

Comportamiento físico-mecánico del hormigón adicionando residuos de acero: una revisión literaria

Physical-mechanical behavior of concrete with the addition of steel waste: a review

Sócrates Pedro Muñoz-Pérez ^{1a}, Antony Luis Cabrera-Alcántara ^{1b}, Carlos César Delgado-Bravo ^{1c}, Paula Alejandra Renilla-Lau ^{1d}

¹ Universidad Señor de Sipán, Perú. Correos electrónicos: ^a msocrates@crece.uss.edu.pe, ^b calcantaraantho@crece.uss.edu.pe, ^c dbravocar1@crece.uss.edu.pe, ^d carlos.bustamante@upb.edu.co
Orcid: ^a 0000-0003-3182-8735, ^b 0000-0002-5286-7744, ^c 0000-0002-0583-0148, ^d 0000-0002-4522-9955

Recibido: 24 junio de, 2021. Aceptado: 16 septiembre, 2021. Versión final: 24 octubre, 2021.

Resumen

En la actualidad, el interés por usar materiales de desecho y subproductos provenientes del hormigón ha incrementado, debido a la necesidad de minimizar la contaminación en el planeta. El presente documento tiene como objetivo la revisión sistemática de la literatura con respecto a la implementación de los residuos de acero en la mezcla de hormigón, y cómo esto influye en su comportamiento físico-mecánico. Se ha enfocado el interés principalmente en los residuos de acero en forma de escoria, limadura, viruta y fibras, incorporados en todo tipo de hormigón estructural, utilizado en columnas, vigas, zapatas, losas y muros. El uso de estos materiales tiene un alto impacto, pues no solo ayuda a reducir el costo de fabricación de cemento y hormigón, sino que a la vez otorga numerosos beneficios ecológicos, como reducir el costo de los vertederos, ahorrar energía y proteger el medio ambiente de una posible contaminación. Se efectuó la búsqueda de artículos indexados en las diversas bases de datos, tales como ASCE, EBSCO, Google Scholar, ScienceDirect, Scopus y SpringerOpen; se seleccionó finalmente un total de 60 artículos publicados desde el año 2014. Se concluye que el uso de residuos de acero es una alternativa para incorporar a la mezcla de hormigón, pues puede reemplazar parcial o totalmente al agregado y lograr la producción de hormigones que no presenten afección en sus propiedades físico-mecánicas; e incluso, en algunos casos, mejorar dichas características.

Palabras clave: acero; agregados; cemento; contaminación; construcción; escoria; fibra; hormigón; limadura; propiedades físico-mecánicas; residuos; viruta.

Abstract

At present, the interest of using waste materials and byproducts from concrete has increased, due to the need for minimizing pollution on our planet. The present document aims to systematically review the literature regarding the implementation of steel residues in the concrete mix, and how this influences its physical-mechanical behavior. It has focused mainly on steel residues in the form of slag, filings, shavings, and fibers; incorporated in all types of structural concrete, used in columns, beams, footings, slabs, and walls. The use of these materials has a high impact because it helps reduce the cost of manufacturing cement and concrete, and also provides numerous ecological benefits, such as reducing the cost of landfills, saving energy, and protecting the environment from possible contamination. The indexed articles were searched in the following databases: ASCE, EBSCO, Google Scholar, ScienceDirect, Scopus y SpringerOpen, finally selecting a total of 60 articles published since 2014.

Finally, it is concluded that the use of steel waste is an alternative to be incorporated into the concrete mix, since it can partially or totally replace the aggregate, achieving the production of concretes that do not present affection in their physical mechanical properties; and even, in some cases, improving said characteristics.

Keywords: aggregate; cement; chip; concrete; construction; contamination; fiber; filing; physical mechanical properties; slag; steel; waste.

1. Introducción

En los últimos años, la demanda de proyectos de infraestructura y construcción ha crecido rápidamente, lo que ha despertado mayor interés por la búsqueda de un diseño más eficiente, económicamente rentable y óptimo en lo que refiere a la mezcla de hormigón. Sin embargo, así como ha crecido la demanda de proyectos, han crecido los problemas al momento de la construcción, la innovación en los materiales utilizados y los impactos que estos ocasionan.

Al plantear los problemas ambientales, se tiene como dato que los residuos en construcción liberados anualmente equivalen a 1183 millones de toneladas [1]. Esto propone el reto de buscar una alternativa sostenible para resguardar el medio ambiente por medio de la reutilización de recursos y así minimizar la cantidad de estos en los vertederos [2].

El ámbito de la ingeniería ha ido innovando en la construcción, es así que se ha empezado a ver el desarrollo de estructuras de gran escala, que generan un mayor impacto y, por consiguiente, una mayor seguridad al momento de la construcción; esto exige un mejor rendimiento del hormigón estructural [3], capaz de hacer frente a las dificultades y múltiples demandas constructivas. Por esto, un gran número de investigadores recientemente [4], [5], [6] se han concentrado en agregados provenientes de la utilización del acero en forma de residuos para hormigón, que otorguen una gran resistencia, mayor tenacidad, y que ayuden a ahorrar energía y sean ecoamigables con el entorno.

El rescate natural de materiales de desecho es un largo proceso durante el cual el medio ambiente se ve afectado por contaminación y daños. En países como Irán, los productos de desecho se entierran en vertederos o se vierten en áreas rurales para posteriormente ser quemados. Claramente, esta situación es peligrosa para el medio ambiente y conduce a la erosión del suelo, contaminación del aire, paisajes devastados y hábitats pobres para la vida silvestre. La mejor manera de manejar los desechos parece involucrar su separación en la fuente y su reciclaje para la reutilización en la producción [7].

Teniendo como base lo mencionado y las amplias investigaciones recientes, se puede decir que dentro del sector construcción e industrial resulta imprescindible incorporar la sostenibilidad en el uso de materiales innovadores y materias primas, así como en los procesos de construcción. La fabricación y producción de materiales de acero, actualmente, es una de las industrias más relevantes a nivel mundial. Sin embargo, cabe resaltar que los procesos industriales de materias primas implican la generación de desperdicios [8].

El incremento de la demanda y producción de acero ha mostrado una tasa de crecimiento moderada en Europa, Asia, América y China, en el año 2018. El sector de la construcción y la industria de la ingeniería mecánica han sido, sin duda, los impulsores primarios en la demanda del acero en el continente europeo [9].

Uno de los más grandes problemas respecto a la industria del acero es la producción de residuos en cantidades variables, según el tipo de chatarra utilizada y el acero por procesar; esto genera diversos tipos de acero, por ejemplo, el acero ferrítico. Estos materiales producen grandes cantidades de desechos que se acumulan como polvo de humo; este polvo se genera en la combustión de la chatarra dentro del horno de arco eléctrico. El polvo se evapora y se extrae, luego se deposita en colectores de polvo de cámara de filtros para su posterior remoción y deposición en vertederos, pues es costoso de reciclar o reutilizar y difícil de transformar en un residuo inerte [10].

Dentro del sector dedicado a la producción de acero se incluye la producción del acero inoxidable, donde se tiene como principales materiales utilizados el níquel, cromo, molibdeno y chatarra ferrosa. En el año de 2018, se superaron los 50,7 millones de toneladas de producción mundial de acero inoxidable, lo que muestra un aumento del 5,5 % respecto al volumen del año anterior. China, que es el principal productor de acero inoxidable del mundo, mostró un crecimiento de 3,6 % en dicha actividad, lo que incrementó a 26,7 millones de toneladas totales la producción del país. Esta cifra representa el 52,6 % de la producción mundial de acero inoxidable [11].

Una de las características ecoamigables del acero inoxidable es que es un material que se puede reciclar una y otra vez, por tanto, es apto para el desarrollo sustentable y la economía circular. La producción de este material genera residuos tales como la escoria de acero inoxidable, principal residuo generado en volumen y principal subproducto, que representa un 74 % del total [12].

Alrededor de 130 a 200 kg de escoria se producen en la fabricación de una tonelada de acero; este valor es dependiente de la composición y el proceso de producción de este último. El acero residual tipo escoria, generalmente, se encuentra como materiales granulados que contienen racimos grandes, partículas gruesas y muy finas [13].

Muchos años atrás, los mayores problemas ambientales iniciaban en la grava y arena, extraídas descontroladamente de los ríos. Sin embargo, y por fortuna, desde algunas décadas, se viene considerando la posibilidad del uso de diversos materiales reciclados como agregados de hormigón, aunque solo sean reemplazo parcial de los agregados de origen natural.

Los subproductos de acero son materiales de desecho torneados y productos industriales. Estos materiales de desecho no tienen un reconocimiento apropiado y no se reutilizan correctamente. Tales residuos se pueden utilizar eficazmente en hormigón armado, por ejemplo: las propiedades físicas de la chatarra de acero en forma de limadura, escoria, viruta y fibra le dan al hormigón un refuerzo que produce una resistencia adicional a la tracción [14].

Durante las últimas tres décadas, se ha probado la posibilidad de utilizar hormigón reforzado con fibra de acero con el fin de experimentar y fortalecer numéricamente el desempeño estructural de diversas construcciones, desde edificaciones hasta túneles de hormigón reforzado [15]. El hormigón reforzado con fibra de acero mejora claramente el transporte de carga, capacidad y absorción de energía en comparación con el hormigón normal. Varios tipos de fibras industriales como acero, carbono, vidrio, polipropileno, nailon y otros se han utilizado para reforzar el hormigón grueso [16]. Recientemente, algunos investigadores han introducido diferentes tipos de fibras de acero en hormigón autocompactante engomado para mejorar la resistencia al impacto y postfisuración [17].

En China, la esperanza de vida media de un neumático se estima entre 5-6 años. Un neumático típico contiene un 17 % de cables de acero y la gran mayoría de estos cables de acero de desecho se utilizan en la industria de

producción de hierro [18]. Además, se creía que utilizar fibras de acero de bajo precio y garantizar el rendimiento del hormigón en polvo reactivo lograría aminorar el costo de este en gran medida y hacer que esté ampliamente disponible [19].

Con base en las investigaciones recaudadas, se mostró que el hecho de innovar en la construcción a través de las diversas formas de implementar los residuos de acero favorece tanto en la mitigación de la contaminación mundial como en conseguir edificaciones con una capacidad estructural similar, pero con un valor agregado ecoamigable y un menor peso muerto. En este sentido, se presenta como objetivo la revisión sistemática de la literatura, respecto a la implementación de los residuos de acero en la mezcla de hormigón, y cómo esto influye en su comportamiento físico-mecánico; se seleccionaron diferentes formas de implementación, tales como escoria, limadura, viruta y fibras.

2. Metodología

La metodología empleada corresponde a una investigación y selección de artículos científicos, referentes al tema tratado: implementación de residuos de acero en la mezcla de hormigón estructural y la influencia en su comportamiento físico y mecánico. Se efectuó la revisión de 60 artículos indexados en diversas bases de datos, tales como ASCE, EBSCO, Google Scholar, ScienceDirect, Scopus y SpringerOpen. Estos artículos han sido cuidadosamente seleccionados a partir de una serie de criterios como el año de publicación, el cual debe ser con un máximo de 7 años de antigüedad, desde el año 2014 hasta el presente año; área de asignatura; idioma; entre otros. En la *tabla 1* se puede observar la cantidad de artículos seleccionados por año, según las bases de datos mencionadas anteriormente; cabe resaltar que se tomaron como bases de datos principales las de mayor impacto: ScienceDirect y Scopus.

Para obtener los artículos necesarios se utilizaron en la búsqueda diferentes palabras clave relacionadas con el tema, sin embargo, para reducir la cantidad de artículos iniciales, se añadieron diversos filtros como el año de publicación (desde el 2014) y las áreas de investigación.

Finalmente, el método de investigación empleado se resume en la *tabla 2*, la cual muestra la cantidad inicial de artículos encontrados en las diferentes bases de datos mediante las palabras clave, la cantidad de artículos filtrados teniendo como ítem el año de publicación y las áreas de investigación y, finalmente, la cantidad de artículos seleccionados en cada base de datos.

Tabla 1. Distribución de artículos usados como referencia, según el año de publicación y la base de datos

Base de datos	Año de publicación								Total
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	
ASCE		1		1	1				3
EBSCO						3	2		5
Google Scholar	1		3		1	1	1		7
ScienceDirect	4	3	8	1	2	6	3	2	29
Scopus	1	2	2		2	2	4	2	15
SpringerOpen	1								1
Total	7	6	13	2	6	12	10	4	60

Fuente: elaboración propia.

A consecuencia de la actualización constante de las bases de datos, tras lo cual cambia la cantidad de artículos indexados, se toma como última fecha de actualización el día 17 de junio del 2021.

Una vez seleccionados los artículos, se elaboró una bitácora en la que se considerarán las bases de datos, los títulos, así como el nombre de los autores, el año en que fueron publicados, DOI, revista y su ranking según Scimago, para que de esta manera la redacción del artículo se realice de una forma más ordenada.

3. Resultados

3.1. Limadura de acero

3.1.1. Origen

La limadura de acero (figura 1), material compuesto por diminutos trozos de hierro o hierro galvanizado, es un producto de desecho que a su vez es un subproducto de la molienda, limado o fresado de acabado de productos de hierro. Normalmente, existen dos opciones de desecho: o se recicla para ser utilizada en productos de hierro de baja calidad o termina como residuos en un vertedero [20]. Estos residuos son fragmentos muy pequeños formados localmente en cantidades excesivas en las fábricas de acero y talleres de trabajo. Estos productos tienen un impacto nocivo sobre el medio ambiente.

En la década anterior, se suscitó el interés mundial por la construcción ecológica. En consecuencia, el uso de los desechos industriales, como las limaduras de hierro en la producción de hormigón, mostró grandes beneficios, ya que conduce a una mejora del medio ambiente, de la gestión de residuos y del consumo comercial de residuos industriales, y propicia un mundo más verde [21], [22].

3.1.2. Aplicación

Debido a que el gradiente de tamiz de las limaduras de hierro está cerca de la gradación de la arena, se utilizan como reemplazo parcial de la arena en la mezcla de hormigón; así mismo, los granos de limaduras de hierro tienen una mayor tolerancia a la compresión en comparación con las partículas de arena, por lo que se espera que aumenten la resistencia a la compresión del hormigón [23]. En el estudio del reemplazo parcial de limadura de acero por arena en hormigón utilizado para la construcción de columnas como elemento estructural, se muestra un aumento en la capacidad de resistencia a la compresión, resistencia a la flexión y a la tracción por rotura; de la misma forma pasa con la prueba de tracción por división, módulo de elasticidad, capacidad de carga, ductilidad y tenacidad, donde las muestras con presencia de limadura de acero en reemplazo parcial de la arena muestran un incremento significativo [24], [25], [26].

Otra de las aplicaciones de la limadura de acero en el hormigón es como reemplazo parcial del cemento, donde presenta una alta trabajabilidad y un mayor factor de compactación. Frente a las pruebas de resistencia a la compresión y tracción, la adición de limadura de acero hace que este tipo de hormigón presente menor capacidad frente al convencional; no obstante, si la limadura de acero se aplica como empaste dentro del hormigón, esta muestra valores más altos en la resistencia a la compresión y tracción, frente a un hormigón tradicional [27], [28].

3.1.3. Análisis

La resistencia a la compresión del hormigón incrementa linealmente a medida que el porcentaje de limaduras de hierro aumenta de 2,5 % a 10 % (donde 10 % es el valor óptimo), como reemplazo parcial de la arena, ya que, con este contenido, la mezcla a los 28 días alcanza una resistencia 25 % mayor a la de control.

Tabla 2. Criterios de búsqueda de selección y cantidad de artículos recopilados

Base de datos	Motor de búsqueda	Filtros utilizados	Total de artículos		
			Sin filtros	Con filtros	Seleccionados
ASCE	Recycled Aggregate Concrete	Años: 2014-2021 Temas técnicos: Recycling, Concrete, Aggregates	2081	92	1
	Steel chips	Años: 2014-2021 Techical topics: Concrete	1417	39	1
	“Steel Fiber”/ “Steel Fibre”		922	94	1
EBSCO	Steel waste	Año de publicación: 2014-2021 Tipos de fuente: publicaciones, publicaciones académicas, revistas Materia: Steel Idioma: inglés	2538	30	1
	Steel fiber/Steel fibre		8251	153	3
	Steel filings	Año de publicación: 2014-2021	423	95	1
Google Scholar	“Steel filings”	Año de publicación: 2014-2021	1250	233	4
ScienceDirect	Steel waste in concrete	Años: 2014-2021 Tipo de artículo: review articles, research articles Área temática: Engineering, Materials science	30.709	7326	3
	Steel powder in concrete		20.908	7729	4
	“Steel slag in concrete”		138	63	9
	Steel chip in concrete		5460	952	2
	“Steel fiber in concrete”/ “Steel fibre in concrete”		16.449	2983	11
Scopus	“Steel waste”	Años: 2014-2021 Área temática: Engineering, Materials science, Environmental science, Energy, Earth and planetary science Tipo de documento: articles	215	69	2
	“Steel chips”		182	40	6
	Steel filing		303	22	1
	“Steel fiber”/ “Steel fibre”		17.584	7778	1
	“Steel slag”		3730	1680	6
Springer Open	Steel waste	Ordenado por: Date	503	503	1

Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, frente al ensayo de resistencia a la tracción por rotura, el porcentaje óptimo de uso de la limadura de acero fue de 5 %, pues esto le permitió superar en un 22 % la resistencia de una muestra control tradicional. Otra capacidad del hormigón que se vio mejorada fue la resistencia a la flexión, pues, con un porcentaje del 10 % de residuo de acero en forma de limadura, los resultados mostraron un aumento de entre el 11 % y 11,1 % frente a la resistencia de un hormigón con agregados tradicionales [24], [26], [27].

3.2. Escoria de acero

3.2.1. Origen

Aproximadamente 30 millones de toneladas de escoria de acero (figura 2) son depositadas en patios de almacenamiento y tierras agrícolas, lo que genera un impacto negativo para el medio ambiente. Por otro lado, existe un crecimiento en el valor de los materiales utilizados en la construcción y en el agotamiento de los recursos naturales no renovables [29].

Desde tiempos anteriores, se han realizado investigaciones importantes sobre la escoria de acero y su aplicación como agregado en combinación con la mezcla de hormigón; la escoria tiene una gran importancia al ser el principal subproducto del proceso de fabricación de acero [30]. Así, las estadísticas informan que los desechos ocasionados por la industria del acero suman entre dos a cuatro toneladas por cada tonelada de producción de acero. El derivado más importante, la escoria de acero, se obtiene de tres fuentes principales: escoria de altos horno, escoria de horno de arco eléctrico y escoria de horno de cuchara [31], [32].

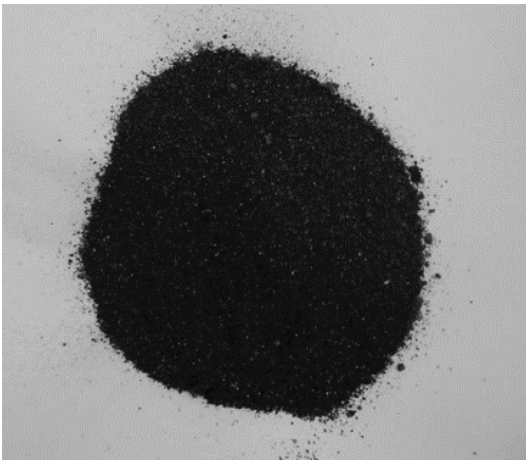


Figura 1. Limadura de acero.

Fuente: [26].

Debido a su composición química, la escoria de acero, especialmente la escoria de horno de arco eléctrico puede contener elementos peligrosos. Por consiguiente, el mejor método de reutilización es la solidificación y estabilización, ya que ayuda a reducir la modificación química en los materiales de desecho, forma un compuesto insoluble y atrapa el elemento tóxico [33]. La escoria de acero de desecho se puede concentrar y estabilizar implementando el uso de diferentes aglutinantes, por ejemplo, cemento, puzolana, polímero, etc. El más comúnmente utilizado es el cemento, debido a su economía y conveniencia [34].

3.2.2. Aplicación

Con el pasar de los años, muchos investigadores han dado gran importancia a la implementación y reutilización de la escoria de acero, y han demostrado que el uso de este subproducto como agregado puede incrementar la resistencia a la compresión del hormigón en un 20 % o incluso más. Esto se debe principalmente a que la escoria de acero posee una mayor angularidad, que

consiguientemente otorga una mejor adherencia con la mezcla de cemento en comparación con el agregado natural [35].



Figura 2. Escoria de acero.

Fuente: [30].

Según [28], cuando se usa la escoria de acero como material de reemplazo al cemento, teniendo una proporción constante de agua-cemento, actúa disminuyendo la resistencia a la compresión, pero cuando la proporción de agua-cemento se reduce a 0,35, la resistencia a la compresión es casi igual a la del hormigón convencional. Al utilizar la escoria de acero como material aglutinante en el hormigón, la fuerza, la impermeabilidad al ion cloruro y la resistencia a la carbonatación aumentan en una etapa posterior, y al disminuir la relación de agua-cemento, la permeabilidad del hormigón de escoria de acero se reduce.

La escoria de horno tipo cuchara y la escoria de horno de arco eléctrico, cuando se emplean como sustituyente del agregado fino, muestran un buen comportamiento en los estudios de durabilidad [36]. El cemento con menor cantidad de escoria de acero ofrece una mejor resistencia a la penetración de iones de cloruro, pero su resistencia al congelamiento-descongelamiento se ve afectada y disminuye, debido a su alto volumen de poros capilares [37]. El agregado de escoria de acero se puede carbonatar para reducir los poros dañinos y aumentar los poros inofensivos, y con ello aumentar su durabilidad.

Cuando el hormigón con agregado de escoria de acero es expuesto a ambientes marinos y al agua de mar, se observa una penetración más rápida del cloruro, pero con una menor expansión en el mortero de escoria, debido al ataque de sulfatos y también a un aumento en la resistencia que prueba que no hay daño interno [38].

Otras investigaciones incrementaron los beneficios del uso de la escoria de acero, combinándola con otros subproductos del acero. Al incluir un 15 % de lodo de acero y un 20 % de escoria de acero en el hormigón, se obtiene una mayor resistencia que el hormigón convencional, especialmente, en edades de curado posteriores. La mayor reactividad de los lodos de acero se debe a una mayor pérdida de conductividad [39]. Por otro lado, cuando se utilizan aguas residuales para la preparación de hormigón, y el 50 % del agregado convencional se reemplaza por agregado de escoria de acero, se evidencian buenas características de resistencia y mayor durabilidad [40].

3.2.3. Análisis

En la búsqueda de una alternativa en materiales de construcción que sean ecoamigables y sostenibles, salió a la luz el principal subproducto del acero: la escoria de acero reciclado y su posible utilización como reemplazo de los agregados en la mezcla de hormigón.

Se han realizado investigaciones sistemáticas sobre las propiedades físico-mecánicas, así como del comportamiento estructural y la durabilidad de la mezcla de hormigón convencional y la mezcla de hormigón que incorpora escoria de acero como reemplazo parcial o total del agregado fino. Los resultados obtenidos indican la gran posibilidad de incorporar escoria de acero reciclado en la mezcla de hormigón sin que sea perjudicial para las propiedades, durabilidad o rendimiento de esta [41].

La producción de los materiales de construcción necesarios para la realización de la mezcla de hormigón ha provocado el agotamiento de los recursos naturales y consiguientemente del medio ambiente. Por ende, diversos estudios se han enfocado en la implementación y reemplazo no solo de los agregados finos, sino también de los agregados gruesos en la mezcla de hormigón.

En la investigación de [42] se realizó la evaluación de tres tamaños de 5/10, 5/14 y 5/19 mm de agregado grueso, con un contenido de escoria de acero de horno eléctrico en porcentajes de 0, 25, 50, 75 y 100 %; se evaluaron la tracción, absorción de agua, absorción superficial inicial, porosidad, permeabilidad y resistencia al ataque de sulfatos. Por otro lado, en [43] se realizó una mezcla comparativa a base de áridos naturales en tamaños de 0/4, 4/8 y 8/16 mm. Durante la investigación experimental, los agregados naturales de 4/8 mm y 8/16 mm fueron reemplazados por escoria de acero de la misma fracción; se realizaron las pruebas de granulometría, densidad, peso específico, absorción y las características de resistencia evaluadas a los 3, 7, 14, 21, 28 y 90 días.

Tras ambas investigaciones, se observa que es posible la sustitución o reemplazo total de los agregados gruesos por escoria de acero, sin evidenciar efectos perjudiciales significativos sobre la durabilidad del hormigón ni en sus características físico-mecánicas.

3.3. Viruta de acero

3.3.1. Origen

El mecanizado de acero inoxidable austenítico se considera un material difícil de cortar debido a un alto endurecimiento por deformación, alta ductilidad y baja conductividad térmica. Estas propiedades promueven alta temperatura de corte y virutas continuas que pueden causar serios problemas durante el mecanizado [44]. El uso de un suministro de refrigerante a alta presión puede conducir a una mejora considerable en el rendimiento y el proceso de mecanizado. Debido a la alta presión del chorro de refrigerante, se forma una cuña en la interfaz herramienta-viruta, lo que logra reducir la longitud de contacto herramienta-viruta y el comportamiento de fricción [45]. Además, el chorro de refrigerante es capaz de crear una cuña de refrigerante a alta presión, que se forma entre la herramienta de corte y la viruta para doblarse hacia arriba, lo que mejora el proceso de formación y control de viruta [46], [47].

3.3.2. Aplicación

En muchos casos, las virutas de acero (figura 3) se utilizan en el hormigón; este se denomina hormigón armado con virutas de acero, por sus propiedades medioambientales y ventajas económicas [48]. Las virutas de acero se han utilizado ampliamente en el hormigón debido a sus propiedades especiales como afinidad con materiales cementosos, facilidad de uso, alta tenacidad y resistencia a cargas estáticas y dinámicas [49]; además, la aplicación de estos residuos actúa como un buen vibrador, facilita la compactación del hormigón premezclado, y crea así la posibilidad de agregar mayor contenido de partículas de acero al hormigón [50].

Las virutas de fibra larga son otra presentación de este residuo, utilizado durante muchos años con éxito, principalmente, para aplicaciones específicas como pisos industriales, hormigón proyectado, vigas y losas. La incorporación de esta mejora la resistencia a la flexión y la rigidez de los elementos de la viga, y confiere una ductilidad significativa, que aumenta también la capacidad de deflexión de dicho elemento estructural [51].

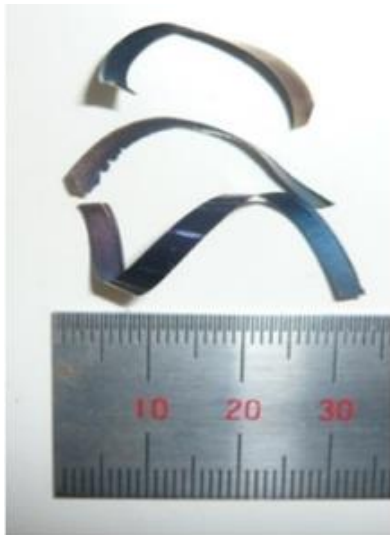


Figura 3. Virutas de acero.
Fuente: [44].

La viruta de acero funciona también como reemplazo parcial de la arena dentro del hormigón, donde logra que la resistencia a la compresión de esta mezcla sea superior a la de una convencional; sin embargo, si dicho reemplazo superara el 25 % del peso de la arena, el hormigón se deteriora [52].

3.3.3. Análisis

Las pruebas de resistencia a la compresión realizadas en las investigaciones [48], [50], [52] señalan que el hormigón mezclado con virutas de acero reciclado tiene mejor resistencia que los hormigones ordinarios, por tanto, se pueden utilizar dichas virutas como reemplazo de la arena en porcentajes que varían desde el 25 % hasta el 100 %, logrando un aumento porcentual de 24,34 hasta 50,79.

En las investigaciones [48], [51], para ensayos de flexión, se sometieron vigas a rotura, donde se demostró que la presencia óptima de la viruta de acero en el hormigón es de 0,6 % a 0,8 %, pues así se ha obtenido que la deflexión aumenta del 100 % al 110 % en comparación con el hormigón de control.

3.4. Fibra de acero

3.4.1. Origen

Un gran número de investigaciones realizadas sobre la implementación de fibras de acero (figura 4) en la mezcla de hormigón rescatan el uso de fibras largas de acero (>25 mm), con forma de gancho a los extremos. Por otro

lado, se han realizado estudios sobre la implementación de microfibras rectas de forma más limitada, estas con el fin de tener una idea más clara del posible impacto negativo sobre la trabajabilidad principalmente en caso de hormigón autocompactante [53].

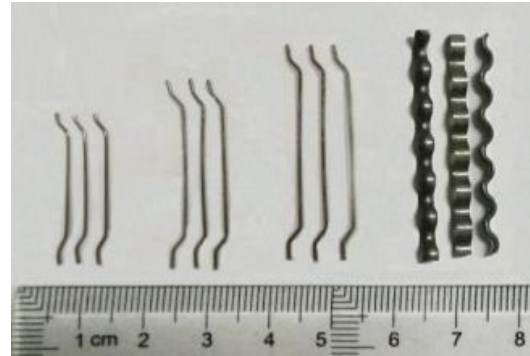


Figura 4. Fibras de acero.
Fuente: [62].

3.4.2. Aplicación

Los agregados reciclados son una gran opción para cubrir la alta demanda de una solución alternativa en el aspecto de la construcción. Sin embargo, existen investigaciones donde se ha descubierto que la implementación de estos no es una buena idea, pues afecta negativamente las propiedades mecánicas del hormigón. No obstante, las fibras de acero en proporciones de 1 a 1,5 % dan como resultado un incremento en el rendimiento de flexión [54]. Consiguientemente, una de las principales características de la fibra de acero con respecto a su comportamiento e influencia en la mezcla de hormigón es su tamaño, debido a que influye directamente en la resistencia a la compresión de la mezcla [55].

En consecuencia, los investigadores recomiendan aplicar dos tipos diferentes de fibras de acero en el hormigón para beneficiarse de su rendimiento combinado. La combinación de diversos tipos de fibras de acero en el hormigón se denomina técnicamente hibridación. Según las investigaciones ya realizadas, la incorporación de dos o más variantes de fibras de acero a la mezcla de hormigón puede mejorar eficazmente sus propiedades mecánicas [56].

Según informes ya realizados, la hibridación de fibras de acero con longitudes largas y clasificadas genera una mayor eficiencia del hormigón y mejora sus propiedades mecánicas.

Se encontraron que las fibras largas dejan mayores efectos en el hormigón respecto a la resistencia a la carga de impacto, esto en comparación con los resultados obtenidos en la mezcla de fibras cortas [57]. También es un hecho que la fibra influye significativamente en el rendimiento fresco al dar como resultado el grado uniforme de clasificación y la energía para superar la fricción [58].

3.4.3. Análisis

Las fibras de acero recicladas tienen numerosos beneficios en las diferentes características físico-mecánicas de la mezcla de hormigón, tales como la resistencia a la flexión, compresión y tracción del hormigón expuesto a altas temperaturas.

Las fibras de acero se pueden clasificar en tres tipos diferentes: micro, con gancho en el extremo y corrugadas.

Existen investigaciones sobre su implementación en la mezcla de hormigón liviano de alta resistencia y cómo influyen en esta, así como también sobre la relación de contenido de volumen de la fibra en la resistencia a la tracción por división, a la flexión y a la compresión. Teniendo principalmente el rango de fracción de contenido de volumen de fibra de acero estudiado de 0,5 % a 2,0 %, se observa que los diferentes tipos de fibra de acero influyen de diferente manera en la mezcla, y la microfibrilla de acero es la que tiene mejor tenacidad sobre las otras dos [59].

Uno de los efectos más significativos de las fibras de acero reciclado sobre el hormigón es minimizar la generación de grietas anchas desarrolladas por el aumento de temperatura y el cambio de presión. En estudios del uso de fibras de acero reciclados combinados con otros materiales como fibras de polipropileno y resortes de metal con diámetros de 8, 12, 16 y 20 mm, se obtiene como resultado que, entre los diferentes tipos de fibras añadidas al hormigón, los resortes con un diámetro de agujero de 12 mm y las fibras de acero podrían mejorar de manera más eficaz las resistencias a la compresión y a la tracción, respectivamente [60].

Por otro lado, la combinación de fibras de acero reciclado con las de polipropileno puede crear ventajas para la industria de la construcción, siempre y cuando estas se encuentren en la dosificación óptima. Tras la evaluación de la fibra de polipropileno (PP) en dosificaciones de 0,1, 0,15, 0,2 y 0,25 % y las fibras de acero en dosificaciones de 0,25, 0,5, 0,75 y 1 %, se obtiene como dosificación óptima el 0,1 % para la fibra del PP y el 0,75 % para la fibra de acero reciclado.

Asimismo, se ha demostrado que se mejoran las propiedades mecánicas y se reduce el agrietamiento a pesar de los efectos negativos de impacto en la propiedad fresca [61].

Los resultados obtenidos de todas las investigaciones estudiadas se presentan de forma resumida en las tablas 3 y 4.

4. Conclusiones

El uso de desechos de acero proporciona una alternativa para la utilización eficaz de los desechos industriales, que normalmente se eliminan mediante la deposición en vertederos. Estos se pueden convertir en agregados para un hormigón de bajo costo de producción, que reducen los efectos ambientales adversos causados por la extracción indiscriminada de arena que se lleva a cabo para satisfacer las crecientes demandas de la industria de la construcción.

La resistencia del hormigón aumenta proporcionalmente a la cantidad de limadura de hierro aplicada, esto debido a que tiene una mejor tolerancia a la compresión que las partículas de arena.

La escoria de acero muestra mejores resultados cuando se reutiliza solidificada y estabilizada, ya que, según los ensayos experimentados y estudiados, puede mejorar la resistencia a la compresión del hormigón hasta en un 20 % respecto al convencional.

Las virtudes de acero tienen una gran afinidad con los materiales cementosos, lo que genera una mejora significativa en el comportamiento a flexión, donde se presenta un aumento de la carga a la rotura y un nivel significativo de ductilidad en el dominio posterior a la rotura.

La resistencia a la compresión, la trabajabilidad y el contenido de aire disminuyen con el aumento del contenido de fibra, mientras que la resistencia a la flexión, la resistencia a la tracción y la tenacidad aumentan.

Recomendaciones

Después de haber revisado con detenimiento los artículos referenciados en esta revisión literaria, se sugiere promover la investigación de la influencia de los residuos de acero, en sus diferentes formas, sobre las propiedades mecánicas del hormigón fabricado industrialmente, por ejemplo, en el caso del hormigón premezclado.

Tabla 3. Resumen de los resultados de la resistencia a la compresión en relación con los residuos estudiados

Tipos de residuos	Contenido de cemento (kg/m ³)	Relación de agua cemento (a/c)	Tipo de cemento	% residuo	F'c 1 (Mpa)	F'c2 (Mpa)	Uso	Ref.
Limadura	495	0,39	Cemento Pórtland tipo I	2,5 %	44,65	49,53	R	[24]
				5 %		52,30		
				10 %		55,63		
Limadura	382,5	0,5	Cemento Pórtland-Limestone	10 %	34,8	36,0	R	[26]
				20 %		39,5		
				30 %		32		
Limadura	445	0,42	Cemento Pórtland	5 %	46,25	49,8	R	[27]
				10 %		51,5		
				15 %		53,7		
Viruta	484,5	0,54	NR	0,4 % (*)	25	27,5	I	[48]
				0,6 % (*)		25		
				0,8 % (*)		23		
Viruta	450	0,65	NR	1 % (*)	18	17	I	[50]
				0,9 % (*)		16		
				25 %		47		
Viruta	413,7	0,52	NR	50 %	37,80	49	R	[52]
				75 %		54		
				100 %		57		
Fibra	440	0,38	Cemento Pórtland	0,5 %	55,3	58	R	[56]
				1 %		61,5		
				1,5 %		65,8		
Fibra	450	0,45	Cemento Pórtland	2 %	50,39	67,7	R	[61]
				0,25 %		24,11		
				0,50 %		23,41		
Fibra	450	0,45	Cemento Pórtland	0,75 %	48,25	19,04	R	[41]
				1 %		25,65		
				20 %		45,44		
Escoria	450	0,40	Cemento Pórtland	40 %	48,25	48,34	R	[41]
				60 %		44,74		
				80 %		40,22		
Escoria	450	0,40	Cemento Pórtland	10 %	48,25	39,88	R	[41]
				20 %		45,44		
				40 %		48,34		

(*): % de residuos por metro cúbico de concreto

F'c1: resistencia a la compresión del concreto patrón, a los 28 días

F'c2: resistencia a la compresión del concreto con uso de residuos de acero, a los 28 días

I: incorporación de los residuos de acero

R: reemplazo de los agregados por residuos de acero.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4. Resumen de las propiedades mejoradas con la influencia de residuos de acero

Tipo de residuo	% de residuos estudiados	% óptimo estudiado	Propiedades mejoradas	Referencia
Limadura	10 %, 20 %, 30 %, 50 %, 70 %, 80 %, 100 %	100	Resistencia a la compresión. Resistencia a la tracción dividida. Resistencia a la abrasión.	[20]
	2,5 %, 5 %, 10 %	2,5	Capacidad de carga.	[24]
		5	Resistencia a la tracción dividida. Resistencia a la flexión. Tenacidad.	
		10	Resistencia a la compresión. Módulo de elasticidad. Índice de ductilidad.	
	10 %, 20 %, 30 %	10	Resistencia a la tracción dividida Resistencia a la flexión.	[26]
		20	Resistencia a la compresión.	
5 %, 10 %, 15 %,	15	Resistencia a la compresión. Resistencia a la tracción dividida.	[27]	
Escoria	0 %, 70 %, 100 %,	100	Resistencia a la compresión. Resistencia a la penetración de cloruros.	[37]
	15 %, 25 %, 50 %, 75 %, 100 %	50	Resistencia a la compresión. Resistencia a la flexión. Módulo de elasticidad. Durabilidad.	[40]
	20 %, 40 %, 60 %, 80 %, 100 %	NR	Resistencia a la compresión.	[41]
	0 %, 25 %, 50 %, 75 %, 100 %	100	Resistencia a la tracción dividida. Permeabilidad. Resistencia a los sulfatos.	[42]
	305 %	30	Resistencia a la compresión.	[43]
Viruta	1 %, 1,25 %, 1,5 %	1	Resistencia a la compresión. Resistencia a la tracción.	[7]
		1,25	Resistencia a la flexión.	
	0,4 %, 0,6 %, 0,8 %, 1 %, 1,2 %, 1,5 %	0,4	Ductilidad. Resistencia a la compresión. Resistencia a la flexión.	[48]
Fibra	2 % × vol. de concreto	NR	Resistencia a la flexión.	[4]
	0,35 %, 0,7 %, 1,05 %	0,7 %	Trabajabilidad. Resistencia a la compresión. Resistencia a la flexión. Resistencia al impacto.	[6]
	0,5 %, 1 %, 1,5 %, 2 %	1,5 %	Capacidad de carga. Resistencia a la flexión. Reduce la propagación de grietas.	[14]
	1,9 % × vol. de concreto	NR	Resistencia a la compresión.	[19]
	1 %, 1,5 %	NR	Viscosidad. Resistencia a la flexión.	[49]
	0,5 %, 1 %, 1,5 %, 2 %	NR	Resistencia a la tracción por rotura. Resistencia a la flexión. Ductilidad.	[43]
	0,5 %, 1 %, 1,5 %, 2 %	NR	Resistencia a la compresión. Resistencia a la flexión. Resistencia a la tracción. Índices de tenacidad.	[56]

NR: no reportado

Fuente: elaboración propia.

Referencias

- [1] K. Abhiram, P. Saravanakumar, “Properties of Recycled Aggregate Concrete Containing Hydrochloric Acid Treated Recycled Aggregates”, *International Journal of ChemTech Research*, vol. 8, no. 1, pp. 72-78, 2015.
- [2] R. Purushothaman, R. R. Amirthavalli, L. Karan, “Influence of treatment methods on the strength and performance characteristics of recycled aggregate concrete”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 27, no. 5, pp. 04014168, 2015, doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001128](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001128)
- [3] H. T. Le, S. T. Nguyen, “A study on high performance fine-grained concrete containing rice husk ash”, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, vol. 8, no. 4, pp. 301-307, 2014, doi: <https://doi.org/10.1007/s40069-014-0078-z>.
- [4] D. Y. Yoo, S. T. Kang, Y. S. Yoon, “Enhancing the flexural performance of ultra-high-performance concrete using long steel fibers”, *Composite Structures*, vol. 147, pp. 220-230, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.03.032>.
- [5] Y. Zhao, B. Xu, J. Chang, “Addition of pre-wetted lightweight aggregate and steel-polypropylene fibers in high-performance concrete to mitigate autogenous shrinkage”, *Structural Concrete*, vol. 21, no. 3, pp. 1134-1143, 2019, doi: <https://doi.org/10.1002/suco.201900280>.
- [6] M. Mastali, A. Dalvand, “Fresh and hardened properties of self-compacting concrete reinforced with hybrid recycled steel-polypropylene fiber”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 29, no. 6, 2017, doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001851](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001851)
- [7] Z. Keshavarz y D. Mostofinejad, “Steel chip and porcelain ceramic wastes used as replacements for coarse aggregates in concrete”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 230, pp. 339-351, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.010>.
- [8] “Fact Sheet: Steel industry by-products,” Worldsteel Association, Bélgica, 2016. [En línea]. Disponible en: <https://www.worldsteel.org/>
- [9] K. Peters, E. Malfa, V. Colla, “The european steel technology platform's strategic research agenda: a further step for the steel as backbone of EU resource and energy intense industry sustainability”, *La Metallurgia Italiana*, vol. 5, pp. 5-17, 2019.
- [10] M. Rubio-Cintas, S. Barnett, F. Pérez-García, M. Parrón-Rubio, “Mechanical-strength characteristics of concrete made with stainless steel industry wastes as binders”, *Construction and Building Materials*, vol. 204, pp. 675-683, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.166>.
- [11] Unión de Empresas Siderúrgicas, “Industria siderúrgica española: anuario estadístico 2019”, 2020, [En línea]. Disponible en: <https://unesid.org/docs/2020-09-anuario-siderurgico.pdf>
- [12] J. Rosales, F. Agrela, J. A. Entrenas, M. Cabrera, “Potential of Stainless Steel Slag Waste in Manufacturing Self-Compacting Concrete”, *Materials*, vol. 13, no. 9, pp. 1-17, 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/ma13092049>.
- [13] I. Padmanaban, S. Nithila, K. R. Jahaan, “Replacement of fine aggregate by using construction demolition waste steel powder in concrete”, *Materials Today: Proceedings*, vol. 23, no. 2, pp. 1551-1556, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.318>.
- [14] Y. W. Shewalul, “Experimental study of the effect of waste steel scrap as reinforcing material on the mechanical properties of concrete”, *Case Studies in Construction Materials*, vol. 14, pp. 1-9, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00490>.
- [15] G. Blasini *et al.*, *Precast tunnel segments in fibre-reinforced concrete*. The International Federation for Structural Concrete, 2017, doi: <https://doi.org/10.35789/fib.BULL.0083>.
- [16] T. A. El-Sayed, “Flexural behavior of RC beams containing recycled industrial wastes as steel fibers”, *Construction and Building Materials*, vol. 212, pp. 27-38, 2019.
- [17] M. K. Ismail, A. A. A. Hassan, “An experimental study on flexural behaviour of large-scale concrete beams incorporating crumb rubber and steel fibres”, *Engineering Structures*, vol. 145, pp. 97-108, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.05.018>.
- [18] O. Sengul, “Mechanical behavior of concretes containing waste steel fibers recovered from scrap tires”, *Construction and Building Materials*, vol. 122, pp. 649-658, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.113>.

- [19] X. Xun, Z. Ronghua, y L. Yinghu, "Influence of curing regime on properties of reactive powder concrete containing waste steel fibers", *Construction and Building Materials*, vol. 232, pp. 1-15, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117129>.
- [20] Satyaprakash, P. Helmand, S. Saini, "Mechanical properties of concrete in presence of Iron filings as complete replacement of fine aggregates", *Materials Today: Proceedings*, vol. 15, no. 3, pp. 536-545, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.04.118>.
- [21] A. Anand, G. M. Abraham, J. George, "Review Paper on Reactive Powder Concrete", *International journal for research in emerging science and technology*, vol. 3, no. 12, pp. 15-21, 2016.
- [22] A. N. Alzaed, "Effect of Iron Filings in Concrete Compression and Tensile Strength", *International Journal of Recent Development in Engineering and Technology*, vol. 3, no. 4, pp. 121-125, 2014.
- [23] B. Venkatesan, M. Venuga, P. R. Dhevasenaa, V. Kannan, "Experimental study on concrete using partial replacement of cement by Alccofine fine aggregate as iron powder", *Materials Today: Proceedings*, vol. 37, no. 2, pp. 2183-2188, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.648>.
- [24] A. L. Mhawi, A. O. Dawood, "Experimental investigation of some properties of square concrete-filled steel tubular columns containing iron filings as replacement of sand", *Materials Science and Engineering*, vol. 888, no. 1, pp. 012045, 2020.
- [25] J. Y. Zhu, T. M. Chan, "Experimental investigation on octagonal concrete filled steel stub columns under uniaxial compression", *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 147, pp. 457-467, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.04.030>.
- [26] F. A. Olutoge, M. A. Onugba, A. Oholi, "Strength Properties of Concrete Produced With Iron Filings as Sand Replacement", *British Journal of Applied Science & Technology*, vol. 18, no. 3, pp. 1-6, 2016.
- [27] M. N. H. AL-Hashimi, W. A. Najim, A. M. Hameed, "Performance of Concrete Containing Iron Fillings", *Journal of University of Babylon for Engineering Sciences*, vol. 26, no. 6, pp. 384-392, 2018.
- [28] M. O. Yusuf, "Synergistic-effect of iron-filing and silica-fume on the absorption and shrinkage of cement paste", *Magazine of Civil Engineering*, vol. 91, no. 7, pp. 16-26, 2019.
- [29] V. S. Devi, M. M. Kumar, N. Iswarya, B. K. Gnanavel, "Durability of Steel Slag Concrete under Various Exposure Conditions", *Materialstoday: Proceedings*, vol. 22, no. 4, pp. 2764-2771, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.407>.
- [30] X. Yu, Z. Tao, T. Y. Song, y Z. Pan, "Performance of concrete made with steel slag and waste glass", *Construction and Building Materials*, vol. 114, pp. 737-746, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.217>.
- [31] Y. Jiang, T. C. Ling, C. Shi, y S. Y. Pan, "Characteristics of steel slags and their use in cement and concrete—A review", *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 136, pp. 187-197, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.04.023>.
- [32] L. Gan, H. F. Wang, X. P. Li, Y. H. Qi, C. X. Zhang, "Strength Activity Index of Air Quenched Basic Oxygen Furnace Steel Slag", *Journal of Iron and Steel Research International*, vol. 22, no. 3, pp. 219-225, 2015, doi: [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(15\)60033-4](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(15)60033-4).
- [33] N. H. Roslan, M. Ismail, N. H. A. Khalid, B. Muhammad, "Properties of concrete containing electric arc furnace steel slag and steel sludge", *Journal of Building Engineering*, vol. 28, pp. 101060, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.101060>.
- [34] S. S. G. Hashemi, H. B. Mahmud, T. C. Ghuan, A. B. Chin, C. Kuenzel, N. Ranjbar, "Safe disposal of coal bottom ash by solidification and stabilization techniques", *Construction and Building Materials*, vol. 197, pp. 705-715, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.123>.
- [35] A. S. Brand, J. R. Roesler, "Steel furnace slag aggregate expansion and hardened concrete properties", *Cement and Concrete Composites*, vol. 60, pp. 1-9, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.04.006>.
- [36] I. Santamaría Vicario, Á. Rodríguez, C. Junco, S. Gutiérrez González, V. Calderón, "Durability behavior of steelmaking slag masonry mortars", *Materials & Design*, vol. 97, pp. 307-315, 5 Mayo 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.02.080>.
- [37] B. Lee, G. Kim, J. Nam, B. Cho, Y. Hama, R. Kim, "Compressive strength, resistance to chloride-ion penetration and freezing/thawing of slag-replaced concrete and cementless slag concrete containing desulfurization slag activator", *Construction and Building Materials*, vol. 128, pp. 341-348, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.075>.

- [38] I. Arribas, I. Vegas, J. San-José, J. M. Manso, “Durability studies on steelmaking slag concretes”, *Materials & Design*, vol. 63, pp. 168-176, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.06.002>.
- [39] N. H. Roslan, M. Ismail, Z. Abdul-Majid, S. Ghoreishiamiri, B. Muhammad, “Performance of steel slag and steel sludge in concrete”, *Construction and Building Materials*, vol. 104, pp. 16-24, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.008>.
- [40] S. Saxena, A. Tembhurkar, “Impact of use of steel slag as coarse aggregate and wastewater on fresh and hardened properties of concrete”, *Construction and Building Materials*, vol. 165, pp. 126-137, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.030>.
- [41] E. R. Noufal, A. K. Kasthurba, J. Sudhakumar, U. Manju, “Assessment of concrete properties with iron slag as a fine aggregate replacement”, *Advances in Concrete Construction*, vol. 9, no. 6, pp. 589-596, 2020, doi: <https://doi.org/10.12989/acc.2020.9.6.589>.
- [42] J. T. Kolawole, A. J. Babafemi, S. C. Paul, A. Plessis, “Performance of concrete containing Nigerian electric arc furnace steel slag aggregate towards sustainable production”, *Sustainable Materials and Technologies*, vol. 25, pp. e00174, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2020.e00174>.
- [43] S. K. Singh, Jyoti, P. Vashistha, “Development of newer composite cement through mechano-chemical activation of steel slag”, *Construction and Building Materials*, vol. 268, pp. 121147, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121147>.
- [44] Y. Ida, S. Hong, S. Kimura, Y. Sato, Y. Kaneko, “Prediction of Drying Shrinkage Cracks of Steel Chip Reinforced Polymer Cement Mortar”, *Journal of Advanced Concrete Technology*, vol. 14, pp. 739-752, 2016, doi: <https://doi.org/10.3151/jact.14.739>.
- [45] Y. S. Ahmed, J. M. Paiva, S. C. Veldhuis, “Characterization and prediction of chip formation dynamics in machining austenitic stainless steel through supply of a high-pressure coolant”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 102, pp. 1671-1688, 2019, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-03277-7>.
- [46] M. Mia, N. R. Dhar, “Effects of duplex jets high-pressure coolant on machining temperature and machinability of Ti-6Al-4V superalloy”, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 252, pp. 688-696, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.10.040>.
- [47] C. Mendonça, P. Capellato, E. Bayraktar, F. Gatamorta, J. Gomes, A. Oliveira, D. Sachs, M. Melo, G. Silva, “Recycling Chips of Stainless Steel Using a Full Factorial Design”, *Metals*, vol. 9, no. 8, pp. 842, 2019, doi: <https://doi.org/10.3390/met9080842>.
- [48] S. Djebali, Y. Bouafia, S. Larbi, A. Bilek, “Mechanical Behavior of Steel-Chips-Reinforced Concrete”, *Key Engineering Materials*, vol. 592-593, pp. 672-675, 2014, doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.592-593.672>.
- [49] D. A. S. Rambo, F. de Andrade Silva, R. D. Toledo Filho, “Mechanical behavior of hybrid steel-fiber self-consolidating concrete: Materials and structural aspects”, *Materials and Design*, vol. 54, pp. 32-42, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.08.014>.
- [50] I. Abavisani, O. Rezaifar, A. Kheyroddin, “Alternating Magnetic Field Effect on Fine-Aggregate Steel Chip-Reinforced Concrete Properties”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 30, no. 6, pp. 040180871-040180879, 2018.
- [51] D. Atlaoui, Y. Bouafia, “Experimental characterization of concrete beams elements reinforced by long fiber chips”, *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 31, no. 8, pp. 844-857, 2016, doi: <https://doi.org/10.1080/01694243.2016.1233620>.
- [52] M. Alwaeli, “The implementation of scale and steel chips waste as a replacement for raw sand in concrete manufacturing”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 137, pp. 1038-1044, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.211>.
- [53] A. Khaloo, E. M. Raisi, P. Hosseini, H. Tahsiri, “Mechanical performance of self-compacting concrete reinforced with steel fibers”, *Construction and Building Materials*, vol. 51, pp. 179-186, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.054>.

- [54] K. R. Akça, Ö. Çakır, M. Ipek, "Properties of polypropylene fiber reinforced concrete using recycled aggregates", *Construction and Building Materials*, vol. 98, pp. 620-630, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.133>.
- [55] H. Xia, W. Wang, Z. Shi, "Mechanical properties of reactive powder concrete with ultra-short brass-coated steel fibres", *Magazine of Concrete Research*, vol. 67, no. 6, pp. 308-316, 2015, doi: <https://doi.org/10.1680/macrc.14.00184>.
- [56] G. Pachideh, M. Gholhaki, "An experimental study on the performance of fine-grained concrete incorporating recycled steel spring exposed to acidic conditions", *Advances in Structural Engineering*, vol. 23, no. 11, pp. 2458-2470, 2020, doi: <https://doi.org/10.1177/1369433220915794>.
- [57] R. Yu, P. Spiesz, H. Brouwers, "Static properties and impact resistance of a green Ultra-High Performance Hybrid Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC): Experiments and modeling", *Construction and Building Materials*, vol. 68, pp. 158-171, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.033>.
- [58] S. Hesami, I. S. Hikouei, S. A. A. Emadi, "Mechanical behavior of self-compacting concrete pavements incorporating recycled tire rubber crumb and reinforced with polypropylene fiber", *Journal of Cleaner Production*, vol. 133, pp. 228-234, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.079>.
- [59] Y. Ye, J. Liu, Z. Zhang, Z. Wang, Q. Peng, "Experimental Study of High-Strength Steel Fiber Lightweight Aggregate Concrete on Mechanical Properties and Toughness Index", *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2020, 2020, doi: <https://doi.org/10.1155/2020/5915034>.
- [60] G. Pachideh, M. Gholhaki, "An experimental into effect of temperature rise on mechanical and visual characteristics of concrete containing recycled metal spring", *Structural Concrete*, vol. 22, no. 1, pp. 550-565, 2021, doi: <https://doi.org/10.1002/suco.201900274>.
- [61] F. Aslani, L. Hou, S. Nejadi, J. Sun, S. Abbasi, "Experimental analysis of fiber-reinforced recycled aggregate self-compacting concrete using waste recycled concrete aggregates, polypropylene, and steel fibers", *Structural Concrete*, vol. 20, no. 5, pp. 1670-1683, 2019, doi: <https://doi.org/10.1002/suco.201800336>.
- [62] X. Ding, M. Zhao, J. Li, P. Shang, C. Li, "Mix Proportion Design of Self-Compacting SFRC with Manufactured Sand Based on the Steel Fiber Aggregate Skeleton Packing Test", *Materials (Basel)*, vol. 13, no. 12, p. 2833, Jun. 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/ma13122833>.