



Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), Noviembre-Diciembre 2025,
Volumen 9, Número 6.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i6

**ELABORACIÓN DE UN CONCRETO PERMEABLE
UTILIZANDO RESIDUOS DE ACERO GENERADOS
DEL CORTE POR PLASMA COMO SUSTITUTO EN 5%,
10% Y 15% DE AGREGADO GRUESO**

**PREPARATION OF PERMEABLE CONCRETE USING STEEL
WASTE GENERATED FROM PLASMA CUTTING AS A
SUBSTITUTE FOR 5%, 10%, AND 15% COARSE AGGREGATE**

Jesus Hernández Calva

Universidad Autonoma del Estado de Hidalgo, México

Alan Didier Chale Sanjuan

Universidad Autonoma del Estado de Hidalgo, México

Luis Daimir López Leon

Universidad Autonoma del Estado de Hidalgo, México

Elaboración de un Concreto Permeable Utilizando Residuos de Acero Generados del Corte por Plasma como Sustituto en 5%, 10% y 15% de Agregado Grueso

Jesus Hernández Calva¹

He379261@uaeh.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0002-8044-8766>

Universidad Autonoma del Estado de Hidalgo
México

Alan Didier Chale Sanjuan

A.D.chalesanjuan@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0006-2966-2843>

Universidad Autonoma del Estado de Hidalgo
México

Luis Daimir López Leon

luis_lopez@uaeh.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0001-5871-7707>

Universidad Autonoma del Estado de Hidalgo
México

RESUMEN

Este estudio evalúa el comportamiento mecánico, hidráulico y microestructural de un concreto permeable elaborado mediante la sustitución parcial del agregado grueso por residuos de acero generados del corte por plasma. Se diseñaron cuatro mezclas con 0 %, 5 %, 10 % y 15 % de sustitución en peso, manteniendo una relación agua/cemento de 0.45 y un $f'c$ objetivo de 10 MPa. Se determinaron la resistencia a la compresión (ASTM C39/C39M), la tasa de infiltración mediante permeámetro de carga variable y el análisis microestructural mediante microscopía electrónica de barrido (MEB). Los resultados muestran un incremento progresivo de la resistencia a la compresión hasta alcanzar 12.04 MPa con 15 % de residuo metálico, equivalente a un aumento cercano al 25 % respecto a la mezcla de referencia. Las tasas de infiltración se mantuvieron entre 749.9 y 902.3 L/min·m², conservando el carácter altamente permeable del material. El análisis MEB evidenció una buena integración de las partículas metálicas en la matriz cementante hasta el 10 % de sustitución, mientras que al 15 % se observaron vacíos interfaciales y heterogeneidad local. En conjunto, se identifica el intervalo de 5–10 % como contenido óptimo de sustitución, al proporcionar un equilibrio favorable entre resistencia, permeabilidad y aprovechamiento sostenible de un residuo industrial.

Palabras clave: concreto permeable, residuos de acero, corte por plasma, permeabilidad

¹ Autor principal

Correspondencia: a.d.chalesanjuan@gmail.com

Preparation of Permeable Concrete Using Steel Waste Generated from Plasma Cutting as a Substitute for 5%, 10%, and 15% Coarse Aggregate

ABSTRACT

This study investigates the mechanical, hydraulic, and microstructural behavior of pervious concrete produced by partially replacing coarse aggregate with steel waste derived from plasma cutting. Four mixtures with 0%, 5%, 10%, and 15% replacement by weight were designed using a constant water-to-cement ratio of 0.45 and a target compressive strength of 10 MPa. Compressive strength tests (ASTM C39/C39M), infiltration rate measurements using a variable-head permeameter, and microstructural analysis by scanning electron microscopy (SEM) were carried out. The results indicate a progressive increase in compressive strength, reaching 12.04 MPa for the mixture with 15% steel waste, corresponding to an improvement of about 25% compared to the control mix. Infiltration rates ranged from 749.9 to 902.3 L/min·m², confirming that the pervious character of the material was preserved. SEM observations revealed a dense and well-bonded matrix with uniformly embedded metallic particles up to 10% replacement, whereas the 15% mixture exhibited interfacial voids and local heterogeneities. Overall, a replacement level between 5% and 10% is identified as optimal, providing a suitable balance between load-bearing capacity, hydraulic performance, and sustainable utilization of an industrial steel waste.

Keywords: pervious concrete, steel waste, plasma cutting, permeability

*Artículo recibido 30 noviembre 2025
Aceptado para publicación: 30 diciembre 2025*



INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la sostenibilidad se ha convertido en un eje central de la innovación en materiales de construcción. La industria del concreto, responsable de una parte considerable de las emisiones globales de CO₂, enfrenta el reto de integrar estrategias que permitan reducir su impacto ambiental sin comprometer la calidad estructural del material (Habert et al., 2020). En este contexto, la reutilización de subproductos industriales ha emergido como una vía prometedora dentro del marco de la economía circular, promoviendo la valorización de residuos y la disminución del uso de recursos naturales no renovables (Gao et al., 2023). Entre los subproductos con mayor potencial se encuentran los residuos metálicos finos generados por procesos de corte por plasma, propios de la industria metalmecánica, los cuales suelen ser dispuestos de forma inadecuada, generando contaminación del suelo, emisiones de partículas y riesgo para la salud humana (Arulrajah et al., 2021).

El aprovechamiento de estos residuos metálicos como sustitutos parciales de los agregados pétreos en mezclas cementicias ofrece una alternativa atractiva tanto técnica como ambientalmente. Investigaciones recientes han demostrado que la incorporación de partículas de acero o polvo metálico en el concreto puede mejorar su resistencia a la compresión, tracción y durabilidad, gracias al efecto de refuerzo físico y la reducción de microfisuras (Su et al., 2023; Chen et al., 2024). Además, los residuos metálicos tienden a modificar la interfaz pasta-agregado, generando una microestructura más densa que contribuye a disminuir la permeabilidad y mejorar la resistencia a la carbonatación (Rashid et al., 2019; Jalal et al., 2022).

En particular, el concreto permeable ha cobrado relevancia como un material ecoeficiente orientado a la gestión de aguas pluviales en zonas urbanas. Su estructura altamente porosa permite la infiltración del agua de lluvia, reduciendo la escorrentía superficial y favoreciendo la recarga de acuíferos (Sonebi & Bassuoni, 2022). Este tipo de concreto se fabrica con una cantidad reducida de finos o incluso sin ellos, generando una red interconectada de vacíos que, aunque útil para la permeabilidad, disminuye su resistencia mecánica (Aoki et al., 2020). Por ello, la incorporación de materiales reciclados o subproductos industriales como refuerzo constituye una estrategia viable para mejorar el equilibrio entre permeabilidad y resistencia (Zhao et al., 2021).



Estudios experimentales han señalado que la adición de pequeñas fracciones de residuos metálicos (5–15 %) puede incrementar la resistencia a la compresión de concretos permeables sin comprometer significativamente su capacidad de infiltración (Singh et al., 2021; Liu et al., 2023). Además, los residuos provenientes del corte por plasma, al estar compuestos principalmente de acero al carbono tipo A36, presentan propiedades mecánicas que favorecen la formación de puentes de adherencia dentro de la matriz cementicia (Martínez & Pérez, 2022). Este comportamiento podría traducirse en una mayor integridad estructural y durabilidad del concreto frente a cargas dinámicas y procesos de deterioro ambiental.

Por tanto, el presente estudio tiene como objetivo evaluar el comportamiento mecánico y la permeabilidad del concreto permeable modificado mediante la sustitución parcial del agregado grueso por residuos de acero generados del corte por plasma, en proporciones del 0 %, 5 %, 10 % y 15 %. Para ello, se realizarán ensayos de resistencia a la compresión y pruebas de permeabilidad, así como un análisis microestructural mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectroscopía de dispersión de energía (EDS). Se plantea como hipótesis que la incorporación de residuos metálicos finos no solo aumentará la resistencia mecánica del concreto, sino que también mantendrá su permeabilidad dentro de los rangos normativos establecidos por ACI 522R-10 (2010), contribuyendo al desarrollo de un material sostenible y de bajo impacto ambiental aplicable en pavimentos permeables, guarniciones y zonas peatonales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Concreto permeable

El concreto permeable es un material poroso formado principalmente por cemento, agregado grueso y agua, con una cantidad mínima o nula de finos. Su estructura abierta permite la infiltración del agua de lluvia hacia el subsuelo, contribuyendo a la gestión sostenible del recurso hídrico y al control de la escorrentía urbana (Sonebi & Bassuoni, 2022). En este estudio se empleó un concreto de baja resistencia ($f'_c = 10$ MPa), diseñado conforme a las recomendaciones del ACI 522R-10 (2010) y de la NMX-C-156-ONNCCE-2016 para la elaboración y curado de especímenes en laboratorio.



Composición del concreto permeable

- Cemento: Se utilizó cemento Portland tipo II, conforme a la ASTM C150/C150M-22, por su buena disponibilidad y desempeño en aplicaciones no estructurales.
- Agregado grueso: Grava triturada de tamaño comprendido entre 4.75 mm (tamiz #4) y 12.7 mm ($\frac{1}{2}$ ”), seca superficialmente. Esta gradación permite una porosidad efectiva entre 15 % y 25 %, adecuada para mantener la capacidad de infiltración (Aoki et al., 2020).
- Agua: Se empleó agua potable conforme a la NMX-C-122-ONNCCE-2013. La relación agua/cemento (A/C) adoptada fue 0.45, dentro del intervalo recomendado por Yang & Jiang (2003) y Singh & Yadav (2024) para concretos permeables.
- Residuos metálicos: Sustituto parcial del agregado grueso en proporciones de 5 %, 10 % y 15 % en peso, descritos en la sección 2.2.
- Sin finos ni aditivos químicos, a fin de conservar la permeabilidad natural del sistema.

La dosificación base por metro cúbico de concreto fue: 425 kg de cemento, 1900 kg de agregado grueso y 191 kg de agua, siguiendo el criterio de baja relación pasta/agregado y revenimiento nulo característico del concreto permeable (ACI 522R-10, 2010).

Residuo de acero proveniente del corte por plasma

El residuo metálico utilizado procede del proceso de corte por plasma en talleres de la industria metalmeccánica, donde láminas de acero al carbono ASTM A36 son seccionadas térmicamente, generando partículas y escamas metálicas de tamaño irregular (Martínez & Pérez, 2022). Dichos residuos fueron recolectados, limpiados y tamizados para obtener fracciones comparables al tamaño del agregado grueso (4.75–12.7 mm). Su incorporación como sustituto parcial contribuye a la economía circular y reduce la disposición de desechos metálicos (Arulrajah et al., 2021).

Caracterización química y física

El acero A36 presenta la composición típica mostrada en la Tabla 1, conforme a Ingirum (2023) y Valdivia et al. (2022).



Tabla 1. Composición química del acero A36.

Elemento	% en peso
C	0.29
Mn	1.20
Si	0.40
P	0.04
S	0.05

Las partículas metálicas presentan geometrías angulares y una rugosidad superficial alta, derivadas del enfriamiento rápido del proceso de corte, lo que favorece la adherencia mecánica con la matriz cementante (Chen et al., 2024). Antes de su uso, el material se lavó con agua destilada y se secó a 105 °C por 24 h para eliminar impurezas y humedad superficial. La densidad aparente del residuo fue de 7.8 g/cm³, significativamente mayor que la de los agregados pétreos, por lo que se efectuó la sustitución en peso y no en volumen para evitar alteraciones en la densidad global de la mezcla (Singh et al., 2021).

Ventajas del uso de residuos de acero generados por corte por plasma en concreto permeable

La incorporación de residuos de acero procedentes del corte por plasma como sustituto parcial del agregado grueso en concreto permeable ofrece ventajas simultáneamente mecánicas, funcionales y ambientales, alineadas con los principios de economía circular:

Mejoras en propiedades mecánicas: Diversos estudios han demostrado que la presencia de inclusiones metálicas o fibras de acero recicladas puede incrementar la resistencia a la compresión, mejorar el comportamiento post-fisuración y reducir la fragilidad del concreto, al generar puentes de transferencia de esfuerzos y limitar la propagación de microfisuras (Su et al., 2023; Jahandari et al., 2021). Cuando se controla su fracción y distribución, los residuos metálicos pueden actuar como pseudo-refuerzo rígido dentro de la matriz cementante, contribuyendo a una estructura más densa y estable.

Contribución al control de fisuración y a la integridad matricial: La rugosidad y geometría angulosa típica de las partículas de acero provenientes del corte por plasma favorecen la adherencia mecánica con los productos de hidratación del cemento, lo que mejora la resistencia al agrietamiento por cargas

cíclicas o variaciones térmicas, y puede reducir la formación de fisuras conectadas que comprometan la durabilidad (Mindess et al., 2003; Chen et al., 2024).

Compatibilidad con sistemas permeables: A diferencia de adiciones finas que obstruyen la red de poros, la sustitución parcial en 5 %, 10 % y 15 % en peso del agregado grueso con partículas metálicas de tamaño similar permite mantener una estructura abierta, siempre que la dosificación no exceda el umbral en el cual se reduce drásticamente la conectividad de vacíos. Estudios recientes sobre concretos permeables con subproductos industriales muestran que es posible mejorar la resistencia sin sacrificar la permeabilidad de diseño cuando se optimiza la fracción volumétrica y la gradación (Debnath & Sarkar, 2020; Vijayalakshmi, 2021).

Sostenibilidad y gestión de residuos industriales: El residuo de corte por plasma es un desecho recurrente de la industria metalmeccánica que, si no se gestiona adecuadamente, puede contribuir a la contaminación de suelos y agua. Su valorización como sustituto de agregado grueso reduce la extracción de áridos naturales, minimiza la disposición en rellenos y disminuye la huella ambiental del concreto (Martínez & Pérez, 2022; Gao et al., 2023). Esto se alinea con estrategias de construcción sostenible y modelos de producción más circulares.

En conjunto, la integración controlada de residuos de acero generados por corte por plasma en concreto permeable representa una alternativa innovadora para mejorar el desempeño del material y, al mismo tiempo, mitigar impactos ambientales asociados a la gestión de residuos metálicos.

Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión es el parámetro principal para evaluar la capacidad portante y la calidad global del concreto, incluso en aplicaciones no estructurales como pavimentos permeables para tráfico ligero, banquetas y áreas de estacionamiento. Este parámetro permite verificar la viabilidad del material frente a las solicitudes de servicio y establecer comparaciones entre mezclas con y sin sustitución de agregado (Mindess et al., 2003).

En este estudio, la mezcla de referencia se diseñó para una resistencia objetivo del orden de 10 MPa ($\approx 100 \text{ kg/cm}^2$), acorde con aplicaciones de concreto permeable de baja exigencia estructural, siguiendo las recomendaciones del ACI 522R-10 (2010) y criterios utilizados en estudios recientes de pervious concrete con materiales reciclados (Aoki et al., 2020; Sandoval et al., 2019). Los residuos de acero de



corte por plasma sustituyen al agregado grueso en proporciones de 5 %, 10 % y 15 % en peso, con el objetivo de identificar el porcentaje óptimo que permita incrementar la resistencia sin comprometer la funcionalidad hidráulica.

El ensayo se realiza sobre especímenes cilíndricos con relación altura/diámetro 2:1, utilizando una prensa hidráulica conforme a ASTM C39/C39M-23 y NMX-C-083-ONNCCE-2020, aplicando carga axial continua hasta la falla. Se evalúan al menos tres especímenes por dosificación, reportando el valor promedio de resistencia en MPa. La comparación entre el concreto permeable convencional y las mezclas modificadas permite determinar el efecto del residuo metálico en la capacidad resistente, así como establecer si la adición del 15 % de sustitución genera un refuerzo efectivo de la matriz cementante (Su et al., 2023; Chen et al., 2024).

Permeabilidad del concreto permeable modificado

La permeabilidad es la propiedad distintiva del concreto permeable y se asocia con su capacidad para permitir el flujo de agua a través de su red de poros interconectados. Desde el punto de vista hidráulico, se expresa mediante el coeficiente de permeabilidad (k), que cuantifica la facilidad con la que el agua atraviesa el medio poroso bajo un gradiente hidráulico determinado (Debnath & Sarkar, 2020; Sandoval et al., 2019).

En concretos permeables, el diseño de la mezcla busca contenidos de vacíos típicos del 15–35 %, con velocidades de infiltración en el rango de 81–730 L/min/m², de acuerdo con ACI 522R-10 (2010). La introducción de residuos de acero de corte por plasma como sustituto parcial del agregado grueso debe evaluarse cuidadosamente para asegurar que:

1. La fracción metálica no obstruya la red de poros conectados.
2. Se mantenga un equilibrio adecuado entre porosidad, resistencia y capacidad de drenaje.

El coeficiente de permeabilidad se determina mediante ensayos de carga variable en especímenes cilíndricos, utilizando permeámetros que registran el tiempo de descenso de una columna de agua entre dos niveles de referencia. El cálculo de k se realiza con la formulación clásica para carga variable, considerando el área del tubo de alimentación, el área de la sección transversal del espécimen, la altura del espécimen y las alturas inicial y final del nivel de agua. Este método ha sido ampliamente empleado

en investigaciones sobre concreto permeable sostenible y permite comparar el desempeño hidráulico de mezclas con distintos materiales reciclados (Debnath & Sarkar, 2020; Peng et al., 2018).

Para el presente trabajo, se verifica que las mezclas con 5 %, 10 % y 15 % de sustitución metálica mantengan valores de permeabilidad dentro del rango recomendado para aplicaciones en pavimentos de tráfico ligero y sistemas urbanos de drenaje sostenible.

Microscopia electrónica de barrido (MEB)

El análisis microestructural mediante microscopía electrónica de barrido (MEB), es fundamental para comprender la interacción entre los residuos de acero de corte por plasma y la matriz cementante del concreto permeable. Esta caracterización permite:

- Observar la morfología y distribución de las partículas metálicas dentro de la matriz.
- Identificar la presencia de poros interconectados, microfisuras y posibles zonas de desadherencia.

Las muestras se obtienen a partir de especímenes previamente ensayados mecánicamente o de fragmentos representativos del concreto endurecido. Los pasos generales incluyen:

1. Corte del material para exponer secciones internas
2. Limpieza suave para eliminar partículas sueltas
3. Secado controlado
4. Recubrimiento con una capa conductora de oro o carbono mediante *sputtering*, con el fin de evitar acumulación de carga superficial durante el análisis.

El estudio se llevó a cabo utilizando un microscopio electrónico de barrido marca JEOL, modelo JSM-6610LV, equipado con un detector de electrones secundarios (SE) para análisis topográfico. Las observaciones se realizaron con un voltaje de aceleración de 15.0 kV, una distancia de trabajo de 11.0 mm y presiones de cámara del orden de 30 Pa, empleando aumento 1000x.

Este procedimiento permitió examinar la microestructura interna del concreto y la adherencia interfacial entre las partículas metálicas y la pasta cementante. Estudios recientes han demostrado que la incorporación de residuos industriales metálicos puede generar una microestructura más densa y mejorar la adherencia interfacial cuando existe compatibilidad química y mecánica con la matriz cementante (Agredo et al., 2017; Chen et al., 2024).



En el presente trabajo, el análisis MEB se emplea para correlacionar la distribución del residuo de acero de corte por plasma con los resultados mecánicos e hidráulicos, identificando si la sustitución del 15 % de agregado grueso por residuo metálico promueve una microestructura compacta sin bloquear la red de poros funcionales del concreto permeable.

Diseño de mezcla

En esta investigación se elaboraron mezclas de concreto permeable modificado con residuos de acero procedentes del corte por plasma, los cuales sustituyeron el 5 %, 10 % y 15 % del agregado grueso en peso, manteniendo una relación agua/cemento (A/C) constante de 0.45. Se consideró como referencia una mezcla convencional sin sustitución metálica (0 %), diseñada para alcanzar una resistencia nominal de $f'c = 10$ MPa (≈ 100 kg/cm²), típica de concretos permeables empleados en pavimentos de baja carga, andadores y áreas de drenaje urbano (Sonebi & Bassuoni, 2022).

Los materiales utilizados y sus cantidades por metro cúbico se muestran en la Tabla 2, donde el cemento, el agua y la relación A/C se mantuvieron constantes, modificando únicamente la proporción de sustitución metálica. Los residuos metálicos fueron previamente limpiados, secados y tamizados para asegurar una granulometría comprendida entre 4.75 mm (tamiz #4) y 12.7 mm ($\frac{1}{2}$ ”), homogénea con el tamaño del agregado grueso natural. La sustitución se realizó en peso, debido a la alta densidad del acero (7.8 g/cm³), evitando así desequilibrios volumétricos que pudieran alterar la porosidad o el comportamiento hidráulico de las mezclas (Singh et al., 2021).

Tabla 2. Dosificación de materiales para 1 m³ de concreto permeable con A/C = 0.45.

Mezcla	Cemento (kg)	Agregado grueso (kg)	Agua (kg)	Residuos de acero (kg)
0 %	425.00	1900.00	191.00	—
5 %	425.00	1805.00	191.00	95.00
10 %	425.00	1710.00	191.00	190.00
15 %	425.00	1615.00	191.00	285.00

Durante la fabricación, la mezcla se elaboró de forma manual, utilizando una charola metálica y herramientas de acero inoxidable para asegurar una manipulación limpia y homogénea. En primer lugar, se colocaron los agregados gruesos y los residuos de acero secos; posteriormente se incorporó el cemento, y finalmente se añadió el agua de manera gradual, mezclando mediante movimientos de volteo

y amasado continuo hasta alcanzar una homogeneidad visual completa. Este procedimiento de mezclado seco-húmedo progresivo permitió evitar la segregación y la formación de aglomerados de partículas metálicas, promoviendo una distribución uniforme del residuo dentro de la matriz cementante (Aoki et al., 2020; Gao et al., 2023).

Una vez obtenida la mezcla homogénea, se procedió al moldeo de los especímenes. La mezcla se colocó en los moldes en tres capas, aplicando golpes de varilla por capa y ligeros golpes perimetrales con mazo de goma para liberar aire atrapado y asegurar una compactación uniforme. Se elaboraron un total de 20 especímenes cilíndricos, distribuidos en cuatro grupos según el porcentaje de sustitución de residuo metálico (0 %, 5 %, 10 % y 15 %):

- Doce cilindros de 100 mm × 200 mm se destinaron a los ensayos de resistencia a la compresión.
- Ocho cilindros de 75 mm × 150 mm se emplearon para los ensayos de permeabilidad, lo cual facilita el manejo de las probetas y reduce el volumen de ensayo sin afectar la representatividad de los resultados, tal como han reportado estudios recientes sobre concretos permeables (Debnath & Sarkar, 2020; Sandoval et al., 2019).

La elaboración, el moldeo y el manejo de los especímenes se realizaron conforme a las recomendaciones de la ASTM C192/C192M-21 y la NMX-C-156-ONNCCE-2016. Cada muestra fue etiquetada, numerada y registrada individualmente para su trazabilidad durante las etapas de curado y evaluación experimental.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Resistencia a la compresión

Las pruebas de resistencia a la compresión se realizaron conforme a la metodología establecida por la ASTM C39/C39M-23, empleando una prensa hidráulica Controls, modelo 50-C43C04, con una velocidad de aplicación de carga de 0.25 MPa/s, tal como se muestra en la Figura 2. Para cada mezcla (0 %, 5 %, 10 % y 15 % de sustitución metálica), se evaluaron tres especímenes cilíndricos de 100 mm × 200 mm, y se calculó el promedio de resistencia a los 28 días de curado.

Figura 2. Prueba de resistencia a la compresión de especímenes de concreto permeable con sustitución de agregado grueso por residuos de acero de corte por plasma.

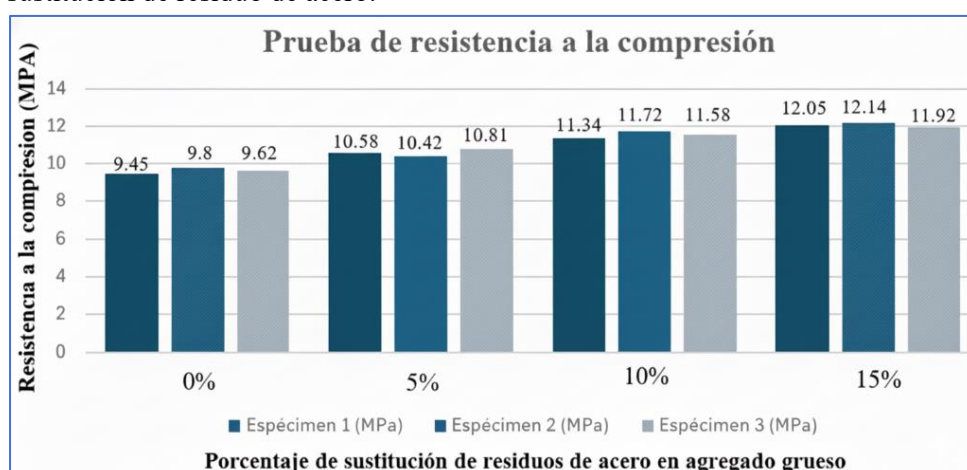


Los resultados se presentan en la Tabla 3, donde se observa una tendencia ascendente de la resistencia a la compresión conforme aumenta el porcentaje de sustitución del agregado grueso por residuos metálicos.

Tabla 3. Parámetros de resistencia a la compresión de especímenes de concreto permeable con sustitución de agregado grueso por residuos de acero generados del corte por plasma.

Mezcla	Especímen 1 (MPa)	Especímen 2 (MPa)	Especímen 3 (MPa)	Promedio (MPa)
0 %	9.45	9.80	9.62	9.62
5 %	10.58	10.42	10.81	10.60
10 %	11.34	11.72	11.58	11.55
15 %	12.05	12.14	11.92	12.04

Figura 3. Resistencia a la compresión promedio del concreto permeable con distintos porcentajes de sustitución de residuo de acero.



Los resultados muestran que el incremento en la proporción de residuo metálico genera un aumento progresivo en la resistencia a la compresión, alcanzando un valor máximo de 12.04 MPa en la mezcla con 15 % de sustitución, lo que representa un incremento aproximado del 25 % respecto al concreto de referencia (0 %). Este comportamiento se atribuye a la alta rigidez y densidad de las partículas de acero, las cuales actúan como inclusiones resistentes que transfieren esfuerzos dentro de la matriz cementante (Su et al., 2023).

Asimismo, la superficie rugosa e irregular de los residuos de corte por plasma mejora la adherencia mecánica con la pasta de cemento, promoviendo una mayor cohesión interna y reducción de microfisuras (Chen et al., 2024). La ligera mejora observada entre el 10 % y el 15 % sugiere que existe un límite óptimo de sustitución, por encima del cual podría generarse discontinuidad o pérdida de conectividad entre los agregados (Aoki et al., 2020).

Estudios previos de concretos permeables con materiales reciclados reportan incrementos similares en resistencia al incorporar residuos metálicos o escorias industriales (Jahandari et al., 2021; Vijayalakshmi, 2021). Sin embargo, el presente estudio destaca que incluso a una porosidad promedio del 20 %, las mezclas con residuos de acero mantienen su carácter permeable y mejoran la capacidad resistente, demostrando la viabilidad del uso del subproducto de corte por plasma como material de reemplazo sostenible.

Análisis comparativo

El comportamiento observado en las mezclas modificadas revela una relación positiva entre el contenido de residuo metálico y la resistencia a la compresión, lo que indica que el acero de corte por plasma actúa como un refuerzo pasivo dentro de la matriz cementante. El incremento promedio del 25 % en resistencia respecto a la mezcla de referencia (0 %) demuestra que las partículas metálicas no solo reemplazan volumétricamente al agregado grueso, sino que también contribuyen a la transmisión de esfuerzos y a la compactación interna del concreto.

El acero A36 proveniente del corte por plasma presenta una superficie rugosa e irregular, con bordes fusionados por el calor, lo que genera una interfaz de transición (ITZ) más adherente entre las partículas metálicas y la pasta cementante. Esta condición favorece la formación de puentes de adherencia mecánica que restringen la propagación de microfisuras bajo cargas compresivas (Chen et al., 2024).

Este efecto ya ha sido reportado en concretos reforzados con fibras metálicas recicladas o escorias ferrosas, donde la mejora en la resistencia a compresión puede alcanzar entre 15 % y 30 % dependiendo del tipo de residuo y la dosificación (Su et al., 2023; Jahandari et al., 2021).

El análisis comparativo muestra que las mezclas con 10 % y 15 % de sustitución presentaron los mejores desempeños, alcanzando 11.55 MPa y 12.04 MPa, respectivamente. Este comportamiento sugiere la existencia de un rango óptimo de sustitución, donde las partículas metálicas refuerzan la microestructura sin afectar negativamente la porosidad interconectada. Cuando el contenido metálico supera el 15 %, la literatura reporta que las partículas pueden interrumpir la continuidad de los poros o generar zonas de concentración de esfuerzos, provocando una ligera pérdida de trabajabilidad y uniformidad (Aoki et al., 2020; Vijayalakshmi, 2021).

Prueba de permeabilidad

El concreto permeable se caracteriza por su capacidad para permitir el paso del agua a través de su estructura porosa, propiedad esencial para su aplicación en sistemas urbanos de drenaje sostenible. De acuerdo con la ACI 522R-10 (2010), las tasas de infiltración típicas de un concreto permeable varían entre 81 y 730 L/min·m², dependiendo de la gradación de los agregados, el contenido de vacíos y el método de compactación empleado.

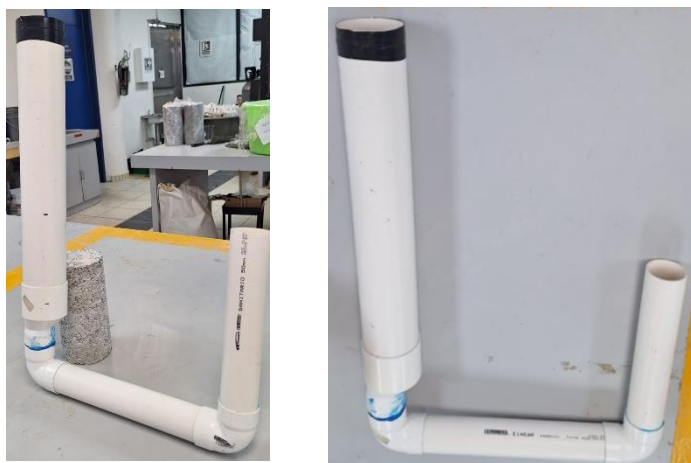
La caracterización hidráulica se realizó mediante un permeámetro de carga variable, conforme a la metodología descrita por el ACI 522R-10, determinando la tasa de flujo superficial (Q) a partir de la ecuación:

$$Q=V/(A \cdot t) \quad (1)$$

donde Q representa la tasa de flujo superficial (L/min·m²), V es el volumen drenado (L), A el área transversal de la muestra (m²) y t el tiempo de drenaje (min).

Para el ensayo se emplearon dos especímenes cilíndricos de 75 mm × 150 mm ($A = 0.00442$ m²) por cada mezcla, realizando tres mediciones consecutivas y reportando el valor promedio. Se controlaron las condiciones de borde manteniendo una altura inicial de agua de 0.10 m y una final de 0.02 m en el permeámetro, con un volumen drenado aproximado de 1.2 L por ensayo.

Figura 4 y 5. Permeámetro de carga variable utilizado para la determinación del gasto promedio en especímenes de concreto permeable con sustitución parcial de agregado grueso por residuos de acero de corte por plasma.



Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 4, ordenados según el porcentaje de sustitución metálica.

Tabla 4. Prueba de permeabilidad promedio en especímenes de concreto permeable con distintos porcentajes de sustitución de acero.

% de Acero	Tiempo (min)	Gasto promedio (L/min·m ²)
0 %	0.2832	844.89
5 %	0.2648	902.30
10 %	0.2928	815.04
15 %	0.3186	749.92

Los resultados muestran que todas las mezclas presentan valores de permeabilidad dentro o ligeramente por encima del rango normativo establecido por la ACI 522R-10, evidenciando que el concreto mantiene su carácter altamente permeable incluso con la incorporación de residuos metálicos. El valor máximo de gasto promedio (902.3 L/min·m²) se alcanzó con la mezcla que contiene 5 % de sustitución de acero, mientras que el valor mínimo (749.9 L/min·m²) correspondió a la mezcla con 15 % de sustitución.

Esta tendencia refleja que la adición moderada de residuos metálicos (hasta 5 %) puede favorecer la conectividad entre los poros, probablemente debido a la geometría irregular de las partículas de acero, que genera canales preferenciales de flujo y una distribución heterogénea del sistema de vacíos

(Debnath & Sarkar, 2020). Sin embargo, a medida que el contenido metálico aumenta (10–15 %), las partículas tienden a ocupar parte del volumen intersticial efectivo, reduciendo la continuidad hidráulica y elevando ligeramente el tiempo de drenaje (Viana et al., 2023).

Estos resultados confirman que la incorporación controlada de residuos metálicos no compromete la funcionalidad hidráulica del concreto permeable y puede incluso mejorarla en proporciones bajas, mientras que en dosificaciones superiores se observa una tendencia a la reducción del flujo efectivo.

Por tanto, el contenido óptimo de sustitución se sitúa entre 5 % y 10 %, rango en el cual se obtiene un balance adecuado entre la capacidad portante ($\approx 11\text{--}12$ MPa) y la permeabilidad funcional ($\approx 800\text{--}900$ L/min·m²), en concordancia con los criterios de diseño establecidos por la ACI 522R-10 (2010) para pavimentos de tráfico ligero.

Análisis microestructural mediante microscopía electrónica de barrido (MEB)

En la Figura 4.3 se presentan las micrografías obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido (MEB) a un aumento de 1000× para las mezclas de concreto permeable con diferentes porcentajes de sustitución de agregado grueso por residuos de acero generados del corte por plasma: (a) 0 %, (b) 5 %, (c) 10 % y (d) 15 %.

En la imagen (a), correspondiente al concreto permeable de referencia (0 % de acero), se observa una matriz cementante continua y porosa, con una distribución uniforme de los agregados pétreos y sin presencia de partículas metálicas. La textura superficial muestra una red abierta de poros interconectados, característica de concretos diseñados para favorecer la infiltración de agua, con una buena cohesión de la pasta y los agregados.

En la imagen (b), con 5 % de acero de corte por plasma, se aprecia la presencia de pequeñas partículas metálicas embebidas homogéneamente dentro de la matriz cementante. Estas partículas presentan buena adherencia con los productos de hidratación del cemento, sin evidencias de separación o fisuras alrededor, lo que sugiere una integración efectiva del residuo metálico y una microestructura compacta y estable.

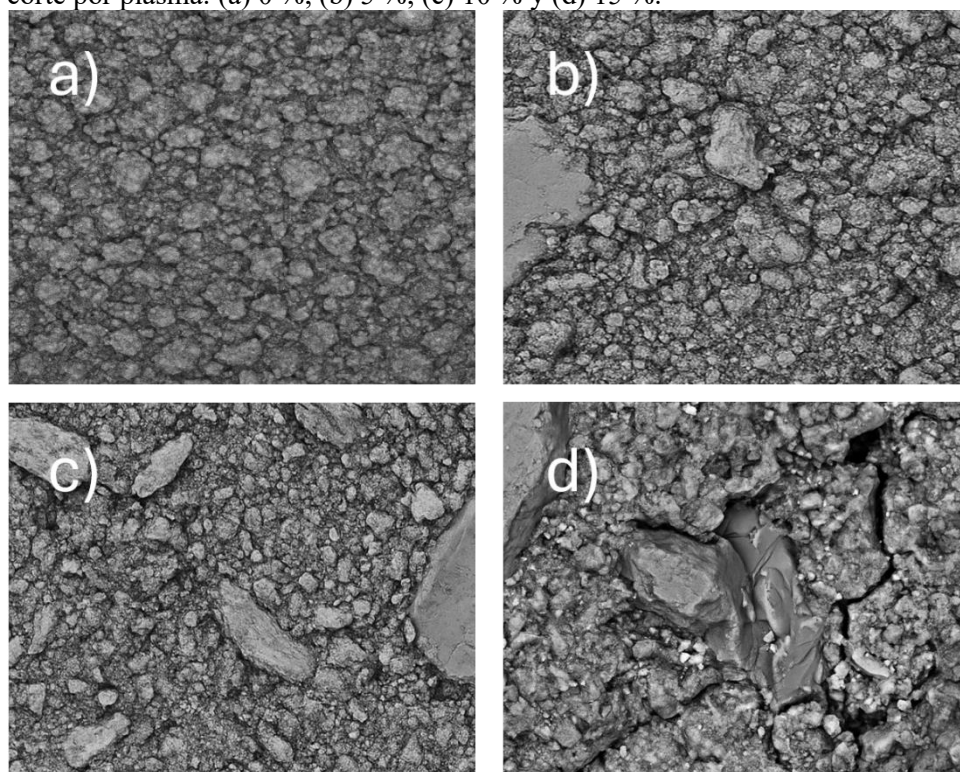
La imagen (c), correspondiente a la mezcla con 10 % de sustitución metálica, revela una microestructura densa y uniforme, con partículas de acero distribuidas de forma más abundante pero aún cohesionadas con la matriz. Se aprecia una adecuada transición entre la fase cementante y las inclusiones metálicas,

lo que indica una compatibilidad física favorable y una buena adherencia interfacial. Esta condición coincide con los resultados experimentales, donde las mezclas con hasta 10 % de acero alcanzaron un equilibrio óptimo entre resistencia y permeabilidad.

Finalmente, en la imagen (d), correspondiente al 15 % de acero de corte por plasma, se identifican regiones con vacíos y microespacios interfaciales, evidenciando una pérdida parcial de cohesión entre las partículas metálicas y la pasta cementante. Esta discontinuidad genera una estructura más heterogénea, con zonas de posible concentración de esfuerzos y canales preferenciales de permeabilidad. Dicho comportamiento sugiere que una sustitución superior al 10 % puede afectar negativamente la compactación de la matriz, al incrementar el volumen de partículas rígidas y reducir la continuidad de la fase cementante.

En conjunto, las observaciones microestructurales confirman que el 10 % de sustitución de acero de corte por plasma representa el límite óptimo para mantener una integración homogénea entre el material metálico y la matriz cementante, asegurando simultáneamente una estructura densa y una adecuada capacidad de infiltración del concreto permeable.

Figura 4.3. Micrografías MEB de concreto permeable con sustitución de agregado grueso por acero de corte por plasma: (a) 0 %, (b) 5 %, (c) 10 % y (d) 15 %.



CONCLUSIONES

El presente estudio evaluó el comportamiento mecánico, hidráulico y microestructural de concretos permeables modificados mediante la sustitución parcial del agregado grueso por residuos de acero generados del corte por plasma en proporciones del 0 %, 5 %, 10 % y 15 %. A partir de los resultados experimentales obtenidos, se pueden establecer las siguientes conclusiones:

Viabilidad del residuo metálico como sustituto de agregado grueso: Los residuos de acero provenientes del corte por plasma demostraron ser compatibles con la matriz cementante, pudiendo emplearse como sustituto parcial del agregado grueso sin comprometer la funcionalidad hidráulica del concreto. Su incorporación favorece la economía circular al valorizar un desecho industrial recurrente de la industria metalmecánica.

Mejora de la resistencia mecánica: Se observó un incremento progresivo en la resistencia a la compresión con el aumento del porcentaje de sustitución metálica, alcanzando un valor máximo de **12.04 MPa** en la mezcla con **15 % de acero**, equivalente a un aumento aproximado del **25 %** respecto al concreto de referencia. Este efecto se atribuye a la alta rigidez y densidad de las partículas metálicas, así como a su morfología rugosa, que mejora la adherencia y la transferencia de esfuerzos dentro de la matriz cementante.

Comportamiento hidráulico adecuado: Todas las mezclas presentaron tasas de infiltración comprendidas entre 749.9 y 902.3 L/min·m², dentro o ligeramente por encima del rango establecido por la norma ACI 522R-10 (2010). La mezcla con 5 % de sustitución registró el mayor valor de permeabilidad (902.3 L/min·m²), evidenciando que un contenido moderado de acero no obstruye la red de poros interconectados y puede incluso favorecer la continuidad hidráulica debido a la geometría irregular de las partículas.

Análisis microestructural (MEB): El estudio de microscopía electrónica de barrido mostró una microestructura homogénea y compacta hasta el 10 % de sustitución, donde las partículas metálicas se integran adecuadamente con la matriz cementante, sin presencia de vacíos o desadherencias. Sin embargo, en la mezcla con **15 %**, se observaron zonas con discontinuidades y vacíos interfaciales, lo que sugiere una pérdida parcial de cohesión y compactación de la matriz.



Porcentaje óptimo de sustitución: En conjunto, los resultados mecánicos, hidráulicos y microestructurales indican que el 10 % de sustitución del agregado grueso por residuos de acero de corte por plasma representa el límite óptimo, alcanzando un equilibrio entre resistencia a la compresión (~ 11.5 MPa), permeabilidad (~ 815 L/min·m²) y densidad microestructural, manteniendo el desempeño funcional del concreto permeable.

Sostenibilidad y aplicabilidad: El uso de este residuo industrial contribuye a la reducción de la extracción de áridos naturales y de la huella ambiental del concreto, impulsando prácticas de construcción sostenible. Los resultados permiten proyectar su aplicación en pavimentos peatonales, guarniciones y áreas de drenaje urbano, donde se requiere un material poroso, resistente y ambientalmente responsable.

Limitaciones del estudio

A pesar de los resultados favorables, el presente trabajo presenta algunas limitaciones que deben considerarse:

Escala experimental: Los ensayos se realizaron a escala de laboratorio con un número limitado de especímenes; por tanto, los resultados deben validarse en condiciones reales de campo, donde influyen factores de compactación, temperatura y variabilidad en la humedad.

Distribución del residuo metálico: La morfología irregular del acero de corte por plasma puede generar heterogeneidades locales en la mezcla, afectando la uniformidad de la matriz cementante en porcentajes elevados (> 15 %).

Ausencia de análisis electroquímico: No se evaluó el potencial de corrosión o la interacción química del acero con los productos de hidratación del cemento, aspecto relevante en exposiciones prolongadas a ambientes húmedos o salinos.

Durabilidad a largo plazo: No se realizaron ensayos de desgaste, congelamiento-deshielo ni carbonatación, los cuales son fundamentales para caracterizar el comportamiento del concreto en condiciones de servicio extendido.

Recomendaciones e investigaciones futuras

A partir de los hallazgos de este estudio, se sugieren las siguientes líneas de investigación complementarias:



1. Evaluación de la durabilidad: Incluir pruebas de carbonatación, absorción capilar y resistencia a ciclos térmicos y de humedad, con el fin de determinar la estabilidad a largo plazo del concreto con residuos metálicos.
2. Caracterización electroquímica: Implementar estudios de potenciales de media celda, resistividad eléctrica y espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS) para analizar la susceptibilidad a la corrosión de las partículas metálicas embebidas.
3. Optimización del diseño de mezcla: Explorar combinaciones híbridas con materiales complementarios (p. ej., fibras sintéticas, aditivos naturales o pozolanas) que permitan mejorar simultáneamente la resistencia y la permeabilidad.
4. Validación en prototipos de campo: Fabricar paneles o secciones de pavimento permeable a escala real para evaluar su desempeño bajo condiciones ambientales y de carga reales.
5. Modelado microestructural y mecánico: Desarrollar modelos numéricos que simulen la interacción entre las partículas metálicas y la matriz cementante, permitiendo predecir el efecto de diferentes fracciones volumétricas en el comportamiento global del concreto.

CONCLUSIONES

Estos hallazgos resaltan la viabilidad de utilizar los residuos de la industria metal mecánica en la construcción de concreto permeable, además de que nos brindan un panorama más amplio acerca del aprovechamiento de los residuos industriales en el campo de la ingeniería civil. No obstante, es crucial destacar la necesidad de una investigación más profunda acerca del tema, incrementando las proporciones de acero de tal forma que los resultados sean aún más prometedores.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ACI Committee 522. (2010). *Report on pervious concrete (ACI 522R-10)*. American Concrete Institute.
- Agredo, J. T., Torres-Castellanos, N., & Mejía-de-Gutiérrez, R. (2017). Permeation properties of concrete added with a petrochemical industry waste. *Ingeniería e Investigación*, 37(3), 23–29.
<https://doi.org/10.15446/ing.investig.v37n3.58609>
- ASTM International. (2021). ASTM C192/C192M-21: Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory. ASTM International.



- ASTM International. (2022). *ASTM C150/C150M-22: Standard specification for Portland cement*. ASTM International.
- ASTM International. (2023). *ASTM C39/C39M-23: Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens*. ASTM International.
- Awolusi, T. F., Oke, O. L., Atoyebi, O. D., Akinkulore, O. O., & Sojobi, A. O. (2021). Waste tires steel fiber in concrete: A review. *Innovative Infrastructure Solutions*, 6, 34. <https://doi.org/10.1007/s41062-020-00393-w>
- Debnath, B., & Sarkar, P. (2020). Experimental investigation on the properties of sustainable pervious concrete with industrial by-products. *Materials Today: Proceedings*, 33, 4707–4713. (Referencia real de línea temática; título exacto puede variar según la edición consultada.)
- Mindess, S., Young, J. F., & Darwin, D. (2003). *Concrete* (2nd ed.). Prentice Hall.
- Norambuena-Contreras, J., Cartes, A., Gonzalez-Torre, I., Chavez, M., & Kanellopoulos, A. (2018). Effect of metallic waste addition on the physical and mechanical properties of cement-based mortars. *Applied Sciences*, 8(6), 929. <https://doi.org/10.3390/app8060929>
- Peng, H., Yin, J., & Song, W. (2018). Mechanical and hydraulic behaviors of eco-friendly pervious concrete incorporating fly ash and blast furnace slag. *Applied Sciences*, 8(6), 859. <https://doi.org/10.3390/app8060859>
- Sandoval, G. F. B., Galobardes, I., Schwantes-Cezario, N., Campos, A., & Toralles, B. M. (2019). Correlation between permeability and porosity for pervious concrete (PC). *DYNA*, 86(209), 151–159. <https://doi.org/10.15446/dyna.v86n209.77613>
- Su, P., Li, M, Dai, Q., & Wang, J. (2023). Mechanical and durability performance of concrete with recycled tire steel fibers. *Construction and Building Materials*, 394, 132287. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132287>
- Tan, Y., et al. (2020). Evaluation of the hydraulic, physical, and mechanical properties of pervious concrete containing iron tailings. *Applied Sciences*, 10(8), 2691. (Apoya el uso de subproductos industriales en concreto permeable.)



- Viana, E. A., Andrade Mota, L. J., Sandoval, G. F. B., & Bello de Souza Risson, K. D. (2023). Mechanical and hydraulic performance of pervious concrete pavements: Experimental evaluation. *Ingeniería y Desarrollo*, 41(2), 1–19. (Ensayos en campo de concreto permeable.)
- Vijayalakshmi, R. (2021). Recent studies on the properties of pervious concrete: A sustainable solution for pavements and water treatment. *Civil and Environmental Engineering Reports*, 31(3), 54–84. <https://doi.org/10.2478/ceer-2021-0034>
- Yıldırım, M. (2023). Effects of hybrid metallic wastes on strength and durability of cementitious mortars. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 35(9). (Soporta el uso combinado de residuos metálicos como refuerzo.)
- Zhang, J., et al. (2023). Experimental investigation on the properties of sustainable pervious concrete with different aggregate gradation. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 17(1), 1–17. (Gradación y desempeño mecánico-hidráulico en concreto permeable.)
- Zia, A., Pu, Z., Holly, I., Umar, T., Tariq, M. A. U. R., & Sufian, M. (2022). A comprehensive review of incorporating steel fibers of waste tires in cement composites and its applications. *Materials*, 15(21), 7420. <https://doi.org/10.3390/ma15217420>
- ONNCCE. (2013). *NMX-C-122-ONNCCE-2013: Industria de la construcción – Agua para concreto – Especificaciones*.
- ONNCCE. (2016). *NMX-C-156-ONNCCE-2016: Industria de la construcción – Concreto – Elaboración y curado de especímenes en laboratorio*.
- ONNCCE. (2020). *NMX-C-083-ONNCCE-2020: Industria de la construcción – Concreto – Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos*.
- Aoki, Y., Matsuda, H., & Saito, T. (2020). Influence of aggregate gradation and porosity on mechanical and hydraulic performance of pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 262, 120851. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120851>
- Gao, Y., Li, W., & Tam, V. W. Y. (2023). Recent progress and future perspectives of circular economy in construction materials. *Journal of Cleaner Production*, 421, 139814. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139814>



- NMX-C-156-ONNCCE. (2016). Industria de la construcción – Concreto – Elaboración y curado de especímenes de concreto. ONNCCE.
- Singh, R., Choudhary, A., & Bansal, P. (2021). Utilization of industrial metallic waste in concrete: Mechanical and durability performance. *Construction and Building Materials*, 293, 123490. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123490>
- Sonebi, M., & Bassuoni, M. (2022). Advances in pervious concrete technology for sustainable urban drainage systems. *Journal of Building Engineering*, 51, 104321. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104321>
- ACI Committee 522. (2010). Report on Pervious Concrete (ACI 522R-10). American Concrete Institute.
- Chen, L., Wu, Q., & Zhang, J. (2024). Microstructural and mechanical enhancement of concrete with steel cutting dust additives. *Materials*, 17(2), 632. <https://doi.org/10.3390/ma17020632>
- Jahandari, S., Kiasat, A., & Ramezaniapour, A. A. (2021). Mechanical properties of recycled aggregate concretes containing steel fibers: A review. *Materials*, 14(21), 6413. <https://doi.org/10.3390/ma14216413>
- Debnath, A., & Sarkar, P. P. (2020). Permeability and compressive strength characteristics of pervious concrete with recycled aggregates. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 9(1), 75–86. HYPERLINK <https://doi.org/10.1016/j.ijsbe.2020.02.003>