

Estudio del impacto del uso del PET-reciclado en concreto modificado sobre la resistencia a la flexión

Study of the impact of using recycled PET in modified concrete on flexural strength

DOI: <https://doi.org/10.32870/rvcs.v0i20.342>

ANA CECILIA ESPINDOLA FLORES

Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: 0000-0001-5525-3927

Correo electrónico: aespindolaf@ipn.mx

EDGAR ONOFRE BUSTAMANTE

Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: 0000-0002-5706-887X

Correo electrónico: eonofre@ipn.mx

Recepción: 13 de octubre de 2025. Aceptación: 5 de marzo de 2026.

RESUMEN

El incremento de población trae retos importantes como modernización en la infraestructura y mayor número de viviendas, entre otros. En este sentido, el material más utilizado para solucionar algunas de estas problemáticas es el concreto. Debido a que presenta excelentes propiedades: durabilidad, trabajabilidad, excelente resistencia a la compresión y a la flexión. Sin embargo, este material presenta grandes problemáticas ambientales; por ejemplo, la obtención del Clinker, es responsable del 8% de las emisiones de CO₂ a nivel mundial. La extracción de los agregados fino (arena) y grueso (grava) provoca la sobreexplotación de los recursos naturales, entre otros. Derivado de las problemáticas ambientales y mecánicas que presenta dicho material, es necesaria la búsqueda de materiales alternativos que ayuden a mitigar dichas problemáticas. Por lo tanto, se propone el uso del PET-reciclado como sustituyente parcial del agregado fino para la fabricación de concreto sustentable con mejores propiedades de resistencia a la flexión. Los resultados de resistencia a la flexión indican un incremento mayor al 30% del módulo de ruptura.

ABSTRACT

Population growth brings significant challenges, such as infrastructure modernization and a greater number of homes, among others. In this regard, concrete is the most widely used material to address some of these problems, due to its excellent properties: durability, workability, and excellent compressive and flexural strength. However, this material presents significant environmental problems. For example, clinker production is responsible for 8% of global CO₂ emissions. The extraction of fine (sand) and coarse (gravel) aggregates leads to the overexploitation of natural resources, among other issues. Due to the environmental and mechanical problems associated with concrete, it is necessary to find alternative materials that help mitigate these problems. Therefore, the use of recycled PET is proposed as a partial substitute for fine aggregate in the production of sustainable concrete with improved flexural strength. Flexural strength results indicate an increase of more than 30% in the rupture modulus. Finally, it was determined that the use of recycled PET contributes to reducing

Finalmente, se determinó que el uso de PET reciclado contribuye a la reducción de la explotación de los bancos de arena, así como a la disminución del impacto de la huella de carbono.

Palabras clave: concreto sustentable; módulo de ruptura; Polietilentereftalato, módulo de finura.

INTRODUCCIÓN

El ser humano siempre ha buscado su confort; en este sentido, los materiales poliméricos llegaron a facilitar muchas actividades como los embalajes, pero principalmente el embotellado de líquidos. Existen estadísticas que indican que se generan cerca de 722 mil toneladas de residuo sólido urbano (RSU) en el año 2017 en México, destacando entre uno de los residuos polímeros el PET, que representó casi la tercera parte del total de residuos, un equivalente a casi 9 mil millones de botellas de bebidas, y solo cerca del 20% de estos son reciclados (Legislatura, 2025) (Gobierno de México, SEMARNAT) (Ruiz, 2020). Sin embargo, no todo es negativo; México lidera en Latinoamérica la recolección y reciclaje de PET, ya que de las botellas producidas se logra recuperar de 54 a 56% (Legislatura, 2025). Otra problemática ambiental importante es la que genera la industria de la construcción, entre las que destaca la sobreexplotación de materiales como la arena y la grava, representando un problema de dimensiones incalculables. Estos materiales representan entre el 70% y el 80% de los materiales de extracción; el único recurso más explotado que la arena y la grava es el agua (Mo, 2020); (Alqahtani, 2021). La sobreexplotación de los bancos de arena es un problema tan grave que algunos ecosistemas fluviales están desapareciendo. Sin embargo, no podemos dejar de utilizar el concreto, debido a que es un material muy versátil, con excelentes propiedades a la compresión, pero deficiente resistencia a la flexión, consecuencia de ser un material cerámico. En este sentido, se convergen distintas problemáticas, pero a la vez se abre la oportunidad de utilizar materiales de desecho, como son las botellas de PET, para po-

the exploitation of sandbanks, as well as decreasing the impact of the carbon footprint.

Keywords: sustainable concrete; rupture modulus; Polyethyleneterephthalate, fineness modulus.

der impactar positivamente en reducir la extracción de arena, sustituyendo parcialmente por el PET. El PET, por ser un polímero termoplástico, tiene buenas propiedades mecánicas que ayudan a mejorar o incrementar las propiedades mecánicas del concreto, como la resistencia a la flexión. Debido a que el PET podría disipar la energía aplicada durante el ensayo, distribuyéndola de forma homogénea en la matriz del concreto, incrementando su resistencia a la flexión. Al incrementar la resistencia a la flexión, permitirá que las construcciones, en especial las carreteras, prolonguen su vida útil, retardando la aparición de patologías prematuras debido a los esfuerzos a los que son sometidas. En este sentido, se propone el uso del PET como sustitución parcial del agregado fino (arena) para mejorar la resistencia a la flexión y poder obtener un material que permita construir viviendas sostenibles, disminuir la huella de carbono y la sobreexplotación de los bancos de arena.

METODOLOGÍA

CLASIFICACIÓN DE POLIETILENTEREFTALATO (PET)

Se recolectaron botellas de PET de distintas marcas, tamaños, que se encontraban en las calles, basureros, casas habitación y principalmente de la campaña de separación de residuos que se encuentra implementada en CICATA-IPN, Unidad Altamira.

Posteriormente, se procedió a retirar la etiqueta, taparroasca y todo material que no pertenezca al PET y, con agua, se retiró el excedente interior de las botellas (figura 1). Después de tener las botellas limpias, se realizó una primera molienda,

utilizando un molino de cuchillas, marca Nelmor, modelo G810, fabricado por USA. Posteriormente, se realizó una segunda molienda en un molino tipo corte cizalla, marca Retsch, modelo SM2000, que se ubica en la empresa M&G Polímeros, Altamira, para obtener un tamaño de partícula homogéneo similar al del agregado fino (arena).

(PET-r) en proporciones de 2,5, 5 y 10% en peso por agregado fino (arena). El diseño contempla una relación a/c (agua/cemento) de 0.45 y una resistencia mecánica ($f'c$) de 40 MPa.

Tabla 1
Diseño de mezcla

Muestra	Componente de la mezcla Kg/m ³				
	Cemento	Agua	Grava	Área	PET-r
Testigo	395	180	952.8	861.3	0
PET-r2.5	395	180	952.8	839.76	21.53
PET-r5	395	180	952.8	818.23	43.06
PET-r10	395	180	952.8	775.17	86.13

Figura 1

a) Recolección, b) limpieza y c) corte de botellas de PET.



DISEÑO DE MEZCLA

Para la elaboración de las probetas se requirió del diseño de una mezcla como se muestra en la Tabla 1 y se siguió de acuerdo como lo describe el método del American Concrete Institute (ACI) (INTERNATIONAL, 2018). Se realizó la modificación del concreto sustituyendo PET reciclado

CARACTERIZACIÓN MECÁNICA

REVENIMIENTO

La prueba de revenimiento es el primer ensayo del concreto en la mezcla fresca, la cual indica la trabajabilidad, la fluidez y/o consistencia de la mezcla de acuerdo con las especificaciones técnicas que requiera el proyecto. La caracterización se realizó como lo marca la norma NMX-C-156-ONNCCE-2010 ([ONNCCE], 2010), “Determinación del revenimiento en el concreto fresco”. El resultado se expresa en centímetros (cm) y se debe aplicar a cada una de las diferentes mezclas utilizadas.

El revenimiento adecuado de la mezcla de concreto dependerá del tipo de aplicación; en la Tabla 2 se muestra la clasificación de acuerdo con la consistencia de la mezcla. En este caso es necesario contar con un revenimiento líquido que pueda ser suministrado por bombas de concreto a las estructuras.

Tabla 2
Clasificación del revenimiento

Consistencia	Revenimiento (cm)	Tolerancia (cm)
Seca (S)	0 – 2	0
Plástica (P)	3 – 5	±1
Blanda (B)	6 – 9	±1
Fluida (F)	10 – 15	±2
Líquida (L)	16 - 20	±2

RESISTENCIA A LA FLEXIÓN

Para la prueba de resistencia a la flexión, se utilizó como base la norma NMX-C-303-ONNCCE-2010 “Industria de la construcción-concreto-determinación de la resistencia a la flexión usando una viga simple con carga en el centro del claro” ([ONNCCE], 2010); se empleó una máquina universal (Figura 2) de acuerdo con la norma NMX-C-083-ONNCCE-2014 ([ONNCCE], 2014). La carga sobre las vigas se aplicó hasta la falla o ruptura. Los resultados de las vigas se reportarán en módulo de ruptura y se analizaron para determinar el efecto de la adición del PET-r sobre la resistencia a la flexión de las probetas.

Figura 2

Máquina universal sujeta a la norma NMX-C-083-ONNCCE-2014 ([ONNCCE], 2014).



RESULTADOS

MÓDULO DE FINURA (MF)

Para realizar el diseño de mezcla es necesario un análisis de granulometría que permitirá calcular el módulo de finura de los agregados (grueso y fino). En este sentido, se realizó el cálculo para el PET-r, para ser sustituido parcialmente por el agregado fino (arena); se muestran los resultados en la Tabla 3. La metodología se basó en la norma NMX-C-077-ONNCCE-2004, “Industria de la construcción-agregados para concreto-análisis granulométrico-método de ensayo” ([ONNCCE], 2019).

Tabla 3
Granulometría del PET-r triturado

Módulo de finura PET-r				
Malla mm (designación)	Peso retenido (gr)	% retenido	% acumulado	% que pasa
4	0.0	0	0	100
8	0.1	0.02	0.02	99.98
16	56.9	11.38	11.40	88.60
30	125.4	25.08	36.48	63.52
50	268.3	53.66	90.14	9.86
100	42.8	8.56	98.7	1.3
Charola	6.5	1.3	100	0
TOTAL	500	100	-	-

De acuerdo con los datos obtenidos, el módulo de finura para el PET-r triturado es:

$$MF = \frac{0.02+11.40+36.48+90.14+98.70}{100} = 2.3 \quad (\text{Ec. 1})$$

De acuerdo con lo descrito en la norma ASTM C33/C33M-18 (INTERNATIONAL, 2018), indica que un valor aceptado o recomendado debe estar entre 2.3 y 3.1. Por lo tanto, el módulo de finura determinado del PET-r (2.36) cumple con las características para poder ser sustituido parcialmente por el agregado fino, favoreciendo la distribución homogénea del PET-r en la matriz del concreto.

DISEÑO DE MEZCLA

En base al diseño de mezcla del testigo, se realizaron los diseños para el concreto modificado, sustituyendo en porcentaje peso de agregado fino (arena) por PET-r en 2,5, 5 y 10% en peso; se muestran las dosificaciones en la Tabla 4. Los diseños se etiquetaron de la siguiente forma: PET-r2,5, PET-r5 y PET-r10.

Tabla 4
Dosificación de los agregados

Muestra	Componente de la mezcla, peso en (kg) para un volumen de 35 litros, f'c 40 MPa				
	Cemento	Agua	Grava	Arena	PET
Testigo	14.18	6.4	33.81	29.90	0
PET-r2.5	14.18	6.4	33.81	29.15	0.747
PET-r5	14.18	6.4	33.81	28.40	1.495
PET-r10	14.18	6.4	33.81	26.91	2.99

A continuación se describe fotográficamente el procedimiento de la elaboración del concreto modificado (ver Figura 3).

Como se puede observar en la Figura 3, la integración del PET-r en el concreto fue homogénea (Figura 3f), donde no se observa aglomeración o una distribución heterogénea del PET-r. Este resultado podría tener una influencia positiva sobre las propiedades mecánicas del concreto modificado con la presencia del PET, ya que si no se hubiera distribuido de forma homogénea, la segregación del PET-r en un punto específico de la matriz del concreto, una vez que fragua,

Figura 3
Proceso de elaboración de concreto modificado para el diseño PET-r triturado



podría representar un defecto en la matriz del concreto que favorezca el crecimiento de una fractura prematura, disminuyendo la resistencia mecánica del mismo.

CARACTERIZACIÓN MECÁNICA

REVENIMIENTO

Los resultados obtenidos para cada diseño de mezcla se muestran en la Tabla 5. Donde se puede observar que los valores de revenimiento se encuentran entre 16 y 20 cm. Por lo tanto, basados en la Tabla 2 y de acuerdo con la norma NMX-C-156-ONNCCE-2010 ([ONNCCE], 2010), las mezclas pueden clasificarse como líquidas y de trabajabilidad aceptable para la aplicación de diseño. Es importante mencionar que, debido a la densidad del PET-r, se esperaba que el revenimiento fuera menor; sin embargo, se determinó que las partículas de PET-r no absorben agua o, por lo menos, no en grandes cantidades.

Tabla 5
Resultados de las pruebas de revenimiento

Muestra	Revenimiento (cm)	Clasificación
Testigo	19	Líquida (L)
PET-r2.5	18	Líquida (L)
PET-r5	17	Líquida (L)
PET-r10	16	Líquida (L)

ENSAYO DE RESISTENCIA A FLEXIÓN

Las vigas se elaboraron en moldes rectangulares con una dimensión de 500x150x150 mm; posteriormente se colocaron en una máquina universal de ensayos y se aplicó el método marcado en la norma NMX-C-303-ONNCCE-2004 ([ONNCCE], 2010). Los resultados se expresan como módulo de ruptura y se calculan a partir de la siguiente ecuación:

$$R = \frac{3PxL}{2bd^2} \quad (Ec 2.)$$

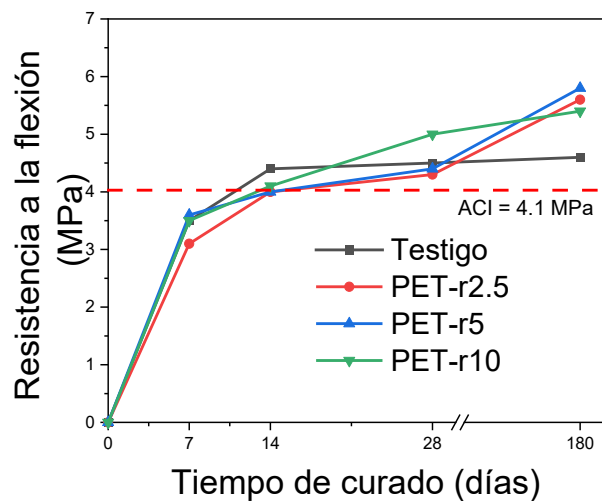
Donde:

- R, es el módulo de ruptura,
- P, es la carga máxima aplicada,
- L, la distancia entre apoyos,

- b, el ancho promedio del espécimen y
- d, es el peralte promedio del espécimen.

Los resultados de las pruebas de resistencia a la flexión fueron obtenidos en dos periodos de tiempo: el primer periodo de 7, 14 y 28 días y posteriormente 18 meses; los resultados obtenidos de la prueba a la flexión se muestran en la Figura 4.

Figura 4
Módulo de ruptura de las probetas modificadas PET-r a 7, 14, 28 y 180 días de curado.



De acuerdo a los resultados obtenidos, se observa que durante los primeros 28 días de curado la resistencia a la flexión no presenta un incremento tangible en el módulo de ruptura, excepto para la muestra PET-r10. Sin embargo, después de 180 días de curado, todas las muestras de concreto modificadas con PET-r, independientemente de la cantidad de PET-r utilizado, presentan un incremento tangible en el módulo de ruptura, mejorando la resistencia a la flexión comparada con la muestra referencia. No obstante, la muestra con resultados más prometedores es la muestra PET-r5, la cual presentó un incremento de ×30% mayor en comparación con la muestra de referencia.

Tabla 6
Tabla comparativa de resultados de resistencia a la flexión

Muestra	Geometría	Resistencia a la flexión (MPa)	% de incremento	Referencia
PET 5%	Partículas	5.7	30	Estudio actual
PET 5%	Partículas	4.7		(Nabajyoti Saikia, 2014)
PET 15%	Mezcla de partículas		14	(Mohammed, 2017)
PET 0.1%	Fibras 40 mm		48.53	(Qahar Mustafa Abdullah, 2022)
PET 1.5 %	Fibras 40 mm	7.37	24.7	(Azad A. Mohammed, 2023)

Los resultados obtenidos presentan un comportamiento de resistencia a la flexión superior al promedio de los reportados en la literatura, como se puede observar en la Tabla 6, donde se reportó un incremento superior del 48% y un mínimo del 14%, demostrando que los resultados reportados en este trabajo de investigación, que alcanzó el 30%, están por encima del promedio.

Es importante remarcar que, hasta los 180 días de curado de las muestras, se obtienen los mejores resultados. Esto se debe a que el PET no es un material absorbente de agua; sin embargo, podría impedir que las reacciones álcali-hidrólisis no se lleven a cabo a la velocidad normal y, por tanto, el proceso de fraguado disminuye, causando que la resistencia mecánica máxima se alcance después de 180 días de curado.

CONCLUSIONES

En este trabajo de investigación se sustituyó parcialmente el agregado fino en una mezcla de concreto por PET-r en diferentes proporciones con el objetivo principal de obtener un concreto verde con propiedades de resistencia a la flexión iguales o superiores al concreto estructural comercial. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

- A partir de una molienda en dos pasos se obtuvo un tamaño de partícula de PET-r homogéneo y con un módulo de finura aceptable para ser sustituido por el agregado fino (2,36),

lo que favoreció la distribución homogénea del PET-r en la matriz del concreto.

- Las muestras de concreto modificadas con PET-r en cualquiera de las proporciones utilizadas incrementaron la resistencia a la flexión después de 180 días de curado. Sin embargo, la muestra PET-r5 mostró un módulo de ruptura mayor, incrementando la resistencia a la flexión un 30% superior a la muestra de referencia (4,6 MPa) y un 41,5% superior al valor mínimo nominal de acuerdo con la normatividad aplicable para este tipo de concreto (4,1 MPa).
- La presencia del PET-r en la matriz de concreto facilitó la disipación de la energía aplicada durante el ensayo de resistencia a la flexión, provocando un incremento del módulo de ruptura de las muestras modificadas.

Finalmente, estos resultados confirman que el reciclaje de PET-r es una alternativa prometedora para producir concreto verde con excelentes propiedades mecánicas para ser aplicado en la industria de la construcción, reduciendo los costos de extracción, el uso de recursos naturales no renovables y contribuyendo en la disminución de la huella de carbono.

REFERENCIAS

- Alqahtani, F.K., Zafar, I., 2021. Plastic-based sustainable synthetic aggregate in Green Ligh-

- twilight concrete – a review. *Construct. Build. Mater.* 292, 123321 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123321>.
- ASTM INTERNATIONAL. ASTM C33/C33M-18 Standard Specification for Concrete Aggregates, 2018.
- Azad A. Mohammed, Sarkawt H. Karim. Impact strength and mechanical properties of high strength concrete containing PET waste fiber. *Journal of Building Engineering.* Volume 68, 2023, 106195. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106195>
- Azad A. Mohammed. Flexural behavior and analysis of reinforced concrete beams made of recycled PET waste concrete. *Construction and Building Materials.* Volume 155, 2017, p. 593-604. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.096>
- De Medio Ambiente y Recursos Naturales, S. (n.d.). *Residuos sólidos urbanos (RSU)*, gob.mx. <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/residuos-solidos-urbanos-rsu>
- En México, 90 millones de botellas de plástico de refrescos y agua son lanzadas a la vía pública, ríos y mares (13 de abril de 2017). *Cámara de Diputados, H. Congreso de la Unión*. <http://www5.diputados.gob.mx/index.php/esl/Comunicacion/Boletines/2017/Abril/13/3469-En-Mexico-90-millones-de-botellas-de-plastico-de-refrescos-y-agua-son-lanzados-a-la-via-publica-rios-y-mares>
- Mo, K.H., Thomas, B.S., Yap, S.P., Abutaha, F., Tan, C.G., 2020. *Viability of agricultural wastes as substitute of natural aggregate in concrete: A review on the durability related properties*. *J. Clean. Prod.* 275, 123062 <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123062>
- Nabajyoti Saikia, Jorge de Brito. Mechanical properties and abrasion behaviour of concrete containing shredded PET bottle waste as a partial substitution of natural aggregate. *Construction and Building Materials.* Volume 52, 2014, p. 236-244. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.049>
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación [ONNCCE]. NMX-C-156-ONNCCE-2010. Industria de la construcción - Concreto hidráulico - Determinación del revenimiento en el concreto fresco.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación [ONNCCE]. NMX-C-303-ONNCCE-2010. Industria de la Construcción - Concreto Hidráulico - Determinación de la Resistencia a la Flexión Usando una Viga Simple con Carga en el Centro del Claro.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación [ONNCCE]. NMX-C-083-ONNCCE-2014. Industria de la construcción - Concreto - Determinación de la resistencia a la compresión de cilindros de concreto.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación [ONNCCE]. NMX-C-077-ONNCCE-2019. Industria de la construcción - agregados para concreto - análisis granulométrico - método de prueba.
- Qahar Mustafa Abdullah, James H. Haido. Response of hybrid concrete incorporating eco-friendly waste PET fiber: Experimental and analytical investigations. *Construction and Building Materials.* Volume 354, 2022, 129071. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129071>
- Ruiz, J. L. R., Hernández, C. G. C., López, R. C. & Hernández, R. N. (2020). Diseño de un sistema autoconstructivo a base de tapial y bahareque de bajo costo e impacto ambiental para una vivienda. *Tópicos de Investigación en Ciencias de la Tierra Y Materiales*, 7(7), p. 68-78. <https://doi.org/10.29057/aactm.v7i7.6207>

Financiamiento.

La presente investigación no recibió financiamiento específico.

Conflicto de interés.

Los autores declaran no tener conflictos de interés en relación con la investigación, la autoría y/o la publicación del presente artículo.

Uso de inteligencia artificial.

Los autores declaran que no se utilizaron herramientas de inteligencia artificial generativa en la elaboración del manuscrito o, en su caso, que su uso se limitó exclusivamente al apoyo lingüístico y de redacción, manteniendo en todo momento la responsabilidad sobre el contenido y las conclusiones del trabajo.

Contribución de autoría.

Los autores participaron en la conceptualización, desarrollo, análisis y redacción del manuscrito, de conformidad con los principios de la taxonomía CRediT (Contributor Roles Taxonomy), y aprobaron la versión final para su publicación.