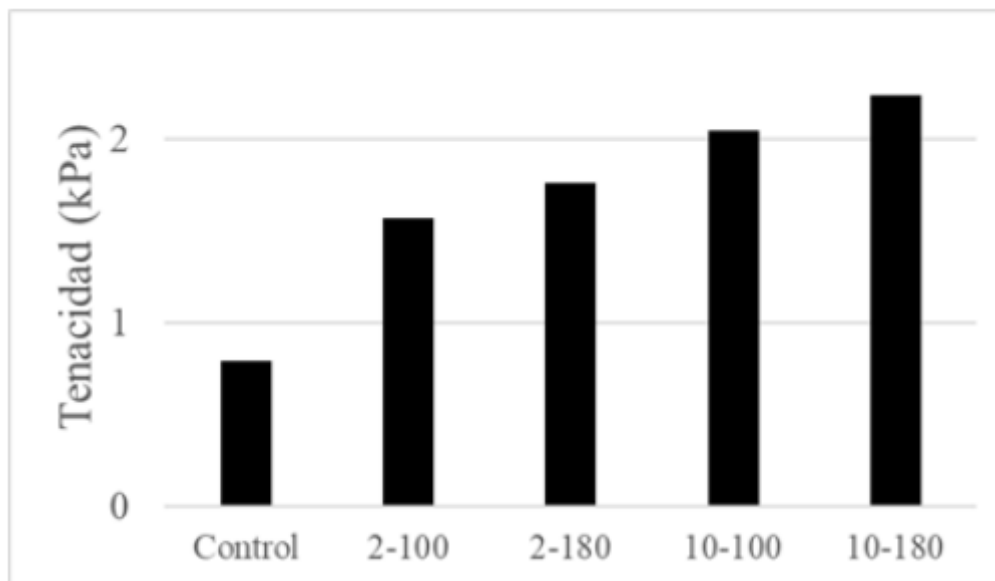


FIGURA 7.-

Tenacidad de los especímenes de concreto reforzado con fibras de PET reciclado y de control.

Los datos muestran un aumento significativo en la tenacidad del concreto reforzado con aros de PET respecto que el de control, con una diferencia mínima entre los especímenes 2 - 100 y control, donde 2 - 100 generó una tenacidad correspondiente a 2 veces la capacidad de la de control. Por otra parte, los elementos 10 - 180 superó en 2.8 veces la capacidad de los de control. En cuanto al efecto de la adición de diferentes dosis y tamaño de aros de PET al concreto, los datos muestran que la diferencia máxima fue de 30%, por lo que se puede afirmar que los cambios no representaron un cambio significativo en la capacidad de tenacidad.

Modos de falla

Los modos de falla típicos de los especímenes ensayados se muestran en la Figura 8. Se observaron cinco modos de falla: i.-explosión ii.- aplastamiento iii.-cono iv.- agrietamiento en diagonal v. agrietamiento vertical. Las muestras de control presentaron dos modos de falla (explosión y agrietamiento diagonal), mientras que los elementos de concreto reforzado con aros de PET fallaron por aplastamiento, cono, agrietamiento diagonal y agrietamiento vertical. El modo de falla según la teoría de falla de Mohr representa la tendencia del comportamiento, aquellos con falla angular (cono y agrietamiento angular) son susceptibles de colapsar por carga de corte; y aquellos con una fisura perpendicular son susceptibles de fallar ante la carga normal (aplastamiento y agrietamiento vertical). Por otro lado, la falla por explosión se observó solo en los elementos sin fibras, lo que indica que el concreto sin refuerzo tiende a tener una falla de manera frágil. Alsaif et al., (2019) y Nkomo, (2022) observaron esta misma tendencia, indicando que las muestras de control fallaron de manera frágil con una falla global repentina y explosiva. Por otro lado, las muestras con aro de PET demostraron una falla dúctil con un agrietamiento distribuido y más delgado. También, Nkomo et al., (2022) observó que la adición de fibras de PET recicladas aumenta la ductilidad del concreto.



FIGURA 8.-

Modos de falla de los especímenes de concreto reforzado con fibras de PET reciclado y de control.

Análisis estadístico

El estudio de los datos (resistencia máxima, módulo de elasticidad y tenacidad) fueron estudiados utilizando el software Minitab, considerando un diseño de experimentos factorial con dos variables (dosis y diámetro de los aros de PET) y dos niveles (2 y 10 kg/m³ y 100 y 180 mm, respectivamente). Los resultados indicaron que el efecto del cambio de dosis y diámetro de los aros de PET no tienen un efecto estadísticamente significativo (con un P valor mayor a 0.05) en las siguientes respuestas analizadas (resistencia máxima, módulo de elasticidad y tenacidad). Es importante denotar que el número de especímenes considerado en el estudio fue suficiente para llegar a una tendencia estadística.

Las Figuras 9, 10, y 11 muestran los gráficos de superficie de las respuestas atribuidas al cambio de dosis y diámetro de los elementos de refuerzo.

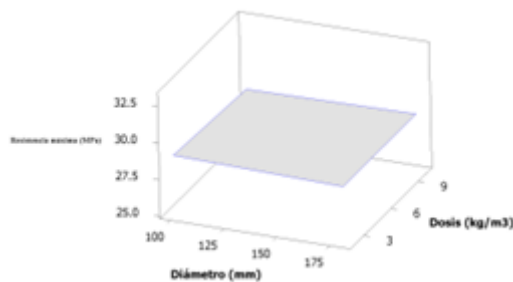


FIGURA 9.-

Gráfico de superficie resistencia máxima contra diámetro y dosis de aro de PET reciclado.

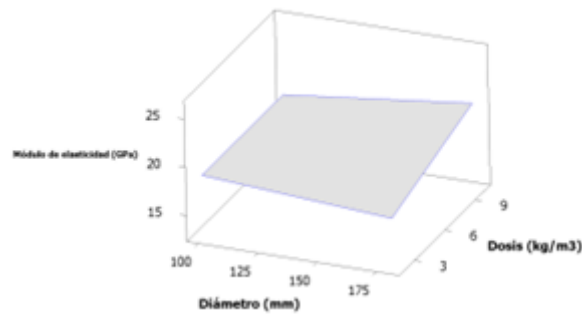


FIGURA 10.-

Gráfico de superficie módulo de elasticidad contra diámetro y dosis de aro de PET reciclado.

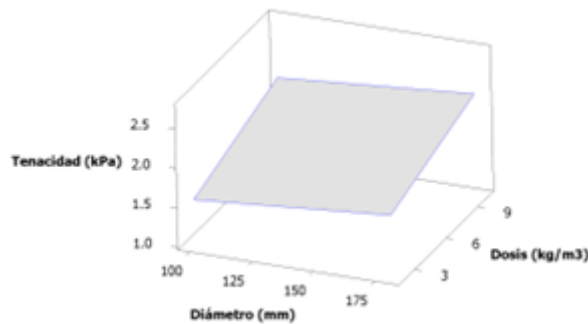


FIGURA 11.-

Gráfico de superficie tenacidad contra diámetro y dosis de aro de PET reciclado.

Conclusión

En la actualidad los desechos plásticos es un problema a nivel mundial que se incrementa día con día, con un material que por naturaleza tiende a ser no degradable. Considerando este efecto, se han desarrollado propuestas que sugieren el uso de materiales desechados como refuerzo del concreto y mejorar sus propiedades mecánicas. En este estudio se abordó la caracterización mecánica a compresión del concreto reforzado con aros de PET desechado. Los resultados indican que las probetas de concreto reforzado con aro de PET tuvieron una escasa reducción de la resistencia a la compresión última (con una diferencia promedio de 2%) en comparación con las de control (sin refuerzo), sin embargo, la ductilidad se vio aumentada en forma significativa, hasta 2.8 veces la capacidad que demostró los especímenes de control. Por otra parte, el cambio de dosis o de diámetro de aro de PET no mostró algún efecto significativo, hecho que se comprobó estadísticamente. Finalmente, se observaron cinco tipos de fallas diferentes en los especímenes ensayados, la tendencia observada indica que los elementos sin refuerzo tienden a una falla repentina, mientras que los aros de PET otorgaron ductilidad al concreto.

Agradecimientos

Se agradece al Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Aguascalientes y Conahcyt por su apoyo en la Investigación.

Referencias

- Adda H and Slimane M (2019) “Study of Concretes Reinforced by Plastic Fibers Based on Local Materials”, *Int J Eng Res Afr*, 2019, 42, 100-108.
- Albano C, Camacho N, Hernandez M and Matheus A, Gutierrez A (2009), “Influence of content and particle size of waste pet bottles on concrete behavior at different w/c ratios”, *Waste Manag*, 29, 2707–2716.
- Alfahdawi I H, Osman S A, Hamid R and Al-hadithi A I (2018), “Modulus of elasticity and ultrasonic pulse velocity of concrete containing polyethylene terephthalate (pet) waste heated to high temperature”, *J Eng Sci Technol*, 13-11, 3577-3592.
- Almeshal I, Tayeh BA, Alyousef R, Alabduljabbar H, Mustafa Mohamed A and Alaskar A (2020), “Use of recycled plastic as fine aggregate in cementitious composites: a review”, *Constr Build Mater*, 253.
- Alsaif A, Garcia R, Figueiredo FP, Neocleous K, Christofed A, Guadagninia M, Pilakoutas K (2019) “Fatigue performance of flexible steel fibre reinforced rubberised concrete pavements” *Engineering Structures* 193, 170–183.
- ASTM C150-07, “Standard Specification for Portland Cement.” ASTM International, 2007.
- ASTM C39/C39M (2018) “Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens”, ASTM International: West Conshohocken, PA, USA.
- Bahij S, Omary S, Feugeas F and Faqiri A (2020), “Fresh and hardened properties of concrete containing different forms of plastic waste – A review”, *Waste Manag*, 113, 157-175.
- Bencardino F, Rizzuti L, Spadea G and Swamy R (2008), “Stress-Strain Behavior of Steel Fiber-Reinforced Concrete in Compression”, *J Mater Civ Eng*, 20, 255–263.
- Borg R P, Baldacchino O and Ferrara L (2016) “Early age performance and mechanical characteristics of recycled PET fibre reinforced concrete”, *Const Build Mater*, 108, 29-47.
- De Silva S and Prasanthan T (2019), “Application of Recycled PET Fibers for Concrete Floors”, *Engineer*, 52-1, 21-27.
- Dutta S, Nadaf M and Mandal J (2016), “An Overview on the Use of Waste Plastic Bottles and Fly Ash in Civil Engineering Applications”, *Procedia Environ Sci*, 35, 681, 691.
- Editorial marine pollution bulletin (2008), “Plastic bottles and moral codes”, *Mar Pollut Bull*, 56, 163-165.
- Geyer R., Jambeck J R, Law K L (2017), “Production, use, and fate of all plastics ever made”, *Sci Adv*, 3, e1700782.
- Gholampour A and Ozbakkaloglu T (2018) “Fiber-reinforced concrete containing ultra-high-strength micro steel fibers under active confinement” *Construction and Building Materials* 187 299–306 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.042>
- Gu L and Ozbakkaloglu T (2016) “Use of recycled plastics in concrete: A critical review”, *Waste Manag*, 51, 19-42.
- Irwan J.M., Othman N, Koh H.B., Asyraf R.M. and Faisal S.K., Annas M.M.K. and Shahrizan A.M. (2013), “Development of Mix Design Nomograph for Polyethylene Terephthalate Fiber Concrete”, *Appl Mech Mater*, 253-255, 408-416.
- Kim J.H., Park C, Lee S, Lee S and Won J (2008), “Effects of the geometry of recycled PET fiber reinforcement on shrinkage cracking of cement-based composites”, *Compos Part B*, 39, 442-450.
- Lopez-Carreno R.D., Pujadas P, Cavalaro S.H. and Aguado A (2017), “Bond strength of whitetoppings and bonded overlays constructed with self-compacting high-performance concrete”, *Constr Build Mater*, 153, 835–845.
- Manaf A.F., Shahidan S, Shamsuddin S, Sharif N.F., Zuki S.S., Khalid F.S., Ali N and Azmi M.A. (2020), “Efficiency of Polyethylene Terephthalate (PET) Waste Fiber in Concrete Material by Means of Ultrasonic Velocity Method”, *Int J Eng Trend Tech*, 68-4, 18-24.
- Meza A and Ahmed F.U. (2020), “Anisotropy and bond behaviour of recycled Polyethylene terephthalate (PET) fibre as concrete reinforcement”, *Const Build Mater*, 265, 120331.
- Meza A and Siddique S (2019), “Effect of aspect ratio and dosage on the flexural response of FRC with recycled fiber”, *Const Build Mater*, 213, 286-291.

- Meza A, Pujadas P, Meza L.M., Pardo-Bosch F and López-Carreño R.D. (2021), “Mechanical Optimization of Concrete with Recycled PET Fibres Based on a Statistical-Experimental Study”, *Materials*, 14, 240.
- Modarres A and Hamed H (2014), “Effect of waste plastic bottles on the stiffness and fatigue properties of modified asphalt mixes”, *Mater Des*, 61, 8-15.
- Mohammed A and Mohammed I (2021) “Effect of Fiber Parameters on the Strength Properties of Concrete Reinforced with PET Waste Fibers”, *Iran J Sci Technol*, 45, 1493-1509.
- Niyomukiza J.B., Bitekateko A, Nsemrerirwe J, Kawiso B and Kiwanuka M (2021), “Investigating the effect of PET plastic bottle strips on the strength and compressibility properties of clayey soil”, *Int Conf Environ Sustainability Context*, 894, 012021.
- Nkomo N.Z., Masu L.M. and Nziu P.K. (2022), “Effects of Polyethylene Terephthalate Fibre Reinforcement on Mechanical Properties of Concrete”, *Adv Mater Sci Eng*, 2022, 4899298.
- NMX-C-128-ONNCCE. Determination of Modulus of Elasticity and Poisson Ratio; Ed. Mexico: Mexico City, Mexico, 2013.
- Plastic Europe. *Plastics-the Facts: An Analysis of European Plastics Production, Demand and Waste Data*. 2020. Available online: <https://www.plasticseurope.org/en/resources/market-data> (accessed on January 1, 2024).
- Rai B, Tabin Rushad S, Bhavesh K and Duggal S (2012) “Study of Waste Plastic Mix Concrete with Plasticizer”, *Int Scholarly Res Network*, 469272.
- Sadat-Shojai M and Bakhshandeh G (2011), “Recycling of PVC wastes”, *Polym Degrad Stab*, 96, 404–415.
- Shahidan S, Ranle N.A., Mohd Zuki S.S., Sheikh Khalid F, Ridzuan A.R.M. and Nazri F.M. (2018), “Concrete Incorporated with Optimum Percentages of Recycled Polyethylene Terephthalate (PET) Bottle Fiber”, *International Journal of Integrated Engineering*, 10-1, 1-8.
- Siddique R, Khatib J and Kaur I (2008), “Use of recycled plastic in concrete: A review”, *Waste Manag*, 28, 1835-1852.
- Siddiqui J and Pandey G (2013), “A review of plastic waste management strategies”, *Int Res J Environ Sci*, 2, 84–88.
- Siddiqui J and Pandey G (2013), “A review of plastic waste management strategies”, *Int Res J Environ Sci*, 2, 84–88.
- Signorini C and Volpini V (2021) “Mechanical Performance of Fiber Reinforced Cement Composites Including Fully-Recycled Plastic Fibers”, *Fibers*, 9, 16.
- Stephens SJ, Zangelmi E, Gettu R, Aguado A, VAISHNAV KUMAR S (2021) “Determination of the complete stress-strain response of concrete under uniaxial compression”. *The Indian Concrete Journal*.
- Umasabor R.I and Daniel S.C. (2020) “The effect of using polyethylene terephthalate as an additive on the flexural and compressive strength of concrete”, *Heliyon*, 6, e04700.
- Wang Z, Ma Z and Li L (2016), “Flow-induced crystallization of polymers: molecular and thermodynamic considerations”, *Macromolecules*, 49, 1505–1517.
- Won J.P., Jang C.I., Lee S.W., Lee S.J. and Kim H.Y. (2010), “Long-term performance of recycled PET fibre-reinforced cement composites”, *Const Build Mater*, 24, 660-665.
- Yin S, Tuladhar R, Collister T, Combe M, Sivakugan N and Deng Z (2015), “Post-cracking performance of recycled polypropylene fibre in concrete”, *Const Build Mater*, 101, 1069-1077.



Disponible en:

<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=94481870002>

Cómo citar el artículo

Número completo

Más información del artículo

Página de la revista en redalyc.org

Sistema de Información Científica Redalyc
Red de revistas científicas de Acceso Abierto diamante
Infraestructura abierta no comercial propiedad de la
academia

Alejandro Meza-de Luna, Rodolfo Benjamín Sierra-Ortiz,
Fernando Chávez-Valdivia, Rafael Reyes-Cortes

**Ingeniería Verde Mediante el Concreto Reforzado con
Fibras Recicladas de PET en Aro: Resistencia a
Compresión**

**Green Engineering Through Concrete Reinforced with
Recycled Ring PET Fibers: Compressive Strength**

Conciencia Tecnológica

núm. 67-B, p. 8 - 20, 2024

Instituto Tecnológico de Aguascalientes,

ISSN: 1405-5597