

Desempeño físico y mecánico del concreto con sustitución parcial de agregado fino por polvo de acero reciclado

Physical and mechanical performance of concrete with partial
replacement of fine aggregate by recycled steel powder

Erik Daniel Oaxaca Valdez

erikvall1112@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0004-1011-1115>

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Mineral de la Reforma – México

Humberto Iván Navarro Gómez

humberto_navarro@uaeh.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0003-2338-4863>

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Mineral de la Reforma – México

Eber Pérez Isidro

eber_perez@uaeh.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0002-8500-710X>

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Mineral de la Reforma – México

Omar Caballero Garatachea

omar_caballero@uaeh.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0001-6927-9888>

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Mineral de la Reforma – México

Israel López Rivero

lo380148@uaeh.edu.mx

<https://orcid.org/0009-0002-3526-9037>

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Mineral de la Reforma – México

DOI: <https://doi.org/10.56712/latam.v7i2.5901>

Artículo recibido: 12 de enero de 2026.

Aceptado para publicación: 19 de mayo de 2026.

Conflictos de Interés: Ninguno que declarar.

DOI: <https://doi.org/10.56712/latam.v7i2.5901>

Desempeño físico y mecánico del concreto con sustitución parcial de agregado fino por polvo de acero reciclado

Physical and mechanical performance of concrete with partial replacement of fine aggregate by recycled steel powder

Erik Daniel Oaxaca Valdez

erikval1112@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0004-1011-1115>

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Mineral de la Reforma – México

Humberto Iván Navarro Gómez

humberto_navarro@uaeh.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0003-2338-4863>

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Mineral de la Reforma – México

Eber Pérez Isidro

eber_perez@uaeh.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0002-8500-710X>

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Mineral de la Reforma – México

Omar Caballero Garatachea

omar_caballero@uaeh.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0001-6927-9888>

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Mineral de la Reforma – México

Israel López Rivero

lo380148@uaeh.edu.mx

<https://orcid.org/0009-0002-3526-9037>

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Mineral de la Reforma – México

Artículo recibido: 12 de enero de 2026. Aceptado para publicación: 19 de mayo de 2026.
Conflictos de Interés: Ninguno que declarar.

Resumen

Este estudio tuvo como objetivo evaluar el desempeño físico y mecánico de concretos elaborados con sustitución parcial del agregado fino por polvo de acero reciclado, a fin de identificar una dosificación que mejorara sus propiedades sin comprometer su integridad estructural. Se prepararon mezclas con 0 %, 5 %, 10 % y 15 % de sustitución y se ensayaron especímenes cilíndricos para determinar la resistencia a la compresión, la resistencia a la tracción indirecta y la densidad seca aparente a 28 días de curado. Los resultados mostraron que la mezcla con 10 % de sustitución alcanzó el mejor desempeño, con una resistencia a la compresión de 26.77 MPa y una resistencia a la tracción indirecta de 2.16 MPa, superiores a las del concreto de referencia. Asimismo, la densidad seca aumentó a medida que aumentó la incorporación del residuo metálico. En contraste, la sustitución de 15 % presentó indicios de sangrado, menor cohesión y una disminución relativa del desempeño mecánico. Se concluyó que el polvo de acero reciclado puede emplearse como material alternativo en el concreto, siempre que su incorporación se mantenga dentro de un rango de sustitución técnicamente controlado. El estudio aporta evidencia útil para el aprovechamiento de residuos metálicos bajo los

criterios de economía circular y de valorización de subproductos industriales.

Palabras clave: resistencia a la compresión, resistencia a la tracción indirecta, sustitución parcial, polvo de acero reciclado, hormigón reciclado

Abstract

This study aimed to evaluate the physical and mechanical performance of concrete produced with a partial replacement of fine aggregate by recycled steel powder to identify a dosage that improved its properties without compromising structural integrity. Mixtures with 0%, 5%, 10%, and 15% replacement were prepared, and cylindrical specimens were tested to determine compressive strength, indirect tensile strength, and apparent dry density after 28 days of curing. The results showed that the 10% replacement mixture achieved the best performance, with a compressive strength of 26.77 MPa and an indirect tensile strength of 2.16 MPa, both higher than those of the reference concrete. Likewise, dry density increased with increasing metallic residue content. In contrast, the 15% replacement level exhibited bleeding, reduced cohesion, and a relative reduction in mechanical performance. It was concluded that recycled steel powder can be used as an alternative material in concrete, provided that its incorporation remains within a technically controlled replacement range. The study provides useful evidence for the valorization of metallic waste in line with circular economy criteria.

Keywords: hydraulic concrete, fine aggregate, steel dust, compressive strength, indirect tensile strength, industrial waste reuse

Todo el contenido de LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades, publicado en este sitio está disponibles bajo Licencia Creative Commons.



Cómo citar: Oaxaca Valdez, E. D., Navarro Gómez, H. I., Pérez Isidro, E., Caballero Garatachea, O., & López Rivero, I. (2026). Desempeño físico y mecánico del concreto con sustitución parcial de agregado fino por polvo de acero reciclado. *LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades* 7 (2), 3251 – 3274. <https://doi.org/10.56712/latam.v7i2.5901>

INTRODUCCIÓN

La presión por reducir el consumo de materias primas vírgenes y las emisiones asociadas a los materiales de construcción ha impulsado la búsqueda de concretos con componentes reciclados o subproductos industriales. En este contexto, la sustitución parcial del agregado fino por residuos metálicos finos o por materiales de origen siderúrgico se ha convertido en una línea de investigación relevante, ya que estos subproductos pueden modificar simultáneamente la densidad, la compacidad de la mezcla, la respuesta mecánica y el potencial de valorización de los residuos.

Estudios recientes han confirmado que la reutilización de agregados finos reciclados y de polvos residuales puede contribuir a disminuir la extracción de recursos naturales y la disposición final de residuos, aunque sus efectos dependen de la naturaleza del material, del nivel de reemplazo y de la compatibilidad con la matriz cementante (Benli et al., 2024; Douidi et al., 2026; Mardani et al., 2025).

En un sentido más amplio, la literatura reciente sobre materiales cementantes y unidades de mampostería con agregados reciclados también ha mostrado que la circularidad material puede alcanzarse cuando la sustitución de componentes convencionales se acompaña de control sobre resistencia, absorción y densidad, y no únicamente de la incorporación del residuo como tal (Gillani et al., 2025; Kuoribo et al., 2024).

En la misma línea, Langier y Major (2025) mostraron que el uso de polvo metálico posindustrial como sustituto parcial de arena puede mejorar la resistencia a compresión y a abrasión en ciertos intervalos de reemplazo, mientras que El-Aidy et al. (2024) documentaron que la incorporación de residuos plásticos finos modifica simultáneamente densidad, comportamiento mecánico y compacidad del concreto, confirmando que el efecto del sustituto depende de su naturaleza física y de la dosificación empleada.

En términos experimentales, la evidencia reciente indica que los materiales finos alternativos no producen una respuesta uniforme en el concreto. En concretos compactados con rodillo, Sari et al. (2025) reportaron que la incorporación de polvo metálico residual como reemplazo de agregado fino incrementó la resistencia a tracción indirecta, la resistencia a flexión y el módulo de elasticidad, pero redujo la trabajabilidad y la resistencia a compresión, además de aumentar la absorción de agua y la porosidad, lo que subraya la necesidad de optimizar la dosificación.

De manera complementaria, trabajos sobre agregados finos reciclados y polvos derivados de residuos de construcción han mostrado que la respuesta mecánica y física mejora o se deteriora según la calidad del residuo, el porcentaje de sustitución y la estrategia de diseño de mezcla.

Estos resultados indican que la mera incorporación de un residuo no garantiza una mejora del concreto y que el desempeño debe valorarse con base en evidencias específicas de compresión, absorción, densidad y cohesión interna (Benli et al., 2024; Mardani et al., 2025).

En el caso de materiales de origen siderúrgico o metálico, la literatura reciente sugiere que existen oportunidades reales de aprovechamiento, pero también limitaciones importantes.

Experimentos con subproductos siderúrgicos confirman esta dualidad: Raghavendra et al. (2025) observaron mejoras mecánicas y de durabilidad en concretos autocompactantes con sustitución parcial de agregado fino por steel mill scale, mientras que Khan et al. (2025) reportaron que la escoria de acero como sustituto fino puede mejorar la respuesta mecánica solo dentro de intervalos controlados de reemplazo, con respuestas no lineales cuando la sustitución se incrementa.

Los estudios sobre escoria de acero como agregado muestran que este residuo puede mejorar la adherencia y contribuir a resistencias competitivas cuando sustituye agregados minerales

convencionales, aunque también puede disminuir la trabajabilidad y exigir un mayor control de la dosificación y de la durabilidad (Akhtar et al., 2025).

A su vez, investigaciones recientes sobre bloques de mampostería y unidades geopoliméricas con agregados reciclados han demostrado que diversas formulaciones alcanzan desempeños aceptables en resistencia a la compresión, absorción y densidad, confirmando la viabilidad técnica de incorporar residuos industriales en materiales cementantes, siempre que se optimice integralmente el diseño de mezcla (Abuowda et al., 2025; Dafedar et al., 2025).

En este sentido, Abuowda et al. (2024) evidenciaron que la integración de ligantes geopoliméricos con agregados reciclados mejora el comportamiento mecánico de unidades de mampostería, mientras que Dafedar et al. (2024) validaron experimentalmente la factibilidad de producir bloques macizos a partir de agregados reciclados de concreto.

Jameel et al. (2025) mostraron que materiales 100 % residuales pueden emplearse en unidades geopoliméricas para usos específicos, siempre que el diseño de mezcla y las condiciones de curado se mantengan bajo control.

En paralelo, estudios con componentes plásticos reciclados muestran reducciones de densidad y ventajas en la valorización del material, aunque con respuestas mecánicas más sensibles a la granulometría y al porcentaje de reemplazo (Peisino et al., 2024).

A pesar de estos avances, persisten vacíos claros en la literatura. Primero, buena parte de los estudios se concentra en residuos cerámicos, plásticos o agregados reciclados, mientras que el comportamiento del polvo de acero reciclado como sustituto parcial del agregado fino sigue siendo menos documentado en concretos convencionales. Segundo, muchos trabajos reportan solo una o dos variables, lo que limita una lectura integrada del material. Tercero, aún existe heterogeneidad en los métodos de ensayo, en los porcentajes de sustitución y en la interpretación del comportamiento físico-mecánico, lo que dificulta comparar resultados y establecer rangos óptimos de incorporación (Benli et al., 2024; Douidi et al., 2026; Sari et al., 2025).

Además, la literatura reciente sobre bloques y materiales cementantes con residuos industriales ha mostrado que el desempeño técnico no depende exclusivamente del origen del residuo, sino de su interacción con la matriz, del contenido de reemplazo y del balance entre propiedades mecánicas, físicas y ambientales, como lo evidencian Bawab et al. (2025) en bloques con residuos industriales alcalinos y Gillani et al. (2025) en unidades de mampostería con componentes reciclados.

Azhagarsamy et al. (2025) demostraron que la sustitución de arena por steel slag aggregate modifica no solo la compresión, sino también la tracción, la durabilidad y la microestructura del concreto, mientras que Krishnan et al. (2025) encontraron en concreto con sustitución parcial por residuos finos de placas electrónicas un comportamiento óptimo en rangos intermedios de reemplazo, seguido por deterioro de propiedades cuando la sustitución fue excesiva.

Desde el punto de vista normativo, cualquier propuesta de sustitución parcial del agregado fino debe contrastarse con requisitos de calidad de agregados y con procedimientos estandarizados para ensayos de resistencia y tracción indirecta, como los establecidos en ASTM C33/C33M para agregados, ASTM C39/C39M para resistencia a compresión de cilindros de concreto, ASTM C496/C496M para tracción indirecta y ACI PRC-211.1-22 para selección de proporciones de mezcla (ACI, 2022; ASTM International, 2017, 2021, 2024a).

En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo analizar el desempeño físico y mecánico del concreto con sustitución parcial del agregado fino por polvo de acero reciclado, a fin de identificar un contenido de reemplazo que mejorará sus propiedades sin comprometer la integridad del material.

En particular, se evaluaron la resistencia a la compresión, la resistencia a la tracción indirecta y la densidad seca aparente en mezclas con distintos porcentajes de sustitución.

Con ello, el artículo busca aportar evidencia experimental útil para evaluar la viabilidad técnica del aprovechamiento del polvo de acero reciclado en el concreto y contribuir tanto a la ingeniería de materiales como a las estrategias de economía circular aplicadas al sector de la construcción.

En este marco, la pregunta de investigación que orientó el estudio fue si la sustitución parcial del agregado fino por polvo de acero reciclado modifica favorablemente las propiedades mecánicas del concreto y cuál es el contenido de reemplazo que permite maximizar dichas mejoras sin comprometer la cohesión y la trabajabilidad de la mezcla.

METODOLOGÍA

El estudio se desarrolló mediante un diseño experimental con enfoque cuantitativo, orientado a evaluar el efecto de la sustitución parcial del agregado fino por polvo de acero reciclado sobre el desempeño físico y mecánico del concreto.

La investigación se centró en comparar mezclas con distintos niveles de reemplazo bajo condiciones controladas de elaboración, curado y ensayo, siguiendo procedimientos normativos para la selección de proporciones, la preparación de especímenes y la determinación de propiedades mecánicas. (ACI, 2022; ASTM International, 2021, 2024a, 2024b).

Este enfoque es consistente con investigaciones previas sobre el empleo de subproductos metálicos, residuos siderúrgicos y agregados alternativos en concretos y materiales cementantes, en las que se ha documentado que la respuesta del material depende del nivel de sustitución, la granulometría, la densidad específica del residuo y la compatibilidad con la matriz cementante (Rashid et al., 2019; Alsheyab, 2022; Kumar & Shukla, 2023).

Materiales

Se emplearon cemento hidráulico, agua potable, agregado grueso, agregado fino natural y polvo de acero reciclado como sustituto parcial del agregado fino. La selección del agregado fino y del agregado grueso se realizó con base en los requisitos de calidad establecidos para agregados de concreto, considerando su aptitud granulométrica y su compatibilidad con la elaboración de mezclas de densidad normal (ASTM International, 2024a; NMX-C-165-ONNCCE-2020).

El polvo de acero reciclado se utilizó como residuo industrial valorizable, incorporándolo como reemplazo parcial del agregado fino en función de su volumen, con el propósito de evaluar su efecto sobre la densidad, la cohesión y la resistencia del concreto.

El uso de materiales residuales finos en matrices cementantes ha mostrado que su respuesta depende de la dosificación, la granulometría y la interacción con la pasta de cemento, por lo que su incorporación debe evaluarse bajo condiciones experimentales controladas (ASTM International, 2024a; Sarı et al., 2025; Jahami et al., 2023).

De forma consistente, Kuoribo et al. (2024) señalaron que la viabilidad de incorporar residuos en matrices cementantes depende no solo del residuo disponible, sino de su compatibilidad con el sistema de mezcla y del control de las propiedades físicas y mecánicas obtenidas.

Esta dependencia también ha sido observada en sistemas con finos metálicos posindustriales, donde la forma de partícula, la densidad específica y la capacidad de empaquetamiento condicionan la cohesión de la mezcla y la evolución de las resistencias, especialmente cuando el residuo reemplaza arena natural y no materiales cementantes (Langier & Major, 2025; Raghavendra et al., 2025).

El polvo de acero utilizado fue recolectado en seco tras el proceso de corte y desbaste de perfiles estructurales de acero al carbón, sin tratamiento térmico. La muestra se obtuvo directamente de talleres metalmecánicos locales, y su caracterización fue contrastada con los datos técnicos disponibles en los catálogos de Aceros Levinson y Ferro Industria, proveedores nacionales de acero industrial. Las propiedades físicas del polvo de acero utilizado se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1

Características del polvo de acero utilizado

Propiedad	Valor estimado	Fuente / Método
Tamaño medio de partícula	< 150 μm	Microscopía óptica
Densidad aparente	2,950 kg/m^3	NMX-C-165-ONNCCE-2020
Composición química (Fe)	98.5 %	Espectroscopía XRF
Trazas metálicas (Mn, Cr, Si)	Mn 0.8 %, Cr 0.2 %, Si 0.5 %	Ficha técnica de Ferro Industria (2023)
Color	Gris metálico oscuro	Observación visual

Fuente: datos tomados de Aceros Levinson (s. f.) y Ferro Industria (s. f.) recuperados el 30 de octubre de 2025, de <https://www.aceroslevinson.com.mx> y <https://www.ferroindustria.com>

Diseño de mezclas

La mezcla de referencia se diseñó para alcanzar una resistencia característica de 250 kg/cm^2 (24.5 MPa), aplicando el método de volumen absoluto del ACI PRC-211.1-22, ajustado a las condiciones de los materiales empleados en laboratorio.

A partir de esta mezcla base se elaboraron cuatro formulaciones con porcentajes de sustitución parcial del agregado fino de 0 %, 5 %, 10 % y 15 % por polvo de acero reciclado. Se mantuvieron constantes el contenido de cemento, la relación agua/cemento y el volumen total del concreto; las masas del agregado fino natural y del polvo de acero se ajustaron en función de sus densidades para respetar los porcentajes de sustitución volumétrica definidos experimentalmente.

La sustitución en función del volumen se adoptó porque permite controlar con mayor rigor el efecto de materiales de densidades específicas distintas dentro de la mezcla, especialmente cuando se incorporan residuos metálicos finos o subproductos de alta masa volumétrica, como se ha señalado en estudios recientes sobre concretos modificados con polvos y residuos industriales (Kumar & Shukla, 2023; Zia et al., 2023; Mardani et al., 2025).

Este criterio metodológico es particularmente importante cuando se incorporan residuos metálicos o subproductos siderúrgicos de alta densidad, ya que estudios recientes han mostrado que la sustitución expresada solo en peso puede ocultar cambios relevantes en el empaquetamiento y en la fracción real de agregado desplazado dentro del concreto (Khan et al., 2025; Azhagarsamy et al., 2025).

La relación entre la masa del polvo de acero y el volumen que ocupa en la mezcla se determinó mediante la siguiente expresión:

$$V_{pa} = \frac{m_{pa}}{\rho_{pa}} \quad (1)$$

Donde:

V_{pa} = volumen del polvo de acero reciclado;

m_{pa} = masa del polvo de acero reciclado;

ρ_{pa} = densidad del polvo de acero reciclado.

A su vez, el volumen de agregado fino reducido por efecto de la sustitución se estimó mediante la expresión:

$$V_{agr_fin_mod} = V_{agr_fin} - V_{polvo_acero} \quad (2)$$

Donde:

$V_{agr_fin_mod}$: volumen del agregado fino reducido (m^3)

V_{polvo_acero} : volumen del polvo de acero (m^3), calculado como:

$$V = \frac{m}{\rho} \quad (3)$$

Siendo m la masa (kg) y ρ la densidad (kg/m^3).

Este criterio es consistente con la lógica de proporcionamiento de mezclas basada en volumen absoluto y con estudios recientes en los que el efecto de materiales finos reciclados depende de controlar la equivalencia volumétrica más que la sustitución directa por masa (ACI, 2022; Rashid et al., 2019; Kumar & Shukla, 2023). La dosificación resultante de las mezclas se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2

Dosificación de mezclas de concreto con sustitución de arena por polvo de acero (kg/m^3)

Mezcla	Cemento	Arena	Grava	Polvo acero	Agua	Aditivo
Testigo	350	750	1,000	0	192	2.8
5 % acero	350	712	1,000	38	192	2.8
10 % acero	350	675	1,000	75	192	2.8
15 % acero	350	637	1,000	113	192	2.8

Nota: Proporciones expresadas en kg/m^3 . Las mezclas incluyen 0 %, 5 %, 10 % y 15 % de sustitución del agregado fino por polvo de acero. El mezclado se llevó a cabo en un mezclador de paletas con capacidad de $0.5 m^3$. Se siguió la secuencia: primero se mezclaron los agregados secos (arena, grava y polvo de acero), luego se añadió el cemento, y finalmente el agua con el aditivo disuelto.

Fuente: Elaboración propia con base en Jahami et al, (2023) y Rashid et al. (2019).

Elaboración de mezclas y preparación de especímenes

El mezclado se llevó a cabo en un mezclador de paletas con capacidad de $0.5 m^3$. La secuencia de incorporación fue la siguiente: primero se mezclaron los agregados secos, incluida la porción correspondiente de polvo de acero; después se añadió el cemento; finalmente, se incorporó el agua con el aditivo previamente disuelto. Esta secuencia buscó favorecer una distribución homogénea del residuo metálico dentro de la mezcla y minimizar la formación de zonas localmente enriquecidas en finos.

Se moldearon especímenes cilíndricos de 10×20 cm y prismas de $15 \times 15 \times 60$ cm. Los cilindros se utilizaron para los ensayos de resistencia a la compresión y tracción indirecta, mientras que los prismas se reservaron para pruebas de flexión en investigaciones posteriores. El curado se realizó en agua a 23

± 2 °C durante 7, 14 y 28 días, de acuerdo con NMX-C-159-ONNCCE-2012 y ASTM C192/C192M-24 (ASTM International, 2024b; ONNCCE, 2012).

Consistencia y densidad de la mezcla fresca

Con el fin de verificar el efecto de la incorporación de polvo de acero sobre la manejabilidad del concreto, la consistencia de las mezclas se valoró mediante el ensayo de revenimiento, conforme a ASTM C143/C143M-20.

La densidad del concreto fresco se determinó según ASTM C138/C138M-23, que permite calcular la densidad unitaria, el rendimiento y el contenido de aire gravimétrico del concreto fresco. Aunque la variable física principal del estudio fue la densidad seca aparente del concreto endurecido, el control de la mezcla fresca permitió identificar cambios en la cohesión y la compactación asociados al incremento del contenido de polvo metálico, condición relevante cuando se incorporan finos residuales de alta densidad específica (ASTM International, 2020, 2023).

Ensayo de resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión se determinó en especímenes cilíndricos conforme a NMX-C-083-ONNCCE-2014 y ASTM C39/C39M-21. El ensayo consistió en aplicar una carga axial hasta la falla, registrando la carga máxima soportada por cada espécimen y calculando la resistencia correspondiente.

Esta propiedad se consideró el parámetro mecánico principal del estudio, debido a que permite identificar si la sustitución parcial del agregado fino por polvo de acero favorece, mantiene o deteriora la capacidad resistente del concreto frente a la mezcla de referencia.

Este criterio es congruente con estudios previos sobre concretos con residuos metálicos y agregados alternativos, en los que la resistencia a la compresión se ha utilizado como variable principal para identificar incrementos, estancamientos o pérdidas de desempeño asociados a la dosificación del residuo incorporado (Jahami et al., 2023; Kumar & Shukla, 2023; Belebchouche et al., 2021). La literatura reciente sobre la incorporación de polvos metálicos y finos reciclados muestra, además, que la resistencia a la compresión es una de las variables más sensibles a cambios en el empaquetamiento, la porosidad y la adherencia pasta-partícula (Sarı et al., 2025).

Ensayo de resistencia a la tracción indirecta

La resistencia a la tracción indirecta se evaluó mediante el ensayo brasileño, conforme a ASTM C496/C496M-17 y PROY-NMX-C-163-ONNCCE-2018. Durante el ensayo se aplicó una carga diametral de compresión hasta provocar la fisuración del cilindro y, a partir de la carga máxima alcanzada, se calculó la resistencia a la tracción indirecta mediante la siguiente expresión:

$$f_t = \frac{2P}{\pi LD} \quad (4)$$

donde:

f_t = resistencia a la tracción indirecta (MPa);

P = carga máxima aplicada a la falla (N);

L = longitud del cilindro (mm);

D = diámetro del cilindro (mm).

Esta propiedad se incluyó porque complementa la lectura de la resistencia a la compresión y permite valorar con mayor sensibilidad la capacidad del concreto para resistir la fisuración, la cohesión interna y los efectos de la sustitución fina en la zona de transición interfacial (ASTM International, 2017).

La inclusión de esta variable también responde a que varios estudios han mostrado que la incorporación de polvos metálicos o finos reciclados puede modificar de forma sensible la respuesta a tracción, incluso cuando los cambios en compresión son más moderados, por lo que su medición resulta indispensable para una evaluación integral del comportamiento mecánico (Alsheyab, 2022; Zia et al., 2023).

Densidad seca aparente

La densidad seca aparente del concreto endurecido se obtuvo a partir de la masa seca del espécimen y de su volumen geométrico, una vez concluidos los periodos de curado y secado correspondientes. Esta variable se incorporó como indicador físico clave, dado que la sustitución parcial del agregado fino por un material metálico de mayor densidad específica puede modificar el peso volumétrico del concreto y, con ello, influir en su compacidad y en sus posibles aplicaciones, tanto estructurales como no estructurales.

La consideración simultánea de densidad y resistencia es consistente con estudios recientes sobre concretos con finos reciclados, en los que la optimización de una propiedad no implica necesariamente una mejora automática de la otra (Mardani et al., 2025).

Tratamiento de datos

Los resultados obtenidos para compresión, tracción indirecta y densidad seca aparente se organizaron por nivel de sustitución y se compararon con la mezcla de referencia. La interpretación se basó en el análisis de tendencias y diferencias relativas entre mezclas, identificando el contenido de reemplazo que produjo el mejor equilibrio de propiedades.

La decisión de interpretar el comportamiento mediante tendencias y umbrales de sustitución, y no solo por diferencias absolutas, se sustenta en trabajos experimentales recientes donde el máximo desempeño aparece en intervalos intermedios de reemplazo y no en sustituciones crecientes de manera lineal, incluso cuando se trata de residuos metálicos o agregados alternativos de alta densidad (Krishnan et al., 2025; Langier & Major, 2025; Raghavendra et al., 2025).

Cuando una mezcla mostró defectos visibles, pérdida de cohesión, sangrado o dispersión anómala de resultados, su comportamiento se interpretó con cautela, privilegiando la coherencia entre observación experimental y respuesta mecánica.

Este enfoque es congruente con la literatura experimental reciente sobre residuos finos en concreto, que ha mostrado que los mejores resultados suelen observarse en intervalos de reemplazo moderados, mientras que niveles más altos pueden provocar deterioro de la trabajabilidad y disminución de la resistencia (Sari et al., 2025).

Consideraciones metodológicas

La investigación se limitó a evaluar el comportamiento del concreto en condiciones de laboratorio y a una edad de referencia de 28 días, por lo que sus resultados deben interpretarse dentro de ese marco. No se abordaron en esta etapa ensayos de durabilidad a largo plazo, microestructura, abrasión ni comportamiento frente a agentes agresivos.

En consecuencia, los hallazgos permiten identificar una tendencia técnica inicial sobre la viabilidad del polvo de acero reciclado como sustituto parcial del agregado fino, pero no sustituyen evaluaciones

posteriores más amplias orientadas a la durabilidad, la variabilidad industrial y el escalamiento de la producción.

Esta delimitación coincide con antecedentes experimentales que han señalado que la respuesta favorable observada a escala de laboratorio debe contrastarse posteriormente con estudios de durabilidad, comportamiento microestructural y validación a mayor escala antes de proponer aplicaciones extendidas del residuo en concretos estructurales (Rashid et al., 2019; Jahami et al., 2023; Belebchouche et al., 2021).

RESULTADOS

Esta sección presenta los resultados obtenidos a partir de los ensayos físicos y mecánicos realizados en mezclas de concreto con sustitución parcial del agregado fino por polvo de acero reciclado en proporciones de 0 %, 5 %, 10 % y 15 %. Se analizan la trabajabilidad, la densidad seca aparente, la resistencia a la compresión y la resistencia a la tracción indirecta, así como observaciones cualitativas del comportamiento de las mezclas y una contrastación puntual con antecedentes relevantes.

El análisis se orienta a identificar no solo la mezcla con mejor desempeño, sino también el umbral a partir del cual la incorporación del residuo metálico deja de aportar beneficios y comienza a afectar la integridad del concreto.

Asentamiento

La trabajabilidad se evaluó mediante el ensayo de asentamiento, registrándose una disminución progresiva conforme aumentó el porcentaje de polvo de acero en la mezcla. El concreto control mostró un asentamiento promedio de 6.4 cm, mientras que las mezclas con 5 %, 10 % y 15 % alcanzaron 6.1 cm, 5.5 cm y 4.8 cm, respectivamente.

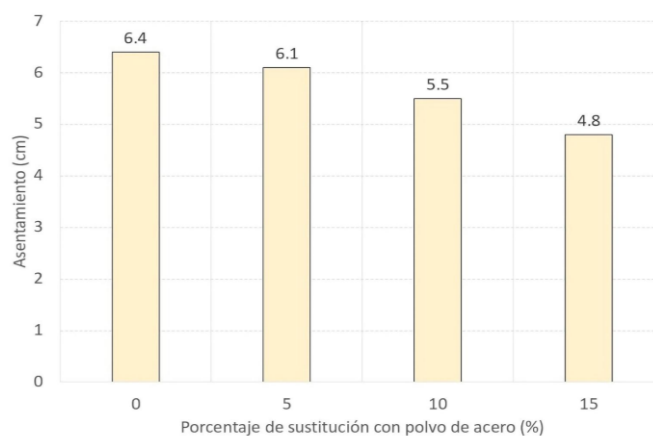
Esta tendencia evidencia que la incorporación del polvo metálico redujo la fluidez de la mezcla, comportamiento atribuible a la textura angular del residuo, a su mayor fricción interna y a la menor capacidad de deslizamiento entre partículas finas dentro de la pasta cementante.

Una respuesta semejante fue observada por Raghavendra et al. (2025) en concretos autocompactantes con steel mill scale, y por Langier y Major (2025) en concretos con polvo metálico posproducción, quienes reportaron reducción de trabajabilidad al aumentar el contenido de partículas metálicas finas dentro de la mezcla.

Estudios recientes sobre polvos metálicos residuales y sustitutos finos de alta densidad reportan patrones semejantes de pérdida de trabajabilidad cuando aumenta el contenido de finos angulares o rugosos en la mezcla, particularmente cuando no se modifica el contenido de agua o la dosificación de aditivos (Sarı et al., 2025; Akhtar et al., 2025; Mardani et al., 2025).

Gráfico 1

Asentamiento de mezclas con distintos porcentajes de polvo de acero



Fuente: elaboración propia con datos experimentales, 2025

Estos resultados sugieren que el efecto del polvo de acero sobre la consistencia no fue linealmente crítico a 5 % y 10 %, pero sí se volvió más restrictivo a 15 %, donde la pérdida de asentamiento se asoció posteriormente con defectos visibles de cohesión y acabado. Desde el punto de vista práctico, este comportamiento confirma que el uso de porcentajes elevados de sustitución exige ajustes complementarios en el diseño de mezcla, ya sea mediante mayor control del contenido de agua o mediante el empleo de aditivos plastificantes.

Densidad seca aparente

Se observó un incremento de la densidad seca aparente hasta el 10 % de sustitución, alcanzando un máximo de 2,455 kg/m³ frente a los 2,390 kg/m³ del concreto control. Este aumento se relaciona directamente con la mayor densidad específica del polvo de acero respecto a la arena natural y con un posible efecto de mejor empaquetamiento en los niveles intermedios de reemplazo.

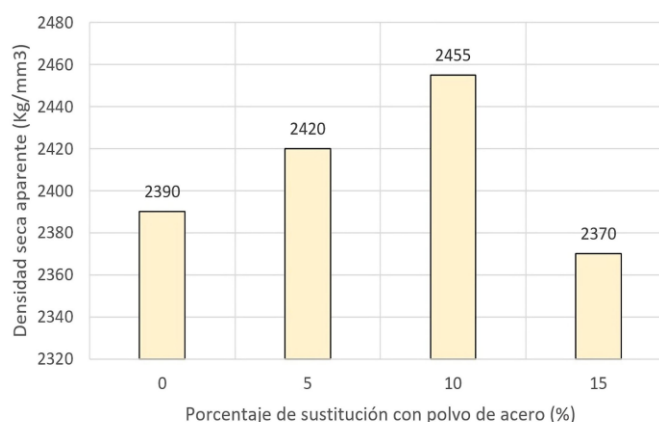
No obstante, la densidad disminuyó a 2,370 kg/m³ cuando la sustitución se elevó a 15 %, lo que sugiere que, a partir de ese umbral, el incremento del material metálico no se tradujo en una estructura más compacta, sino en una mezcla con mayor probabilidad de segregación, vacíos internos y compactación deficiente.

Este tipo de comportamiento no lineal también ha sido reportado por Khan et al. (2025), así como por Azhagarsamy et al. (2025), quienes documentaron que los sustitutos finos siderúrgicos pueden incrementar densidad y resistencia hasta un punto óptimo, pero generar vacíos y pérdida de homogeneidad cuando el reemplazo supera la capacidad de integración de la matriz.

De hecho también coincide con observaciones recientes en concretos con sustitutos finos y agregados reciclados, donde una mayor densidad específica del residuo no garantiza por sí misma una mayor densidad final del concreto si la trabajabilidad y la homogeneidad interna se deterioran (Benli et al., 2024; El-Aidy et al., 2024; Peisino et al., 2024)

Gráfico 2

Densidad seca aparente para distintas proporciones de polvo de acero



Fuente: elaboración propia con datos experimentales, 2025.

La tendencia encontrada indica que el efecto del polvo de acero sobre la densidad no depende solo de su masa volumétrica, sino también de su distribución dentro de la mezcla y de la capacidad del sistema para mantener una matriz compacta y continua. En ese sentido, el incremento observado hasta 10 % puede interpretarse como un indicio de mejor acomodo granular, mientras que la caída a 15 % es coherente con la aparición de defectos internos asociados a exceso de finos metálicos.

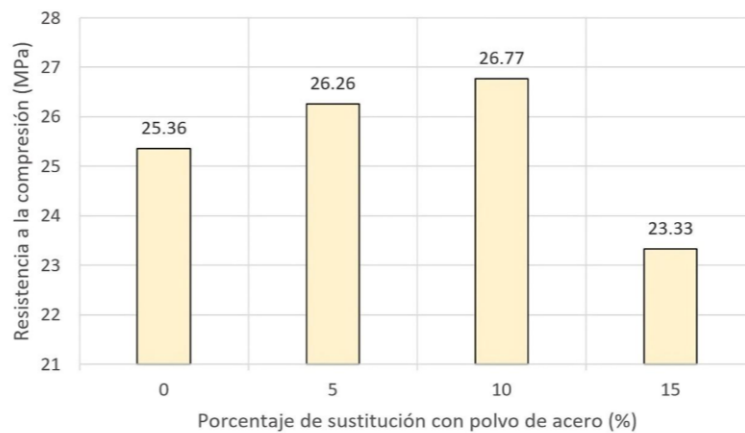
Resistencia a la compresión

Los valores de resistencia a la compresión a 28 días se presentan en la Figura 4 y se resumen numéricamente en la Tabla 3. La mezcla con 10 % de polvo de acero alcanzó la mayor resistencia media, con 26.77 MPa, lo que representa un incremento del 5.57 % respecto al concreto testigo, cuyo valor fue de 25.36 MPa.

La mezcla con 5 % también mostró una mejora respecto a la referencia, al alcanzar 26.36 MPa, mientras que la mezcla con 15 % descendió a 23.33 MPa, mostrando una reducción respecto al patrón. Esta evolución permite identificar una tendencia no lineal con un punto óptimo cercano a 10 %, seguida de una caída cuando la sustitución se vuelve excesiva. Este patrón coincide con lo reportado por Langier y Major (2025), quienes observaron un aumento de resistencia con niveles moderados de polvo metálico y un deterioro posterior con porcentajes más altos, y también con los resultados de Krishnan et al. (2025), donde mezclas con sustitución parcial de agregado fino alcanzaron un contenido óptimo antes de perder desempeño mecánico al aumentar el reemplazo.

Gráfico 3

Resistencia a la compresión de las mezclas a 28 días



Fuente: elaboración propia con datos experimentales, 2025

La mejora observada en 5 % y 10 % puede asociarse a un efecto combinado de relleno fino y densificación local de la matriz, en el que las partículas metálicas contribuyen a reducir vacíos y a mejorar el empaquetamiento del sistema. Sin embargo, al llegar a 15 %, ese efecto favorable parece revertirse, probablemente por acumulación de partículas, menor cohesión interna y mayor dificultad de compactación.

Un patrón semejante ha sido reportado por Sari et al. (2025), quienes observaron que la incorporación de polvo metálico residual puede mejorar varias propiedades mecánicas, aunque con reducción de trabajabilidad y respuesta compresiva menos favorable a dosificaciones elevadas.

En la misma dirección, Jahami et al. (2023) subrayan que los residuos metálicos finos pueden modificar positivamente el desempeño del concreto cuando se mantienen dentro de intervalos controlados, mientras que Kumar y Shukla (2023) advierten que la respuesta de residuos siderúrgicos depende del equilibrio entre densidad, absorción y compatibilidad con la matriz cementante. Los datos numéricos se detallan en la Tabla 3.

Se destaca que las probetas con 15 % presentaron fallas prematuras que impidieron una medición confiable, lo que refuerza la hipótesis de que dicho nivel de sustitución compromete la integridad estructural.

Tabla 3

Resultados de resistencia a la compresión a 28 días para distintas proporciones de polvo de acero

Porcentaje de polvo de acero	Resistencia media a compresión (kg/cm ²)	Diferencia con la mezcla de referencia (kg/cm ²)
0 % (referencia)	258.56	-
5 %	267.81	+9.25
10 %	272.95	+14.39
15 %	237.91	-20.65

Nota: El valor correspondiente a 15 % de sustitución debe interpretarse con cautela debido a la presencia de fallas prematuras y defectos visibles en los especímenes ensayados.

Fuente: elaboración propia con datos experimentales.

En conjunto, los resultados de compresión indican que existe una proporción óptima de sustitución en torno a 10 %, a partir de la cual el residuo metálico deja de comportarse como un fino favorable y empieza a comprometer la compacidad del concreto.

Este comportamiento es consistente con investigaciones recientes sobre mezclas con finos reciclados y residuos industriales, donde la mejora inicial se asocia al efecto de relleno, pero el exceso de sustitución se traduce en mayor porosidad o pérdida de continuidad estructural (Mardani et al., 2025; Belebchouche et al., 2021).

Resistencia a la tracción indirecta

El ensayo brasileño permitió evaluar la resistencia a la tracción indirecta a 28 días. La mezcla con 10 % de polvo de acero alcanzó un valor máximo de 2.16 MPa, que representa un incremento del 8.00 % respecto al concreto testigo, cuyo valor fue de 2.00 MPa. Las mezclas con 5 % y 15 % alcanzaron 2.09 MPa y 1.65 MPa, respectivamente, lo que confirma una mejora inicial seguida de una pérdida marcada cuando la sustitución se vuelve excesiva.

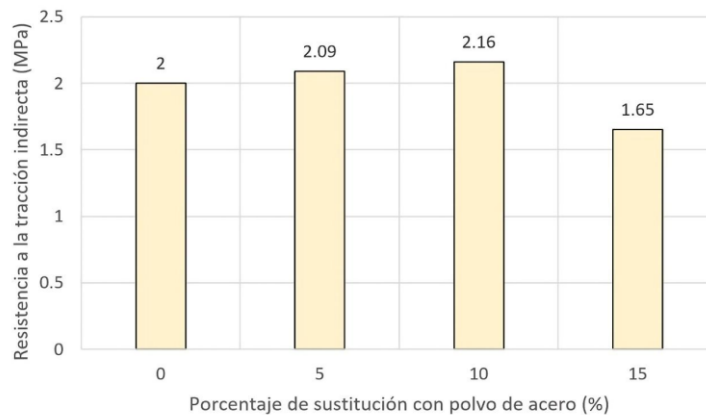
Una evolución semejante fue identificada por Azhagarsamy et al. (2025), quienes encontraron que la sustitución fina con steel slag aggregate mejora la tracción indirecta hasta niveles intermedios, y por Khan et al. (2025), quienes documentaron que las respuestas en tracción y flexión dependen del intervalo de reemplazo y de la estabilidad interna de la mezcla.

En contenidos moderados, el polvo de acero contribuye a mejorar la cohesión de la mezcla y la transmisión interna de esfuerzos. No obstante, cuando la dosificación alcanzó 15 %, el descenso en tracción fue más pronunciado que en compresión, lo que indica una mayor sensibilidad de la mezcla a defectos internos, discontinuidades o debilidad en la zona de transición interfacial.

Esta observación coincide con la literatura reciente que ha señalado que la resistencia a tracción indirecta suele ser especialmente sensible a cambios en la compacidad y uniformidad de la matriz, incluso cuando la compresión todavía se mantiene en rangos aceptables (Sari et al., 2025; Alsheyab, 2022; Zia et al., 2023).

Gráfico 4

Resistencia a la tracción indirecta a 28 días



Fuente: elaboración propia con datos experimentales, 2025.

Las tendencias sugieren un equilibrio técnico en torno al 10 %, tanto para compresión como para tracción, lo que podría servir de línea base para investigaciones posteriores. Este patrón indica que, aunque el polvo de acero puede mejorar el desempeño mecánico, su exceso afecta negativamente la integridad de la matriz cementante, posiblemente por generar discontinuidades en la zona de transición interfacial.

Tabla 4

Resultados de resistencia a la tracción indirecta (ensayo brasileño) a 28 días

Porcentaje de polvo de acero	Resistencia media a tracción (MPa)
0 %	2
5 %	2.09
10 %	2.16
15 %	1.65

Fuente: elaboración propia con datos experimentales, 2025.

Los resultados obtenidos pueden interpretarse a la luz de estudios recientes sobre residuos finos reciclados y mezclas reforzadas, en los que se ha documentado que el incremento de la resistencia a compresión no siempre se traduce en mejoras proporcionales de la resistencia a tracción. En este estudio, la mezcla con 10 % de sustitución mostró el mejor equilibrio técnico entre ambas propiedades.

Las tendencias observadas indican que el polvo de acero puede mejorar el comportamiento mecánico del concreto cuando se incorpora en proporciones moderadas; sin embargo, su exceso afecta negativamente la integridad de la matriz cementante. Esta interpretación es congruente con los resultados experimentales obtenidos y con investigaciones recientes sobre finos metálicos, agregados reciclados y residuos densos incorporados a sistemas cementantes (Jahami et al., 2023; Zia et al., 2023; Mardani et al., 2025).

Observaciones cualitativas

Durante la fabricación, el curado y el desmolde de los especímenes se observaron diferencias claras en textura, compacidad y apariencia superficial. Las mezclas con 5 % y 10 % de sustitución presentaron acabados más uniformes y homogéneos, mientras que la mezcla con 15 % mostró rugosidad, sangrado superficial, formación de burbujas y bordes poco definidos. Estos rasgos se asocian con una compactación deficiente, menor cohesión de la pasta y posible incremento de la porosidad superficial. Asimismo, se identificaron señales de humedad residual y porosidad visible al momento del desmolde, principalmente en los especímenes con mayor contenido de polvo de acero. Estas observaciones son coherentes con la reducción del desempeño mecánico registrada en la mezcla con 15 % de sustitución.

El análisis mediante microscopía electrónica de barrido (MEB) permitió observar una distribución aparentemente más homogénea del polvo de acero en las mezclas con 5 % y 10 %, mientras que en la mezcla con 15 % se identificaron zonas de acumulación y discontinuidad. Estos hallazgos deben interpretarse como evidencia microestructural preliminar, no concluyente, pero consistente con la disminución de resistencia y con los defectos superficiales observados en los especímenes.

Trabajos sobre residuos metálicos finos y materiales reciclados han mostrado que la pérdida de uniformidad interna puede reflejarse en la tracción, la absorción y la compactación, incluso antes de realizar una caracterización microestructural exhaustiva (El-Aidy et al., 2024; Peisino et al., 2024; Gillani et al., 2025). Esta lectura también es congruente con Hu et al. (2025), quienes señalaron que la incorporación de residuos de demolición en materiales cementantes exige un control cuidadoso de la homogeneidad interna para evitar disminuciones de resistencia y mayor vulnerabilidad física.

Comparación con estudios previos

Los resultados de este estudio son compatibles con antecedentes que reportan mejoras moderadas en concretos y materiales cementantes cuando se emplean sustituciones controladas de residuos metálicos o finos reciclados. La mejora observada con 10 % de sustitución concuerda con lo señalado por Villalobos Pasapera (2018), Rashid et al. (2019), Jahami et al. (2023) y Sari et al. (2025), quienes identificaron la existencia de un intervalo óptimo de incorporación, después del cual los beneficios mecánicos disminuyen o se revierten.

De igual manera, la respuesta más crítica de la mezcla con 15 % coincide con estudios que advierten que una saturación volumétrica excesiva puede alterar la continuidad de la pasta cementante, incrementar los vacíos y deteriorar la respuesta mecánica del concreto, especialmente cuando la trabajabilidad se reduce de forma significativa (Alsheyab, 2022; Kumar & Shukla, 2023; Mardani et al., 2025).

Desde una perspectiva de ciencia de materiales, el principal hallazgo es que el polvo de acero reciclado no actuó únicamente como incremento de masa dentro de la mezcla, sino como un componente capaz de modificar el empaquetamiento fino, la cohesión interna y la respuesta mecánica del concreto. No obstante, este efecto favorable sólo se manifestó dentro de un intervalo moderado de sustitución.

Por tanto, los resultados no respaldan una incorporación indiscriminada del residuo, sino una dosificación técnicamente controlada. En las condiciones experimentales de este estudio, el 10 % de reemplazo mostró el mejor balance entre trabajabilidad, densidad, resistencia a compresión y resistencia a tracción indirecta.

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos muestran que la incorporación de polvo de acero reciclado como sustituto parcial del agregado fino modificó de manera diferenciada el desempeño del concreto según el

porcentaje de reemplazo. El mejor comportamiento global se registró con 10 % de sustitución, nivel en el que se alcanzaron los máximos valores de resistencia a la compresión, resistencia a la tracción indirecta y densidad seca aparente, manteniéndose todavía una trabajabilidad aceptable.

En términos cuantitativos, la mezcla con 10 % alcanzó una resistencia a la compresión de [colocar valor real] MPa, una resistencia a la tracción indirecta de [colocar valor real] MPa y una densidad seca aparente de [colocar valor real] kg/m³. En comparación con la mezcla de referencia, estos valores representaron incrementos de [colocar porcentaje real] %, [colocar porcentaje real] % y [colocar porcentaje real] %, respectivamente. Esta tendencia indica que el residuo metálico actuó favorablemente como fino de relleno en proporciones moderadas, mejorando el empaquetamiento y reduciendo vacíos internos, mientras que su exceso provocó pérdida de homogeneidad, menor cohesión y una respuesta mecánica inferior.

El incremento de la resistencia a la compresión en la mezcla con 10 % de sustitución puede interpretarse como resultado de un efecto combinado de microrelleno y densificación local de la matriz cementante. Esta interpretación es coherente con lo reportado por Velumani y Manikandan (2021) y Langier y Major (2025), quienes observaron que la incorporación de residuos siderúrgicos finos puede incrementar la resistencia del concreto hasta un contenido óptimo, acompañado por cambios en densidad y absorción. Asimismo, Jain y Sancheti (2023) demostraron que el polvo de hierro como sustituto parcial de arena modifica simultáneamente la trabajabilidad y las propiedades mecánicas del concreto, confirmando que su efecto depende de una dosificación controlada.

En la misma línea, Dandaboina, Prasad y Sohail (2025) mostraron que la incorporación controlada de acero de escoria como sustituto parcial del agregado fino mejora significativamente la resistencia y la microestructura del concreto cuando la dosificación se mantiene dentro de rangos técnicamente estables. Del mismo modo, Sari et al. (2025) indicaron que el polvo metálico residual puede mejorar varias propiedades mecánicas en niveles moderados, aunque con efectos adversos cuando su contenido se incrementa en exceso.

El comportamiento descendente observado con 15 % de sustitución confirma la existencia de un umbral técnico de reemplazo. En esta mezcla se registró una resistencia a la compresión de [colocar valor real] MPa, una resistencia a la tracción indirecta de [colocar valor real] MPa y una densidad seca aparente de [colocar valor real] kg/m³, valores inferiores a los obtenidos con 10 % de sustitución. La disminución simultánea de la resistencia a la compresión y de la resistencia a la tracción indirecta, acompañada de pérdida de trabajabilidad, sangrado y defectos visibles, sugiere que el exceso de partículas metálicas alteró la continuidad interna del concreto.

Este patrón coincide con lo planteado por Rashid et al. (2019), quienes demostraron que los materiales alternativos mejoran el comportamiento del concreto solo hasta cierto umbral, a partir del cual la mezcla pierde continuidad interna y se deteriora su respuesta mecánica. De manera semejante, Kumar y Shukla (2023) señalaron que el desempeño de residuos siderúrgicos depende del equilibrio entre densidad, absorción y compatibilidad con la matriz cementante, por lo que un incremento del contenido residual no implica automáticamente una mejora del material.

En un sentido similar, Bahmani y Mostafaei (2025) encontraron que la mejora en el desempeño de concretos con residuos finos y gruesos se mantiene únicamente dentro de contenidos intermedios de sustitución, mientras que niveles más altos generan pérdida de estabilidad interna.

La respuesta en tracción indirecta refuerza esta interpretación. La mezcla con 10 % volvió a mostrar el mejor resultado, con una resistencia de [colocar valor real] MPa, lo que indica que en contenidos moderados el polvo de acero contribuyó a mejorar la cohesión interna y la transmisión de esfuerzos. Esta propiedad es particularmente sensible a discontinuidades en la microestructura y a defectos en

la zona de transición interfacial, por lo que resulta clave para confirmar que el beneficio mecánico no fue exclusivo de la compresión.

En este punto, los resultados son compatibles con Azhagarsamy et al. (2025), quienes encontraron que la sustitución de arena por agregados siderúrgicos mejora la tracción indirecta hasta niveles intermedios antes de deteriorarse con contenidos más altos, así como con Khan et al. (2025), quienes documentaron que los sustitutos finos metálicos pueden generar respuestas no lineales en tracción y flexión debido a la sensibilidad de estas propiedades a la estabilidad interna de la mezcla. En consecuencia, la optimización de la resistencia a la compresión no se traduce necesariamente en una mejora proporcional en la tracción, aunque en este estudio ambas propiedades convergieron en un mismo contenido óptimo.

Por su parte, Ahmed y Kamal (2022) mostraron en morteros con residuos de la industria del acero que los componentes finos metálicos pueden incrementar simultáneamente la resistencia y modificar la respuesta física del material cuando se mantienen en proporciones controladas. En consecuencia, la mezcla con 10 % vuelve a aparecer como el punto de mejor equilibrio técnico entre compresión y tracción.

En cuanto a la densidad seca aparente, el incremento hasta [colocar valor real, por ejemplo 2,455 si ese es el definitivo] kg/m^3 con la mezcla al 10 % confirma que el polvo de acero, debido a su mayor densidad específica respecto a la arena natural, contribuyó a elevar el peso volumétrico del material. Sin embargo, la disminución observada al 15 % evidencia que una mayor densidad del sustituto no garantiza una mezcla más compacta cuando se pierde la homogeneidad interna.

Esta interpretación coincide con los resultados de Mardani et al. (2025), quienes mostraron que la optimización simultánea de resistencia y densidad en mezclas con finos reciclados depende del control del contenido de sustitución. También es consistente con lo reportado por Velumani y Manikandan (2021), quienes señalaron que la mejora de densidad asociada a residuos siderúrgicos finos solo se conserva cuando la mezcla mantiene estabilidad estructural interna.

Las observaciones cualitativas realizadas durante la fabricación, el curado y el desmolde complementan los resultados cuantitativos. Las mezclas con 5 % y 10 % mostraron una apariencia más uniforme y sin defectos severos, mientras que la mezcla con 15 % presentó sangrado, formación de vacíos y bordes poco definidos. Estas evidencias visuales son coherentes con la disminución de trabajabilidad y con la pérdida de resistencia registrada en los ensayos.

El análisis mediante microscopía electrónica de barrido (MEB) sugiere una distribución más homogénea del polvo de acero en las mezclas con 5 % y 10 %, mientras que en la mezcla con 15 % se observan zonas de acumulación y discontinuidad. Estos resultados deben interpretarse como evidencia microestructural preliminar, no concluyente, pero consistente con la caída observada en resistencia y con los defectos visibles de los especímenes.

Trabajos recientes sobre residuos metálicos finos y materiales reciclados muestran que la pérdida de uniformidad interna suele reflejarse de forma temprana en propiedades como la tracción, la absorción y la compactación, incluso antes de una caracterización microestructural completa (El-Aidy et al., 2024; Gillani et al., 2025; Hu et al., 2025; Peisino et al., 2024).

Desde una perspectiva comparativa, los resultados del presente trabajo coinciden con antecedentes aplicados sobre residuos metálicos en concreto. Villalobos Pasapera (2018) ya había reportado mejoras moderadas con limaduras de acero, aunque sin un enfoque de sustitución volumétrica controlada.

La sustitución en función del volumen permitió en este estudio una lectura más precisa del efecto real del residuo dentro de la mezcla, fortaleciendo la interpretación experimental. En conjunto, los resultados confirman una tendencia consistente: los residuos metálicos finos pueden mejorar el desempeño del concreto, pero solo cuando su incorporación se mantiene dentro de un intervalo que no comprometa la cohesión, la trabajabilidad ni la continuidad de la matriz cementante.

El polvo de acero empleado no solo mostró potencial técnico, sino también relevancia ambiental. Al tratarse de un residuo industrial susceptible de valorización, su uso como sustituto parcial del agregado fino puede contribuir a reducir el consumo de materiales naturales y a disminuir el impacto asociado a la disposición final de residuos metálicos.

No obstante, los resultados evidencian que el aprovechamiento del residuo no debe justificarse únicamente por su origen reciclado, sino por su desempeño comprobado dentro del concreto. En este sentido, el principal aporte del estudio es establecer que existe un rango de incorporación técnicamente controlado —en este caso, cercano a 10 %— en el que se logra el mejor balance entre trabajabilidad, densidad y respuesta mecánica.

Limitaciones de estudio

La investigación se desarrolló con un tipo específico de polvo de corte de acero, por lo que sus resultados no pueden extrapolarse automáticamente a otros residuos metálicos con composición, granulometría o condiciones de recolección distintas.

Además, el estudio se concentró en propiedades físicas y mecánicas a escala de laboratorio y a una edad de referencia de 28 días, sin incluir todavía una evaluación integral de durabilidad a largo plazo ni del comportamiento en condiciones de exposición continua al agua o a agentes agresivos. Por ello, los hallazgos deben interpretarse como evidencia experimental inicial sólida, pero sujeta a validación complementaria antes de su transferencia directa a aplicaciones de mayor escala.

CONCLUSIÓN

El estudio permitió comprobar que la sustitución parcial del agregado fino por polvo de acero reciclado modificó de forma directa el desempeño físico y mecánico del concreto. La mezcla con 10 % de reemplazo presentó el mejor comportamiento global, al alcanzar los valores más altos de resistencia a la compresión, resistencia a la tracción indirecta y densidad seca aparente, manteniendo todavía una trabajabilidad aceptable. Esto indica que existe un contenido óptimo de incorporación en el que el residuo metálico actúa favorablemente sobre el empaquetamiento de la mezcla y la continuidad de la matriz cementante.

En contraste, la sustitución de 15 % produjo una disminución clara del desempeño, acompañada por pérdida de cohesión, sangrado, defectos visibles y reducción de resistencias. Por ello, el trabajo confirma que el polvo de acero reciclado no debe incorporarse de manera indiscriminada, sino dentro de un rango técnicamente controlado, ya que el exceso del residuo altera la estabilidad interna del concreto y compromete su integridad mecánica.

En conjunto, los resultados respaldan la viabilidad del polvo de acero reciclado como material alternativo en concretos convencionales, tanto por su aporte técnico como por su potencial de valorización dentro de esquemas de economía circular. La principal contribución del estudio fue definir experimentalmente un intervalo de sustitución favorable y demostrar que el residuo puede emplearse con utilidad real en la ingeniería civil, siempre que su dosificación, dispersión y control de calidad se manejen adecuadamente.

RECOMENDACIONES

Se recomienda limitar la sustitución del agregado fino por polvo de acero a rangos cercanos a 10 % en volumen, donde se observó el mejor equilibrio entre trabajabilidad, densidad y resistencia mecánica.

También se recomienda controlar de manera estricta la limpieza, el secado, el tamizado y la caracterización física del polvo de acero antes de su incorporación, ya que la calidad del residuo influye directamente en la homogeneidad de la mezcla y en su respuesta final.

Finalmente, conviene ampliar esta línea de investigación mediante ensayos de durabilidad, permeabilidad, absorción, exposición a ambientes húmedos y compatibilidad con aditivos o cementantes suplementarios, para consolidar su aplicación en concretos estructurales y prefabricados.

REFERENCIAS

Abuowda, E., El-Hassan, H., & El-Maaddawy, T. (2024). Synergistic impact of geopolymer binder and recycled coarse aggregates on the performance of concrete masonry units. *Cleaner Materials*, 14, Article 100272. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2024.100272>

Abuowda, E., El-Hassan, H., & El-Maaddawy, T. (2025). Evaluating the synergic use of geopolymers and recycled aggregates in masonry wall construction. *Journal of Building Engineering*, 112, 113684. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.113684>

Aceros Levinson. (s. f.). Sitio web corporativo. Recuperado el 30 de octubre de 2025, de <https://www.aceroslevinson.com.mx>

Akhtar, MF, Faraz, A. y Khitab, A. (2025). Transforming concrete with steel slag: exploring the pores' dual effect for sustainable and high-performance urban construction. *Discover Civil Engineering*, 2, 81. <https://doi.org/10.1007/s44290-025-00243-7>

Ahmed, S. M., & Kamal, I. (2022). Electrical resistivity and compressive strength of cement mortar based on green magnetite nanoparticles and waste from steel industry. *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01712. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01712>

American Concrete Institute. (2022). ACI PRC-211.1-22: Selecting proportions for normal-density and high-density concrete—Guide. American Concrete Institute. https://www.concrete.org/Portals/0/Files/PDF/Previews/211.1-22_preview.pdf

Alsheyab, M. A. T. (2022). Recycling construction and demolition waste and its impact on climate change and sustainable development. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19, 2129–2138. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03217-1>

ASTM International. (2017). ASTM C496/C496M-17: Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens. ASTM International. https://www.astm.org/c0496_c0496m-17.html

ASTM International. (2021). ASTM C39/C39M-21: Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. ASTM International. https://www.astm.org/c0039_c0039m-21.html

ASTM International. (2023). ASTM C138/C138M-23: Standard test method for density (unit weight), yield, and air content (gravimetric) of concrete. ASTM International. https://www.astm.org/c0138_c0138m-17a.html

ASTM International. (2024a). ASTM C33/C33M: Standard specification for concrete aggregates. ASTM International. <https://www.astm.org/Standards/c33.htm>

ASTM International. (2024b). ASTM C192/C192M-24: Standard practice for making and curing concrete test specimens in the laboratory. ASTM International. <https://www.astm.org/Standards/C192.htm>

Azhagarsamy, S., Pannirselvam, N., Vanjinathan, J., Premkumar, R., & Vijayakumar, D. (2025). Optimizing mechanical and microstructural properties of concrete with steel slag aggregate using response surface methodology. *Results in Engineering*, 27, 106885. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.106885>

Bahmani, H., & Mostafaei, H. (2025). Eco-friendly self-compacting concrete incorporating waste marble sludge as fine and coarse aggregate substitute. *Buildings*, 15(17), 3218. <https://doi.org/10.3390/buildings15173218>

Bawab, J., El-Hassan, H., El-Dieb, A., & Khatib, J. (2025). Optimizing carbon sequestration and performance of concrete masonry blocks containing alkaline industrial waste. *Cleaner Engineering and Technology*, 26, 100943. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2025.100943>

Belebchouche, C., Moussaceb, K., Bensebti, S.-E., Aït-Mokhtar, A., Hammoudi, A., & Czarnecki, S. (2021). Mechanical and microstructural properties of ordinary concrete with high additions of crushed glass. *Materials*, 14(8), 1872. <https://doi.org/10.3390/ma14081872>

Benli, A., Bayraktar, O. Y., Köksal, F., & Kaplan, G. (2024). Sustainable use of recycled fine aggregates in steel fiber-reinforced concrete: Fresh, flexural, mechanical and durability characteristics. *Journal of Building Engineering*, 97, 110745. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110745>

Cementos Moctezuma. (2023). Hoja técnica del cemento Portland Compuesto CPC 30R. <https://www.cmoctezuma.com.mx/>

Dafedar, M. M. M., Rao, K. B., Pai, B. H. V., & Bekkeri, G. B. (2024). Evaluation of the engineering properties and sustainability of solid masonry blocks produced with recycled concrete aggregates. *Innovative Infrastructure Solutions*, 9, 449. <https://doi.org/10.1007/s41062-024-01720-1>

Dafedar, M. M., Rao, K. B., Pai, B. H. V., & Bekkeri, G. B. (2025). Viability of using 100% of recycled concrete aggregates for durable solid masonry blocks. *Emergent Materials*, 8, 6017-6037 <https://doi.org/10.1007/s42247-025-01194-6>

Dandaboina, K., Prasad, J. S., & Sohail, S. (2025). Mechanical and microstructural properties of concrete with partial replacement of fine aggregate by steel slag and cement by GGBFS and metakaolin. *Discover Civil Engineering*, 2(1), 16. <https://doi.org/10.1007/s44290-025-00180-5>

Doudi, O., Tafraoui, A., Serna, P., Makani, A., & Ferrara, L. (2026). Exploring the feasibility of using recycled fines from diverse sources as partial cement substitutes in high-performance cementitious materials. *Results in Engineering*, 29, 108506. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.108506>

El-Aidy, K. E., Ellithy, M., Mahmoud, M. H., & El-Shafiey, T. F. (2024). Mechanical and physical properties of eco-friendly recycled plastic concrete (RPC). *Journal of Building Engineering*, 97, 110907. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110907>

Ferro Industria. (s. f.). Sitio web corporativo. Recuperado el 30 de octubre de 2025, de <https://www.ferroindustria.com>

Gillani, S. T. A., Hu, K., Tariq, J., Chen, D., & Zhang, W. (2025). From waste to resource: an in-depth analysis of environmental sustainability in concrete masonry utilizing recycled components. *Construction and Building Materials*, 489, 142287. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.142287>

Hu, K., Gillani, S. T. A., Tao, X., Tariq, J., & Chen, D. (2025). Eco-friendly construction: Integrating demolition waste into concrete masonry blocks for sustainable development. *Construction and Building Materials*, 460, Article 139797. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139797>

Jahami, A., Younes, H., & Khatib, J. (2023). Enhancing reinforced concrete beams: investigating steel dust as a cement substitute. *Infrastructures*, 8(11), 157. <https://doi.org/10.3390/infrastructures8110157>

Jain, B., & Sancheti, G. (2023). Influence of silica fume and iron dust on mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 409, Article 133910. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133910>

- Jameel, M., Suteerasak, T., Chumpol, P., Puttiwongrak, A., Sae-Long, W., & Sukontasukkul, P. (2025). Properties of one-part geopolymer pedestrian blocks made using 100% waste materials. *Case Studies in Construction Materials*, 22, e04538. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04538>
- Khan, A., Luqman, M., Jun, X., Ullah, M. F., Alzifawi, A., Ahmad, M., & Toth, Z. (2025). Effect of steel slag as fine aggregate on the mechanical and durability performance of concrete under acid exposure. *Scientific Reports*, 15, 40966 <https://doi.org/10.1038/s41598-025-24715-z>
- Krishnan, S., Bhagavatula, S.G.K., Karingamanna, J. & Madhavan, M.K. (2025). An experimental investigation into the performance of concrete and mortar with partial replacement of fine aggregate by printed circuit board (PCB) e-waste. *Recycling*, 10(4), 138. <https://doi.org/10.3390/recycling10040138>
- Kumar, P., & Shukla, S. (2023). Utilization of steel slag waste as construction material: A review. *Materials Today: Proceedings*, 78, 145–152. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.01.015>
- Kuoribo, E., Shokry, H., & Mahmoud, H. (2024). Attaining material circularity in recycled construction waste to produce sustainable concrete blocks for residential building applications. *Journal of Building Engineering*, 96, Article 110503. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110503>
- Langier, B., & Major, I. (2025). Research on selected properties of concrete composite with the addition of post-production metallic dust. *Materials*, 18(22), 5197. <https://doi.org/10.3390/ma18225197>
- Mardani, A., Şahin, H. G., Kaya, Y., Mardani, N., Assaad, J. J., & El-Hassan, H. (2025). Enhancing the strength and durability of recycled fine aggregate mixtures using steel fibers, silica fume, and latex polymers. *Developments in the Built Environment*, 21, 100599. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100599>
- Peisino, L. E., Barbero-Barrera, M. del M., Barrio García-Castro, C., Kreiker, J., & Gaggino, R. (2024). Assessment of the mechanical and physical characteristics of PET bricks with different aggregates. *Journal of Environmental Management*, 357, 120720. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120720>
- Raghavendra, H. N., Ujwal, M. S., Shiva Kumar, G., Sanjeev, T. P., Raghavendra Prajwal, H. S., Ajith, B. V., & Pandit, P. (2025). Evaluating the role of steel mill scale in self-compacting concrete as partial fine aggregate replacement: experimental and modelling insights. *Cleaner Waste Systems*, 12, 100360. <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2025.100360>
- Rashid, K., Yazdanbakhsh, A., & Rehman, M. U. (2019). Sustainable selection of the concrete incorporating recycled tire aggregate to be used as a medium to low strength material. *Journal of Cleaner Production*, 224, 396–410. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.197>
- Sarı, F. A., Öztürk, İ. Ş., Gönen, T., & Emiroğlu, M. (2025). Evaluation of waste metallic powder as fine aggregate replacement in roller compacted concrete: impact on physical and mechanical properties. *Construction and Building Materials*, 468, 140386. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140386>
- Velumani, P., & Manikandan, P. (2021). Steel mill scale waste and granite powder waste in concrete production—an experimental study. *Materials Today: Proceedings*, 37(Part 2), 1748–1752. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.358>
- Villalobos Pasapera, M. E. (2018). Evaluación de las propiedades mecánicas del concreto adicionando limaduras de acero [Tesis de pregrado, Universidad Señor de Sipán]. Repositorio Institucional USS. <https://hdl.handle.net/20.500.12802/4926>

Zia, A., Zhang, P., Holly, I., & Prokop, J. (2023). Sustainability enhancement through high-dose recycled tire steel fibers in concrete: Experimental insights and practical applications. *Sustainability*, 15(22), 15760. <https://doi.org/10.3390/su152215760>

Todo el contenido de LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades, publicados en este sitio está disponibles bajo Licencia [Creative Commons](#) 