



USE OF CONCRETE USING MOLTEN STEEL AS AGGREGATES: A LITERATURE REVIEW

USO DE CONCRETOS UTILIZANDO ACERO FUNDIDO COMO AGREGADOS: UNA REVISIÓN DE LITERATURA

Andy Correa-Zeña¹; Aldo Hurtado-Bravo¹; Sócrates Muñoz-Pérez¹;
Noé Marín-Bardales¹ & Ernesto Rodríguez-Lafitte^{1*}

¹ Universidad Señor de Sipán. Campus Universitario, Km. 5 Carretera Pimentel. Chiclayo, Perú.
czenaandywilfre@crece.uss.edu.pe/ hbravoaldo@crece.uss.edu.pe/ msocrates@crece.uss.edu.pe/
dmbardales@crece.uss.edu.pe/ rlafitte@crece.uss.edu.pe

* Corresponding author: msocrates@crece.uss.edu.pe

Andy Correa-Zeña:  <https://orcid.org/0000-0002-5121-9489>

Aldo Hurtado Bravo:  <https://orcid.org/0000-0002-1376-8903>

Sócrates Muñoz-Pérez:  <https://orcid.org/0000-0003-3182-8735>

Noe Marín-Bardales:  <https://orcid.org/0000-0003-3423-1731>

Ernesto Rodríguez-Lafitte:  <https://orcid.org/0000-0003-2834-5097>

ABSTRACT

The construction industry is composed of various materials whose components must play a fundamental role, such as the case of concrete, which depends mainly on the properties of cement and aggregates that make it up. However, today there is the incorporation of innovative products for its elaboration, such as molten steel. The purpose of this paper is to carry out a literature review on the effects of the use of molten steel as aggregate in concrete in order to see its mechanical properties and its behavior, being adequate to counteract the cracks that occur in this material. A review of 50 refereed and indexed articles was made. The keywords used were: use of concretes using molten steel as aggregates and molten steel fibers. Finally, from the review, it is concluded that designs are usually obtained with biaxial behavior and multiaxial stresses instead of uniaxial stresses and high resistance capacity.

Keywords: cast steel – concrete – compressive – flexural and compressive strength

RESUMEN

La industria de la construcción está compuesta de diversos materiales, cuyos componentes deben desempeñar un papel fundamental, tal es el caso del concreto, que depende principalmente de las propiedades del cemento y de los agregados que lo conforman, sin embargo, hoy en día se está dando la incorporación de productos innovadores para su elaboración, como es el acero fundido. El presente documento tiene como objetivo realizar una revisión de literatura sobre los efectos que produce la utilización de aceros fundidos como agregado en el concreto, de tal manera ver sus propiedades mecánicas y su comportamiento, siendo adecuado de tal manera que permite contrarrestar las fisuras que se presentan en dicho material. Se hizo una revisión de 50 artículos arbitrados e indexados. Seguidamente las palabras claves fueron: Use of concretes using molten steel as aggregates, what are molten steel fibers. Finalmente, a partir de la revisión se concluye que se obtienen diseños normalmente con comportamientos biaxial y tensiones multiaxiales en lugar de tensiones uniaxial, además de alta capacidad de resistencia.

Palabras clave: acero fundido – concreto – flexión y compresión – resistencia a la compresión

INTRODUCCIÓN

La constante innovación de los materiales en la industria de la construcción llevará consigo el surgimiento de que proyectistas busquen productos nuevos y alternativos, que posean características adecuadas y que cumplan los diferentes requisitos al ser utilizados en la construcción (Krishna *et al.*, 2016). Es más, se han realizado diversas investigaciones a nivel mundial donde se evidencia que en la actualidad se está haciendo indispensable el uso de materiales que puedan formar parte del concreto, tales como: residuos metálicos, que pueden tra-

bajar junto al cemento portland en la elaboración del concreto, debido a que reducen la contaminación al medio ambiente (Msinjili *et al.*, 2019).

Del mismo modo, también se afirma que uno de los grandes retos que se enfrentan en la industria de la construcción son: la constante contaminación ambiental, las variaciones de clima y el excesivo consumo de los recursos no renovables (Praveenkumar *et al.*, 2019), pues basándonos en estos aspectos, diversos países se han visto en la necesidad de buscar o crear nuevos componentes que sean innovadores y eficaces, al ser empleados como

agregado en el concreto (Katare & Madurwar, 2020). Aquí es donde surge la utilización de materiales como el acero, donde en la actualidad se produce cerca de 35-M de tn y cada día aumenta más. Por tal motivo, es que se busca dar un uso adecuado a los compuestos que se originan a partir de este residuo, dado que sería de gran importancia (Lanfang *et al.*, 2015).

Vale decir, que, en la industria de la construcción, el concreto sigue siendo considerado el material más utilizado en todo el mundo; puesto que brinda buenas propiedades mecánicas (Nagajyothi *et al.*, 2019); no obstante, debido a las innovaciones que se están presentando es que han surgido diversos cuestionamientos que ocasionaría el uso de nuevos materiales al ser utilizados como agregados en la elaboración del concreto (Izquierdo *et al.*, 2018).

Es importante destacar que, desde tiempos remotos, hasta la actualidad, en el campo de la construcción los diversos materiales han ido pasando por muchos procesos, donde en algunos de estos, se ha demostrado que resultan ser productos que brindarían buenas propiedades para los materiales, y, por tanto, si a este tipo de residuos se les da un buen uso, surgirían nuevos componentes que al pasar por un cierto proceso surgirían elementos capaces de ser incorporados en la elaboración del concreto. A su vez, el conjunto de actividades económicas que involucran la transformación de materias primas, ocasionan desechos. Incluso se puede mencionar, que la industria de la construcción, como actividad económica, es uno de los

mayores generadores de residuos, que se conocen con diferentes nombres (Tsukada *et al.*, 2016). De igual forma, otras industrias metalmeccánicas son causantes de una gran producción de residuos que son obtenidos a partir de la recuperación y reutilización (Serrano-Guzmán & Pérez-Ruiz, 2015).

Ahora bien, sabemos que el reciclaje ha estado presente desde la antigüedad hasta la actualidad en toda la naturaleza, puesto que son consideradas como fuente sostenible de otros (Lim *et al.*, 2020). Asimismo, los humanos día a día realizan muchos procesos con la finalidad de recuperar los diferentes residuos. Tal es el caso, que en materiales metálicos los disuelve para que los transforme en innovadoras herramientas para que sean utilizados en el concreto; por ejemplo: caucho, vidrio, residuos de acero, etc. (Aghaee *et al.*, 2015).

Por otra parte, siempre se destacará que, en el campo de la construcción, será necesario la búsqueda de nuevos productos con la finalidad de que en algunos casos se pueda sustituir o reemplazar algunos componentes que formen parte de los diferentes materiales de construcción (Singh *et al.*, 2018). Cabe precisar, que estos desafíos se están convirtiendo en uno de los más exitosos, puesto que a partir de materiales como acero fundido se han logrado obtener buenos complementos para los materiales como concreto, debido a las buenas propiedades que dan como resultado, y entre los que podríamos mencionar: Resistencia. En países desarrollados, se está haciendo constante el uso de ma-

teriales nuevos como componentes del concreto, debido a que beneficiarían al medio ambiente y por razones económicas resultaría ser el más factible de conseguir (Etse *et al.*, 2016).

Sin embargo, hoy en día, cuando hacemos referencia a la acumulación de residuos metálicos, surge una nueva problemática, dado que generan gran contaminación ambiental. No obstante, se han optado posibilidades de emplear estos residuos en la construcción, puesto que, se ha evidenciado que al utilizarlo mejoran las propiedades mecánicas del concreto; sin dejar de lado que permite disminuir la contaminación ambiental al reutilizar estos residuos de acero, además del buen factor económico (Briones *et al.*, 2020)

Ahora, de acuerdo a muchas investigaciones se ha evidenciado que se ha tratado de incorporar los residuos metálicos, como las virutas del torno de hierro y el torno de aluminio, con la finalidad de buscar mejoras en el comportamiento estructural del concreto (Alfeehan *et al.*, 2020); del mismo modo, se podría decir que utilizar las propiedades que brindan este tipo de residuos permiten ser empleados en la construcción, rehabilitación y mantenimiento de las carreteras. (Rondón *et al.*, 2018). En este sentido, se puede decir que el no dar un buen uso a este tipo de residuos, ocasionaría problemas ambientales. Por ello se busca ver la manera de que puedan ser incorporados como agregados pétreos de mezclas asfálticas.

Sobre residuos metálicos industriales

En pleno Siglo. XXI la industria de la construcción está pasando

por diferentes fases, que conllevan al desarrollo sustentable, el cual no siempre ha traído consigo un aspecto favorable para el medio ambiente, pues, simplemente se ha enfocado en crear nuevos productos, sin tener en cuenta si son o no respetuosos con el medio ambiente (Šadzevičius *et al.*, 2015).

Un claro ejemplo es utilización del acero, que en el campo de la construcción está ganando la popularidad de ser una buena y óptima alternativa para ser utilizado en la elaboración de los diversos materiales de construcción (Selvaraj & Madhavan, 2021). No obstante, han dejado de lado los grandes porcentajes de emisión de CO₂, que perjudican al medio ambiente, y es un tema de gran importancia ambiental (Dias-Feiber *et al.*, 2020).

Asimismo, a nivel mundial se ha considerado que el aumento de la demanda en la industria de la construcción, ha conllevado el excesivo uso del concreto; y a su vez el empleo constante de este tipo de materia prima, que daña considerablemente al ambiente y a la sociedad, puesto que los materiales que lo componen no serían considerados materiales respetuosos con el medio ambiente (Alengaram *et al.*, 2016).

Se puede decir que, respecto a lo ya mencionado, los constantes daños al medio ambiente, están originando que se busquen nuevas alternativas eficaces y favorables para que sean empleados en los materiales de construcción, como la fabricación del concreto. Luego se ha presenciado que con el surgimiento de estos nuevos productos innovadores está conllevando al desarrollo sustentable.

Del mismo modo, hoy en día, materiales como el hormigón están siendo los más utilizados en la construcción, dado que son capaces de mejorar la propiedades tanto físicas - mecánicas del material ya mencionado (Scope *et al.*, 2021). No obstante, buenas características que brindan también existe un alto porcentaje negativo respecto a la producción de estos materiales, tales son: Los morteros u hormigones, puesto que para su fabricación conllevaría el uso constante de uno de los recursos natural que demanda mucha energía, sin dejar de lado las expulsiones en grandes cantidades de CO₂ (Herrmann *et al.*, 2018).

Utilización del acero en la construcción

En los últimos años se están explorando nuevos e innovadores compuestos para reducir los grandes porcentajes de CO₂ que dañan al medio ambiente y son empleados en la construcción (Di Maria *et al.*, 2018). Por ello, diversas investigaciones, han evidenciado que están centrándose en reutilizar los residuos industriales con el fin de producir nuevos componentes que puedan utilizarse junto al cemento en la elaboración de materiales de construcción como el concreto (Mukherjee *et al.*, 2019).

Diversos estudios han mencionado que la escoria de acero con el cemento ha evidenciado un aumento en la resistencia a la comprensión de materiales como el concreto (Ramalingam & Masilamani, 2021). Por otro lado, también existen investigaciones que al utilizar escoria de acero produce efectos negativos al medio ambiente, a pesar de los

buenos efectos sobre las características del hormigón, y, por tanto, se siguen examinando tantos los beneficios del equilibrio económico y ambiental (Gencel & Karadag, 2021). Del mismo modo, Lai & Zou (2021) sugieren que se reemplace algunos componentes del concreto, por productos como escoria de acero, dado que, al reemplazados, generaron como resultado que las propiedades mecánicas sean óptimas, además del beneficio que conllevaría para la protección ambiental.

No obstante, de acuerdo algunas investigaciones consideran que la fabricación de nuevos productos tendría que ir de la mano con aspectos que implementen la ecología industrial, es decir, siempre y cuando se generen ganancias ambientales (Salman *et al.*, 2016). Es así que surge, la utilización de las escorias de acero fundido, que son compuestos obtenidos a partir de la industria de dicho material y son óptimas para ser aplicados en los diversos productos; sin embargo, se sugiere que para su uso sea necesario el estricto cuidado, ya que, así sea un material con bajo costo económico, si no se utiliza de forma adecuada, podría ser un gran contaminante (Dell'Anna *et al.*, 2020).

Han existido estudios de vigas de hormigón con fibras de acero se diseñan con parámetros que se someten al estado de tensión-deformación, formando el desarrollo de grietas. Estos cambios afectan al parámetro de diseño de capacidad de carga y desplazamiento. Los resultados de esta simulación muestran que estos parámetros de diseño afectan a la capacidad portante,

la tensión de deformación y desarrollo de grietas, por tal razón se recomienda el aumento del contenido de fibras de acero en el hormigón. Por lo tanto, esta investigación ayuda al diseño de estructuras de vigas de hormigón con fibras de acero para soportar las cargas de impacto y limitar las grietas en las vigas (Do & Lam, 2021).

Por otro lado, trabajar los efectos del contenido de árido grueso reciclado, el contenido de fibra de acero de concreto resistente debe comportarse a compresión axial de columnas circulares con refuerzo de acero con reciclaje de árido grueso. Al realizar los ensayos se obtuvo como resultados que el uso de árido grueso reciclado reduce la capacidad portante de las columnas, sin embargo, al aumentar las fibras de acero también aumenta la resistencia influenciada en la ductilidad y la rigidez, eliminando las deficiencias (Wang *et al.*, 2021).

Por último, el concreto con escoria de acero ha demostrado buenas características físicas y químicas, además de

reducir el impacto de usar recursos naturales, y, por ende, el desempeño del concreto con incorporación del acero sería adecuado, debido a las buenas características que posee (Gong & Wang, 2021). Del mismo modo, Subathra & Madhan (2020) mencionan que la utilización de residuo de acero brinda al hormigón obtener buena durabilidad. El objetivo fue evaluar el uso del concreto usando acero fundido como agregados.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se buscaron 50 artículos arbitrados e indexados, de los cuales fueron obtenidos de las siguientes bases de datos: Scopus, Scielo, Ebsco y Science Direct. Para la búsqueda de los artículos, se utilizaron las siguientes palabras claves: “fibras de concreto”, “viruta de acero”, “residuo de acero”, “steel fiber in concrete”, “Steel chip in concrete”, and “Steel residue in concrete”. Seguidamente para un mejor detalle se muestran las siguientes tablas 1 y 2:

Tabla 1. Artículos distribuidos, según la base de datos y el año de publicación.

Año De Publicación	Base de Datos				Total
	Scopus	Ebsco	Scielo	Science Direct	
2015		5			5
2016		4	2		6
2017	1				1
2018		7			7
2019		3		2	5
2020	1	4	4	2	11
2021	3	2	4	6	15
2015-2021			50		

Tabla 2. Artículos distribuidos, de acuerdo a los diferentes criterios de búsqueda.

BASE DE DATOS	AÑOS DE BÚSQUEDA	PALABRAS CLAVE	SIN FILTRO (SF)	FILTRO DE BUSQUEDA	CON FILTRO	SELECCIÓN
EBSCO	2015-2021	Use of concretes using molten steel as aggregates	2511	concrete/ compressive strength/ construction materials/ portland cement/ reinforced concrete/ fly ash/ cement/ concrete durability/ concrete waste/ mechanical behavior of materials/ concrete mixing/ concrete construction/ fiber-reinforced concrete/ flexural strength/ building materials recycling/ high strength concrete/ cement composites/ concrete additives/ strength of materials/ composite materials/ fibers/ concrete industry/ concrete products/ durability	368	3
	2015-2021	what are molten steel fibers	3989	liquid metals / fused salts/ steel stainless steel/ slag/ liquid iron/ blast furnaces/ heat resistant alloys/ corrosion resistance/ iron alloys/ high temperatures/ heat transfer fluids/ iron/ manufacturing processes/ steel corrosion/ high strength steel/ steel industry/ cast steel/ cast-iron/ construction materials	841	2
	2015-2021	steel in construction	6663	steel/ iron & steel building/ structural steel/ construction materials/ construction projects/ welded steel structures/ stainless steel/ construction/ construction industry/ steel industry/ iron & steel bridge design & construction/ steel mills -- design & construction/ building design & construction/ structural engineering/ civil engineering/ strength of materials	890	10
	2015-2021	steel fibers in concrete	2307	fiber-reinforced concrete/ reinforced concrete/ steel/ fibers/ flexural strength/ concrete/ fibrous composites/ mechanical behavior of materials/ high strength concrete/ strength of materials/ construction materials/ concrete construction	346	10
Scielo	2015-2021	steel fibers	54	Engineering / Civil / Building / Construction/ Materials	49	10
Scopus	2015-2021	Steel fiber in concrete	9168	Engineering/ Materials Science/ Chemistry/ Chemical Engineering	8591	5
ScienceDirect	2015-2021	Steel fiber in concrete	7179	Engineering/ Materials Science/ Chemistry/ Chemical Engineering	5545	10

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La mayoría de los artículos mencionados, respecto a diversas investigaciones se basan en un análisis de la incorporación de los residuos metálicos industriales en materiales como el concreto. Se detalla los estudios más relevantes y representativos, en los cuales explican la variedad de resultados.

Se sabe que el acero en el campo de la construcción e ingeniería es uno de los materiales más importantes a nivel mundial (Zeng *et al.*, 2018). De tal modo, hoy en día se usa en la mayoría de sectores, pero entre los que más se destaca es la construcción, por tal es importante las características que posea este material (Qiu *et al.*, 2018).

Diversos estudios mencionan que la consistencia seca del concreto se caracteriza por su proceso particular en la mezcla, molde y asentamiento con densificación manual y mecánica de los ensayos característicos como tracción y flexión. Puesto que, de modo cualitativo, al combinar los métodos se densificó la proporción dando un aspecto liso a la superficie del objeto ensayado (Barbosa *et al.*, 2020).

Ahora, las fibras de acero presentan un comportamiento de efecto torsional donde se realizaron especímenes cilíndricos con porcentajes de 0,5%, 0,75% y 1%, que fueron sometidos a pruebas bajo torsión después de 28 días de curado, donde se obtuvieron como resultado que su resistencia máxima incremento (Bilal *et al.*, 2021). Asimismo, otros estudios donde se utilizó la fibra de acero se evaluaron la resistencia a la compresión del hormigón a diferentes edades de curado (3,

7 y 28 días) resultando un aumento de 0% a 15%. Aquí se utilizaron dos métodos para construir ecuaciones de predicción para la fuerza cúbica utilizando el Diseño Compuesto Central (CCD) y el Diseño Box Behnk (BBD) prediciendo las fuerzas cúbicas experimentales de investigación, donde se verificó la base de diseño de mezcla del concreto (Sharaky *et al.*, 2021).

Además, las fibras de acero han sido incorporadas para el diseño de canales de hormigón, donde dichos estudios se basaron en utilizar el método para las pruebas con sujetadores instalados con anclaje de pernos; resultando que las muestras reflejan un rendimiento alto de los pernos de canal instalados a comparación de aquellos sistemas de hormigón reforzado simple (Ayoubi *et al.*, 2020).

Por otro lado, para los ensayos sometidos al concreto se centró en la distribución y disposición en la conducta post-agrietamiento fortalecido con fibras de acero para un concreto auto-compactante. El comportamiento se comprobó posteriormente mediante el ensayo de tracción por fraccionamiento modificado. Asimismo, se verificó por el método de rayos X para la fibra. Resultando para los elementos estructurales mayores tensiones residuales y absorción de energía (Medina *et al.*, 2021). Del mismo modo, diversas investigaciones han demostrado que el residuo de viruta de acero favorece al concreto en su resistencia cuando se le adiciona 2% en peso de concreto, en comparación al 1 y 1,5% (Osifala *et al.*, 2017).

Por el contrario, en vigas sin refuerzo transversal se realizaron seis ensayos,

probando hasta el fallo de flexión en cuatro puntos. Tras las pruebas resultaron valores de resistencia al corte eran menores de vigas profundas con poca luz. Sin embargo, con la presencia de fibras de acero la resistencia aumenta y contribuye a cuantificar la fisuración diagonal. La carga máxima de corte con fibras de acero en vigas profundas aumento un 16%. Además, se evaluaron la aplicación de hormigón ligero sin fibras de acero y se comparan las predicciones de cizalladura, según algunos investigadores (Garcia *et al.*, 2021).

Para complementar la posibilidad de sustituir el refuerzo de barras de acero incorporando fibras de acero en el hormigón de alta resistencia, debe mostrar potencial de comportamiento estructural dúctil y reducir el tiempo de construcción. Para trazar el diagrama de interacción de carga-axial y momento flexión (N – M) los ensayos resultaron que los pilares presentan alta resistencia, enfocando dos análisis para predecir éste diagrama. Por lo que se demuestra prometedora para su aplicación en columnas y vigas de hormigón con fibras de acero a altas resistencia (Akshay *et al.*, 2021).

Los hormigones al ser diseñados y construidos normalmente experimentan comportamientos biaxial y tensiones multiaxiales en lugar de tensiones uniaxial. La investigación con incorporación de fibras de acero como refuerzo las limita a compresiones biaxial, mientras que la información relativa a la tensión biaxial y tensión-compresión es relativamente escasa. La adición de fibra de acero mejoró la

resistencia del concreto entre un 15% y un 41% bajo tensión-compresión en comparación con el concreto simple (Chiew *et al.*, 2020).

Los efectos de las fibras de acero, evaluando 21 muestras cúbicas ensayadas a resistencia a la compresión, 14 muestras cilíndricas para las pruebas de resistencia a la tensión y también 14 muestras prismáticas para las pruebas de resistencia a la flexión en tres puntos. Los resultados reflejan que la adicción de fibras de acero entre el 0,3% y el 0,9% para el hormigón aumenta simultáneamente las resistencias a la compresión, a la tensión y a la flexión en comparación con el hormigón simple. Por lo general la resistencia a la tensión y a la flexión del hormigón podrían explicarse como el 8% y el 13% de la resistencia a la compresión. (Akbari & Abed, 2020).

Venkatesan & Lijina (2021) mencionan que el residuo de acero afecta al medio ambiente llegando a dañarlo, es por tal razón que considera la utilización de éste, donde se sustituye 0%, 10%, 20%, 30%, 40% y 50% como agregado en el concreto, dando como resultado que las propiedades mecánicas tales como resistencia a la compresión, resistencia a la tracción y propiedades de resistencia a la flexión y durabilidad tales como absorción de agua, ataque de ácido y ataque de sulfatos fueron las deseadas.

Al adherir al hormigón refuerzo con fibras de acero, se realizaron ensayos de empuje de 16 especímenes en proporciones de 0%, 1%, 2% y 3%, obteniendo indicadores de resistencia de adherencia, la disipación de energía y

las variables de daño, los resultados de la investigación muestra diferencia de cargas en el extremo libre, conduce un buen comportamiento de adhesión lo que significa que puede almacenar

alta energía de deformación elástica en la interfaz, generando que la variable de daño se desarrolle a un bajo ritmo (Wu *et al.*, 2021)

Tabla 3. Comparación de patrones de falla de probetas con diferentes psf “libra por pie cuadrado”.

<i>Fibra de acero</i>	<i>Ruido en el momento de la destrucción</i>	<i>Patrón de daño</i>
0%	Un sonido obvio de grietas en el hormigón.	Antes de alcanzar la capacidad de carga límite, aparecieron grietas de división en dirección longitudinal. Después de alcanzar la capacidad de carga final, las grietas originales se hicieron más anchas con menos grietas nuevas, y básicamente no aparecieron grietas ramificadas.
1%	Debido a la rotura de la fibra de acero en las grietas, la energía acumulada en la muestra se liberó instantáneamente, lo que provocó un fuerte ruido.	Antes de alcanzar la capacidad portante última, las grietas se extendían desde el extremo de carga hasta la mitad de la altura del hormigón. Después de alcanzar la capacidad de carga final, las grietas originales se extendieron hasta el extremo libre a lo largo de la dirección longitudinal, con más grietas nuevas y ramificadas al mismo tiempo. Las grietas longitudinales transversales aparecieron repentinamente en la zona que antes no tenía grietas.
2%	El sonido del fallo del hormigón fue similar al de la proporción de fibra de acero del 0%.	Antes de alcanzar la capacidad portante última, había menos grietas, y la grieta principal se extendía desde el extremo de carga hasta un tercio de la altura del hormigón. Después de alcanzar la capacidad de carga final, la grieta principal se extendía hasta el extremo libre. Un gran número de grietas ramificadas en el espécimen C1-6-20, y no se produjeron nuevas grietas en el espécimen C2-2-20. muestra C2-2-20.
3%	Los especímenes tenían un ligero ruido cuando se agrietan.	Antes de alcanzar la capacidad portante última, había menos grietas, y la grieta principal se extendía desde el extremo de carga hasta aproximadamente un tercio de la altura del hormigón. Después de alcanzar la capacidad de carga final, la grieta principal se extendía hasta el extremo libre, y había más grietas ramificadas en el espécimen

Wu *et al.* (2021).

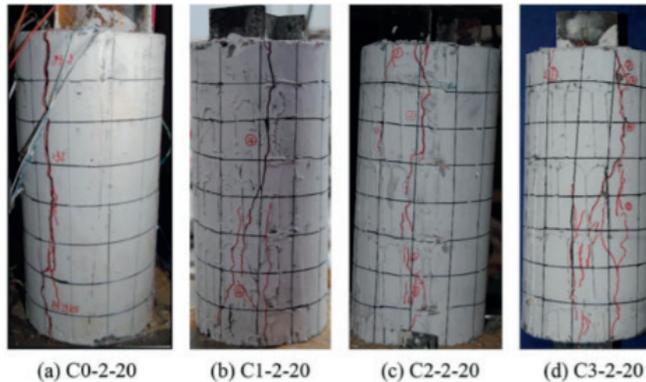


Figura 1. Comparación de la forma de daño de las muestras con diferentes psf “libra por pie cuadrado”.

Finalmente, en cuanto, a los efectos que ocasiona en la resistencia mecánica de compresión en el concreto al incorporar escorias de alto horno en un porcentaje del 70%, se confirma que es beneficioso en microclimas húmedos y marinos; y en lugares propensos a carbonatación es beneficioso incorporar hasta el 50%, ya que en estos rangos se logra una eficiencia superior a la resistencia a la compresión (Cabrera *et al.*, 2016). Además, con porcentajes de 10%, 15%, y 20% con escoria de horno de cubilote (EHC), muestran que la profundidad de penetración de CO_2 es inferior mientras sea superior el porcentaje de sustitución (Cruz *et al.*, 2015).

Del mismo modo, podríamos mencionar que en los edificios se han utilizado procesos de forjados de acero y hormigón, ocasionando una respuesta óptima en la estructura, además de una considerable resistencia a la flexión y capacidad de rigidez (Araújo & Batista, 2020).

En este sentido, se puede decir que estos residuos metálicos industriales

están surgiendo como nuevas alternativas capaces de ser utilizados en los materiales de construcción, brindando así las características deseadas al material que lo conforman, y que además disminuirían la contaminación ambiental; sin dejar de lado el desarrollo sustentable en la rama de la ingeniería.

Mediante el análisis del estado del arte en la temática se concluye que la incorporación de residuos metálicos industriales en el concreto logra: Se obtengan diseños normalmente con comportamientos biaxial y tensiones multiaxiales en lugar de tensiones uniaxial. Además, un efecto positivo, puesto que su aplicación conllevaría a la disminución del consumo de recursos extraídos de cantera, generando así menor contaminación al medio ambiente. Y finalmente, los residuos metálicos, favorece en el concreto, debido a su alta capacidad de resistencia, durabilidad, entre otros.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aghaee, K.; Yazdi, M. & Tsavdaridis, K. 2015. Investigation into the mechanical properties of structural light-weight concrete reinforced with waste steel wires. *Magazine of Concrete Research*, 67: 197-205.
- Akbari, J. & Abed, A. 2020. Experimental evaluation of effects of steel and glass fibers on engineering properties of concrete. *Frattura e Integrità Strutturale*, 54: 116-127.
- Akshay, V.; Lai, B. & Richard, L. 2021. Design of steel fiber-reinforced high-strength concrete-encased steel short columns and beams. *ACI Structural Journal*, 118: 45-59.
- Alengaram, U.; Mo, K.; Jumaat, M.; Yap, S. & Lee, S. 2016. Green concrete partially comprised of farming waste residues: a review. *Journal of Cleaner Production*, 117: 122-138.
- Alfeehan, A.; Mohammed, M.; Jasim, M.; Fadehl, U. & Habeeb, F. 2020. Utilización de desechos metálicos industriales en los paneles de hormigón armado nervados unidireccionales. *Revista Ingeniería de construcción*, 35: 246-256.
- Araújo, L. & Batista, E. 2020. Composite floor system with CFS trussed beams, concrete slab and innovative shear connectors. *REM - International Engineering Journal*, 73: 23-31.
- Ayoubi, M.; Mahrenholtz, C. & Nell, W. 2020. Influence of the steel fibres on the tension and shear resistance of anchoring with anchor channels and channel bolts cast in concrete. *RILEM bookseries*, 30: 221-232.
- Barbosa, M.; Rodrigues, R.; Souza, M.; Soares, E. & Silva, M. 2020. Analysis of the influence of test method and properties of steel addition on concrete under the three-point flexural tensile. *Revista Chilena de Ingeniería*, 28: 373-382.
- Bilal, A.; Israil, M. & Ayaz, M. 2021. Effect of steel fibres on the torsional behaviour of concrete elements: unified model using artificial neural networks. *Innovative Infrastructure Solutions*, 6: doi:10.1007/s41062-021-00479-z
- Briones, A.; Zambrano, J.; Muñoz, J.; Ruiz, W. & Panchana, R. 2020. Análisis de la pretación mecánica del hormigón empleando virutas de acero como agregado fino. *Revista de Investigaciones en Energía, Medio ambiente y Tecnología*, 5: 15-22.
- Cabrera, J.; Escalante, J. & Castro, P. 2016. Resistencia a la compresión de concreto con escoria de alto horno. Estado del arte re-visitado. *Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción*, 6: 64-83.
- Chiew, S.; Ibrahiim, I.; Jamaluddin, N. & Sarbini, N. 2020. Behavior of Steel Fiber-Reinforced Concrete under Biaxial Stresses. *ACI Structural Journal*, 117: 267 - 278.
- Cruz, R.; Pico, C. & Pérez, L. 2015. Durabilidad y acústica del concreto con escoria de cubilote como reemplazo del agregado fino. *Tecnura*, 19: 31-45.

- Dell'Anna, M.; Romanazzi, G.; Positano, M.; Specchio, V.; Mastrorilli, P.; Tomasicchio, G. & Mali, M. 2020. Assessing environmental impacts in using waste steel slags as construction materials in a highly industrialized area. *Aquatic Ecosystem Health & Management*, 23: 474-482.
- Di Maria, A.; Salman, M.; Dubois, M. & Van Acker, K. 2018. Life cycle assessment to evaluate the environmental performance of new construction material from stainless steel slag. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 23: 2091-2109.
- Dias-Feiber, S.; De-Souza, T.; Bressiani, L. & Tino-Balestra, C. 2020. Analysis of CO₂ emissions between construction systems: light steel frame and conventional masonry. *Environmental Engineering & Management Journal*, 19: 2147-2156.
- Do, T. & Lam, T. 2021. Design parameters of steel fiber concrete beams. *Magazine of Civil Engineering*, 102: 73-86.
- Etse, G.; Vrech, S. & Ripani, M. 2016. Constitutive theory for Recycled Aggregate Concretes subjected to high temperature. *Construction & Building Materials*, 111: 43-53.
- Garcia, S.; Pereira, A.; & Pierott, R. 2021. Shear strength of sand-lightweight concrete deep beams with steel fibers. *ACI Structural Journal*, 118: 203-214.
- Gencel, O. & Karadag, O. 2021. Steel slag and its applications in cement and concrete technology: A review. *Construction and Building Materials*, 283: 122783.
- Gong, Q. & Wang, G. 2021. Recycling of steel slag aggregate in portland cement concrete: An overview. *Journal of cleaner production*, 282: 124447.
- Herrmann, A.; Koenig, A. & Dehn, F. 2018. Structural concrete based on alkali-activated binders: Terminology, reaction mechanisms, mix designs and performance. *Structural Concrete*, 19: 918-929.
- Izquierdo, I.; Izquierdo, O. & Ramalho, M. 2018. Physical and mechanical properties of concrete using residual powder from organic waste as partial cement replacement. *Construction Engineering Magazine*, 33: 229-240.
- Katare, V. & Madurwar, M. 2020. Design and investigation of sustainable pozzolanic material. *Journal of Cleaner Production*, 242: 118431.
- Krishna, N.; Sandeep, S. & Mini, K. 2016. Study on concrete with partial replacement of cement by rice husk ash. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 149: 012109.
- Lai, M. & Zou, B. 2021. Improving mechanical behavior and microstructure of concrete by using BOF steel slag aggregate. *Construction and Building Materials*, 277: 122269.
- Lanfang, L.; Issam, S.; Chong, W. & Christopher, H. 2015. Integrating G₂G, C₂C and resource flow analysis into life cycle assessment framework: A case of construction steel's resource loop. *Resources, Conservation & Recycling*, 102: 143-152.

- Lim, Y.; Shih, Y.; Tsai, K.; Yang, W. & Chen, C. 2020. Recycling dredged harbor sediment to construction materials by sintering with steel slag and waste glass: Characteristics, alkali-silica reactivity and metals stability. *Journal of Environmental Management*, 270: 110869.
- Medina, N.; De Melo-Lameiras, R.; Dos Santos, A. & Willrich, F. 2021. Effect of distribution and orientation of fibers on the porst-cracking behavior of steel fiber reinforced self-compacting concrete in small thickness elements. *RILEM Bookseries*, 30: 279-289.
- Msinjili, N.; Schmidt, W.; Rogge, A. & Kühne, H. 2019. Rice husk ash as a sustainable supplementary cementitious material for improved concrete prop. *African Journal of Science, Technology and Innovatio*, 11: 417-425.
- Mukherjee, S.; Eberle, J.; Milius, J. & Kettleison, P. 2019. High time for a Change: Re-decking the multi-span tied steel arch Smith Avenue Bridge in St. Paul. *Roads & Bridges*, 57: 20-26.
- Nagajyothi, K.; Shyam Chamberlin, K.; Asadi, S. & Maheswara Reddy, M. 2019. Experimental study on strength and workability of concrete using rice husk ash and quarry dust concrete. *International Journal of Recent Research Aspects*, 6: 35-41.
- Osifala, K.; Salau, M. & Obiyomi, T. 2017. Effect os waste steel shavings on bond strength between concrete and steel reinforcement. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 251: 012080.
- Praveenkumar, T.; Vijayalakshmi, M. & Meddah, M. 2019. Strengths and durability performances of blended cement concrete with. *Construction and Building Materials*, 217: 343-351.
- Qiu, J.; Leng, B.; Liu, H.; Macdonald, D.; Wu, A.; Jia, Y. & Zhou, X. 2018. Effect of SO₄²⁻ on the corrosion of 316L stainless steel in molten FLiNaK salt. *Corrosion Science*, 144: 224-229.
- Ramalingam, M. & Masilamani, A. 2021. Effect of surface-treated energy optimized furnace steel slag as coarse aggregate in the performace of concrete under corrosive. *Construction and Building Materials*, 284: 122840.
- Rondón, H.; Muniz, M. & Reyes, F. 2018. Uso de escorias de alto horno y acero en mezclas asfálticas: revisión. *Revista Ingenierias Universidad de Medellin*, 17: 71-97.
- Šadzevičius, R.; Gurskis, V. & Ramukevičius, D. 2015. Sustainable construction of agro-industrial buildings from straw panels. *Proceedings of the International Scientific Conference: Rural Development*, 1: 6.
- Salman, M.; Dubois, M.; Maria, A.; Acker, K. & Balen, K. 2016. Construction Materials from Stainless Steel Slags: Technical Aspects, Environmental Benefits, and Economic Opportunities. *Journal of Industrial Ecology*, 20: 854-866.
- Scope, C.; Vogel, M. & Guenther, E. 2021. Greener, cheaper, or more sustainable: Reviewing sustainability assessments of maintenance strategies of concrete structures. *Sustainable Production and Consumption*, 26: 838-858.

- Selvaraj, S. & Madhavan, M. 2021. Criteria for Selection of Sheathing Boards in Cold-Formed Steel Wall Panels Subjected to Bending: Construction Applications and Performance-Based Evaluation. *Practice Periodical on Structural Design & Construction.*, 26: 1-14.
- Serrano-Guzmán, M. & Pérez-Ruíz, D. 2015. Concreto preparado con residuos industriales: Resultado de Alianza Empresa Universidad. *Revista Educación en Ingeniería*, 1: 1-11.
- Sharaky, I.; Ghoneim, S.; Abdel, B. & Emara, M. 2021. Experimental and theoretical study on the compressive strength of the high strength concrete incorporating steel fiber and metakaolin. *Structures*, 31: 57-67.
- Singh, N.; Mithulraj, M. & Arya, S. 2018. Influence of coal bottom ash as fine aggregates replacement on various properties of concretes: A review. *Resources, Conservation & Recycling*, 138: 257-271.
- Subathra, D. & Madhan, K. 2020. Durability of steel slag concrete under various exposure conditions. *Materials Today: Proceedings*, 22: 2764-2771.
- Tsukada, K.; Haga, Y.; Morita, K.; Song, N.; Sakai, K.; Kiwa, T. & Cheng, W. 2016. Detection of inner corrosion of steel construction using magnetic resistance sensor and magnetic spectroscopy analysis. *IEEE Transactions on Magnetics*, 52: 1-4.
- Venkatesan, B. & Lijina, V. 2021. APrtial replacement of fine aggregate by steel sleg and coarse aggregate by walnut shell in concrete. *Materials Today: Proceedings*, 37: 1761-1766.
- Wang, Q.; Liang, J.; He, C. & Li, W. 2021. Axial compressive behavior of steel fiber-reinforced recycled coarse aggregate concrete-filled short circular steel columns. *Advances in materials science & Engineering*, 2021: 5516893.
- Wu, K.; Xu, J. & Chen, F. 2021. Bonding Behavior and interfacial Damage between fiber-reinforced concrete anda steel. *ACI Materials Journal*, 118: 83-96.
- Zeng, M.; Liu, J.; Yang, Z.; Liu, X. & Wang, F. 2018. Ion transport in MgO porous fibers retained molten salt electrolytes for thermal batteries. *Journal of the Electrochemical Society*, 165: 736-740.

Received June 25, 2021.

Accepted August 9, 2021.