

A review of the mechanical behavior of concrete with the addition of steel fibers from recycled tires

INGENIERÍA DE MATERIALES

Una revisión del comportamiento mecánico del concreto con adición de fibras de acero de neumáticos reciclados

Jorge A. Nunton¹, Jean Pool Portocarrero¹, Sócrates P. Muñoz^{1§}

^{1§}*Universidad Señor de Sipán, Pimentel, Perú, Escuela de Ingeniería Civil*

NCARRASCOJORG@crece.uss.edu.pe, pbustamantejean@crece.uss.edu.pe, §msocrates@crece.uss.edu.pe.

Recibido: 17 de noviembre de 2021 – **Aceptado:** 12 de febrero de 2022

Abstract

Concrete in the construction industry is a widely used material, so there has been research on how to innovate the materials that are usually used for the production of concrete, but without altering the mechanical properties, that is to say that they are equal or better than they usually are; so using recycled material is a good option because it would help to reduce pollution, reduce the use of raw materials and improve the environmental situation. The objective of this article is to review different research on a material called tire steel fibers incorporated in concrete, which allows improving the properties of workability, compressive strength, flexural strength and density of concrete. A search of 80 review articles indexed in different databases was performed, in addition to being published research from the last 7 years between 2015 and 2021, which are divided as follows: 14 from ScienceDirect, 21 from EBSCO, 20 from Sopas and 24 from Web Of Science, documents that point out the importance of sustainable construction and the description of recycled tire steel fibers. The steps, methods and techniques of selection, characteristics and adequate volume that the fiber should have were reviewed, after discussing and analyzing the results, it is concluded that recycled tire steel fibers cause positive effects on the mechanical characteristics of concrete.

Keywords: *Mechanical properties, recycled tire, concrete, steel fibers.*

Como citar:

Nunton JA, Portocarrero JP, Muñoz SP. Una revisión del comportamiento mecánico del concreto con adición de fibras de acero de neumáticos reciclados. *INGENIERÍA Y COMPETITIVIDAD*, In press 2022; e30611741. <https://doi.org/10.25100/iyc.v24i2.11741>



Resumen

El concreto en la industria de la construcción es un material muy usado, por lo que se ha venido investigando la manera de innovar los materiales que usualmente se usan para la elaboración del concreto, pero sin alterar las propiedades mecánicas, es decir que sean igual o mejores de lo que usualmente son; por lo que usar material reciclado es una buena opción ya que sería de ayuda en la disminución de la contaminación, disminuiría el uso de materia prima y mejoraría la situación del medio ambiente. El presente artículo tiene como objetivo revisar diferentes investigaciones sobre un material denominado fibras de acero de neumáticos incorporado en el concreto, que permita mejorar las propiedades de trabajabilidad, resistencia a la compresión, flexión y densidad del concreto. Se realizó una búsqueda de 80 artículos de revisión indexados en diferentes bases de datos, además de ser investigaciones publicadas de los últimos 7 años entre el 2015 y 2021, los cuales se dividen de la siguiente manera: 14 de ScienceDirect, 21 de EBSCO, 20 de Sopas y 24 de Web Of Scince, documentos que señalan la importancia de la construcción sostenible y la descripción de las fibras de acero de neumático reciclado. Se revisó los pasos, métodos y técnicas de selección, características y volumen adecuado que debe tener la fibra, después de discutir y analizar los resultados, se llega a la conclusión de que las fibras de acero de neumáticos reciclados causan efectos positivos en las características mecánicas del concreto.

Palabras claves: Propiedades mecánicas, neumático reciclado, concreto, fibras de acero

1. Introducción

Al hablar de concreto, hablamos de un material que es muy usado en la construcción, el incremento del uso de concreto ha hecho que la tecnología de los materiales últimamente tenga una amplia investigación, para innovar materiales y disminuir el uso de la materia prima, uno de estos nuevos materiales a emplear en la elaboración del concreto es la fibra de acero que se puede extraer de los neumáticos desechados ^(1,2).

Por otro lado, se habla de la preocupación que causa la gran cantidad de producción de neumáticos al año, estima que anualmente se desecha una cantidad de 4 mil millones de llantas usadas, un pequeño porcentaje de estas las usan para mejorarlas y volverlas a usar como neumáticos de segunda mano, pero la otra parte se queda como desecho ^(3,4), de la misma manera Shaaban et al. ⁽⁵⁾ menciona que en Estados Unidos se desechan aproximadamente 270 millones de toneladas de llantas, por lo que investigadores han optado por agregar este material en la elaboración de un concreto ecológico.

La acumulación de neumáticos usados y desechados son un gran peligro para la salud,

además en ocasiones se convierten en el medio que genera incendios, contaminado de gran manera al medio ambiente ^(6,7), todo ello porque los neumáticos terminan en botaderos legales o ilegales, en las calles o barrancos causando también una contaminación visual ⁽⁸⁾

Es importante dejar en claro que la innovación de materiales es para lograr un resultado similar o mejor en las propiedades mecánicas del concreto, por otro lado, al emplear materiales que están en situación de desecho en la industria de la construcción y en especial en la elaboración del concreto, mejoraría la situación actual del medio ambiente, ya que sería una buena manera de reciclar en vez de quemarlo o tirarlo.

Ya se han hecho diversas investigaciones de materiales implementados en la elaboración del concreto, materiales como fibras de vidrio, fibras de caucho, de pluma, de madera y de otras más, hasta de fibra de acero dando buenos resultados, pero si se le agrega o aumenta la dosificación de esta fibra, la trabajabilidad disminuye ⁽⁹⁾, sin embargo usar fibras de acero en la elaboración del concreto es limitado por el alto costo que tiene, por eso es que la de neumático reciclado es una alternativa prometedora para optimizar costos ⁽¹⁰⁾, en cuanto a las investigaciones hechas hasta la

actualidad, indican que el concreto de alta resistencia es un material quebradizo débil a esfuerzos de tracción y ductilidad, lo contrario sucede cuando se usan fibras de acero ⁽¹¹⁾.

Mejorar las propiedades mecánicas del concreto es un reto, por lo que en ocasiones se usa una variedad de aditivos dependiendo a la necesidad del trabajo o de la zona, sin embargo, el uso de estas sustancias genera un costo adicional, pero investigaciones proponen usar materiales reciclados en vez de aditivos, por ejemplo, al agregar caucho granulado al concreto, permite que este sea impermeable o al agregar material PET permite que el concreto sea más flexible.

El reciclaje de neumáticos desechados permite darles un uso diferente como, combustible para hornos de cemento o también, al triturar el caucho y formar partículas se puede usar en mezcla asfáltica o como agregado para el concreto, en cuanto a las fibras de acero se pueden separar mediante procesos de magnetismo ⁽¹²⁾, es importante que se reutilice la mayor cantidad posible de neumáticos ya que estos no son biodegradables son inflamables y expulsan sustancias tóxicas ⁽¹³⁾, estas fibras sacadas de las llantas pueden tener el mismo efecto que las fibras industriales en el concreto de repente en mayor dosificación pero el rendimiento será el mismo ⁽¹⁴⁾.

Reciclar es una manera de aportar contra la contaminación ambiental y de encontrar soluciones económicas, en diferentes países han apostado por reciclar los neumáticos para extraer el caucho y usarlo para recauchutar llantas o para convertirlo en polvo, pero muy pocos son los que se interesan por las fibras de acero que tiene los neumáticos.

El uso de fibras de acero en el concreto no afecta las propiedades mecánicas, si no que se puede ver una mejora en cuanto a tenacidad y la resistencia

post agrietamiento ⁽¹⁵⁾, los investigadores para determinar si la adición de fibras de acero en el concreto da resultados positivos, realizan ensayos de laboratorio en el cual prueban diferentes dosificaciones. Se puede decir que un 2% con respecto al mortero es aceptable ya que el concreto muestra mejorar en la ductilidad ⁽¹⁶⁾, todo indica que este material sacado de los neumáticos es una buena alternativa para usarlo en concreto de alta resistencia ⁽¹⁷⁾, hay que tener en cuenta que el material de reciclaje que se pueda recuperar de un neumático, se puede reemplazar o adicionar como agregado ⁽¹⁸⁾.

Se sabe que el concreto de alta resistencia es un material usado en estructuras de esfuerzos importantes, como por ejemplo las super estructuras de puentes o en las represas, no cabe duda que la adición de fibras de acero de neumático reciclado en el concreto es una alternativa potencialmente viable.

En cuanto al reciclaje de los neumáticos, en Europa existe un gran problema con el crecimiento del número de neumáticos en desuso, por lo que se ha creado una política de reutilizar este material de una manera ecológica, al año se estima que 3,3 millones de toneladas requieren ser reciclados ⁽¹⁹⁾, además el aumento del parque automotriz significa también el crecimiento de la cantidad de neumáticos, por lo que las autoridades competentes deben hacer lo suyo para manejar esta situación, los neumáticos se pueden reutilizar para diferentes fines, como material de relleno, barreras de seguridad, arrecifes etc., minimizando costos ^(20,21), no se debe dejar de lado la tecnología del concreto, donde los materiales extraídos del neumático reciclado, se pueden usar para elaborar concreto y mejorar sus características, reemplazando parte de la dosificación de agregados ^(22,23,24).

Es importante que se use materiales innovadores para elaborar concreto, mejor si es un material

reciclado, podría mitigar o reducir algunos problemas actuales, como el uso excesivo de materia prima lo cual se convierte en la explotación de canteras, podría reducir la contaminación ambiental, por otra parte, beneficiaria económicamente, el reciclaje y la industria de la construcción son temas tan importantes en la actualidad que muchos autores los investigan, en este caso en la presente revisión, trataremos términos como fibras de acero, neumático reciclado, concreto, agregados, entre otros que pertenecen a los temas mencionados.

El propósito de la presente investigación es revisar los últimos estudios sobre las fibras de acero de neumático reciclado implementado en la elaboración de concreto y entender sistemáticamente los efectos que causa esta fusión, se analizará y se discutirá para lograr un entendimiento profundo del tema.

2. Metodología

Para el desarrollo del presente artículo de revisión, se hizo uso de un material bibliográfico basado en 80 documentos que se encuentran indexados en base de datos como son ScienceDirect, EBSCO, Scopus y Web of Science (WOS), documentos que han sido publicados en los últimos siete años entre el 2015 y 2021.

La búsqueda se hizo usando una serie de palabras claves y filtrando de acuerdo a la necesidad de

información, en ScienceDirect se usó la ecuación “steel fibers from tire and concrete” seleccionando 15 artículos, de la misma manera se hizo en EBSCO con la ecuación “recycled tire steel fiber” de la cual se seleccionaron 21 documentos, la misma modalidad se usó en las demás bases de datos.

En Scopus se escogieron 20 artículos de la búsqueda con la palabra clave “tire steel fibers”, finalmente en WOS se usaron dos ecuaciones “recycled tire steel fiber” y “recycled tire steel fibers and concrete” de las cuales se seleccionaron 10 y 14 artículos respectivamente, todos los documentos seleccionados han servido de referencia para realizar la presente revisión. Se presenta la tabla 1 y 2 para un mejor detalle de la búsqueda.

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

Año	Base de datos				Total
	ScienceDirect	EBSCO	Scopus	WOS	
2015	-	3	-	3	6
2016	1	2	1	1	5
2017	1	2	1	7	11
2018	5	1	-	2	8
2019	1	6	5	3	15
2020	4	5	9	5	23
2021	3	2	4	3	12
Total	15	21	20	24	80

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2: Artículos seleccionados según la base de datos, palabras claves y filtros de búsqueda.

Base de Datos	Palabras claves	Cantidad de doc. Resultantes sin filtro	Filtro de la búsqueda	Años de la búsqueda de la información	Cantidad de doc. Resultantes con filtro	Cantidad de doc. que se seleccionó
ScienceDirect	steel fibers from tire	1469	Review articles Research articles Construction	2015-2021	337	15

	and concrete		and Building Materials Engineering			
EBSCO	recycled tire steel fiber	53	Academic Publications Magazines	2015-2021	44	21
Scopus	tire steel fibers	236	ingeniería ciencia de los materiales ciencia medioambiental artículo	2015-2021	149	20
	recycled tire steel fiber	143	Articles Engineering Civil Environmental Sciences	2015-2021	90	10
WOS	recycled tire steel fibers and concrete	134	Articles Engineering Civil	2015-2021	82	14

Fuente: Elaboración propia.

3. Resultados y discusión

El problema de vertederos con millones de neumáticos que cumplieron su tiempo de vida útil es un peligro medioambiental, por lo que experimentaron la manera de usar los elementos de los neumáticos como lo es el caucho y las fibras de acero para elaborar un concreto verde, como resultado tuvieron que al agregar 0.1% y 0.2% de fibras de acero mejora la resistencia a la compresión, pero recomiendan que no se incorpore en grandes cantidades por que conducen al concreto a que tenga propiedades débiles a comparación de un concreto de referencia ⁽²⁵⁾. El uso de fibra reciclada sería una posible solución al problema de neumáticos desechados al final de su vida útil ⁽²⁶⁾.

En la actualidad diversas investigaciones mencionan varios tipos de materiales que pueden formar parte de la elaboración del concreto, por lo general las fibras son las que se han ganado un

lugar por los resultados favorables que le da a las propiedades del concreto ⁽²⁷⁾, por lo que Hegger et al. ⁽²⁸⁾ sostiene que se debe innovar e implementar tecnologías y procesos para una mejor planificación y así producir y reciclar materiales que se puedan incluir en la industria de la construcción, especialmente en la elaboración de concreto.

Para que el material sea considerado fibra, su longitud debe ser mucho mayor que el diámetro. Las fibras de acero de neumático reciclado en el concreto son una alternativa viable, sería de gran ayuda en cuanto a mitigar problemas de contaminación ambiental y también a mejorar las propiedades mecánicas del concreto endurecido siempre y cuando se use la dosificación adecuada, aparte de ello se haría de la construcción una actividad eco amigable.

De la misma manera se puede deducir que el uso de la fibra en el concreto controla la presencia de

grietas y también reduce las dimensiones de ellas ⁽²⁹⁾, sin embargo, Zhang et al. ⁽³⁰⁾ sostiene que cuando el concreto es afectado por congelamiento-descongelamiento la fibra no reduce el agrietamiento y tampoco mejora en cuanto a la porosidad, pero Baricevic et al. ^(31,32) asegura que con ayuda de un aditivo incorporador de aire tendría la resistencia a congelamiento-descongelamiento y a la deformación, Norambuena et al. ⁽³³⁾ realizó pruebas de temperatura a fibras, las cuales mostraron algunos cambios en su morfología, sin embargo, lograron obtener resultados favorables en cuanto a la resistencia.

Por otro lado, se menciona que las fibras en el concreto pueden prevenir daños como el desconchado producido por efectos de fuego en un incendio eventual ⁽³⁴⁾, el uso de este material es prometedor debido a su comportamiento en tenacidad y postcraqueo ⁽³⁵⁾, por otro lado, Alsaif et al. ^(36,37) con sus investigaciones concluyen que el uso de fibras de acero industriales o recicladas es una buena alternativa ya que desarrolla la resistencia a flexión y mejora la capacidad de deformación.

3.1. Obtención de fibras de acero recicladas

La principal fuente de obtención de fibras de acero son los neumáticos que se encuentran en desuso y abandonados en botaderos y barrancos, estas fibras se han venido empleando en la industria de la construcción, especialmente en la elaboración de concreto lo cual ha resultado un éxito ⁽³⁸⁾, además Flores et al ⁽³⁹⁾. menciona que, en la actualidad, por lo general el caucho se recicla mediante procesos químicos, mecánicos o la combinación de estos, con el fin de obtener el caucho y las fibras por separado, pero que estos procesos son costosos.

Sin embargo la fabricación de la gran cantidad de fibras de acero industriales es un problema,

llegando a estimarse la cantidad de 0.3 millones de toneladas al año en todo el mundo, la fabricación de este material emite gases que resultan muy contaminante para el medio ambiente, por ello se ha buscado la alternativa de usar fibras eco sustentables, los cuales se pueden conseguir de los neumáticos desechados ⁽⁴⁰⁾, De todas formas cabe resaltar que al realizar el proceso de separar los materiales o componentes del neumático, suele quedar de diferentes tamaños las fibras o puede quedar con adherencias de caucho, lo que puede dificultar la unión de la fibra con el concreto ⁽⁴¹⁾, además Caggiano et al. ⁽⁴²⁾ sostiene que va a dependerá del tipo de uso que se le haya dado al material reciclado para que de buenos resultados.

Hoy en día se puede encontrar fibras que son fabricadas para diferentes usos, en la construcción mayormente se usan fibras con extremos en forma de gancho, debido a que mejora la adherencia con el concreto y un mejor anclaje, sin embargo, investigadores, recomiendan el uso de fibras de acero de neumáticos reciclados, donde se pueden encontrar fibras de diferentes tamaños y formas, que al agregarlo al concreto pueden mejorar las propiedades.

Para la obtención de las fibras de acero de neumático reciclado, se debe realizar un proceso de 4 etapas, que son: (a) el neumático es reducido de tamaño. (b) los neumáticos reducidos se introducen en una cámara donde se congelarán con nitrógeno líquido a 184°C. (c) con ayuda de un molino de martillos el material se reduce a partículas de diferentes tamaños. (d) las fibras se separan por medio de magnetismo ⁽⁴³⁾, quedando así solo las fibras.

3.2. Trabajabilidad

Al experimentar agregando las fibras de acero a la mezcla de concreto y luego realizar el ensayo del Slump, se observa que los resultados de

asentamiento disminuyen, sin embargo, al momento del vaciado se pudo notar que la mezcla aún era trabajable ⁽⁴⁴⁾, de la misma manera Papastergiou et al. ⁽⁴⁵⁾ indica que al usar la fibra la trabajabilidad de la mezcla se dificulta haciendo que no se pueda controlar fácilmente cuando se necesita de una relación a/c específicas, también Singh et al. ⁽⁴⁶⁾ considera que mientras más fibra se adiciona, la trabajabilidad disminuye, sin embargo la mezcla resulta ser estable, todas las propiedades del concreto en estado fresco va a depender de la forma geométrica que tenga la fibra de acero.

Según los estudios, al momento de incluir las fibras de acero en el concreto fresco, estas se entrelazan formando así unas llamadas erizos, las cuales causan un efecto negativo en la trabajabilidad, sin embargo, los resultados que arroja las pruebas de concreto fresco, están dentro de los parámetros establecido.

En una investigación se realizó 3 tipos de concreto para estudiar sus propiedades frescas en los cuales, uno incluyo 20 kg de fibra fabricada y 20 kg de fibra reciclada (20M20R), en otro concreto incluyo 40 kg de fibra fabricada y 0 kg de fibra reciclada y por último un concreto liso (PC) ⁽⁴⁷⁾, dando los siguientes resultados (tabla N°3).

Tabla 3: Propiedades del concreto fresco.

Mix	Slump (mm)	Densidad (Kg/m ²)	Contenido de Aire (%)
PC	200	2368	1.4
20M20R	160	2332	2.8
40M0R	160	2366	3.1

Fuente: Frančić et al. ⁽⁴⁷⁾.

La trabajabilidad del concreto fresco es importante para explotar al máximo su versatilidad, sin embargo se puede decir que la

fibra de acero disminuye las propiedades frescas, ya que en diferentes investigaciones sostienen esta idea ya que al agregar fibras de acero en la mezcla de concreto y posterior a ello hizo las pruebas asentamiento y prueba del anillo en J, donde se obtuvo resultados negativos ^(48,49), en otra investigación agregaron diferentes porciones como 0%, 0.5% y 1% de fibra en la mezcla para evaluar el asentamiento y compararlo con una mezcla que no contiene fibra pero contiene caucho, arrojando que la mezcla que tenía altas presiones es la que contiene solo caucho ^(50,51), por lo tanto Leone et al. ⁽⁵²⁾ concluye que, en bajo contenido de volumen de fibras en la mezcla, no influye en la trabajabilidad.

3.3. Resistencia a esfuerzos de compresión

Experimentalmente el comportamiento del concreto cuando se le adhiere fibras de acero es bueno, después de ensayar los testigos resultó que el 1% de este material es la dosificación adecuada para agregar en la mezcla y se pueda obtener buenos resultados en cuanto a esfuerzo de compresión debido a que las fibras de acero reducen el agrietamiento ⁽⁵³⁾, coincidiendo con que el 1% de fibra es el adecuado para mejorar las propiedades del concreto, especialmente la resistencia a compresión ⁽⁵⁴⁾, de la misma manera Flores et al. ⁽⁵⁵⁾ sostiene que la presencia de fibras en el concreto mejora considerablemente el esfuerzo a compresión y resulta ser mejor que un concreto tradicional o el concreto cauchutado.

Por otro lado al agregar 0.030, 0.035 y 0.045 % de fibras de acero reciclado en la mezcla de concreto, las cuales después de endurecido y ensayado, se concluye que la dosificación de 45 kg/cm³ de fibras de acero es la adecuada, ya que mejora la resistencia a la compresión, por lo que deducen que mientras más se le agregue de este material mejores serán los resultados ⁽⁵⁶⁾, al reforzar el concretó con fibra, la resistencia a la

compresión mejora en un 5% a 10% con respecto al concreto patrón ⁽⁵⁷⁾.

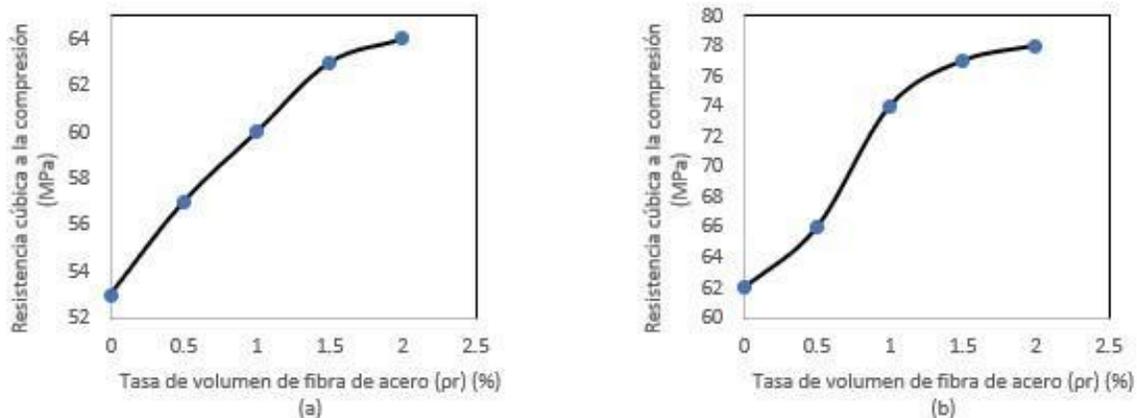
Hoy en día una alternativa que ha dado resultados favorables en las propiedades del concreto armado es la fibra de acero, este material está siendo usado en diferentes campos de la ingeniería, en un estudio se hizo mezcla con fibra sin vibrar (C50) y mezcla con fibra vibrada (C60),

Tabla 4: Prueba de mezcla de concreto con fibra de acero.

Muestra numero	Fibra de acero parámetro (%)	Fibra de acero (Kg)	agua (Kg)	Cemento (Kg)	Agregado grueso (Kg)	Agregado fino (Kg)	Aditivo (Kg)	Relación arena-agregado grueso
C50	0	0	172	347.5	1181.3	664.5	2.7	0.36
	0.5	39	172	347.5	1159.5	674.3	2.7	0.36
	1	58.9	172	347.5	1148.6	679.2	2.7	0.36
	1.5	78.5	172	347.5	1137.8	684.9	2.7	0.36
	2	117	172	347.5	1115.1	693.7	2.7	0.36
C60	0	0	164	451.8	1078.2	660.8	4.9	0.36
	0.5	39.3	164	451.8	1055.8	671.2	4.9	0.36
	1	78.5	164	451.8	1033.5	681.5	4.9	0.36
	1.5	117.8	164	451.8	1011.1	691.9	4.9	0.36
	2	157	164	451.8	988.8	702.2	4.9	0.36

Fuente: ⁽⁵⁸⁾

Tabla 5: Prueba de mezcla de concreto con fibra de acero.



Fuente: ⁽⁵⁸⁾

3.4. Resistencia a esfuerzos de flexión

En cuanto a resistencia de flexión Aoun et al. ^(59,60) usó fibras de acero de neumáticos reciclados para agregarlo en la mezcla de concreto y así elaborar vigas, luego de los ensayos, resultó que las propiedades que mostraron mejor desempeño son la de flexión ya que se notó mayor ductilidad y en cuanto a la rigidez se observó un aumento, de la misma manera Bjegovic et al. ^(61,62) usó la fibra de acero reciclada con extremos en forma de gancho, debido a que muchos estudios mencionan que esta forma de la fibra ayuda al concreto a obtener alta resistencia a flexión, después de las pruebas de esfuerzo a un concreto con 20 a 40 kg de fibra por m³, logró los resultados esperados, ya que logró tenacidad, aumento en la resistencia a la compresión, y disminución de grietas, siendo 30 kg la porción óptima para buenas respuestas de las propiedades.

Por lo general el concreto es frágil, para terminar con ese problema se empleó una armadura de acero para combinarla y formar el concreto armado y pueda ser más resistente, sin embargo, hay ocasiones que requieren de un concreto más fuerte y dúctil, por lo que en los últimos tiempos se ha venido investigando la manera de integrar las fibras de acero para reforzar aún más al concreto, Las fibras de acero son consideradas igual de confiable y resistentes que las varillas de acero tradicionales.

Además al experimentar con fibras recicladas, industriales con longitudes y diámetros diferentes, se puede observar que la resistencia a flexión mejora considerablemente, por lo que recomiendan que la fibra reciclada es una buena alternativa para mejorar las propiedades del concreto y también para la sostenibilidad ⁽⁶³⁾, de la misma forma Zhong et al. ⁽⁶⁴⁾ agregó fibras de acero para reforzar el concreto, obteniendo valores altos, sin embargo se debe tener en cuenta que mientras la dosificación de fibra sea mayor, las propiedades disminuirán considerablemente, siendo entre 0.5 % y 1.0 % la dosificación adecuada.

Se ha experimentado con fibras industriales y también reciclados, dando como resultado que el concreto con fibras industriales tiene mejor respuesta que la reciclada, sin embargo, para que tengan resultados similares se tendría que aumentar la dosificación de fibras recicladas ⁽⁶⁵⁾, por otro lado también se puso a prueba vigas de concreto armado con refuerzo de fibras de acero en cantidad de 0%, 0.5%, 1.0% en volumen, después de realizar las pruebas notaron que las vigas con menor refuerzo de fibra tiene baja respuesta a la flexión y mientras aumenta la dosificación de fibra, también aumenta la resistencia a flexión ⁽⁶⁶⁾, de la misma forma Rashid et al. ⁽⁶⁾ probaron vigas de concreto adicionando fibras de acero dando los resultados que se muestran en la tabla (Tabla N°5)

Tabla 6: Resumen de resultados para todo tipo de vigas.

Muestra	Carga de fallas	Resistencia a la cizalladura	Resistencia al corte nominal	Deflexión máxima	Modo de fallo
F0S0	27.47	13.73	7.38	6.35	S
F0.4S0	32.37	16.12	7.54	8.13	F+S
F0.65S0	37.28	18.64	7.64	13.97	F+S
F1S0	45.13	22.56	7.72	14.99	F+S
F0S1	34.83	17.41	7.38	7.24	F+S

Fuente: ⁽⁶⁾

Al momento que se integran las fibras de acero en el concreto, estas ya forman parte de la matriz de él, haciéndolo un material más resistente y dúctil, esto gracias a que las fibras se entrelazan entre si formando una red de refuerzo por todo el elemento de concreto.

3.5. Resistencia a tracción

Al agregar dosis de 30, 35 y 45 kg/m³ mejora marginalmente en cuanto a la resistencia a la tracción, es decir los resultados en cuanto a las propiedades no son notables ⁽⁶⁷⁾, sin embargo, Wang et al. ⁽⁶⁸⁾ menciona que, si se refuerza el concreto con fibras, tendrá una mayor capacidad de deformación por tracción en rango de 2% a 5% frente a 0.01% del concreto convencional, además de mejorar en ductilidad y controlar las grietas.

Por otro lado al realizar pruebas a probetas cilíndricas de 15mm x 300mm las cuales contienen 1% de fibras de acero a la edad de 28 días, se logró obtener respuestas favorables en cuanto a la resistencia a la tracción, la cual incrementa en un 49% a 68% con respecto a un concreto tradicional o también llamado patrón el cual está elaborado por agregados naturales ⁽⁶⁹⁾, los mejores resultados son los de los elementos de concreto reforzado con fibras de acero con extremo en forma de gancho, ya que permite una mejor adherencia y agarre, además de ello disminuye las fisuras ⁽⁷⁰⁾.

3.6. Módulo de elasticidad

Al evaluar probetas de concreto en forma de cubo de 100 mm x 100 mm x 300 mm en donde se le adicionó fibras de acero, ensayándolas a la edad de 28 días para determinar el módulo de elasticidad, las cuales mostraron un aumento significativo a comparación de un concreto tradicional ⁽⁷¹⁾, sin embargo, Alwesabi et al. ⁽⁷²⁾ menciona que al incorpora fibras el módulo de elasticidad reduce de manera ligera.

De la misma forma se probó con caucho reciclado y fibras de acero, por un lado obtuvo que el caucho reciclado disminuye drásticamente el módulo de elasticidad debido a que afecta a la propiedad de la resistencia a la compresión, de la misma forma el concreto con fibra, tuvo una reducción en el módulo de elasticidad, pero menor al concreto con caucho, sin embargo se puede incorporar 50% de caucho junto con 0.25 de fibras de acero para obtener un resultado aceptable, con el fin de agregar material reciclado en la elaboración del concreto ^(73,74).

Con los mismos materiales se hizo otra investigación, donde usaron concreto reforzado con fibras en forma de gancho además de caucho y un concreto solo con fibra, después de los ensayos obtuvieron que la mejor respuesta fue el concreto reforzado solo con fibra ya que el otro tipo de concreto disminuyo en 8,3%, 13,7% y 17,4% con contenidos de caucho de 5%, 10% y 15% respectivamente ⁽⁷⁵⁾, se puede concluir que entre estos dos materiales, la fibra de acero da mejor respuesta a las propiedades del concreto ⁽⁷⁶⁾.

3.7. Durabilidad

Se sometió elementos de concreto reforzado con fibras de acero por 150 o 300 días a la exposición acelerada al cloruro, después de los días mencionados, pudo observar que no había presencia de grietas y tampoco se visualizaba deterioro, al evaluar las fibras, tampoco se observó que se haya contaminado o tenga presencia de oxidación, por lo que se puede concluir que reforzar con fibras de acero los elementos de concreto, es una alternativa viable por su contribución positiva a la durabilidad ⁽⁷⁷⁾.

La durabilidad es un punto importante para la vida útil de una estructura de concreto, ya que es la capacidad para resistir factores como el medio ambiente, ataques químicos o físicos, hasta el proceso de deterioro por el pasar del tiempo,

movimientos sísmicos, entre otros, por ello es importante un buen diseño y un buen proceso constructivo, sin dejar de lado el mantenimiento que deben tener las estructuras.

Por otro lado en las investigaciones de Todut et al. (78,79,80) pusieron a prueba paneles de concreto armado bajo fuerzas laterales cíclicas, fuerzas que se usan para simular los sismos, estas pruebas se realizan con la finalidad de dañar los paneles y luego rehabilitarlos, los autores coincidieron con la idea de aplicar diferentes tipos de fibras para reforzar, como fibra de acero, rejillas de fibra de

carbono, rejillas de fibra de vidrio, entre otras, para luego someterlas nuevamente a los esfuerzos mencionados y evaluar que otras fuerzas de sismo puede soportar.

Por último, en la tabla 6 se puede apreciar diferentes mezclas de concreto con distintas dosificaciones representadas por un código mezclas que contienen fibras de desecho y fibras comerciales, por otro lado, en la tabla 7 se puede apreciar un resumen de las propiedades del concreto, las cuales resultaron de diferentes ensayos realizados a diferentes tipos de vigas.

Tabla 7: Composiciones y algunas propiedades frescas de los hormigones frescos.

Materiales (kg/m³)	P	W0.3 -5	W0.3 -10	W0.3 -15	W0.6 -10	W0.6 -20	W0.6 -30	W0.6 -40	W1.4 -20	W1.4 -40	W1.4 -60	C-20
Cemento	366	365	367	364	363	368	368	376	362	362	363	364
Agua	183	182	184	182	182	184	184	188	181	181	182	182
Superplastificante	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	5	4.9	5	4.9	5.1
Fibra	0	4.9	9.8	14.8	9.9	19.7	29.5	39.7	19.8	39.8	59.7	20.2
Tipo de fibra	Sin fibra	Fibra de desecho W0.3			Fibra de desecho W0.6				Fibra de desecho W1.4			Fibra comercial
Arena (0–1 mm)	314	312	314	311	315	314	320	310	308	308	310	310
Arena (0–4 mm)	635	631	636	628	628	636	635	646	626	623	623	628
C.S.I (0–12 mm)	382	380	382	378	378	383	382	389	377	375	375	378
C.S.II (12–22 mm)	571	568	572	565	565	572	571	581	563	560	560	555
Peso unitario	2456	2448	2470	2449	2442	2456	2469	2450	2444	2454	2477	2442
Asentamiento	14	9	7	6	10	4	1	0	14	16	7	16

Fuente: [3]

Tabla 8: Resumen de resultados para todo tipo de vigas.

Código de mezcla	Fuerza a compresión (MPa)	Resistencia a la tracción de división (MPa)	Fuerza flexible (MPa)	Energía de fractura (N/m)
P	69.3	6.7	5.6	152
W0.3-5	69.5	5.6	7.4	457
W0.3-10	65.8	6.5	5.1	625
W0.3-15	70.6	6.6	7.2	1146
W0.6-10	64.1	6	5.7	559
W0.6-20	64.7	7.2	5.4	947
W0.6-30	71.5	7.9	7.7	1357
W0.6-40	75.3	9	9.4	1893
W1.4-20	68.7	6.8	6.8	521
W1.4-40	69.1	7.7	6.7	1136
W1.4-60	63.6	7	6.7	1388
C-20	63.1	6.9	6.5	2322

Fuente: ^[3]

4. Conclusiones

La industria de la construcción es un sector que está en constante crecimiento y eso significa un uso mayor de concreto, al elaborar concreto conlleva a que se use materia prima lo cual es perjudicial para el medio ambiente, dado a que se explota las canteras, sin embargo adicionando dosificaciones de fibras de acero recuperadas de los neumáticos reciclado aumentara la cantidad y también el rendimiento del concreto, esta opción permitiría reducir el uso de los minerales y también mitigar el impacto ambiental que existe por la gran cantidad de neumáticos desechados que existe y es un problema a nivel mundial.

Para que las fibras mejoren las propiedades mecánicas del concreto, los extremos de estas deben tener la forma de gancho, ya que esta forma permite agarre en el concreto reduciendo las fisuras y el desconchado que se producen por diferentes motivos, además el vibrado es importante para la distribución de fibras de acero por toda la mezcla, ya que las fibras tienden a entrelazarse y formar lo que se llama bolas, lo cual reduce la trabajabilidad.

La mayoría de investigaciones sostienen que las fibras tienen una respuesta positiva en cuanto a los esfuerzos mecánicos del concreto, como resistencia a la compresión, resistencia a tracción y a flexión, sin dejar de lado el módulo de elasticidad y la durabilidad, en cuanto a la dosificación de fibras de acero para que tenga buena respuesta y mejore las propiedades del concreto están entre 0.1% a 2.0%.

5. Referencias bibliográficas

- (1). J. Wang, Q. Dai, R. Si, Y. Ma y S. Guo, «Fresh and mechanical performance and freeze-thaw durability of steel fiber-reinforced rubber self-compacting concrete (SRSCC),» *Journal of Cleaner Production*, vol. 277, pp. 1-10, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123180>
- (2). M. Shahjalal, K. Islam, J. Rahman, K. Sakil, M. Rezaul y A. Muntasir, «Flexural response of fiber reinforced concrete beams with waste tires rubber and recycled aggregate,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 278, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123842>
- (3). O. Sengul, «Mechanical behavior of concretes containing waste steel fibers recovered from scrap

tires,» *Construction and Building Materials*, vol. 122, pp. 649-658, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.113>

(4). M. KÖROĞLU, «MECHANICAL CHARACTERIZATION OF RECYCLED TIRES IN CONCRETE,» *Engineering Science and Technology*, vol. 4, n° 4, pp. 330-336, 2016. <https://doi.org/10.15317/Scitech.2016.62>

(5). I. Shaaban, J. Rizzuto, A. El-Nemr, L. Bohan, H. Ahmed y H. Tindyebwa, «Mechanical Properties and Air Permeability of Concrete Containing Waste Tires Extracts,» *Revista de materiales en ingeniería civil*, vol. 33, n° 2, 2021. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003588](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003588)

(6). K. Rashid y N. Balouch, «Influence of steel fibers extracted from waste tires on shear behavior of reinforced concrete beams,» *Journal of the fib*, vol. 18, n° 74, pp. 589-596, 2017. <https://doi.org/10.1002/suco.201600194>

(7). A. Reza, A. Esrafil, M. Kalani y M. Hosein, «Use of polymer fibres recovered from waste car timing belts in high performance concrete,» *Construction and Building Materials*, vol. 80, pp. 31-37, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.011>

(8). A. Nacer, A. Honores, P. Chulak y O. Pavez, «HORMIGÓN SUSTENTABLE BASADO EN FIBRAS DE NEUMÁTICOS FUERA DE USO,» *Revista internacional de contaminación ambiental*, vol. 35, n° 3, pp. 723-729, 2019. <https://doi.org/10.20937/RICA.2019.35.03.17>

(9). M. Alpaslan, «Behavior of composite self-compacting concrete (SCC) reinforced with steel wires from waste tires,» *Revista de la Construcción*, vol. 17, n° 3, pp. 484-498, 2018. <https://doi.org/10.7764/RDLC.17.3.484>

(10). T. Awolusi, O. Oke, O. Akinkulere y O. Atoyebi, «Comparison of response surface

methodology and hybrid-training approach of artificial neural network in modelling the properties of concrete containing steel fibre extracted from waste tyres,» *Cogent Engineering*, vol. 6, n° 1, 2019. <https://doi.org/10.1080/23311916.2019.1649852>

(11). Fauzan, R. Kurniawan, O. Fitrah, C. Lovina y Z. Al Jauhari, «EXPERIMENTAL STUDY ON THE EFFECT OF STEEL FIBER WASTE TYRE ON HIGH STRENGTH CONCRETE,» *International Journal of GEOMATE*, vol. 16, n° 58, pp. 14-19, 2019. <https://doi.org/10.21660/2019.58.4772>

(12). S. Samarakoon, P. Ruben y J. Wie, «Mechanical performance of concrete made of steel fibers from tire waste,» *Case Studies in Construction Materials*, vol. 11, n° 259, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00259>

(13). x. Shi, L. Brescia-Norambuena, Z. Grasley y J. Hogancamp, «Fracture Properties and Restrained Shrinkage Cracking Resistance of Cement Mortar Reinforced by Recycled Steel Fiber from Scrap Tires,» *Transportation Research Record*, vol. 2674, n° 8, pp. 581-590, 2020. <https://doi.org/10.1177/0361198120924407>

(14). Y. Zhang y L. Gao, «Influence of Tire-Recycled Steel Fibers on Strength and Flexural Behavior of Reinforced Concrete,» *Hindawi Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2020, pp. 1-7, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/6363105>

(15). A. Simalti, A. Singh y P. Professor, «Comparative study on direct shear behavior of manufactured and recycled shredded tyre steel fiber reinforced self-consolidating concrete,» *Journal of Building Engineering*, vol. 29, pp. 1-9, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101169>

(16). X. Shi, L. Brescia-Norambuena, C. Tavares y Z. Grasley, «Semicircular bending fracture test to evaluate fracture properties and ductility of cement mortar reinforced by scrap tire recycled steel fiber,»

Engineering Fracture Mechanics, vol. 236, 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2020.107228>

(17). J. Carrillo, J. Lizarazo-Marriaga y F. Lamus, «Properties of Steel Fiber Reinforced Concrete Using Either Industrial or,» Recycled Fibers from Waste Tires, vol. 21, n° 9, pp. 2055-2067, 2020.
<https://doi.org/10.1007/s12221-020-1076-1>

(18). G. Martínez, J. del Cos, M. Elisa, M. Martínez, M. Ribeiro, C. Velasco, H. Hagg y W. Brostow, «Modified recycled tire fibers by gamma radiation and their use on the improvement of polymer concrete,» Construction and Building Materials, vol. 204, pp. 327-334, 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.177>

(19). M. Pawelska y M. Kaszynska, «Mechanical Performance and Environmental Assessment of Sustainable Concrete Reinforced with Recycled End-of-Life Tyre Fibres,» Materials, vol. 14, n° 2, 2021. <https://doi.org/10.3390/ma14020256>

(20). E. Bocci y E. Prospero, «Recycling of reclaimed fibers from end-of-life tires in hot mix asphalt,» journal of traffic and transportation engineering, vol. 7, n° 5, pp. 678-687, 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.jtte.2019.09.006>

(21). M. Ansari y A. Safiey, «Corrosion effects on mechanical behavior of steel fiber reinforced concrete, including fibers from recycled tires,» Computers and Concrete, vol. 26, n° 4, pp. 367-375, 2020.

(22). M. Isa, K. Pilakoutas, M. Guadagnini y H. Angelakopoulos, «Mechanical performance of affordable and eco-efficient ultra-high performance concrete (UHPC) containing recycled tyre steel fibres,» Construction and Building Materials, vol. 255, 2020
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119272>

(23). M. Jelcic, A. Baricevic, M. Serdar y M. Grubor, «Study on the post-fire properties of concrete with recycled tyre polymer fibres,» Cement

and Concrete Composites, vol. 123, 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104184>

(24). M. Fakhri, B. Baveli, S. Javadi y M. Sharaf, «An evaluation of the mechanical and self-healing properties of warm mix asphalt containing scrap metal additives,» Journal of Cleaner Production, vol. 253, p. 119963, 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.119963>

(25). S. Mohamad, A. Rahman, A. Jumaah, N. Mohammad y A. Faheiman, «Incorporation of Recycled Tire Products in Pavement-Grade Concrete: An Experimental Study,» Crystals, vol. 11, n° 2, 2021.
<https://doi.org/10.3390/cryst11020161>

(26). A. Tareq, A. Bakar, H. Akil y A. Alani, «Fracture characteristics of plain and steel fibre reinforced rubberized concrete,» Construction and Building Materials, Vols. %1 de %2414-423, p. 152, 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.127>

(27). W. Weber y V. Mechtcherine, «Modeling the dynamic properties of fibre-reinforced concrete with different coating technologies of multifilament yarns,» Cement and Concrete Composites, vol. 73, pp. 257-266, 2016.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.07.017>

(28). J. Hegger, M. Curbach, A. Stark, S. Wilhelm y K. Farwig, «Innovative design concepts: Application of textile reinforced concrete to shell structures,» fib. International Federation for Structural Concrete, vol. 19, n° 3, pp. 637-464, 2017. <https://doi.org/10.1002/suco.201700157>

(29). H. Al-musawi, H. Huang, M. Guadagnini y K. Pilakoutas, «A numerical study on the effect of restrained shrinkage on rapid hardening plain and recycled clean steel fibre concrete overlays,» Construction and Building Materials, vol. 244, n° 3,

2020.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117723>

(30). W. Zhang, S. Gong y J. Zhang, «Effect of rubber particles and steel fibers on frost resistance of roller compacted concrete in potassium acetate solution,» *Construction and Building Materials*, vol. 187, pp. 752-759, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.244>

(31). A. Baricevic, M. Pezer, M. Jelcic, M. Serdar y N. Stirmer, «Effect of polymer fibers recycled from waste tires on properties of wet-sprayed concrete,» *Construction and Building Materials*, vol. 176, pp. 135-144, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.229>

(32). A. Alsaif, S. Bernal, M. Guadagnini y K. Pilakoutas, «Freeze-thaw resistance of steel fibre reinforced rubberised concrete,» *Construction and Building Materials*, vol. 195, pp. 450-458, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.103>

(33). J. Norambuena, V. Gutierrez y G. I., «Physical and mechanical behaviour of a fibre-reinforced rubber membrane with self-healing purposes via microwave heating,» *Construction and Building Materials*, vol. 94, pp. 45-56, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.068>

(34). F. Figueiredo, S. Huang, K. Pilakoutas y I. Burgess, «Effects of Recycled Steel and Polymer Fibres on Explosive Fire Spalling of Concrete,» *Fire Technology*, vol. 55, pp. 1495-1516, 2019. <https://doi.org/10.1007/s10694-019-00817-9>

(35). M. Leone, G. Centonze, D. Colonna, F. Micelli y M. Aiello, «Experimental Study on Bond Behavior in Fiber-Reinforced Concrete with Low Content of Recycled Steel Fiber,» *Revista de materiales en ingeniería civil*, vol. 28, n° 9, 2016. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001534](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001534)

(36). A. Alsaif, L. Koutas, S. Bernal, M. Guadagnini y K. Pilakoutas, «Mechanical performance of steel

fibre reinforced rubberised concrete for flexible concrete pavements,» *Construction and Building Materials*, vol. 172, pp. 533-543, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.010>

(37). H. Zhong y M. Zhang, «Experimental study on engineering properties of concrete reinforced with hybrid recycled tyre steel and polypropylene fibres,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 259, p. 120914, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120914>

(38). K. Liew y A. Akbar, «The recent progress of recycled steel fiber reinforced concrete,» *Construction and Building Materials*, vol. 232, n° 2, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117232>

(39). D. Flores, N. Flores y F. Hernández, «Influence of fibers partially coated with rubber from tire recycling as aggregate on the acoustical properties of rubberized concrete,» *Construction and Building Materials*, vol. 129, pp. 25-36, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.007>

(40). A. Sahraei, F. Omidinasab y M. Abdalikia, «The effect of initial strength of concrete wastes on the fresh and hardened properties of recycled concrete reinforced with recycled steel fibers,» *Construction and Building Materials*, vol. 300, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124284>

(41). J. Carrillo y C. Diaz, «Mechanical Properties of Concrete Slabs Reinforced with Recycled Steel Fibers from Post-Consumer Tires in Bogotá, Colombia,» *Revista Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, vol. 30, n° 2, pp. 67-79, 2020. <https://doi.org/10.18359/rcin.4412>

(42). A. Caggiano, H. Xarga, P. Folino y E. Martinelli, «Experimental and numerical characterization of the bond behavior of steel fibers recovered from waste tires embedded in cementitious matrices,» *Cement & Concrete Composites*, vol. 62, pp. 146-155, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.04.015>

- (43). Z. Zamanzadeh, L. Lourenço y J. Barros, «Recycled Steel Fibre Reinforced Concrete failing in bending and in shear,» *Construction and Building Materials*, vol. 85, pp. 195-207, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.070>
- (44). A. Eisa, M. Elshazli y M. Nawar, «Experimental investigation on the effect of using crumb rubber and steel fibers on the structural behavior of reinforced concrete beams,» *Construction and Building Materials*, vol. 252, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119078>
- (45). P. Papastergiou, H. Hu, H. Angelakopoulos, M. Guadagnini y K. Pilakoutas, «Mechanical properties of SFRC using blended Recycled Tyre Steel Cords (RTSC) and Recycled Tyre Steel Fibres (RTSF),» *Construction and Building Materials*, vol. 187, pp. 553-564, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.206>
- (46). A. Singh y A. Simalti, «Comparative study on performance of manufactured steel fiber and shredded tire recycled steel fiber reinforced self-consolidating concrete,» *Construction and Building Materials*, vol. 266, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121102>
- (47). M. Frančić, D. Damjanović y A. Baričević, «Application of recycled steel fibres in concrete elements subjected to fatigue loading,» *Građevinar*, vol. 69, n° 10, pp. 893-905, 2017. <https://doi.org/10.14256/JCE.2059.2017>
- (48). F. Aslani y R. Gedeon, «Experimental investigation into the properties of self-compacting rubberised concrete incorporating polypropylene and steel fibers,» *fib. International Federation for Structural Concrete*, vol. 20, n° 1, pp. 267-281, 2018. <https://doi.org/10.1002/suco.201800182>
- (49). M. Mastali y 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, n° 6, 2017. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001851](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001851)
- (50). S. Charkhtab, R. Madandoust, M. Jamshidi y I. Nikbin, «Mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with crumb rubber and steel fiber under ambient and sulfuric acid conditions,» *Construction and Building Materials*, vol. 281, p. 122571, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122571>
- (51). D. Gao, T. Zhang, Y. Wang, Y. Kong, D. Li y Y. Meng, «Analysis and Prediction of Compressive Properties for Steel Fiber-and-Nanosilica-Reinforced Crumb Rubber Concrete,» *Advances in Civil Engineering*, vol. 2020, n° 9693405, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/9693405>
- (52). M. Leone, G. Centonze, D. Colonna, F. Micelli y M. Aiello, «Fiber-reinforced concrete with low content of recycled steel fiber: Shear behaviour,» *Construction and Building Materials*, vol. 161, pp. 141-155, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.101>
- (53). M. Nematzadeh, A. Karimi y S. Fallah-Valukolae, «Compressive performance of steel fiber-reinforced rubberized concrete core detached from heated CFST,» *Construction and Building Materials*, vol. 239, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117832>
- (54). A. Altay, R. Alzebaree, A. Çevik, A. Niş, A. Mohammedameen y M. Eren, «The Effects of Recycled Tire Rubbers and Steel Fibers on the Performance of Self-compacting Alkali Activated Concrete,» *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, vol. 65, n° 3, pp. 8900-900, 2021.
- (55). N. Flores, D. Flores, H. F. y M. Navacerrada, «Mechanical and thermal properties of concrete incorporating rubber and fibres from tyre recycling,» *Construction and Building Materials*,

vol. 144, pp. 563-573, 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.196>

(56). H. Hu, P. Papastergiou, H. Angelakopoulos, M. Guadagnini y K. Pilakoutas, «Mechanical properties of SFRC using blended manufactured and recycled tyre steel fibres,» *Construction and Building Materials*, vol. 163, pp. 376-389, 2018.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.116>

(57). A. Caggiano, P. Folino, C. Lima, E. Martinelli y M. Pepe, «On the mechanical response of Hybrid Fiber Reinforced Concrete with Recycled and Industrial Steel Fibers,» *Construction and Building Materials*, vol. 147, pp. 286-295, 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.160>

(58). Y. Zheng, X. Wu, G. He, Q. Shang, J. Xu y Y. Sun, «Mechanical Properties of Steel Fiber-Reinforced Concrete by Vibratory Mixing Technology,» *Advances in Civil Engineering*, vol. 2018, pp. 1-11, 2018.
<https://doi.org/10.1155/2018/9025715>

(59). H. Aoun, N. Barnes y B. Kaveh, «Structural Performance of Concrete Beams Constructed Using Recycled Concrete Aggregate and Recycled Tyre Steel Fibres.,» *Proceedings of the International Conference on Waste Technology & Management*, n° 138407287, pp. 51-60, 2019.

(60). C. Nayak, «Experimental and numerical study on reinforced concrete deep beam in shear with crimped steel fiber,» *Innovative Infrastructure Solutions*, vol. 7, n° 41, 2021.
<https://doi.org/10.1007/s41062-021-00638-2>

(61). D. Bjegovic, A. Baricevic y M. Skazlic, «Hybrid Fiber-Reinforced Concrete with Unsorted Recycled-Tire Steel Fibers,» *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 29, n° 6, pp. 1-10, 2017.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001906](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001906)

(62). Z. Al-Kamyani, F. Figueiredo, H. Hu, M. Guadagnini y K. Pilakoutas, «Shrinkage and

flexural behaviour of free and restrained hybrid steel fibre reinforced concrete,» *reinforced concrete*, vol. 189, pp. 1007-1018, 2018.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.052>

(63). M. Alper, F. Hayati y S. Çelikten, «Influence of Steel Fiber Addition on the Vibrational Characteristic of High Strength Cementitious Composites,» *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 5, pp. 4677-4685, 2021.
<https://doi.org/10.1007/s13369-020-05096-z>

(64). H. Zhong, E. Whye, K. Chen y M. Zhang, «Engineering properties of crumb rubber alkali-activated mortar reinforced with recycled steel fibres,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 238, p. 117950, 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117950>

(65). E. Martinelli, A. Caggiano y H. Xargay, «An experimental study on the post-cracking behaviour of Hybrid Industrial/Recycled Steel Fibre-Reinforced Concrete,» *Construction and Building Materials*, vol. 94, pp. 290-298, 2015.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.007>

(66). A. Fantilli, B. Orfeo y A. Pérez, «The deflection of reinforced concrete beams containing recycled steel fibers,» *Structural Concrete*, vol. 22, n° 4, pp. 2089-2104, 2021.
<https://doi.org/10.1002/suco.202000729>

(67). H. Hu, Z. Wang, F. Figueiredo, P. Papastergiou, M. Guadagnini y K. Pilakoutas, «Postcracking tensile behavior of blended steel fiber-reinforced concrete,» *fib. International Federation for Structural Concrete*, vol. 20, n° 2, pp. 707-719, 2018.
<https://doi.org/10.1002/suco.201800100>

(68). Y. Wang, C. Lin, S. Hangm y M. Zhang, «Engineering properties of strain hardening geopolymer composites with hybrid polyvinyl alcohol and recycled steel fibres,» *Construction and Building Materials*, vol. 261, p. 120585, 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120585>

(69). M. Ahmadi, S. Farzin, A. Hassani y M. Motamedi, «Mechanical properties of the concrete containing recycled fibers and aggregates,» *Construction and Building Materials*, vol. 144, pp. 392-398, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.215>

(70). J. Rueda, J. Carrillo y J. Ortiz, «Indirect Tensile Behavior of Hooked-End Steel Fiber-Reinforced Concrete under Double-Punch Tests,» *ACI MATERIALS JOURNAL*, vol. 118, n° 5, pp. 93-105, 2021. <https://doi.org/10.14359/51732932>

(71). J. Yang, G.-F. Peng, G.-S. Shui y G. Zhang, «Mechanical Properties and Anti-Spalling Behavior of Ultra-High Performance Concrete with Recycled and Industrial Steel Fibers,» *Materiales*, vol. 15, n° 5, 2019. <https://doi.org/10.3390/ma12050783>

(72). E. Alwesabi, B. Bakar, I. Alshaikh y H. Akil, «Experimental investigation on mechanical properties of plain and rubberised concretes with steel-polypropylene hybrid fibre,» *Construction and Building Materials*, vol. 233, p. 117194, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117194>

(73). S. Alfayez, T. Omar y M. Nehdi, «Eco-efficient Preplaced Recycled Aggregate Concrete Incorporating Recycled Tire Rubber Granules and Steel Wire Fibre,» *Engineering Sustainability*, vol. 173, n° 2, pp. 84-96, 2018. <https://doi.org/10.1680/jensu.18.00027>

(74). X. Jian, G. Yong, L. Li y X. Zhi, «Compressive and flexural behaviours of a new steel-fibre-reinforced recycled aggregate concrete with crumb rubber,» *Construction and Building Materials*, vol. 79, pp. 263-272, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.036>

(75). A. Tareq, B. Abu, Md. y Hazizan, «Experimental investigation on compression toughness of rubberized steel fibre concrete,» *Construction and Building Materials*, vol. 115, pp.

163-170, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.022>

(76). A. Karimipour, M. Ghalehnovi y J. de Brito, «Mechanical and durability properties of steel fibre-reinforced rubberised concrete,» *Construction and Building Materials*, vol. 257, p. 119463, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119463>

(77). S. Bernal, M. Guadagnini, K. Pilakoutas y A. Alsaif, «Durability of steel fibre reinforced rubberised concrete exposed to chlorides,» *Construction and Building Materials*, vol. 188, pp. 130-142, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.122>

(78). C. Todut, D. Dan y V. Stoian, «Numerical and experimental investigation on seismically damaged reinforced concrete wall panels retrofitted with FRP composites,» *Composite Structures*, vol. 119, pp. 645-665, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.09.047>

(79). N. Fouad y M. Saifelddeen, «Smart self-sensing fiber-reinforced polymer sheet with woven carbon fiber line sensor for structural health monitoring,» *Advances in Structural Engineering*, vol. 24, n° 1, pp. 14-24, 2021. <https://doi.org/10.1177/1369433220944507>

(80). O. Ali, D. Bigaud y H. Riahi, «Seismic performance of reinforced concrete frame structures strengthened with FRP laminates using a reliability-based advanced approach,» *Composites*, vol. 139, pp. 238-248, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.11.051>