



**FACULTAD DE INGENIERÍA, ARQUITECTURA Y
URBANISMO**

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

**Propiedades físicas y mecánicas del concreto con la
incorporación de caucho reciclado: Una revisión**

**PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE BACHILLER EN
INGENIERÍA CIVIL.**

Autor

Agip Alvarado Yeisy Dayana

<https://orcid.org/0000-0001-6344-9831>

Asesor(a)

Mg. Muñoz Perez Socrates Pedro

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

Línea de Investigación

**Tecnología e Innovación en el Desarrollo de la Construcción
y la Industria en un Contexto de Sostenibilidad.**

Sublínea de Investigación

**Innovación y Tecnificación en Ciencias de los Materiales,
Diseño e Infraestructura.**

Pimentel – Perú

2023


DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD

Quien suscribe la DECLARACIÓN JURADA, somos del programa de Estudios de la **Escuela Académica Profesional de Ingeniería Civil** de la Universidad Señor de Sipán S.AC, declaramos bajo juramento que soy el autor del trabajo titulado:

Propiedades físicas y mecánicas del concreto con la incorporación de caucho reciclado: Una revisión.

El texto de mi trabajo de investigación responde y respeta lo indicado en el código de Ética del Comité Institucional de Ética en Investigación de la Universidad Señor de Sipán (CIEI USS) conforme a los principios y lineamientos detallados en dicho documento, en relación a las citas y referencias bibliográficas, respetando al derecho de propiedad intelectual, por lo cual informo que la investigación cumple con ser inédito, original y auténtico.

En virtud de lo antes mencionado, firma:

Agip Alvarado Yeisy Dayana	DNI: 71593257	
-----------------------------------	----------------------	---

Pimentel, 06 de septiembre del 2024




5% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto mencionado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 8 palabras)

Fuentes principales

- 4%  Fuentes de Internet
- 1%  Publicaciones
- 1%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

DEDICATORIA

Agradezco a mi familia por su amor, comprensión y apoyo, también a mi querido papá Armando que nunca dejó de creer en mí, sé que desde donde estés estas feliz por que te prometí el día que cumpliría y aquí estamos, porque me acompañas espiritualmente, gracias por estar todo mi caminar universitaria, a nuestros profesores por su guía, por creer en mi persona, dedicando este esfuerzo con gratitud y esperanza.

AGRADECIMIENTOS

A Dios porque nos protege y nos concede buena salud en estos tiempos difíciles de pandemia, también a mi familia por su apoyo incondicional, a los docentes y a la Universidad Señor de Sipán por todo el apoyo brindado para hacer realidad la presente investigación. Este logro también es de ustedes

INDICE

Dedicatoria	3
AGRADECIMIENTOS	4
I. INTRODUCCIÓN	8
1.1. Realidad problemática.	8
1.2. Formulación del problema	8
1.3. OBJETIVO	10
II. METODOLOGÍA	10
III. RESULTADOS Y DISCUSIONES	12
IV. CONCLUSIONES	27
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	28

RESUMEN

Objetivo: Analizar la viabilidad del uso del caucho reciclado como componente en la elaboración del concreto.

Metodología: Se ha hecho una revisión detallada de la literatura científica producida, dónde se estudia tanto las propiedades físicas como mecánicas del concreto, que incluyen en su estructura caucho reciclado en diferentes proporciones, formas, y tamaños. Para ello se han analizado 60 artículos publicados en revistas de alto impacto, indexadas en Scopus, EBSCOhost y ScienceDirect entre el 2015 y el 2021.

Resultados: Los resultados de las investigaciones analizadas demuestran que al utilizar caucho triturado en sustitución parcial por el volumen del agregado fino o reemplazo de caucho por el cemento en bajos porcentajes, el concreto adquiere óptimos resultados en sus propiedades mecánicas. También se concluye que el pretratamiento con NaOH de las partículas de caucho, antes de incluirlo a la mezcla del concreto, mejora considerablemente sus propiedades mecánicas tanto en estado fresco como en su estado sólido. El concreto con caucho presenta un mejor coeficiente de aislamiento acústico, es más resistente a la erosión por iones de cloruro, presenta mayor dureza a la abrasión y mejor resistencia al desgaste en comparación con el concreto convencional.

Conclusiones: La utilización de partículas de caucho reciclado en la elaboración de concreto, es una alternativa viable para reducir la contaminación generada por estos desechos, el análisis detallado de todas las investigaciones estudiadas demuestran que hay mejoras en muchas propiedades mecánicas y físicas del concreto con caucho en comparación con el concreto convencional.

Palabras clave: Concreto, caucho, propiedades físicas y mecánicas, resistencia, compresión, flexión.

ABSTRACT

Objective: Analyze the feasibility of using recycled rubber as a component in the production of concrete.

Methodology: A detailed review of the scientific literature has been made, where both the physical and mechanical properties of concrete, which include in its structure recycled rubber in different proportions, shapes, and sizes, are studied. For this purpose, 60 articles published in high impact journals indexed in Scopus, EBSCOhost and ScienceDirect between 2015 and 2021 have been analyzed.

Results: The results of the analyzed research show that by using crushed rubber in partial substitution for the volume of fine aggregate or replacing rubber with cement in low percentages, the concrete achieves optimum results in its mechanical properties. It is also concluded that the pre-treatment of rubber particles with NaOH, before including it in the concrete mix, considerably improves its mechanical properties both in the fresh and solid states. The concrete with rubber has a better acoustic insulation coefficient, is more resistant to erosion by chloride ions, has higher abrasion hardness and better wear resistance compared to conventional concrete.

Conclusions: The use of recycled rubber particles in the production of concrete is a viable alternative to reduce the pollution generated by these wastes. A detailed analysis of all the research studies shows that there are improvements in many mechanical and physical properties of concrete with rubber compared to conventional concrete.

Keywords: Concrete, rubber, physical and mechanical properties, strength, compression, flexion.

I. INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad problemática.

El caucho reciclado como parte de la estructura del concreto, se puede usar en diferentes aplicaciones en ingeniería civil. El hormigón con caucho se puede utilizar en pistas de atletismo y barreras en las carreteras, donde se necesita una capacidad de absorción de energía de alto impacto (Pham *et al.*, 2018). También podría utilizarse en estructuras hidráulicas, como túneles y aliviaderos de presas, donde se necesita una alta resistencia a la abrasión (Thomas y Chandra, 2016).

Se sabe que la contaminación crece de una forma acelerada y uno de los principales factores contaminantes son los neumáticos en desuso. Aproximadamente en todo el mundo se estima que se generan 1,5 millones de neumáticos de desecho cada año (Xu *et al.*, 2020). Actualmente existe una gran demanda de neumáticos, estos están compuestos principalmente a base de caucho (Wurster y Schulze, 2020).

El caucho de los neumáticos contiene estireno, un componente muy tóxico que es muy dañino para los seres humanos (Kaewunruen *et al.*, 2018). Estos residuos también poseen otras sustancias tóxicas que se dispersan por el medio ambiente, además en los botaderos actúan como hábitat para la reproducción de mosquitos (Mohajerani *et al.*, 2020).

1.2. Formulación del problema

El problema radica en el desgaste de los neumáticos en las carreteras generan partículas microplásticas, éstos residuos contaminantes se depositan en los

sistemas de agua residual, márgenes de las vías y los suelos que se encuentran cerca de las carreteras (Baensch-Baltruschat *et al.*, 2021). Recientemente, se están utilizando partículas de caucho de neumáticos usados en sustitución de los áridos normales para hacer un hormigón ecológico y ligero, que se denomina hormigón cauchutado (Pham *et al.*, 2019). La influencia del caucho granulado en el material compuesto cementoso de ingeniería (ECC) se revela a través de la densidad, la resistencia a la compresión, el rendimiento a la flexión, la contracción por secado, la contracción restringida y la huella ambiental (Zhang *et al.*, 2015). La mala interfaz de la matriz de caucho de neumáticos de desecho reciclados y cemento contribuye a la reducción de la resistencia mecánica en el concreto (Onuaguluchi, 2015). Además se ha demostrado que la fibra de caucho de desecho puede utilizarse como material sostenible para mejorar la resistencia al impacto y la ductilidad del hormigón (Trilok *et al.*, 2015). Asimismo se afirma que el hormigón cauchutado con 40% de contenido de caucho tiene una densidad de 1 950 kg / m³, que es inferior a 2 450 kg / m³ de hormigón convencional (Elchalakan, 2015). Otros autores concluyen que el hormigón recubierto de caucho es altamente resistente a los ambientes agresivos y puede ser implementado en las áreas donde hay posibilidades de ataque ácido (Thomas *et al.*, 2016). En una investigación se utilizó el material de caucho de desecho para producir pavimento de hormigón compactado con rodillos. Los resultados demostraron que la resistencia a la compresión aumentó con bajas relaciones de reemplazo (alrededor del 10% y 20% de volumen del agregado fino) en comparación con el hormigón convencional (Fakhri y Saberi, 2016). Asimismo después de analizar las propiedades frescas y endurecidas del concreto cauchutado, se concluyó que la

partícula de caucho es apta para usarse como agregado fino o grueso en el concreto. Se puede desarrollar un concreto altamente trabajable con hasta un 30% de agregados de caucho fino y un 10% agregado de caucho grueso con rendimiento mecánico confiable y durabilidad (Islam *et al.*, 2021).

Esta investigación tiene como objetivo analizar la viabilidad del uso del caucho reciclado como componente en la elaboración del concreto. Para ello, se han revisado diferentes investigaciones donde se estudia tanto las propiedades físicas como mecánicas del concreto que incluyen en su estructura caucho reciclado en diferentes proporciones, formas, y tamaños.

1.3. OBJETIVO

Objetivo: Analizar la viabilidad del uso del caucho reciclado como componente en la elaboración del concreto.

II. METODOLOGÍA

La presente investigación se realizó empleando 60 artículos indexados en bases de datos como: Scopus, EBSCOhost y ScienceDirect, con las siguientes palabras claves: tire contamination, concrete with rubber + mechanical properties, concrete with rubber, Concrete with tire rubber, entre otras, con los siguientes resultados: 7 artículos en el 2015, 9 artículos en el 2016, 4 artículos en el 2017, 6 artículos en el 2018, 12 artículos en el 2019, 13 artículos en el 2020 y 9 artículos en el 2021. La temática de los artículos investigados están relacionados con el diseño de mezclas de concreto con caucho tanto para estructuras como también para pavimentos rígidos. En las siguientes tablas se detalla la base de datos, año de publicación y número de artículos.

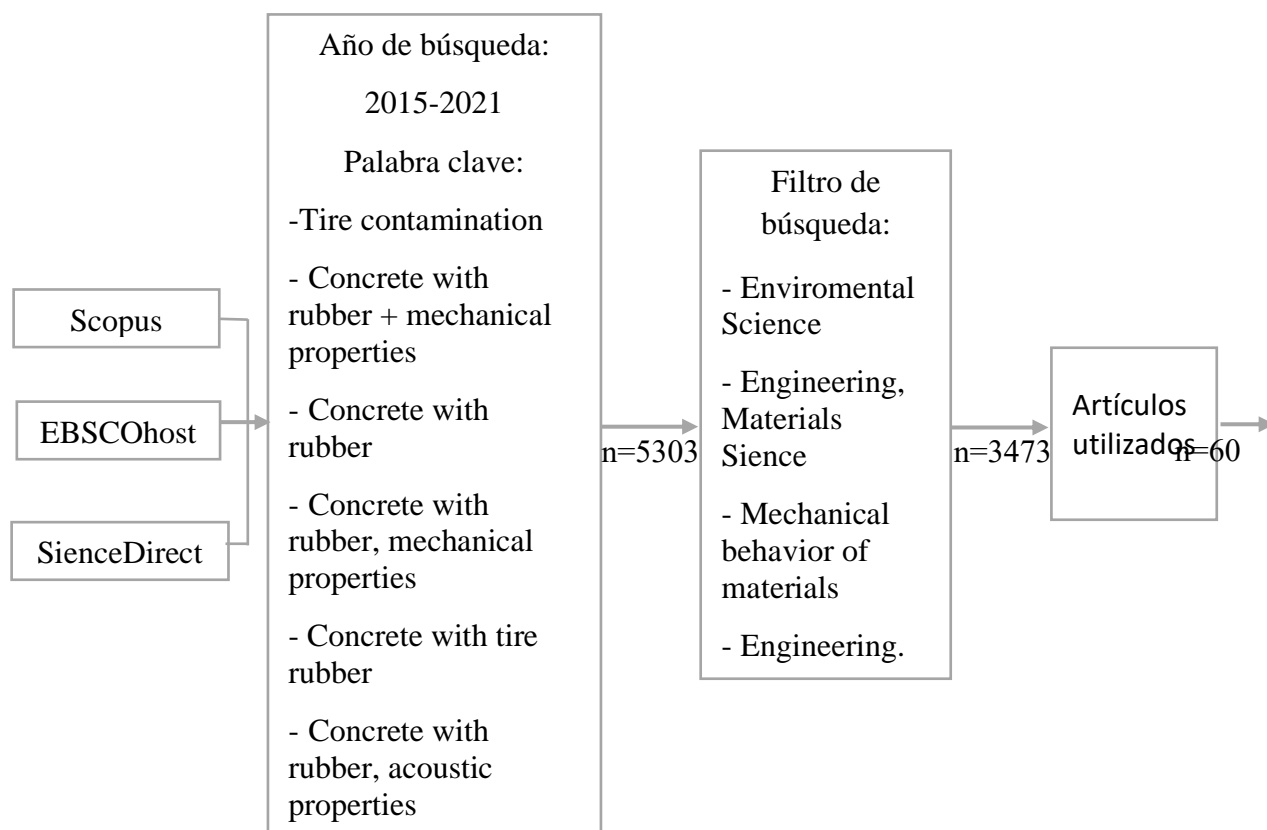


Figura 1. Cuadro de resumen de base de datos, año de publicación, filtro de búsqueda

Fuente: elaboración propia

Tabla 1. Resultados de la búsqueda con filtros

Base de datos	Año de búsqueda	Palabra clave	Documentos sin filtro	Filtro de Búsqueda	Documentos con filtro	Documentos seleccionados	Total
Scopus	2015-2021	Tire contamination.	187	Enviromental Science.	93	16	28
		Concrete with rubber + mechanical properties.	649	Engineering, Materials Sience.	574	12	
EBSCOhost	2015-2021	Concrete with rubber.	890	-	890	7	9

		Concrete with rubber+mechanical properties.	101	Materia-ruber	12	2	
ScienceDirect	2015-2021	Concrete with tire rubber.	2252	(Engineering)	1400	12	23
		Concrete with rubber, acoustic properties.	1200	(Engineering)	689	11	

Fuente: elaboración propia

Tabla 2. Distribución de artículos referenciados según el año de publicación y base de datos

Base de datos	Año de publicación de artículos							Total
	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	
Scopus	5	4	2	3	6	4	4	28
EBSCOhost	-	2	-	-	3	4	-	9
ScienceDirect	2	3	2	3	3	5	5	23
Total	7	9	4	6	12	13	9	60

Fuente: elaboración propia

III. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Propiedades mecánicas

Existen numerosas investigaciones con el propósito de estudiar el concreto con caucho y evaluar sus propiedades mecánicas. Hay algunos estudios que se enfocan en el análisis del comportamiento del hormigón con caucho, añadiendo o reemplazando por el agregado grueso y el cemento, pero muchas

de las investigaciones se centran en la sustitución o adición del caucho por el agregado fino.

Bandarage y Sadeghian (2020), el objetivo de su investigación fue de estudiar el comportamiento mecánico del concreto con partículas de caucho provenientes de neumáticos de desecho para posteriormente disminuir el uso de materiales no renovables en el concreto. Ellos hicieron sustituciones de hasta 50 % de caucho reciclado triturado largo inferiores al tamiz # 4 por volumen del agregado fino.

Resistencia a la compresión

Kardos y Durham (2015), estudiaron las propiedades mecánicas del concreto para aplicaciones de pavimento, reemplazando caucho desmenuzado en sustitución parcial por la arena, los porcentajes que utilizaron fueron de (10; 20; 30; 40 y 50) %, también utilizaron 15 % de sustitución de cenizas volantes por cemento. Concluyeron que se logran óptimos resultados con un 30 % de sustitución de migajas de caucho por el agregado fino.

Otro estudio demuestra que para aplicaciones estructurales reemplazando hasta un 10 % de caucho por el agregado fino no afecta mucho la trabajabilidad del concreto en estado fresco, pero a medida que se aumenta el caucho disminuye la resistencia a la compresión (Moustafa y ElGawady, 2015).

Raffoul *et al.* (2016), en su investigación demostraron que el empleo elevado de partículas de caucho en el concreto disminuye la trabajabilidad, la densidad del concreto en estado endurecido y la resistencia a compresión. Asimismo concluyeron que al reemplazar 40 % de caucho por el árido fino en la mezcla

original redujo 70 % de la resistencia a la compresión también disminuyó 49 % de la resistencia a la compresión en la mezcla optimizada.

Por otro lado, se recomienda la sustitución inferior a 10 % de partículas de caucho por el volumen de la arena con tamaños superiores a 0,864 mm de diámetro para su utilización en pavimentos, pero los autores recomiendan más investigación de este tipo de concreto antes de utilizarlo a gran escala (Li *et al.*, 2016).

Asimismo, otros investigadores evaluaron la sustitución de 20 % de raspado de caucho de neumáticos por el agregado fino en el concreto autocompactante, la resistencia mecánica alcanzada fue de 32,81 Mpa, idóneos para aplicaciones estructurales (Grazia, 2016).

También se considera, que si el agregado de caucho se trata con hidróxido de sodio aumenta la unión entre el partículas de caucho y la pasta cementante y se puede utilizar hasta un 25 % de caucho en las mezclas de concreto para pavimentos rígidos con óptimos resultados (Guo *et al.*, 2017).

En cambio, en el concreto de caucho de alto rendimiento (HPRC) cuando el contenido de caucho es del 5 % la porosidad del HPRC aumenta en 3,45 %, el contenido de caucho controla la cantidad de poros que están entre los tamaños de 10 a 100 mn, mientras que la adición de SAP (tres polímeros superabsorbentes) controla los poros encontrados entre los intervalos de 100 a 1 000 mn y macroporos que están por encima de los 1 000 mn (Zhu *et al.*, 2019).

Abd-Elaal *et al.* (2019), realizaron un estudio novedoso donde trataron las partículas de caucho granulado mediante un tratamiento térmico a 200 °C antes de su incorporación al hormigón donde las variables de estudio fueron:

el tiempo de calentamiento, el tamaño del caucho y el contenido de caucho. Los autores concluyeron que el método de tratamiento térmico tiene una sensibilidad al tamaño del caucho y las partículas de caucho relativamente pequeñas tienen más potencial para contribuir a mejorar las resistencias a la compresión y a la tracción.

Abdelmonem *et al.* (2019), la finalidad de su investigación fue determinar las propiedades del concreto de elevada resistencia con partículas de caucho como reemplazo parcial del agregado fino, los porcentajes de sustitución que utilizaron fueron de (0; 10; 20 y 30) % del volumen. Las conclusiones experimentales de los autores demostraron que con un reemplazo de 30 % del caucho por el árido natural el concreto alcanza una resistencia a la compresión de 35 Mpa aptos para aplicaciones estructurales.

Otro estudio afirma que se obtienen buenos resultados en cuanto a trabajabilidad y propiedades mecánicas sustituyendo el 15 % de la arena o el 7 % a 8 % del peso por caucho molido grueso para algunas aplicaciones (Valente y Sibai, 2019).

También se demuestra que la sustitución de partículas de caucho (CR) por los áridos naturales finos o gruesos o cemento en el concreto reduce la resistencia a la compresión, flexión y el módulo elástico, esta reducción está en función a la cantidad de CR, pero el desempeño mecánico a compresión y flexión del concreto de caucho granulado (CRC) supera ligeramente al concreto de agregado natural (NAC) dependiendo del tamaño del CR. La sustitución de 0 % a 10 % de CR aumenta 2 % la resistencia a la compresión en el CRC (Li *et al.*, 2019).

Asimismo en otro estudio se concluye que en el concreto con caucho, con un 60 % de sustitución volumétrica de caucho la resistencia a compresión fue la décima parte del concreto convencional de referencia, pero tuvo una mejor respuesta frente a la disipación de energía (Bompa y Elghazouli, 2019).

Por otro lado, el desempeño mecánico a compresión del hormigón autocompactante disminuye de forma lineal con el aumento de agregado de caucho a los 56 días, además la resistencia a la compresión reduce en 3,9 % con el aumento de 1 % de volumen de caucho, puede existir mayores rendimientos si existe interfaces mejoradas entre la matriz y el agregado de caucho (Li *et al.*, 2019).

Bušić *et al.* (2020), el objeto de su estudio fue de investigar la influencia del caucho de neumáticos de desecho y el humo de sílice tanto en las propiedades frescas como endurecidas del hormigón fluido (SCC) y diseñar modelos de regresión multivariante para la predicción de las propiedades mecánicas del concreto cauchutado autocompactante (SCRC), el reemplazo de caucho granulado por el agregado fino fueron de (0; 5; 10; 15; 20; 25 y 30)% del volumen total del agregado y el humo de sílice se reemplazó por el cemento en proporciones de (0; 5 y 10)% de la masa total del cemento. Los investigadores concluyeron que se pueden obtener propiedades favorables de SCC fresco y endurecido con hasta un 15% de caucho desmenuzado y un 5% de humo de sílice.

En otra investigación se menciona que si se sustituye caucho triturado GGBS simple por el peso del cemento en cantidades de (10; 20 y 30) %, hay una mejora de la resistencia a la compresión de hasta 17 % en el concreto (Rajini y Chandrasekhar, 2020).

En cambio sí se utilizara subproductos de neumáticos de desecho para la elaboración de “hormigón verde” para pavimentos, la incorporación de caucho desmenuzado (CR) tiene efectos negativos en todas las propiedades mecánicas del concreto pero los más evidentes son el desempeño mecánico a tracción y el módulo de ruptura, en cambio sí se introduce 0,1 % y 0,2 % de fibras de acero (SF) aumenta tanto el módulo de ruptura como la resistencia a la compresión a los 7 días en comparación con el concreto de referencia (Soleimani *et al.*, 2021).

Resistencia a la flexión

Los investigadores estudiaron el uso de caucho triturado modificado con una solución saturada de hidróxido de sodio o agente de acoplamiento de silano (SCA) en el concreto. Los resultados que se obtuvo fue que el pretratamiento con una solución saturada de hidróxido de sodio inferiores a 24 horas no genera cambios significativos en las propiedades del concreto, en cambio el pretratamiento con SCA actúa como aditivo entre las partículas de caucho y la matriz, mejorando la resistencia a la flexión del hormigón en estado endurecido en 2,2 % a los 28 días (Su *et al.*, 2015).

Por otra parte, se hizo un estudio donde se sustituyó el árido fino por caucho de neumático triturado en 10 %, las pruebas se hicieron en tres mezclas de concreto: concreto sin caucho (concreto de referencia), concreto con caucho con cemento en la misma proporción del concreto de referencia y concreto con caucho y adición de cemento hasta obtener la misma resistencia que el concreto patrón. Los resultados obtenidos para la resistencia a flexión fue de una disminución de 43 % del concreto con caucho en relación al concreto de

referencia, y para igualar la misma resistencia del concreto patrón se tuvo que añadir un 30 % más de cemento (Silveira *et al.*, 2016).

En otra investigación se hizo la sustitución de polvo de caucho por el agregado fino en el concreto con las proporciones de (2,5; 5 y 7,5) %. El mayor valor registrado para la resistencia a la flexión fue para 2,5 % con resistencias de 4,26 N/mm² a los 7 días, 5,33 N/mm² a los 14 días y 6,66 N/mm² a los 28 días superando en resistencia a la sustitución de 5 % y 7,5% en todos los días anteriormente mencionados (Karthik y Saranya, 2017).

Por otro lado, se investigaron un tipo de concreto hecho a base de agua, cemento, arena como agregado fino y el agregado grueso ligero de lutita expandida, se incorporó el agregado de neumáticos triturados en la sustitución del agregado grueso ligero variando en porcentajes de 0% a 100%. De acuerdo con los resultados la resistencia a la flexión disminuyó de una forma no lineal en las proporciones de reemplazo de 0 % a 100 %, con un punto de inflexión entre el 40 % y 60 % de reemplazo de caucho (Miller y Tehrani, 2017).

Otra investigación se hizo en concreto de 210 kg/cm² en tres grupos de control: concreto modificado con aditivo plastificante usando en su composición caucho reciclado en las siguientes proporciones de (5, 10 y 15) %, concreto con aditivo plastificante y concreto sin aditivo plastificante. Los resultados se evaluaron a los 7; 14 y 28 días, la máxima resistencia a la flexión obtenida fue de (81,861 kg/cm²), con 10 % de caucho (Farfán y Leonardo, 2018).

Choudhary *et al.* (2020), elaboraron una investigación experimental con la finalidad de estudiar el concreto funcionalmente graduado, para ello utilizaron fibras de caucho como sustitución parcial del agregado fino, este tipo de concreto se elaboró con diferentes materiales como: agregados de granito

triturado, cenizas volantes, fibras de acero, gránulos de vidrio, etc. los porcentajes de sustitución fue de 0% – 20 % para concreto de control, 5% para el concreto de fibra de caucho y 30 % para concreto funcionalmente graduado. La investigación concluyó que la resistencia a la flexión aumentó con la añadidura de fibras provenientes de caucho, también se observó un mayor índice de resistencia a la flexión de aproximadamente 42,28% para la muestra del concreto funcionalmente graduado fue con 20% de fibras de caucho.

Alfayez *et al.* (2020), estudiaron un tipo de concreto que contenía 50 % más de agregado grueso que el concreto convencional, colocando primero el esqueleto granular en el encofrado para posteriormente inyectar una lechada fluida reduciendo energía de mezclado y colocación, los ensayos contenían áridos de hormigón reciclado en reemplazo del agregado grueso natural en intervalos de 19 a 38 mm, el caucho granulado de neumáticos reciclados de 6 a 12 mm y alambre de neumáticos reciclados de una longitud de 20 a 35 mm. Concluyeron que al agregar el caucho granulado disminuye las propiedades mecánicas pero la adición de fibras de acero disminuyó la caída de la resistencia a flexión y a compresión.

Por otro lado se investigó tres tipos de concreto: (a) 0-50% de agregado fino reemplazado por contenido de caucho, (b) 0-50% de agregado grueso reemplazado por contenido de caucho, y (c) 50% de agregado fino y grueso reemplazado por contenido de caucho grueso. Los investigadores concluyeron que las vigas de concreto con caucho sufrieron una disminución a flexión de hasta un 167% con un contenido de caucho del 50% (Tufail *et al.*, 2020).

Shahjalal *et al.* (2021), el objeto de su investigación fue estudiar la influencia combinada del agregado grueso reciclado (RCA), caucho desmenuzado (CR)

y la fibra del polipropileno (PP), en concreto de goma reforzado con fibra. Llegaron a la conclusión de que la introducción de la fibra PP, y el caucho desmenuzado mejoran las propiedades mecánicas del concreto a corto y largo plazo.

Propiedades físicas

Al agregar caucho en las mezclas de concreto, modifican sus propiedades físicas, la mayoría estas propiedades son muy favorables, por ejemplo la disminución del peso en relación con el concreto convencional lo que daría lugar a estructuras más livianas, también se puede resaltar el alto índice de aislamiento sonoro.

Hamdi *et al.* (2021), revisaron de forma sistemática la literatura para evaluar la factibilidad de utilizar caucho de neumáticos desmenuzados para la elaboración de concreto destinados a fines estructurales y de pavimentos, en su investigación estudiaron las diferentes propiedades del concreto. Los resultados en cuanto a densidad del concreto con caucho determinaron que está en función de la cantidad de caucho en la mezcla y la finura de este material, lo que lo convierte en apto para estructuras livianas siempre y cuando adquiera una resistencia aceptable.

Resistencia al impacto

Flores *et al.* (2017), en su investigación estudiaron las propiedades térmicas como mecánicas del hormigón, incorporando caucho granulado (CR) y concreto con fibras de acero o plástico revestidas con caucho (FCR). El concreto con caucho presenta mayores índices de absorción de energía de impacto pero aún más el concreto con FCR, también el concreto cauchutado

cuenta con mayor dureza a la abrasión mejores resistencias al desgaste, convirtiéndose en aptos para su uso en pavimentos, aceras y cubiertas.

Se afirma que la superficie lisa de las partículas de caucho genera mala interacción con la pasta de cemento, por esta razón los investigadores trataron el caucho con los siguientes tipos de sustancias: una solución de hidróxido de sodio (NaOH), sulfonación y urea. La resistencia al impacto del hormigón que en su composición llevaba caucho tratado con NaOH incrementó en un 25,6 % con relación al hormigón con caucho sin tratar (CRC), el concreto que en su estructura tenía caucho sulfonado incrementó su resistencia al impacto en un 39 % con relación al CRC, mientras que el concreto con partículas de caucho tratadas con urea mejoró la resistencia al impacto en 32,6 % que la del concreto con caucho sin tratar (CRC) (He *et al.*, 2021).

Protección ante la corrosión del acero en el concreto.

En el concreto, la corrosión del acero es un problema principal que afecta la durabilidad de las estructuras, pero la adición de caucho desmenuzado en el hormigón reduce la corrosión. El hormigón con caucho granulado es más resistente a la erosión por iones de cloruro que el hormigón convencional especialmente a una temperatura inferior de 20 °C (Zhu *et al.*, 2018).

Liang *et al.* (2019), en su estudio investigaron la corrosión del acero en el hormigón bajo la condición de corrosión electroacelerada por cloruro, utilizando las siguientes proporciones de agua/cemento 0,45 y 0,55 y los contenidos de caucho para el experimento que utilizaron fueron de (0; 50; 100 y 150 kg/m³). Los resultados demostraron que el concreto con mayor relación agua/cemento presenta un mayor índice anticorrosión, también se demostró que a mayor contenido de caucho en el concreto menor es la presencia de

fisuras posponiendo el desarrollo de grietas lo que reducirá la corrosión del acero estructural.

Ductilidad

Haciendo uso del sistema de correlación de imágenes digitales tridimensionales (3D-DIC) se detectó los valores críticos de deformación que principalmente se encuentran en la interfaz entre el concreto y las partículas de caucho, también se determinó que al reemplazar 50 % de caucho por el árido natural, aumenta la ductilidad del concreto de una forma considerable, pero disminuye la resistencia a la compresión en un 80 % (Abbassi y Ahmad, 2020).

Abdulameer y Mohammed (2021), hicieron un estudio de vigas de hormigón armado ordinario (ORC) como referencia y vigas de hormigón armado con caucho (RRC), los parámetros principales que utilizaron para su estudio fueron la relación distancia de corte /profundidad (a/h) de 1,33 y 1,66 las proporciones de reemplazo de miga y viruta de caucho por volumen del agregado fino y grueso fueron de (5; 10; 15; 20) %. Mediante los resultados experimentales se puede afirmar que la ductilidad de las vigas profundas con caucho aumentaron hasta un 36,95 % cuando el reemplazo de caucho granulado fue por el 20 %.

Propiedades acústicas

Zhang y Poon (2018), en su estudio, en el concreto de control utilizaron arcilla expansiva ligera como agregado grueso, y ceniza de fondo de horno como agregado fino (FBA). Al sustituir el agregado de caucho reciclado por todo el FBA el nivel de reducción sonora fue de 32,5 dB, claramente más alto que los 15,5 dB alcanzado en el concreto de control sin caucho, sin embargo se hizo

un simple pretratamiento con una lachada de cemento para modificar la superficie de las partículas de caucho lográndose resultados de reducción del ruido de 10,9 dB y 14,8 dB cuando se sustituyó el caucho pretratado por el FBA en 50 % y 75 % respectivamente.

Ghizdăveț *et al.* (2016), la finalidad de su investigación fue estudiar el comportamiento acústico del concreto con partículas de caucho de campos deportivos, haciendo muestras de control de concreto sin caucho, en el concreto con caucho utilizaron dosificaciones de 5 % y 7,5 % de peso de los agregados finos que fueron reemplazados por caucho de estireno butadieno (SBR) pretratado con NaOH, la relación agua/cemento que utilizaron fue de 0,45; 0,50 y 0,55 y superplastificante en 0,8 % en peso. Este tipo de concreto obtuvo un buen coeficiente de absorción acústica superior a 0,5 para todas las muestras con caucho en relación a las muestras de control sin (SBR).

Wang y Du (2020), estudiaron los siguientes tipos de concreto: hormigón normal (NC), hormigón reciclado (RC) y hormigón de caucho granulado reciclado (RCC). Los resultados obtenidos detallaron que con el aumento del contenido de caucho, RCC tiene un mejor efecto de absorción de sonido que el RC y NC; cuando la tasa de reemplazo de caucho es del 30%, hay un mayor coeficiente de aislamiento acústico y reducción de ruido y un mejor efecto de aislamiento acústico en el rango de frecuencia de 250 –2000 Hz.

Concreto más liviano

Revelo y Colorado (2021), elaboraron cemento de fosfato con partículas de caucho molido, incorporando hasta 12 % de las partículas de caucho al cemento, para la caracterización de las muestras utilizaron diferentes métodos e instrumentos como: pruebas térmicas a temperaturas de 50 y 100 ° C,

densidad, estadísticas de Weibull, entre otros. Los autores concluyeron que las muestras oscilaban entre las densidades de 1 gr/cm³ y 1,6 gr/cm³.

En cambio el concreto a base de desechos de neumáticos de automóvil como agregado fino y grueso es más liviano. Se observó que este concreto con un contenido de caucho de 0 % su densidad fue de 2 350 kg/m³, con 15 % se obtuvo una densidad de 2 091 kg/m³ y con 30 % su densidad redujo 1 833 kg/m³, este tipo de concreto es muy resistente al impacto en comparación del concreto normal disminuyendo la propagación de las grietas pero es más sensible a la tasa de deformación (Pham *et al.*, 2020).

Trabajabilidad

Liu *et al.* (2016), elaboraron una investigación de concreto con caucho, para su estudio hicieron una muestra de control de concreto sin caucho, otras muestras de concreto con caucho pretratado en sustitución del agregado fino y otras muestras sustituyendo caucho pretratado por la mezcla, el caucho sustituido se hizo en diferentes proporciones de volumen para ambos casos. La mezcla diseñada alcanzó asentamientos entre los intervalos de 30-60 mm asegurando la trabajabilidad del concreto.

Si *et al.* (2018), estudiaron un tipo de concreto autocompactante con 15 % de partículas de caucho y 15 % y 25 % de caucho tratado con NaOH, la sustitución de caucho se hizo en función del agregado fino, también elaboraron muestras de control sin caucho. Los resultados obtenidos de la mezcla fueron que al agregar partículas de caucho redujo ligeramente la fluidez de la mezcla pero el concreto que en su composición presentaba caucho tratado con NaOH ralentizó la reducción de la fluidez.

Siddika *et al.* (2019), hicieron una investigación revisando sistemáticamente la literatura con la finalidad de proporcionar una visión fundamental de las aplicaciones integradas de los materiales de concreto con caucho para mejorar los métodos de construcción. Llegaron a la conclusión de que el concreto con caucho posee baja trabajabilidad, también quedó demostrado que el concreto con caucho puede reducir las propiedades mecánicas del hormigón aumentando esta tendencia con el tamaño y contenido de caucho, asimismo este tipo de concreto tiene mayor capacidad de control de la ductilidad y la deformación.

Resistencia a altas temperaturas

Nematzadeh *et al.* (2020), estudiaron el módulo elástico de las columnas de tubo de acero rellenos de hormigón reforzado con fibras de caucho (RuF-CFST) después de la carga térmica, para esto se elaboraron 57 muestras y se evaluaron diferentes módulos elásticos, las cargas térmicas utilizadas fueron de (20, 250, 500 y 750 °C), el porcentaje de sustitución de partículas de caucho por la arena fue de 0; 5 y 10 %, la proporción de fibra de acero fue de 0; 1; 1,5 % y la relación entre el diámetro externo del tubo de acero y el espesor fue de (25,4 y 43). Se observó la caída del módulo de elasticidad en un 50 y 70 % con una carga térmica de 750 °C, pero al aumentar la proporción de fibras en las muestras con carga térmica y sin carga térmica el módulo elástico aumentó entre un 5% y un 10%.

Záleská *et al.* (2019), en su estudio elaboraron una muestra de control sin caucho y tres tipos de mezclas incluyendo caucho pretratado con NaOH, en la primera mezcla se sustituyó partículas de caucho por el agregado fino en porcentajes de (10; 20; 30 %), en la segunda mezcla se utilizó partículas de

caucho de mayor tamaño en sustitución por el agregado grueso en los siguientes porcentajes (10; 20; 30 %) y en la tercera mezcla se sustituyó tanto el agregado fino y grueso por los dos tipos de caucho también al igual que los porcentajes anteriores, la relación agua/cemento y la proporción agregado/cemento se mantuvo constante para todas las mezclas. Los autores concluyeron que las muestras que contenían caucho en su composición se mantuvieron estables hasta 300 °C, pero a 400 °C se descompuso el agregado a base de caucho y su combustión afectó las propiedades funcionales del concreto con caucho.

Mousavimehr y Nematzadeh (2019), en su investigación elaboraron una muestra de referencia sin caucho en su composición, también hicieron 2 mezclas más sustituyendo 15 % y 30 % de caucho desmenuzado por la arena, las cargas térmicas utilizadas fueron de (200; 400; 600 y 800 °C) incluida la temperatura ambiente de 23 °C y la relación agua/cemento fue constante para todas las muestras de 0,51. Los resultados en cuanto a la pérdida de la resistencia a la compresión fue alrededor de 35 % a diferentes temperaturas con el reemplazo del 15 % de caucho por la arena, pero esta resistencia disminuyó en 56 % en las muestras que contenían 30% de sustitución de caucho por la arena sometidas a temperaturas de 400 °C.

Tang *et al.* (2021), elaboraron una investigación con la finalidad de evaluar la resistencia al fuego del hormigón con agregados reciclados modificados con caucho (RRAC), e investigar la respuesta térmica y la propiedades mecánicas después de esa exposición, el RAC estaba compuesto de: agua, cemento, arena, RA y NA, y el RRAC además de los materiales del RAC, tenía en su composición partículas de caucho en proporciones de (4 y 9 %) de la masa del

agregado fino, las temperaturas utilizadas fueron de (20; 200; 400 y 600 °C) en intervalos de 60 minutos. De acuerdo a las conclusiones se recomienda un RRAC con un contenido de caucho de 4% porque presentó un mejor desempeño de resistencia al fuego bajo cargas de compresión.

La incorporación de caucho en la mezcla del hormigón, ya sea por adición o sustitución parcial del agregado fino o grueso en cierto porcentaje, o por el reemplazo de polvo de caucho por cemento en diferentes proporciones, hace variar el comportamiento del concreto, tanto en sus propiedades físicas y mecánicas.

En los siguientes cuadros se resumen los datos de sustitución, adición de caucho por los componentes de concreto, mostrando los diferentes resultados en lo que respecta a propiedades físicas y mecánicas del concreto con incorporación de caucho en su estructura, detallando la variabilidad la variabilidad de resultados.

IV. CONCLUSIONES

La utilización de partículas de caucho reciclado en la elaboración de concreto, es una alternativa viable para reducir la contaminación generada por el caucho proveniente principalmente de los neumáticos en desuso.

Al utilizar caucho triturado en el concreto, como reemplazo parcial del volumen del agregado fino o sustitución parcial del cemento en bajos porcentajes, el concreto adquiere óptimos resultados en sus propiedades mecánicas tanto a compresión como a flexión. Abriendo la posibilidad de utilizar concreto con caucho en aplicaciones estructurales.

Debido a la mala unión entre las partículas de caucho y el cemento algunos investigadores se han enfocado en hacer un pretatamiento de las partículas de

caucho con NaOH u otras sustancias, aumentando considerablemente las propiedades mecánicas del concreto con caucho tratado en comparación del concreto con caucho sin tratar.

Otras investigaciones también demostraron que el concreto con caucho es más liviano, presenta mejor coeficiente de aislamiento acústico, es más resistente a la erosión por iones de cloruro, presenta mayor dureza a la abrasión y mejor resistencia al desgaste, por lo que se podría usar en la construcción de pavimentos, aceras y cubiertas.

Existen muchos estudios que avalan el uso del caucho en el concreto sobre todo el caucho de neumáticos reciclados, pero la mayoría de los estudios se enfocan en la sustitución parcial en porcentajes de volumen de caucho triturado por el agregado fino, se requiere más investigaciones donde se estudie la sustitución del caucho por el agregado grueso o el cemento en el concreto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abbassi, F. y Ahmad, F. (2020). Behavior analysis of concrete with recycled tire rubber as aggregate using 3D-digital image correlation. *Journal of Cleaner Production*, 274. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123074>

Abd-Elaal, E.-S., Araby, S., Mills, J. E., Youssf, O., Roychand, R., Ma, X., Zhuge, Y. y Gravina, R. J. (2019). Novel approach to improve crumb rubber concrete strength using thermal treatment. *Construction and Building Materials*, 229. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116901>

- Abdelmonem, A., El-Feky, M. S., Nasr, E.-S. A. y Kohail, M. (2019). Performance of high strength concrete containing recycled rubber. *Construction and Building Materials*, 227. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.08.041>
- Abdulameer Kadhim, A. y Mohammed Kadhim, H. (2021). Experimental investigation of rubberized reinforced concrete continuous deep beams. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2021.03.001>
- Alfayez, S. A., Omar, T. y Nehdi, M. L. (2020). Eco-efficient preplaced recycled aggregate concrete incorporating recycled tyre waste. *Engineering Sustainability*, 173(2), 84-96. <https://doi.org/10.1680/jensu.18.00027>
- Baensch-Baltruschat, B., Kocher, B., Kochleus, C., de Friederike, S. y Reifferscheid, G. (2021). Tyre and road wear particles - A calculation of generation, transport and release to water and soil with special regard to German roads. *Science of the Total Environment*, 752. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141939>
- Bandarage, K. y Sadeghian, P. (2020). Effects of long shredded rubber particles recycled from waste tires on mechanical properties of concrete. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 9(1), 50-59. <https://doi.org/10.1080/21650373.2019.1676839>
- Bompa, D. V. y Elghazouli, A. Y. (2019). Creep properties of recycled tyre rubber concrete. *Construction and Building Materials*, 209, 126-134. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.127>
- Bušić, R., Benšić, M., Milicević, I. y Strukar, K. (2020). Prediction Models for the Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete with Recycled Rubber and Silica Fume. *Materials*, 13(8). <https://doi.org/10.3390/MA13081821>

- Choudhary, S., Chaudhary, S., Jain, A. y Gupta, R. (2020). Assessment of effect of rubber tyre fiber on functionally graded concrete. *Materials Today: Proceedings*, 28, 1496-1502. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.830>
- Elchalakan, M. (2015). High strength rubberized concrete containing silica fume for the construction of sustainable road side barriers. *Structures*, 1, 20-38. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2014.06.001>
- Fakhri, M. y Saberi, F. (2016). The effect of waste rubber particles and silica fume on the mechanical properties of Roller Compacted Concrete Pavement. *Journal of Cleaner Production*, 129, 521-530. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.017>
- Farfán, M. y Leonardo, E. (2018). Caucho reciclado en la resistencia a la compresión y flexión de concreto modificado con aditivo plastificante. *Revista ingeniería de construcción*, 33(3), 241-250. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732018000300241>
- Ghizdăveț, Z., Stefan, B.-M., Nastac, D., Vasile, O. y Bratu, M. (2016). Sound absorbing materials made by embedding crumb rubber waste in a concrete matrix. *Construction and Building Materials*, 124, 755-763. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.145>
- Guo, S., Dai, Q., Si, R., Sun, X. y Lu, C. (2017). Evaluation of properties and performance of rubber-modified concrete for recycling of waste scrap tire. *Journal of Cleaner Production*, 148, 681-689. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.046>
- Grazia, M. T. (2016). Determinação Do Teor Ótimo De Raspa De Borracha Como Substituta Parcial Do Agregado Miúdo Em Concreto Autoadensável. *Revista Mackenzie de Engenharia e Computação*, 16(1), 54-70.

- Hamdi, A., Abdelaziz, G. y Farhan, K. Z. (2021). Scope of reusing waste shredded tires in concrete and cementitious composite materials: A review. *Journal of Building Engineering*, 35. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.102014>
- He, L., Cai, H., Huang, Y., Ma, Y., Van Den Bergh, W., Gaspar, L., Valentin, J., Vasiliev, Y. E., Kowalski, K. J. y Zhang, J. (2021). Research on the properties of rubber concrete containing surface-modified rubber powders. *Journal of Building Engineering*, 35. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101991>
- Islam, M., Islam, M., Siddika, A. y Mamun, M. A. (2021). Performance of rubberized concrete exposed to chloride solution and continuous wet–dry cycle. *Innovative Infrastructure Solutions*, 6(2). <https://doi.org/10.1007/s41062-020-00451-3>
- Kaewunruen, S., Li, D., Chen, Y. y Xiang, Z. (2018). Enhancement of dynamic damping in eco-friendly railway concrete sleepers using waste-tyre crumb rubber. *Materials*, 11(7). <https://doi.org/10.3390/ma11071169>
- Kardos, A. J. y Durham, S. A. (2015). Strength, durability, and environmental properties of concrete utilizing recycled tire particles for pavement applications. *Construction and Building Materials*, 98, 832-845. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.065>
- Karthik, S. y Saranya, T. (2017). An Experimental Investigation on Partial Replacement of Fine Aggregate by Used Tyre Rubber Particles in Concrete. *Rasayan Journal of Chemistry*, 10(2), 415-422. <https://doi.org/10.7324/RJC.2017.1021642>
- Li, N., Long, G., Ma, C., Fu, Q., Zeng, X., Ma, K., Xie, Y. y Luo, B. (2019). Properties of self-compacting concrete (SCC) with recycled tire rubber aggregate: A comprehensive study. *Journal of Cleaner Production*, 236. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117707>

- Li, L.-J., Tu, G.-R., Lan, C. y Liu, F. (2016). Mechanical characterization of waste-rubber-modified recycled aggregate concrete. *Journal of Cleaner Production*, 124, 325-338. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.003>
- Li, Y., Zhang, S., Wang, R. y Dang, F. (2019). Potential use of waste tire rubber as aggregate in cement concrete – A comprehensive review. *Construction and Building Materials*, 225, 1183-1201. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.198>
- Liang, J., Zhu, H., Chen, L., Han, X., Guo, Q., Gao, Y. y Liu, C. (2019). Rebar corrosion investigation in rubber aggregate concrete via the chloride electro-accelerated test. *Materials*, 16(6). <https://doi.org/10.3390/ma12060862>
- Liu, H., Wang, X., Jiao, Y. y Sha, T. (2016). Experimental Investigation of the Mechanical and Durability Properties of Crumb Rubber Concrete. *Materials*, 9(3). <https://doi.org/10.3390/ma9030172>
- Medina, N. F., Medina, D. F., Hernández-Olivares, F. y Navacerrada, M. A. (2017). Mechanical and thermal properties of concrete incorporating rubber and fibres from tyre recycling. *Construction and Building Material*, 144, 563-573. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.196>
- Miller, N. M. y Tehrani, F. M. (2017). Mechanical properties of rubberized lightweight aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 147, 264-271. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.155>
- Mohajerani, A., Burnett, L., Smith, J. V., Markovski, S., Rodwell, G., Rahman, M. T., Kurmus, H., Mirzababaei, M., Arulrajah, A., Horpibulsuk, S., & Maghool, F. (2020). Recycling waste rubber tyres in construction materials and associated

environmental considerations: A review. *Resources, Conservation & Recycling*, 155. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104679>

Mousavimehr, M. y Nematzadeh, M. (2019). Predicting post-fire behavior of crumb rubber aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 229. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116834>

Moustafa, A. y ElGawady, M. A. (2015). Mechanical properties of high strength concrete with scrap tire rubber. *Construction and Building Materials*, 93, 249-256. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.115>

Nematzadeh, M., Memarzadeh, A. y Karimi, A. (2020). Post-fire elastic modulus of rubberized fiber-reinforced concrete-filled steel tubular stub columns: Experimental and theoretical study. *Journal of Constructional Steel Research*, 175. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106310>

Onuaguluchi, O. (2015). Effects of surface pre-coating and silica fume on crumb rubber-cement matrix interface and cement mortar properties. *Journal of Cleaner Production*, 104, 339-345. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.04.116>

Pham, T. M., Chen, W., Khan, A. M., Hao, H., Elchalakani, M. y Tran, T. M. (2020). Dynamic compressive properties of lightweight rubberized concrete. *Construction and Building Materials*, 328. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117705>

Pham, T. M., Elchalakani, M., Hao, H., Lai, J. y Ameduri, S. (2019). Durability characteristics of lightweight rubberized concrete. *Construction and Building Materials*, 224, 584-599. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.048>

- Pham, T. M., Zhang, X., Elchalakani, M., Karrech, A., Hao, H. y Ryan, A. (2018). Dynamic response of rubberized concrete columns with and without FRP confinement subjected to lateral impact. *Construction and Building Materials*, 186, 207-218. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.146>
- Raffoul, S., Garcia, R., Pilakoutas, K., Guadagnini, M. y Flores Medina, N. (2016). Optimisation of rubberised concrete with high rubber content: An experimental investigation. *Construction and Building Materials*, 124, 391- 404. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.054>
- Rajini Devi, T. y Chandrasekhar Rao, T. (2020). Development of normal grade concrete using waste rubber. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.057>
- Revelo, C. F. y Colorado, H. A. (2021). A green composite material of calcium phosphate cement matrix with additions of car tire waste particles. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 18(1), 182-191. <https://doi.org/10.1111/ijac.13617>
- Shahjalal, M., Islam, K., Rahman , J., Ahmed , K. S., Karim, M. R. y Billah, A. M. (2021). Flexural response of fiber reinforced concrete beams with waste tires rubber and recycled aggregate. *Journal of Cleaner Production*, 278. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123842>
- Si, R., Wang, J., Guo, S., Dai, Q. y Han, S. (2018). Evaluation of laboratory performance of self-consolidating concrete with recycled tire rubber. *Journal of Cleaner Production*, 180, 823-831. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.180>
- Siddika, A., Mamun, M. A., Alyousef, R., Amran , Y. M., Aslani, F. y Alabduljabbar, H. (2019). Properties and utilizations of waste tire rubber in concrete: A review. *Construction & Building Materials*, 224, 711-731. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.108>

- Silveira, P. M., Albuquerque, M., Cassola, S., Bortolucci, A. A., De Paulli, L. y Villa, D. F. (2016). On the mechanical behavior of concrete with rubber tires. [Estudo do comportamento mecânico do concreto com borracha de pneu]. *Revista Materia*, 21(2), 416-428. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620160002.0039>
- Soleimani, S. M., Alaqqad, A. R., Jumaah, A., Mohammad, N. y Faheiman, A. (2021). Incorporation of recycled tire products in pavement-grade concrete: An experimental study. *Crystals*, 11(2). <https://doi.org/10.3390/cryst11020161>
- Su, H., Yang, J., Ghataora, G. S. y Dirar, S. (2015). Surface modified used rubber tyre aggregates: Effect on recycled concrete performance. *Magazine of Concrete Research*, 67(12), 680-691. <https://doi.org/10.1680/macr.14.00255>
- Tang, Y., Wanhui, F., Feng, W., Chen, J., Bao, D. y Li, L. (2021). Compressive properties of rubber-modified recycled aggregate concrete subjected to elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 268. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121181>
- Thomas, B. S. y Chandra Gupta, R. (2016). Properties of high strength concrete containing scrap tire rubber. *Journal of Cleaner Production*, 113, 86-92. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.11.019>
- Thomas, B. S., Gupta, R. C. y Panicker, V. J. (2016). Recycling of waste tire rubber as aggregate in concrete: durability-related performance. *Journal of Cleaner Production*, 112, 504-513. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.046>
- Trilok, G., Sharma, R. K. y Chaudhary, S. (2015). Impact resistance of concrete containing waste rubber fiber and silica fume. *International Journal of Impact Engineering*, 83, 76-87. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2015.05.002>

- Tufail, R. F., Feng, X., Zahid, M., Utashev, N., Mehmood, T., Nawaz, A., Maqsoom, A. y Salahuddin, H. (2020). Statistical modeling of rubberized concrete beams confined by FRP using RSM technique. *Sadhana - Academy Proceedings in Engineering Sciences*, 45(1). <https://doi.org/10.1007/s12046-020-01349-7>
- Valente, M. y Sibai, A. (2019). Rubber/crete: Mechanical properties of scrap to reuse tire-derived rubber in concrete; A review. *Journal of Applied Biomaterials and Functional Materials*, 17. <https://doi.org/10.1177/2280800019835486>:
- Wang, J. y Du, B. (2020). Experimental studies of thermal and acoustic properties of recycled aggregate crumb rubber concrete. *Journal of Building Engineering*, 32. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101836>
- Wurster, S. y Schulze, R. (2020). Consumers' acceptance of a bio-circular automotive economy: Explanatory model and influence factors. *Sustainability (Switzerland)*, 12(6). <https://doi.org/10.3390/su12062186>
- XU, J., Yao, Z., Yang, G. y Han, Q. (2020). Research on crumb rubber concrete: From a multi-scale review. *Construction and Building Materials*, 232. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117282>
- Záleská, M., Pavlík, Z., Čítek, D., Jankovsky, O. y Pavlíková, M. (2019). Eco-friendly concrete with scrap-tyre-rubber-based aggregate – Properties and thermal stability. *Construction & Building Materials*, 225, 709-722. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.168>
- Zhang , Z., Ma , H. y Qian, S. (2015). Investigation on properties of ECC incorporating crumb rubber of different sizes. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 13(5), 241-251. <https://doi.org/10.3151/jact.13.241>

Zhang, B. y Poon, C. S. (2018). Sound insulation properties of rubberized lightweight aggregate concrete. *Journal of Cleaner Production*, 172, 3176-3185.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.044>

Zhu , H., Wang , Z., Xu , J. y Han, Q. (2019). Microporous structures and compressive strength of high-performance rubber concrete with internal curing agent. *Construction and Building Materials*, 215, 128-134.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.184>

Zhu, H., Liang, J., Xu, J., Bo, M., Li, J. y Tang, B. (2018). Research on anti-chloride ion penetration property of crumb rubber concrete at different ambient temperatures. *Construction and Building Materials*, 189, 42-53.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.193>