



Modificación de propiedades mecánicas del concreto permeable adicionado con residuos de PET y macrofibras sintéticas

Modification of mechanical properties of permeable concrete with PET waste and synthetic macrofiber additives

Gómez-Valdovinos María Guadalupe

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México
Facultad de Ingeniería Civil
Correo: maria.valdovinos@umich.mx
<https://orcid.org/0009-0007-5468-286X>

Martínez-Molina Wilfrido

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México
Facultad de Ingeniería Civil
Correo: wilfrido.martinez@umich.mx
<https://orcid.org/0000-0002-3301-4949>

Muciño-Vélez Alberto

Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Arquitectura,
Centro de Investigaciones en Arquitectura, Urbanismo y Paisaje
Correo: amucino@unam.mx
<https://orcid.org/0000-0002-6386-0249>

Alonso-Guzmán Elia Mercedes

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México
Facultad de Ingeniería Civil
Correo: elia.alonso@umich.mx
<https://orcid.org/0000-0002-8502-4313>

Chávez-García Hugo Luis

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México
Facultad de Ingeniería Civil
Correo: luis.chavez@umich.mx
<https://orcid.org/0000-0002-6114-4900>

Sánchez-Calvillo Adriá

Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología
Correo: adria.sanchez@umich.mx
<https://orcid.org/0000-0002-3653-8000>

Arreola-Sánchez Mauricio

Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología
Correo: mauricio.arreola@umich.mx
<https://orcid.org/0000-0002-4105-5281>

Navarrete-Seras Marco Antonio

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México
Facultad de Ingeniería Civil
Correo: mnavarrete@umich.mx
<https://orcid.org/0000-0002-4582-9387>

Borrego-Pérez Jorge Alberto

Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología
Correo: jorge.borrego@umich.mx
<https://orcid.org/0000-0001-6302-1958>

Cervantes-Servín Adrián Ixcoatl

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México
Facultad de Ingeniería Civil
Correo: adrian.ixcoatl.cervantes.servin@umich.mx
<https://orcid.org/0000-0002-5649-4199>

Pacheco-Segovia Jorge Alberto

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México
Facultad de Ingeniería Civil
Correo: jorge.pacheco@umich.mx
<https://orcid.org/0009-0004-1160-2688>

Resumen

El concreto permeable inició su desarrollo a finales del siglo XIX en el Reino Unido. Se piensa en su utilización cuando: a) no existe drenaje pluvial para recolectar agua de lluvia, b) cuando se desea recargar el manto freático. Debido a que el concreto permeable no presenta una alta resistencia mecánica, su uso se restringe para pavimentos rígidos o semirrígidos, ya sea de carga moderada o peatonal. La presente investigación propone el diseño de un concreto permeable con la adición de residuos sólidos de Tereftalato de Polietileno, y macrofibras de polipropileno comparando sus propiedades con una mezcla control sin adiciones. Se elaboraron tres mezclas con las mismas cantidades de cemento, agregados y 6 ml de aditivo inclusor de aire: la primera siendo la mezcla control (TP-6), la segunda mezcla incorporó un 0.08 % de PET respecto a la masa (TP6-PET), y la tercera con un 0.08 % de macrofibras respecto a la masa (TP6-M). Los concretos fueron caracterizados mediante diversos métodos de ensayo, determinando el contenido de vacíos y densidad, resistividad eléctrica, frecuencia de resonancia, compresión simple, tensión indirecta y flexión en vigas. Se obtuvo una mejor respuesta ante sollicitaciones mecánicas por parte de las mezclas adicionadas tanto con PET como con macrofibras; por lo tanto, el refuerzo permite incrementar la vida útil, durabilidad y comportamiento mecánico en los concretos adicionados. Se observó que la resistividad eléctrica es difícilmente una prueba representativa del concreto permeable por las dificultades que se presentan al aplicar el método de ensayo en un concreto con elevada porosidad.

Descriptores: Permeabilidad, refuerzo, porosidad, sostenibilidad, reciclaje, durabilidad.

Abstract

Pervious concrete began its development at the end of the 19th century in the United Kingdom. Its use is thought of when: a) there is no storm drainage to collect rainwater, b) when it is desired to recharge the water table. Because pervious concrete does not exhibit high mechanical strength, its use is restricted to rigid or semi-rigid pavements, whether moderately loaded or pedestrian. The present research proposes the design of a permeable concrete with the addition of solid waste of Polyethylene Terephthalate and polypropylene macrofibers, comparing its properties with a control mixture without additions. Three mixtures were made with the same amounts of cement, aggregates and 6 ml of air-inclusive additive: the first being the control mixture (TP-6), the second mixture incorporated 0.08 % PET with respect to mass (TP6-PET), and the third with 0.08 % macrofibers with respect to mass (TP6-M). The concretes were characterized by various test methods, determining the void and density content, electrical resistivity, resonant frequency, simple compression, indirect stress and bending in beams. A better response to mechanical stresses was obtained by the mixtures added with both PET and macrofibers; therefore, the reinforcement allows to increase the useful life, durability and mechanical behavior of the added concretes. It was observed that electrical resistivity is hardly a representative test of permeable concrete due to the difficulties encountered when applying the test method to a concrete with high porosity.

Keywords: Permeability, reinforce, porosity, sustainability, recycle, durability.

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, los problemas generados por inundaciones en el planeta han sido tan graves que la UNESCO las declaró el desastre más dañino y peligroso en la Tierra, destacando que, de los desastres existentes relacionados con el agua, 50 % corresponde a inundaciones, incluso arriba de hambrunas, epidemias y sequías (Hernández *et al.*, 2017). En el contexto nacional, de acuerdo con la revista Forbes México, los fuertes aluviones llegan a generar pérdidas de 230 millones de dólares (mdd) cada año en el país, y alrededor de 22 millones de personas están expuestas a desastres causados por inundaciones (Forbes, 2017).

Una de las causas principales que da origen a este problema es el crecimiento urbano que elimina la vegetación en zonas de asentamiento humano y sella las tierras naturales, dando origen a la necesidad de políticas que busquen la implementación de infraestructura respetuosa con el medio ambiente para poder mitigar las inundaciones (De Sales *et al.*, 2022).

Lo anterior ha dado paso a una extensa investigación en el área de materiales para pavimentos, resaltando el caso del concreto permeable, que se presenta como una solución para desalojar el agua pluvial en las zonas urbanas de manera rápida y eficiente, resolviendo el problema que se origina debido a que muchas ciudades no cuentan con drenaje pluvial y las escorrentías son por gravedad. Pese a que los concretos porosos no son desarrollos recientes, encontrando los primeros antecedentes en el año 1852 en áreas residenciales del Reino Unido (Adresi *et al.*, 2023); las problemáticas hídricas más recientes han propiciado un mayor progreso y estandarización de estas tecnologías.

Otra área de impacto con la que está relacionada este material es la recarga de mantos acuíferos. Hay sobre-explotación para abastecer de agua potable al 50 % de la población mundial; más de 2,500 millones de personas utilizan exclusivamente las aguas subterráneas para satisfacer sus necesidades básicas diarias de agua (Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental, 2017). A la explotación del agua freática también está asociado el hundimiento del Nivel de Piso Terminado (NPT) con sus consiguientes daños en las edificaciones.

El concreto permeable está siendo ampliamente estudiado por sus beneficios ambientales, se ha demostrado que ayuda a combatir el efecto de la isla de calor, mientras actúa como un sistema de drenaje y devuelve agua a los mantos freáticos (Rangelov *et al.*, 2016); además, puede llegar a disminuir la contaminación por escorrentía, pues su porosidad da como resultado una alta superficie específica que beneficia la biodegrada-

ción de los contaminantes que se puedan adherir a ella durante la infiltración del agua pluvial (Wu *et al.*, 2022).

La producción bibliográfica en los últimos años acerca de los concretos permeables ha sido relevante, con un crecimiento exponencial en cuanto a las publicaciones anuales y el número de citas (Singer *et al.*, 2022). El análisis bibliométrico de las palabras clave efectuado por Adresi *et al.* (2023) muestra como estos concretos y pavimentos cada vez están más ligados a conceptos como la sostenibilidad, la economía circular, las infraestructuras verdes o el efecto de las islas de calor urbanas.

En cuanto a sus características, el concreto permeable se distingue por un volumen relativamente alto de poros conectados, en el rango de 15 % a 30 %, y cuya permeabilidad al agua es de aproximadamente 2 a 6 mm/s (Zhong *et al.*, 2018). Estos porcentajes de poros y permeabilidad se logran, principalmente, controlando la granulometría de los agregados gruesos o eliminando el agregado fino; pero también interviene en ello la relación agua-cemento (*a/c*) y el contenido de pasta de cemento (Seifeddine *et al.*, 2023).

Cuanto más poroso sea un concreto, sus propiedades de permeabilidad a los líquidos y el aislamiento acústico o térmico, se incrementan; sin embargo, sus propiedades mecánicas se reducen considerablemente debido a las discontinuidades (Park *et al.*, 2022). Dentro de las propiedades mecánicas de este material, los estudios realizados indican que al utilizar los modelos de correlación existentes para concreto convencional en concreto permeable, no puede predecirse la resistencia a tracción a partir de la resistencia a compresión, mientras que la correlación entre la compresión y la resistencia a la flexión es casi la misma en ambos tipos de concreto (Seifeddine *et al.*, 2022).

La resistencia mecánica entonces dirige a estos materiales a usos mínimos de carga vertical, como son los casos de carriles de bicicletas, aceras para peatones, estacionamientos de vehículos, plazas públicas, áreas ajardinadas, pavimentos en áreas de fuentes, etc. (Rangelov *et al.*, 2016).

Como varias investigaciones han señalado su buen comportamiento ante cargas bajas de tránsito cuando se aplica como capa de rodadura en pavimento (Latif *et al.*, 2023), el número de investigaciones sobre pavimento permeables aumentó un 53 % de 2013 a 2020 (Singer *et al.*, 2022), sin embargo, una investigación extensa realizada en The Hong Kong Polytechnic University concluyó que aún quedan muchas lagunas de conocimiento en torno a este material, destacando que es necesario seguir investigando para disminuir esas lagunas y poder ampliar su aplicación (Zhong *et al.*, 2018; Adresi *et al.*, 2023)

En otro orden de ideas, el PET es uno de los residuos sólidos de mayor generación, alcanzando un poco más de un millón de toneladas al año en México (SEMARNAT, 2020), su acumulación excesiva afecta al medio ambiente. México es de los mayores recicladores de PET, se puede presumir de un 56 % de acopio y reciclaje, consolidándose como líder en América Latina y Norteamérica con una tasa de reciclaje de este plástico casi al nivel del de Estados Unidos (El Universal, 2019). Aún con lo anterior, queda un largo camino por recorrer si se quiere atender el llamado de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) para lograr un futuro mejor y más sostenible.

Existen investigaciones sobre la incorporación de diferentes tipos de fibras a la matriz cementante del concreto permeable para incrementar sus prestaciones que reportan una mejora en la resistencia a la tracción y a la flexión (Ahmed *et al.*, 2019); incluso hay estudios sobre la utilización de humo de sílice como reemplazo de un porcentaje de cemento que dan estos mismos resultados (Liu *et al.*, 2019). Relacionando las oportunidades de desarrollo antes descritas, con los ODS adoptados por la Asamblea General de la ONU para la Agenda 2030, se buscó no solo emplear fibras de refuerzo específicas para tales fines, sino que se inquirió experimentar qué residuos pueden dar las prestaciones de las fibras, abatiendo la necesidad de espacios para acumulación de residuos y minimizando el gasto por transporte si se adquirirían de otro origen.

Se experimentó con distintas fibras de otros residuos. La mejor respuesta para incrementar la resistencia de la matriz cementante fueron las fibras de PET (Gómez, 2022). Estas fibras fueron procesadas por el equipo de trabajo del Laboratorio de Materiales "Ing. Luis Silva Ruelas" de la Facultad de Ingeniería Civil de la UMSNH después de campañas de recaudación de botellas desechables.

También se elaboró una mezcla adicionada con macrofibras sintéticas de polipropileno para hacer una comparación de las prestaciones mecánicas de un concreto permeable adicionado con macrofibras contra otro adicionado con PET, respecto a un concreto sin adición (mezcla control o testigo).

Esta investigación busca generar un futuro impacto en varios objetivos, como la recarga de los mantos freáticos y la mitigación de inundaciones en zonas rurales. Sin embargo, este trabajo también busca resolver lo relativo a la acumulación de residuos sólidos e innovar en el diseño de matrices cementantes reforzadas con fibras de PET, contribuyendo a un modelo de economía circular en la edificación.

DESARROLLO

MATERIALES

Los materiales utilizados para la elaboración de las diferentes mezclas fueron:

- Cemento: el cemento fue un CPC 30 R RS (Cemento Portland Compuesto clase resistente 30 MPa, resistencia Rápida y Resistencia a Sulfatos) bajo la norma mexicana NMX C-414-ONNCCE-2017 (ONNCCE, 2017), y la norma ASTM C150/150M-22 (ASTM, 2022a).
- Agregado: se utilizó únicamente agregado grueso de origen natural basáltico que corresponde a una grava triturada con tamaños de partícula entre $\frac{3}{4}$ " (19 mm) y malla No. 4, 4.76 mm. El uso de agregado natural o triturado no influye significativamente en la resistencia a compresión de un concreto permeable (Mulyono & Anisah, 2018), por ello se utilizó el de mayor disponibilidad en la región.
- Aditivo: HPA-AIR-CRETE-SR® inductor de aire de resina sintética formulado a base de tensoactivos sintéticos, clasificados en el Tipo A: aditivos reductores de agua, según las normas ASTM C494/C494M-17 (ASTM, 2017a) y NMX C-494-ONNCCE (ONNCCE, 2014).
- Tereftalato de polietileno (PET): molido en hojuelas con más de 70 % de material que pasa la malla No. 4, 4.76 mm y se retiene en la malla No. 8, 2.38 mm.
- Macrofibras sintéticas estructurales® de polipropileno para concreto con un tamaño medio de 2 cm de largo, 0.5 mm de ancho y 0.19 mm de espesor (Figura 1).

MÉTODOS: DISEÑO DE MEZCLAS, PROPORCIONAMIENTO Y ELABORACIÓN DE LOS ESPECÍMENES

Para el proporcionamiento de las 3 mezclas se utilizó como guía el ejemplo de diseño para un concreto hidráulico sin revenimiento que se encuentra en la norma ACI 211.3, Standard Practice for Selecting Proportions for no-Slump Concrete (ACI, 2002), pero siguiendo los parámetros de resistencia mecánica presentados en el Report on Pervious Concrete, también del ACI (American Concrete Institution) (ACI, 2010).

Se elaboraron 3 mezclas diferentes, utilizando las dosificaciones que se encuentran en la Tabla 1, y una relación agua-cemento en masa de 0.4 por criterios de durabilidad (Martínez *et al.*, 2015). La mezcla control es denominada TP-6, elaborada con 6 ml de aditivo inductor de aire por cada kg de cemento. Después se preparó una segunda mezcla adicionada con la misma cantidad de aditivo inductor de aire, pero agregando un 0.08 %



Figura 1. Materiales utilizados en la elaboración de las diferentes mezclas: a) Grava basáltica, b) PET triturado en hojuelas, c) Cemento y d) Macrofibras sintéticas

Tabla 1. Dosificación de materiales de las mezclas elaboradas

Mezcla	Cemento (kg/m ³)	Grava (kg/m ³)	Agua (kg/m ³)	Aditivo (ml/m ³)	PET (kg/m ³)	Macrofibras (kg/m ³)
TP-6	271.423	1658.250	133.776	1628.538	-	-
TP-6-PET	271.423	1658.250	133.776	1628.538	1.651	-
TP-6-M	271.423	1658.250	133.776	1628.538	-	1.651

de PET en forma de hojuelas, respecto al peso total de la mezcla, incluida el agua, grava y cemento; ésta fue llamada TP-6-PET. Por último, se hizo la mezcla denominada TP-6-M con la misma cantidad de aditivo inductor de aire y una adición de 0.08 % de macrofibras, también respecto a la masa total de la mezcla.

Las mezclas se elaboraron de manera mecánica utilizando revolvedora en condiciones de laboratorio. Para el mezclado se integraron, primero el agregado pétreo con el cemento en la revolvedora, y posteriormente se fue adicionando el agua en forma gradual, para obtener una mezcla trabajable.

Se colaron los especímenes necesarios para las pruebas. Se elaboraron 3 tipos de especímenes: cilindros de Ø 15 cm x h 30 cm, cilindros de Ø 10 cm x h 20 cm y vigas de 15 x 15 x 60 cm³. Los especímenes se descimbraron a las 48 horas, para después ser sometidos a un proceso de curado por inmersión antes de los ensayos. Las pruebas se realizaron a edades de 90, 120 y 180 días.

EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS

Para evaluar el comportamiento y adecuación de las distintas mezclas se emplearon los siguientes métodos de ensayo: determinación del contenido de vacíos y densidad, resistividad eléctrica, frecuencia de resonancia, compresión simple uniaxial, tensión indirecta, flexión y módulo de ruptura. La aplicación de estas

pruebas destructivas y no destructivas permitió obtener las propiedades físicas y mecánicas de los concretos permeables diseñados.

Para conocer la relación de vacíos y la densidad, se llevó a cabo el método de prueba propuesto en la norma ASTM C 1754/C1754M-20 (ASTM, 2012) para especímenes cilíndricos.

La resistividad eléctrica se cuantificó de acuerdo con la norma mexicana NMX-C-514-ONNCCE-2019 (ONNCCE, 2019c), y la norma estadounidense ASTM C1876-19 (ASTM, 2019a). Se utilizaron especímenes cilíndricos.

Se realizaron pruebas de frecuencia de resonancia en probetas prismáticas de 15cm x 15cm x 60cm según la norma NMX-C-089-ONNCCE-2019 (ONNCCE, 2019b), así como la norma ASTM C215-19 (ASTM, 2019b), permitiendo encontrar el módulo de elasticidad dinámico.

Para determinar la resistencia a compresión simple de las mezclas diseñadas se utilizaron especímenes cilíndricos siguiendo los procedimientos y especificaciones dictadas en la norma NMX-C-083-ONNCCE-2014 (ONNCCE, 2014); la referencia internacional es la norma ASTM C39/C39M-21 (ASTM, 2021).

La resistencia a la tensión indirecta se obtuvo de los especímenes cilíndricos. Su determinación se basó en el método de tensión por compresión diametral dictado en la norma mexicana NMX-C-163-ONNCCE-2019

(ONNCCE, 2019a) y ASTM C496/C496M-17 (ASTM, 2017b).

Este parámetro se obtuvo del método de tres puntos usando una viga simple con carga en los tercios del claro según la norma NMX-C-191-ONNCCE-2015 (ONNCCE, 2015), y la norma ASTM C78/C78M-22 (ASTM, 2022b).

DISCUSIONES Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación, se muestran los resultados de la campaña experimental y las propiedades obtenidas para la mezcla control y los concretos permeables con adiciones; los datos obtenidos resultaron del promedio de tres cuantificaciones para cada una de las pruebas realizadas. Las Tablas 2, 3 y 4 exponen los resultados promedio de resistividad eléctrica (Re), módulo de elasticidad dinámico (Ed), resistencia a compresión

simple ($f'c$), tensión indirecta (ft) y módulo de ruptura (Mr); así como la desviación estándar (σ) y el coeficiente de variación (C_v) obtenidos para cada ensayo.

En la Figura 2 se aprecia que la distribución de la pasta cementante es diferente en cada una de las mezclas. Puede observarse cómo la mezcla testigo muestra una menor cantidad de pasta de cemento cubriendo las partículas, lo que se traduce en una menor resistencia cohesiva entre sus elementos y una densidad más baja. El concreto permeable presenta menor área de contacto entre la matriz y los geomateriales, la cohesión disminuye como una función del tamaño de los poros y de los agregados. También puede apreciarse cómo la incorporación del PET y de las macrofibras modificó la consistencia y distribución de la lechada. En las Figuras 2b y 2c la cantidad de pasta cementante que cubre a la probeta es mayor que la que se alcanza a apreciar en la Figura 2a.

Tabla 2. Resumen de resultados, desviación estándar (σ) y coeficiente de variación (C_v) de los ensayos realizados a la edad de 90 días

Ensayo	TP-6	C_v (%)	TP-6-PET	C_v (%)	TP-6-M	C_v (%)
Re (k Ω -cm)	27.72 \pm 4.92	18	22.37 \pm 4.97	22	21.76 \pm 1.33	6
Ed (kgf/cm ²)	243587 \pm 22619	9	233878 \pm 51488	22	157122 \pm 11828	8
$f'c$ (kgf/cm ²)	56.46 \pm 17.22	30	56.22 \pm 12.54	22	68.80 \pm 10.49	15
ft (kgf/cm ²)	7.95 \pm 5.45	69	18.29 \pm 6.56	36	11.96 \pm 3.74	31
Mr (kgf/cm ²)	19.94 \pm 3.28	16	18.48 \pm 3.14	17	34.07 \pm 3.40	10

Tabla 3. Resumen de resultados, desviación estándar (σ) y coeficiente de variación (C_v) de los ensayos realizados a la edad de 120 días

Ensayo	TP-6	C_v (%)	TP-6-PET	C_v (%)	TP-6-M	C_v (%)
Re (k Ω -cm)	26.05 \pm 8.00	31	23.31 \pm 4.86	21	29.01 \pm 5.38	19
Ed (kgf/cm ²)	198374 \pm 10524	5	182632 \pm 55751	31	162272 \pm 56148	35
$f'c$ (kgf/cm ²)	59.85 \pm 17.75	30	74.16 \pm 12.12	16	61.57 \pm 7.60	13
ft (kgf/cm ²)	12.08 \pm 2.43	20	22.62 \pm 2.07	9	16.57 \pm 4.00	24
Mr (kgf/cm ²)	13.10 \pm 0.23	2	15.50 \pm 4.37	28	12.71 \pm 6.91	54

Tabla 4. Resumen de resultados, desviación estándar (σ) y coeficiente de variación (C_v) de los ensayos realizados a la edad de 180 días

Ensayo	TP-6	C_v (%)	TP-6-PET	C_v (%)	TP-6-M	C_v (%)
Re (k Ω -cm)	20.23 \pm 5.39	27	24.42 \pm 2.90	12	25.30 \pm 2.53	10
Ed (kgf/cm ²)	196876 \pm 4084	2	175837 \pm 5870	3	107596 \pm 3100	3
$f'c$ (kgf/cm ²)	47.21 \pm 13.36	28	75.94 \pm 12.59	17	68.69 \pm 21.71	32
ft (kgf/cm ²)	11.41 \pm 1.19	10	13.27 \pm 4.59	35	17.14 \pm 0.32	2
Mr (kgf/cm ²)	17.83 \pm 0.27	2	14.63 \pm 0.25	2	6.23 \pm 0.99	14



Figura 2. Distribución de pasta cementante en las diferentes mezclas: a) Mezcla TP-6, b) Mezcla TP-6-PET, c) Mezcla TP-6-M

La Tabla 5 presenta los datos del contenido de vacíos y de la densidad. La densidad se incrementó en las mezclas adicionadas con fibras. Para la mezcla con PET, la densidad se incrementó en un 4.35 % respecto a la mezcla control, mientras que en la adicionada con macrofibra aumentó un 9.78 %. Es imperante resaltar que el aumento de la densidad no comprometió la permeabilidad en el material, la cual se siguió conservando en las mezclas con mayor densidad, porque al modificarse la distribución de lechada en las mezclas adicionadas (como ya se mencionó) la distribución de la porosidad en ella también mejoró.

Tabla 5. Porcentaje de vacíos y densidad de las mezclas elaboradas

Mezcla	% vacíos	Densidad (kg/m ³)
TP-6	32.55	1822.40
TP-6-PET	37.76	1901.60
TP-6-M	44.77	2000.54

Los resultados de resistividad eléctrica se encuentran en la Figura 3a. Aunque a la edad de 90 días, la mezcla control tiene una mayor resistividad eléctrica, la tendencia de resultados en esta mezcla es descendente, mientras que en las dos mezclas adicionadas es ascendente. Por lo tanto, a la edad de 180 días, las mezclas TP-6-PET y TP-6-M tienen una resistividad eléctrica de 20.71 % y 25.06 % más alta que la mezcla TP-6, respectivamente.

Los valores encontrados en esta prueba, están en un rango de 20 a 30 kΩ-cm, que, aunque ciertamente están en un rango bajo indicando porosidad interconectada de consideración, se esperaban valores en un rango mucho menor, debido a que los poros presentes en el concreto son de tamaño macro. Es muy probable que, como se tiene muy poca matriz cementante cubriendo los agregados, la corriente eléctrica esté viajando a través de las partículas de grava, entregando al final de la prueba una resistividad eléctrica correspondiente al material pétreo utilizado, y no una resistividad eléctrica representativa del concreto permeable elaborado.

Con la prueba de frecuencia de resonancia se obtuvo el módulo de elasticidad dinámica, E_d (Figura 3b). El comportamiento de los resultados obtenidos en la experimentación es el mismo para las mezclas TP-6 y

TP-6-PET, presentando un decremento conforme aumenta la edad de prueba. La mezcla TP-6-M se comporta un poco diferente, alcanzando un valor máximo en la segunda edad de prueba, pero disminuyendo para la última edad, siendo el que presenta el resultado menor a los 180 días.

Siguiendo la misma tendencia que la resistividad eléctrica, la resistencia a la compresión del concreto permeable aumentó con la incorporación de PET y macrofibras, (Figura 3c). Los incrementos de la resistencia a la compresión fueron de 61 % y 46 % para la mezcla TP-6-PET y TP-6-M, respectivamente. La mezcla control y la adicionada con PET presentan la misma tendencia a lo largo de las diferentes edades de prueba, y, aunque la mezcla restante presenta una disminución de la resistencia a los 120 días, para la última edad de prueba alcanza una resistencia mayor que la mezcla TP-6.

Aunque la mezcla TP-6-PET muestra una resistencia menor en la última edad de prueba, la tendencia de resultados respecto al tiempo es similar en las cuatro mezclas. La resistencia a la tensión indirecta es mayor en las mezclas TP-6-PET y TP-6-M respecto a la mezcla TP-6, para todas las edades de prueba (Figura 3d). La mezcla que obtuvo una mayor resistencia a 180 días es la mezcla adicionada con macrofibras con una resistencia a la tensión 50 % mayor que la mezcla testigo, mientras que la mezcla adicionada con PET tuvo un aumento del 16 %, respecto a la mezcla TP-6.

En el concreto convencional suele existir una relación matemática entre la resistencia a la tensión y la resistencia a la compresión. Kosmatka *et al.* (2004) definen que la resistencia a la tensión es aproximadamente de 1.3 a 2.2 veces la raíz cuadrada del f'_c , en kgf/cm². En la Tabla 6 se revisa la relación mencionada.

Con los resultados de la comparación, la relación obtenida entre la resistencia a la tensión de las diferentes mezclas contra la resistencia a la compresión queda dentro del rango establecido por Kosmatka *et al.* (2024) para la mayoría de los casos. Por otro lado, con la prueba de flexión usando una viga simple con carga en el tercio medio del claro, se obtuvieron los módulos de ruptura para cada mezcla mostrados en la Figura 4. Se observa que el comportamiento no es similar para todas las mezclas, sin embargo, todas tienen una tendencia de

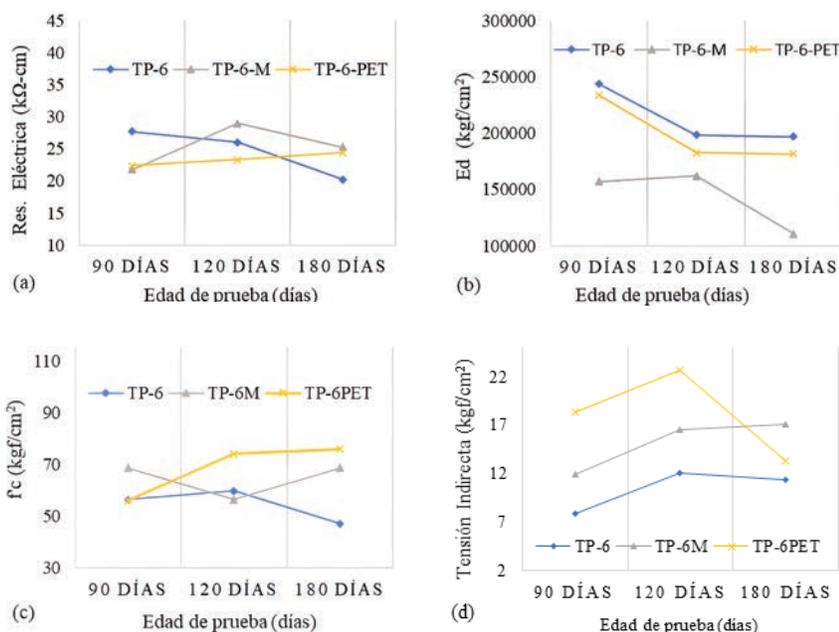


Figura 3. Resultados de las pruebas de: a) resistividad eléctrica, b) frecuencia de resonancia, c) compresión simple y d) tensión indirecta en las diferentes mezclas

Tabla 6. Verificación de la correlación entre resistencia a tensión y compresión

Mezcla	Edad (días)	f'c (kgf/cm²)	1.3 √f'c (kgf/cm²)	2.2 √f'c (kgf/cm²)	Tensión I (kgf/cm²)	Cumple con relación
TP-6	90	56.46	9.77	16.53	7.95	Inferior
	120	59.85	10.06	17.02	12.08	Cumple
	180	47.21	8.93	15.12	11.41	Cumple
TP-6-PET	90	56.22	9.75	16.50	18.29	Superior
	120	74.16	11.20	18.95	22.62	Superior
	180	75.94	11.33	19.17	13.27	Cumple
TP-6-M	90	68.8	10.78	18.25	11.96	Cumple
	120	61.57	10.20	17.26	16.57	Cumple
	180	68.69	10.77	18.23	17.14	Cumple

decrecimiento respecto al tiempo de prueba de 90 días, disminuyendo las prestaciones mecánicas de los especímenes.

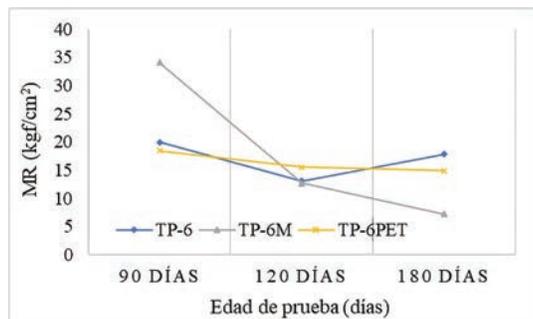


Figura 4. Resultados de las pruebas de flexión en vigas para las diferentes mezclas

También se realizó la revisión de la correlación matemática entre la flexión y la compresión en la Tabla 7. El autor indica que la flexión en un concreto convencional se encuentra entre 1.99 a 2.65 veces la raíz cuadrada del f'c, en kgf/cm² (Kosmatka *et al.*, 2004), y para las mezclas analizadas en este documento no se cumple dicha relación en muchos de los casos. Este resultado muestra que los hallazgos realizados por Seifeddine *et al.* (2022) mencionados en la introducción, respecto a la relación entre resistencia a compresión y resistencia a la flexión en un concreto permeable no se cumplen para este material.

Finalmente, el módulo de elasticidad para concreto convencional puede ser aproximado a 15,500 veces la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión en kg/

cm² (Kosmatka *et al.*, 2004). Comprobando dicha relación en la Tabla 8, solo un dato se encuentra debajo de la relación, mientras que todos los demás tienen un valor superior a lo manifestado por Kosmatka.

Tabla 7. Verificación de la correlación entre resistencia a flexión y a compresión

Mezcla	Edad (días)	f'c (kgf/cm ²)	1.99 √f'c (kgf/cm ²)	2.65 √f'c (kgf/cm ²)	Flexión I (kgf/cm ²)	Cumple con relación
TP-6	90 días	56.46	14.95	19.91	19.94	Superior
	120 días	59.85	15.40	20.50	13.10	Inferior
	180 días	47.21	13.67	18.21	17.83	Mayor
TP-6-PET	90 días	56.22	14.92	19.87	18.48	Cumple
	120 días	74.16	17.14	22.82	15.50	Menor
	180 días	75.94	17.34	23.09	14.88	Menor
TP-6-M	90 días	68.8	16.51	21.98	34.07	Mayor
	120 días	61.57	15.61	20.79	12.71	Menor
	180 días	68.69	16.49	21.96	7.23	Menor

Tabla 8. Verificación de la correlación entre módulo de elasticidad y la compresión

Mezcla	Edad (días)	f'c (kgf/cm ²)	15500 √f'c (kgf/cm ²)	Ed (kgf/cm ²)	Cumple con relación
TP-6	90	56.46	116466.80	243587.00	Superior
	120	59.85	119912.31	198374.00	Superior
	180	47.21	106499.78	196876.00	Superior
TP-6-PET	90	56.22	116219.00	233878.00	Superior
	120	74.16	133480.11	182632.00	Superior
	180	75.94	135072.52	175837.00	Superior
TP-6-M	90	68.8	128565.94	157122.00	Superior
	120	61.57	121623.16	162272.00	Superior
	180	68.69	128463.12	107596.00	Inferior

CONCLUSIONES

Aparentemente, el porcentaje de vacíos aumenta al adicionar PET o macrofibras en el concreto elaborado, se incrementa por la liga proporcionada por las fibras, pero no se llenan los poros, la permeabilidad se conserva. La distribución de la pasta cementante en los especímenes ensayados se modifica con la incorporación de PET o de macrofibra. En un concreto permeable la cantidad de pasta de cemento que cubre y une a los agregados es poca, dando como resultado un material con una baja resistencia cohesiva entre sus elementos, ya que la cohesión es inversamente proporcional al tamaño de poros y agregados.

La adición de PET y macrofibras cumple su función de ligar las partículas de los agregados gruesos bajo sollicitaciones de compresión y tensión, sin absorber agua.

Lo anterior mejora el desarrollo de las propiedades mecánicas en el concreto, principalmente la adición de PET, que presenta una resistencia a tensión y compresión superior a la mezcla control en todas las edades de prueba.

Analizando los resultados, la mezcla elaborada con PET se presenta como la óptima, primero por su resistencia ante esfuerzos de compresión y tensión; segundo, porque es la mezcla que presenta una mejor distribución y homogeneidad entre sus elementos; es un residuo del que se busca reciclar y reducir su consumo. La utilización de este residuo como adición en el concreto permeable aumentó la fuerza cohesiva entre sus partículas.

Por cuestiones prácticas, se suele considerar al concreto convencional como un material homogéneo isotrópico. En este trabajo se observó que en un concreto

permeable la heterogeneidad está muy presente, por ello sus propiedades varían.

Los resultados obtenidos para la mezcla control (TP-6) parecerían los menos prometedores. La incorporación de PET y macrofibras disminuyó la variabilidad en la mezcla, presentando menor desviación estándar en sus resultados.

La resistividad eléctrica es difícilmente una prueba representativa del concreto permeable por las dificultades que se presentan en el método de ensayo, no es posible mantener la probeta totalmente saturada a la hora de la prueba por el tamaño de los poros. La limitada cantidad de pasta cementante cubriendo los agregados puede ocasionar que la corriente viaje por estos últimos y el resultado final de la prueba sea la resistividad eléctrica del material pétreo utilizado.

Al adicionar un residuo industrial como el PET a un concreto permeable se obtuvo un concreto sostenible con mejores prestaciones físico-mecánicas ante sollicitaciones estáticas respecto a la mezcla control. El hecho de reutilizar e incorporar residuos de esta clase contribuye a alargar la vida útil de ciertos productos altamente contaminantes, además de permitir incorporar estrategias de economía circular en el sector de la construcción.

Es imperante la necesidad de seguir investigando materiales alternativos, y propiciar una solución a los problemas asociados a las inundaciones para lograr una filtración del recurso hídrico al subsuelo y contribuir a la recarga de los mantos acuíferos. Los concretos permeables ofrecen una respuesta a estas problemáticas y son una alternativa viable, especialmente para aquellos usos con menores requerimientos estructurales y usos intensivos del pavimento.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el soporte financiero de la Coordinación de la Investigación Científica (CIC) de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH); del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) mediante Proyectos CONAHCYT CF-2023-G-985 Y CBF2023-2024-1613 y el Proyecto Pronaces 321260; del programa SEP-Prodep; del Laboratorio de Materiales Ing. Luis Silva Ruelas de la Facultad de Ingeniería Civil de la UMSNH; y del Instituto de Ciencia, Tecnología e Innovación (ICTI) del Gobierno del Estado de Michoacán.

REFERENCIAS

ACI. (2002). Standard practice for selecting proportions for non-slump concrete. American Concrete Institute. ACI 211.3.

- ACI. (2010). Report on pervious concrete. American Concrete Institute. ACI 522R.
- Adresi, M., Yamani, A., Karimaei-Tabarestani, M., Rooholamini, H. (2023). A comprehensive review on pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 407(133308). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133308>
- Ahmed, A. M., Hussein, A. H., & Hammood, M. (2019). Recycling of disposal polypropylene blister tablets and strapping ties as fiber reinforcement for pervious concrete. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 584(012031), 1-10. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/584/1/012031>
- ASTM. (2012). Standard test method for density and void content of hardened pervious concrete. American Society for Testing and Materials. ASTM C1754/C1754M-20.
- ASTM. (2017a). Standard specification for chemical admixtures for concrete. American Society for Testing and Materials. ASTM C494/C494M-17.
- ASTM. (2017b). Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens. American Society for Testing and Materials. ASTM C496/C496-17.
- ASTM. (2019a). Standard test method for bulk electrical resistivity or bulk conductivity of concrete. American Society for Testing and Materials. ASTM C1876-19.
- ASTM. (2019b). Standard test method for fundamental transverse, longitudinal, and torsional resonant frequencies of concrete specimens. American Society for Testing and Materials. ASTM C215-19.
- ASTM. (2021). Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. American Society for Testing and Materials. ASTM C39/C39M-21.
- ASTM. (2022a). Standard specification for portland cement. American Society for Testing and Materials. ASTM C150/C150M-22.
- ASTM. (2022b). Standard test method for flexural strength of concrete (Using simple beam with third-point loading). American Society for Testing and Materials. ASTM C78/C78M-22.
- De Sales-Braga, N. T., Santos-Arruga, J. E., & Pinheiro-Cordeiro, L. D. (2022). Performance and runoff coefficient of permeable concretes subjected to heavy rainfall simulations. *Materia*, 27(4), 1-19. <https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2022-0216>
- El Universal. (25 de noviembre de 2019). México, líder de acopio y reciclaje de plástico PET. El Universal. Recuperado de <https://www.eluniversal.com.mx/nacion/mexico-lider-de-acopio-y-reciclaje-de-plastico-pet/>
- Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental, A. (2017). Agua en el planeta. Recuperado de Agua.org.mx: <https://agua.org.mx/en-el-planeta/>
- Forbes, S. (1 de Junio de 2017). En México se pierden cada año 230 mdd por inundaciones. Forbes. Recuperado de <https://www.forbes.com.mx/mexico-pierden-230-mdd-cada-ano-por-inundaciones/>
- Gómez-Valdovinos, M. G., (2022). *Incremento de las prestaciones físico-mecánicas de un concreto permeable ante sollicitaciones estáticas dopando la matriz con PET y microfibras*. (Tesis de Licenciatura). Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH. Morelia, México.

- Hernández-Urbe, R. E., Barrios, P. H., & Ramírez, A. I. (2017). Análisis de riesgo por inundación: metodología y aplicación a la cuenca Atemajac. *Tecnología y Ciencia del Agua*, VIII(3), 5-25. Recuperado de <https://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v8n3/2007-2422-tca-8-03-00005.pdf>
- Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., Panarese, W. C., & Tanesi, J. (2004). *Diseño y control de mezclas de concreto*. 1a ed., (2797). PCA, Ed. México: Portland Cement Association.
- Latif, A. A., Putrajaya, R., & Ing, D. S. (2023). A Review of porous concrete pavement: compressive strength and clogging investigation. *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*, 29(3), 128-138. <https://doi.org/10.37934/araset.29.3.128138>
- Liu, H., Luo, G., Wang, L., Wang, W., Li, W., & Gong, Y. (2019). Laboratory evaluation of eco-friendly pervious concrete pavement material containing silica fume. *Applied Sciences*, 9(1), 73. <https://doi.org/10.3390/app9010073>
- Martínez-Molina, W., Torres-Acosta, A. A., Martínez-Peña, G. E., Alonso-Guzmán, E., & Mendoza-Pérez, I. N. (2015). Cement-Based, materials-enhanced durability from opuntia ficus indica mucilage additions. *ACI Materials Journal*, 165-172. <https://doi.org/10.14359/51687225>
- Mulyono, T., & Anisah (2018). Sustainable material for local road using pervious concrete with various aggregates. En 3rd UNJ International Conference on Technical and Vocational Education and Training, KnE Social Science, 65-79. Recuperado de <https://doi.org/10.18502/kss.v3i12.4074>
- ONNCCE. (2014). Determinación de la resistencia a la compresión. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. NMX-C-083-ONNCCE-2014.
- ONNCCE. (2015). Determinación de la resistencia a la flexión del concreto usando una viga simple con carga en los tercios del claro. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. NMX-C-191-ONNCCE-2015.
- ONNCCE. (2017). Especificaciones y métodos de ensayo para cementos hidráulicos. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación S.C. NMX-414-ONNCCE-2017.
- ONNCCE. (2019a). Determinación de la resistencia a la tensión por compresión diametral de cilindros de concreto-Método de ensayo. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. NMX-C-163-ONNCCE-2019.
- ONNCCE. (2019b). Determinación de las frecuencias fundamentales, transversales, longitudinales y torsionales de especímenes de concreto. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. NMX-C-089-ONNCCE-2019.
- ONNCCE. (2019c). Resistividad eléctrica del concreto hidráulico. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. NMX-C-514-ONNCCE-2019.
- Park, S., Ju, S., Kim, H.-K., Seo, Y.-S., & Pyo, S. (2022). Effect of the rheological properties of fresh binder on the compressive strength of pervious concrete. *Journal of Materials Research and Technology*, 17, 636-648. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.01.045>
- Rangelov, M., Nassiri, S., Haselbach, L., & Englund, K. (2016). Using carbon fiber composites for reinforcing pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 126, 875-885. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.035>
- Seifeddine, K., Amziane, S., & Toussaint, E. (2022). State of the art on the mechanical properties of pervious concrete. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 26, 7727-7755. <https://doi.org/10.1080/19648189.2021.2008511>
- Seifeddine, K., Amziane, S., & Toussaint, E. (2023). State of the art on the hydraulic properties of pervious concrete. *Road Materials and Pavement Design*, 24(11), 2561-2596 <https://doi.org/10.1080/14680629.2022.2164332>
- SEMARNAT. (2020). *Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México: Lucart Estudio S.A. de C.V.
- Singer, M. N., Hamouda, M. A., El Hassan, H., & Hinge, G. (2022). Permeable pavement systems for effective management of stormwater quantity and quality: a bibliometric analysis and highlights of recent advancements. *Sustainability*, 14(20), 1361. <https://doi.org/10.3390/su142013061>
- Wu, L., Mei, M., Liu, S., & Wang, X. (2022). Study on photocatalytic and mechanical properties of TiO₂ modified pervious concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 17(e01606), 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01606>
- Zhong, R., Leng, Z., & Poon, C.-s. (2018). Research and application of pervious concrete as a sustainable pavement material: A state-of-the-art and state-of-the-practice review. *Construction and Building Materials*, 183, 544-553. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.131>

Cómo citar:

Gómez-Valdovinos, M. G., Martínez-Molina, W., Muciño-Vélez, A., Alonso-Guzmán, E. M., Chávez-García, H. L., Sánchez-Calsvillo, A., Arreola-Sánchez, M., Navarrete-Seras, M. A., Borrego-Pérez, J. A., Cervantes-Servín, A. I., & Pacheco-Segovia, J. A. (2025). Modificación de propiedades mecánicas del concreto permeable adicionado con residuos de PET y macrofibras sintéticas. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 26(01), 1-11. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2025.26.1.002>