INVESTIGACIÓN e INNOVACIÓN en INGENIERÍAS
ISSN2344-8652

Aplicación de caucho reciclado para uso en pavimento Rígido: Revisión, análisis y perspectivas de investigación.

Recycled rubber application for use on rigid pavement,analysis and research perspectives.

Lina Johanna Reyes López
Universidad Santo Tomás, Tunja, Colombia.

Jasmith Daniela Sierra Rodríguez
Universidad Santo Tomás, Tunja, Colombia.

Javier Eduardo Becerra Becerra.
Universidad Santo Tomás, Tunja, Colombia.

Resumen

Objetivo: Determinar el estado de investigación referente a usos, comportamiento mecánico del caucho y su interacción como reemplazo en los agregados para establecer las perspectivas de investigación que se pueden desarrollar en las facultades de ingeniería civil en Colombia.

Metodología: tiene en cuenta diferentes fuentes al recolectar la información por cuanto, se indagan bases de datos y búsqueda de bibliografía de documentos científicos, revistas, informes, trabajos de grado, institucionales y personales.

Conclusiones: De los antecedentes tanto nacionales como internacionales encontrados en las diferentes bases de datos, se muestra que predominan aquellos que aplican caucho reciclado como reemplazo del agregado fino y del volumen total de los agregados; tomando una relación agua-cemento promedio de 0.5, como un valor óptimo que garantiza altas resistencias. Se recomienda que el reemplazo del material no debe ser mayor al 10%, para sustitución como agregado fino o agregado grueso.

Palabras claves: Pavimento Rígido, Reciclaje, Caucho, Resistencia, Comportamiento.

Abstract:

Objective: To determine the research status regarding uses, mechanical behavior of rubber and its interaction as a replacement in aggregates to establish the research perspectives that can be developed in the civil engineering faculties in Colombia.

Methodology: it take into account different sources when collecting the information, as databases and bibliographic searches of scientific documents, journals, reports, undergraduate, institutional and personal works are investigated.

Conclusions: From the national and international antecedents found in the different databases it is shown that those that apply recycling as a replacement for fine aggregate and the total volume of aggregates predominate taking an average water-cement ratio of 0.5 as an optimal value that guarantees high resistance. It is recommended that the replacement of the material should not be greater than 10% for substitution as fine aggregate or coarse aggregate.

Keywords: Rigid Pavement, Recycling, Rubber, Resistance, Behavior.

INTRODUCCIÓN:

Los pavimentos rígidos o flexibles corresponden a carpetas de rodadura con capas compuestas por agregados minerales, recubiertos y cementados con asfaltos o cementos; al igual que una base o subbase capaz de resistir grandes esfuerzos tanto temporales como permanentes. Hoy día se ha estado experimentando con pavimentos reciclados en busca de reducir el impacto ambiental, y descubrir si estos materiales pueden llegar a tener unas propiedades mecánicas óptimas para que haya una reducción importante en el consumo de recursos naturales, ya que reducir el calor que se requiere para mezclas en caliente ayuda al ambiente al momento de usarlas en pavimentos [1].

En la actualidad se busca el mejoramiento de pavimentos con materiales reutilizables, que brinden varios usos con el fin de aprovecharlos para la estabilización de vías, reusando materiales que necesitan de un tratamiento y/o disposición adecuada para que no afecten el medio ambiente [2]; por ende se ha estado implementando el uso de materiales reciclados en pavimentos, tales como plástico, desechos de demolición y construcción, caucho, entre otros.

Materiales como el caucho se han estado implementando por su comportamiento mecánico ya que son derivados del petróleo; por ende, la mayor parte de estudios están enfocados en mezclas asfálticas. El caucho natural es un polímero que presenta buenas propiedades mecánicas tales como resistencia al desgarre, abrasión, resistencia al corte y resiliencia [3]; cabe destacar que los polímeros son sustancias macromoleculares que suelen ser naturales o sintéticas, las cuales se caracterizan por tener un alto peso molecular, durabilidad, resistencia mecánica, estructura repetitiva y sufren alteraciones por temperatura, agua y agentes químicos [4].

El uso del caucho mejora propiedades tanto plásticas como elásticas; por ende, su uso en vías favorece a disminuir el agrietamiento, ya que genera mayor adherencia y por sus características ayuda a reducir el ruido que generan los vehículos [5].

La producción de llantas genera emisiones de (CO_2) dióxido de carbono tanto en su producción como en su disposición final, lo que afecta al ecosistema y a la salud humana [6]. La acumulación de llantas de neumáticos que son generados día tras día es tanta

que se estiman alrededor de 1255 millones por año en países como Brasil, México y Estados Unidos; en la mayoría de estos, se queman a cielo abierto, son desechados en quebradas y basureros, o simplemente tienen un almacenamiento inadecuado [7].

El proceso del reciclaje de llantas de neumáticos en Colombia es tan bajo ya que la mayoría no son aptas para reencauche, comparado con otros países tales como Francia, Alemania, España, Portugal e Inglaterra; debido a que por 100 unidades se reencauchan alrededor del 30% a 46% [8], mientras que en Colombia se estiman alrededor de 77 empresas dedicadas al reencauche de neumáticos, donde en su mayoría se dedican a recuperar aquellas con fabricación radial y su porcentaje anual no sobrepasa el 0,3% por cada llanta a reencauchar [9].

El presente, es un artículo de revisión de artículos de investigación, bases de datos, trabajos de grado, tesis doctorales y de maestría y repositorios institucionales, realizados en los últimos veinte (20) años, en los que se muestran las diferentes aplicaciones del caucho reciclado en pavimento rígido. El objetivo del artículo es determinar el estado de investigación referente a usos, comportamiento mecánico del caucho y su interacción como reemplazo en los agregados para establecer las perspectivas de investigación que se pueden desarrollar en las facultades de ingeniería civil en Colombia.

El documento está dividido en tres secciones. En la primera sección se aborda las propiedades y características del caucho reciclado en el campo de la ingeniería, específicamente en el área de pavimentos rígidos. En la segunda se hace el análisis de los resultados obtenidos en las investigaciones consultadas sobre los efectos de la sustitución del caucho reciclado con relación al comportamiento mecánico del pavimento rígido. Por último, se establecen las perspectivas de investigación que se pueden desarrollar en el campo de la ingeniería civil.

Metodología.

La metodología desarrollada para el presente artículo tiene en cuenta diferentes fuentes al momento de recolectar la información, por cuanto se indagan bases de datos y búsqueda de bibliografía de documentos científicos, revistas, informes, trabajos de grado, institucionales y personales. Se toma información cualitativa y cuantitativa que muestra la evolución de la investigación relacionada con la aplicación del caucho reciclado en pavimento rígido en los últimos 20 años, en el contexto nacional e internacional.

De igual manera, se analiza y aborda el problema de caucho reciclado partiendo de lo general a lo particular, centrándose en los parámetros que permiten definir las características del comportamiento mecánico del caucho y su interacción como reemplazo de agregados en el concreto, indagando sobre aspectos desde sus propiedades y características del material hasta los porcentajes de sustitución del caucho reciclado, relación agua cemento, valores de resistencia a la compresión (en PSI).

Propiedades y características del caucho reciclado.

El caucho se divide en dos tipos: Natural y sintético, los cuales se diferencian por que los naturales son extraídos de árboles tropicales tales como el Hevea brasiliensis y Palaquium gutta; y los sintéticos que se obtienen de un proceso de polimerización para generar mezclas variando su peso molecular [10].

El caucho natural tiene la característica de ser un sólido transparente en frío con densidad de 0.950 g/cm³; al ser calentado con temperaturas alrededor de 20°C se ablanda generando una textura viscosa con densidad de 0.934 g/cm³, y por encima de los 60°C puede cristalizarse; por otro lado, cuando se congela llega a tener una estructura fibrosa, susceptible a tener alteraciones en el material por luz y altas temperaturas. Antes de la vulcanización la resistencia del caucho es muy baja con deformación permanente [11]; después del proceso de vulcanización, el material genera una respuesta elástica mejorando las propiedades mecánicas del caucho. Cabe destacar que para vulcanizar el caucho se necesitan de compuestos con presencia de sulfuro de Zinc (ZnS), los cuales aumentan el riesgo de generación de grietas.

Existen diferentes tipos de caucho utilizados para fabricar neumáticos [12]: Están los Polibutadienos (BR), Poliisoprenos sintéticos(IR), caucho natural (NR) proveniente del látex que brinda elasticidad, resistencia mecánica y resistencia a la abrasión; y por último el Estireno Butadieno (SBR), polímero que abarca la mitad del proceso de producción de los cauchos sintéticos, los cuales brindan estabilidad térmica [13]. La mezcla del caucho natural con el butadieno se usa principalmente en áreas industriales, con el fin de disipar vibraciones gracias a su estabilidad elástica; pero cuando tiene contacto con oxígeno y luz, se endurece generando tracción en el material, por lo cual su densidad cambia y disminuye la resistencia del caucho [14].

El deterioro que sufre el caucho revela cambios de aspecto en su textura por alteraciones mecánicas en su dureza y resistencia. Los factores que definen el envejecimiento de estos materiales son: Calor, el que en algunos casos es externo ocasionando deformaciones repetidas que causan calor por histéresis (característica de los elastómeros); oxigeno, con un porcentaje del 20% presente en la atmósfera, generando daños por la exposición del caucho; ozono, porque la atmósfera contiene de 0 a 25 partes de ozono por millón de partes de aire (ppcm), y al ser activo químicamente reacciona rápidamente en cauchos, al tener doble ligadura en su cadena molecular; deformaciones repetidas, ligados a la aparición de grietas en el material, a tal punto de inutilizar el caucho; luz, puesto que el negro humo, uno de los componentes que contiene el caucho, absorbe la radiación ultravioleta (UV) ablandando el material. Por último están los agentes químicos presentando dos casos: Iones de metales pesados (cobre y manganeso), que catalizan las reacciones de oxidación del caucho; y los hidrocarburos

o ácidos, los cuales pueden producir un hinchamiento o una posible degradación o ataques de cargas minerales [15].

Cabe considerar que el espesor del caucho es un elemento que puede afectar el envejecimiento del material, al existir un cambio constante en sus propiedades mecánicas. Cai, Bing, Wang, & Yu [16] en el año 2014, tomaron resultados de ensayos en un lapso de 40 años. Los resultados arrojan que entre mayor sea su espesor, gran parte del material elástico, su módulo de tensión y dureza, aumentan al transcurrir el tiempo; a diferencia de la resistencia a tracción, que disminuye bajo la condición de termo-oxidación, con una evaluación de envejecimiento respecto al criterio de falla de los anillos de sellado; en el que la superficie de contacto es mayor que la presión de trabajo. Sin embargo, que esta información sea exacta es complicado de conseguir a causa de la insuficiencia de información del producto.

Entre los materiales y compuestos más utilizados del caucho se tienen: El negro de humo, encargado de generar buena consistencia; estructura rígida, capaz de resistir altas deformaciones y dureza; fibras de rayón y acero, los cuales dan estructura y fortalece la llanta [17]; azufre, material necesario al momento de vulcanizar el jebe (potasio de alumina y potasa) o goma, y convertirlo en producto útil; caucho sintético y natural, materiales principales para la fabricación; antioxidantes y antiozonantes los que resisten daños de luz solar, oxígeno y ozono, creando durabilidad en el material; y finalmente aceites y grasas para hacer maleable la mezcla para ayudar en la incorporación de los componentes [18].

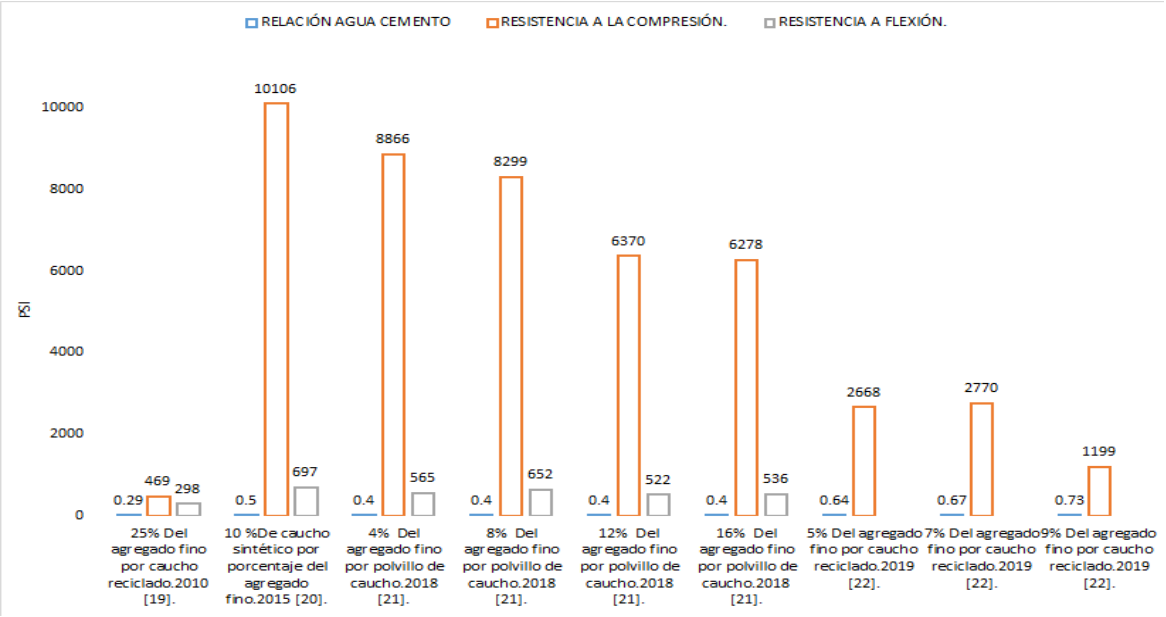
Análisis de resultados de los efectos de sustitución de caucho.

Dentro de las aplicaciones del caucho reciclado se destacan: La elaboración y caracterización tanto de adoquines como de cilindros de concreto, tomando énfasis de las propiedades mecánicas del hormigón al añadir caucho reciclado; ya sea como reemplazo de la proporción fina, gruesa o ambas. A continuación se presentan los trabajos más importantes de la elaboración y caracterización tanto de adoquines como de cilindros de concreto.

- **Adoquines de concreto:**

Los autores López [19] en el año 2010, Cuzco [20] en el año 2015, Yugsi [21] en 2018 y Jaimes y Torres [22] en 2019, reemplazan caucho de diferentes tamaños correspondientes al polvillo de caucho, con un tamaño menor a 0.5 mm y caucho sintético, entre 1-10 mm; sustituyendolos en porcentajes no mayores al 25% del agregado fino, con el objetivo de identificar las variaciones de la resistencia mecánica. En la gráfica 1, se muestran los resultados más relevantes de cada autor, realizando ensayos de resistencia a la compresión y flexión con su respectiva relación agua cemento.

Gráfica 1. Resultados de resistencia a la compresión y resistencia a flexión con caucho como sustitución del agregado fino.



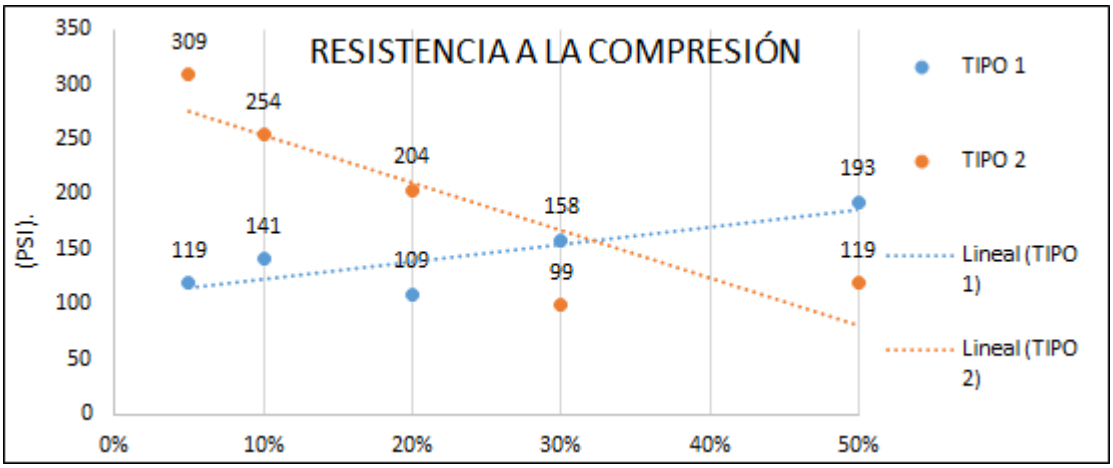
Fuente: Elaboración propia.

Cuzco afirma, que los porcentajes de reemplazo de caucho reciclado deben ser menores o iguales al 10% y Yugsi asegura que para no afectar la consistencia y propiedades del concreto, se debe tener en cuenta un valor cercano al 0.5 de relación agua cemento; ya que un valor muy alto o muy bajo puede afectar la resistencia, generando porosidad en las muestras.

Como el porcentaje de caucho y relación agua cemento influyen directamente en las propiedades mecánicas; la caída de resistencia de López [19] y Jaimes y Torres[22] del gráfico 1, se debe a que López, utiliza un valor alto de reemplazo de caucho y una relación agua cemento muy baja; mientras que Jaimes y Torres utilizan una relación agua cemento muy alta. Respecto a la resistencia a flexión de los autores Cuzco y Yugsi , presentan valores de relación agua cemento similares, manteniendo un rango de resistencia entre 500 a 700 PSI; pero López, utiliza una relación agua cemento tan baja, que no aporta gran resistencia de flexión al concreto.

Almeida [23] en 2011, realiza bloques de mampostería con el objetivo de mitigar el impacto ambiental negativo de los neumáticos de vehículos, reemplazando caucho en fibras, usando dos tipos: El primer tipo de fibra con un diámetro de 1.1 mm y longitud de 5.7 mm, y el segundo con diámetro de 1.4 mm y longitud de 19 mm. En la gráfica 2 se observan los resultados del fallamiento de bloques a compresión reemplazando ambos tipos de fibras.

Gráfica 2. Resultados de resistencia a la compresión con porcentajes de reemplazo del 5%, 10%, 20%, 30% y 50% con fibras de caucho tipo 1 y fibras tipo 2.



Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de resistencia a la compresión, arrojan que a medida que se va adicionando fibras tipo 1 su resistencia aumenta; por el contrario, con la adición de fibras tipo 2 su resistencia disminuye; debido a que las fibras tipo 1 tienen menor tamaño comparadas a las tipo 2. Destacando que la adición de cualquier fibra, ayuda a disminuir el peso del bloque y garantizan una buena adherencia al hormigón.

En el año 2018 Plazas y Gamba [24] tomaron caucho de canchas sintéticas, con el objetivo de realizar una mezcla para bloques con destino vial, para uso en parqueaderos o vías terciarias, usando una relación agua cemento de 0,33, con tres dosificaciones con caucho al 5%, 10% y 15% de reemplazo respecto al peso total, con un tamaño de caucho entre 25 mm y 50 mm, realizando únicamente ensayos de resistencia a flexión, mostrados en la tabla 2.

Tabla 2. Resultados de resistencia a flexión con porcentajes de sustitución del 5%, 10% y 15%.

%	RESISTENCIA A FLEXIÓN.
5%	793 PSI
10%	777 PSI
15%	713 PSI

Fuente: Elaboración propia.

De la tabla anterior, se observa que a medida que se agrega caucho triturado, disminuye la resistencia a flexión; llegando a la conclusión de optar por porcentajes del 5% y 10% de sustitución, como una opción viable en pavimento articulado. Debido a la disminución

de resistencia, los autores recomiendan que estos adoquines sean usados en lugares que no se vean afectados por alto tránsito vehicular.

Concerniente a la utilización de otros tipos de materiales con inclusión de caucho, Izurieta y Rodríguez [25] en el mismo año, fabrican un adoquín con el objetivo de incluir materiales reciclados con botellas de Tereftalato de polietileno(PET), con tamaños entre 1 a 3 mm y grano de caucho reciclado (GCR), con tamaños de 1 a 7 mm; confeccionando moldes con área de 345,60 cm² en tres mezclas: En la primera mezcla, se reemplaza el 50% del agregado fino por (PET) y el 50% del agregado grueso por GCR, con una resistencia a la compresión de 1196 PSI; en la segunda mezcla con las mismas características pero con 60% PET y 40% de sustitución de GCR, arrojando una resistencia a la compresión de 4597 PSI; finalmente, la tercera mezcla con 60% de GCR y 40% PET, soportando una resistencia a la compresión de 1312 PSI, manifestando porosidad y descascaramiento en sus terminaciones. Los autores concluyen que el porcentaje con mayor cantidad de plástico ayuda a aumentar el comportamiento a compresión y el caucho contribuye a mejorar la adherencia al hormigón.

Ledezma y Yauri [26] en el año 2018, llevan a cabo adoquines para uso peatonal con el objetivo de determinar la influencia del polvo de caucho con tamaños menores a 0.5 mm en una mezcla de concreto; reemplazando un 25%, 35% y 40% de polvo caucho, correspondiente al peso total de los agregados. A continuación, se muestran los resultados en la tabla 3, evidenciando los resultados de resistencia a la compresión y a flexión.

Tabla 3. Resultados de resistencia a flexión y compresión con porcentajes del 25%, 35% y 40% de polvo de caucho respecto al peso total de los agregados.

%	RESISTENCIA A FLEXIÓN.	RESISTENCIA A COMPRESIÓN.
25%	298 PSI	495 PSI
35%	85 PSI	128 PSI
40%	42 PSI	113 PSI

Fuente: Elaboración propia.

De lo anterior se evidencia una disminución significativa de las propiedades mecánicas, a medida que aumenta el porcentaje de sustitución de polvo de caucho, tanto a compresión como a flexión. Los autores concluyen, que la inclusión del polvo en la mezcla de concreto no es recomendable en vías, pero si en senderos peatonales; ya que sus resistencias son tan bajas que no pueden soportar cargas vehiculares.

Rey [27] en 2018, realiza adoquines reemplazando del volumen del agregado grueso el 10% y 15% de fibras de plástico y otros con sustitución del 10% y 15% de caucho, manteniendo una relación agua cemento de 0,4; el adoquín consta de 20 cm de largo, 10 cm de ancho y 8 cm de espesor. A continuación se muestran los resultados de los ensayos de resistencia a la compresión y a flexión en la tabla 4.

Tabla 4. Resultados resistencia a flexión y compresión con porcentajes de reemplazo del 10% y 15% de plástico y caucho respecto al volumen del agregado grueso.

	RESISTENCIA COMPRESIÓN.		RESISTENCIA A FLEXIÓN.	
%	PLÁSTICO	CAUCHO	PLÁSTICO	CAUCHO
10%	5660 PSI	5177 PSI	179 PSI	146 PSI
15%	5148 PSI	4736 PSI	106 PSI	128 PSI

Fuente: Elaboración propia.

De lo anterior, se evidencia que al hacer la comparación entre los dos materiales, el concreto obtiene mayor resistencia mecánica al añadir plástico; mientras que a medida que se incrementa el porcentaje de caucho reciclado disminuye la resistencia tanto a compresión como a flexión, ya que a la hora de realizar los bloques, los vacíos se llenan con hule evitando que los agregados cumplan su función.

- **Caracterización de cilindros de concreto.**

En el año 2008 Albano, Camacho, Hernández, Bravo y Guevara [28], buscan analizar las propiedades mecánicas del concreto tradicional adicionando tiras de caucho; usando una relación agua cemento de 0.45; al realizar 3 mezclas que se muestran en la tabla 5. La primera sin un tamaño específico de tiras de caucho, con reemplazo del 5% del peso de los agregados; la segunda con el 5% del agregado fino, con tamaño ≥ 1.19 mm y la tercera con el 5% del agregado grueso con tamaño menor a 1.19 mm.

Tabla 5. Resultados de la resistencia a flexión y compresión con reemplazo de mezcla aleatoria, 5% de reemplazo del agregado fino y 5% de sustitución del agregado grueso.

%	RESISTENCIA A COMPRESIÓN.	RESISTENCIA A FLEXIÓN.
Mezcla sin tamaño específico.	4061 PSI	377 PSI

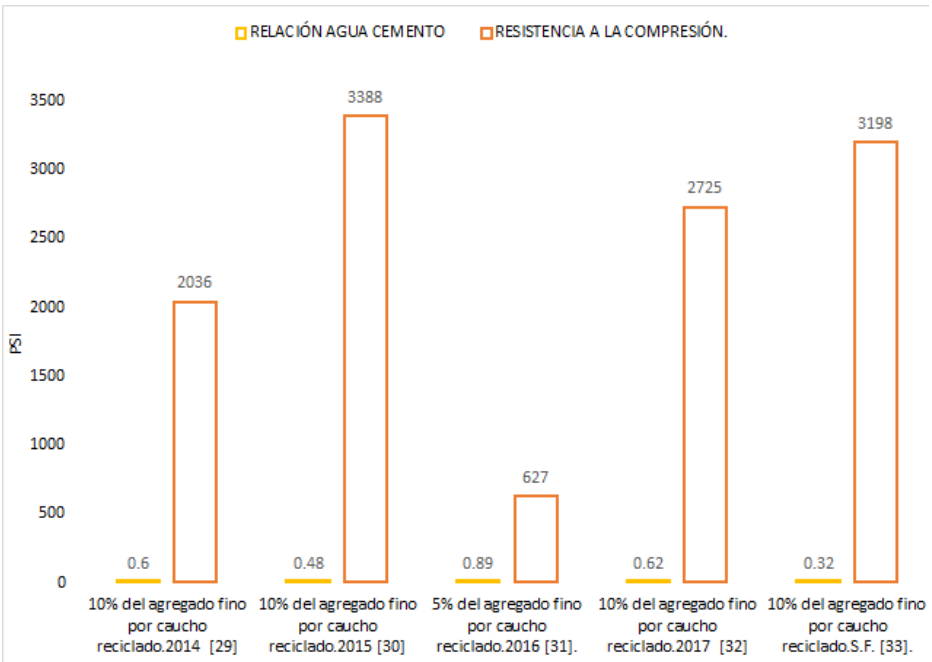
5% de sustitución del agregado fino por fibras de caucho ≥ 1.19 mm.	3190 PSI	261 PSI
5% de sustitución del agregado grueso por fibras de caucho < 1.19 mm.	2900 PSI	275 PSI

Fuente: Elaboración propia.

Los autores concluyen, que el reemplazo de caucho sin un tamaño específico en mezclas de hormigón, presenta mejor comportamiento debido a que las fibras pequeñas llenan vacíos que dejan las fibras grandes; evitando porosidad en los especímenes, tal como sucede con la sustitución del 5% del agregado fino y grueso.

Torres en 2014 [29], Peñaloza en 2015 [30], Jiménez y Mujica [31] en 2016, Cabanillas en 2017 [32] y García, Inga, Moscoso y Ortiz [33] s.f, realizan cilindros de concreto con el objetivo de utilizar caucho como sustituto del agregado fino variando su relación agua cemento, para determinar si este material desechado es apto para fines viales y así contribuir con la disminución del impacto ambiental. La metodología utilizada de los autores se divide de la siguiente manera: Recolectar información, consultar normatividad vigente, selección y obtención de materiales, diseño de mezcla con diferentes relaciones agua cemento, elaboración de especímenes y finalmente ensayos de resistencia a la compresión y a la flexión que se registran en la gráfica 3, presentando los resultados más relevantes.

Gráfico 3. Resultados resistencia a compresión.



Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico 3, se observa el caucho como reemplazo del agregado fino, con valores altos y bajos de relación agua cemento; en el que el cilindro de Jimenez y Mujica, indica menor resistencia a la compresión, debido a una relación de agua cemento muy alta de 0.89, manifestando mayor porosidad. Por otro lado, el espécimen realizado por Peñaloza, usa una relación agua cemento cercana al 0.5, incrementando evidentemente su resistencia a la compresión al presentar menor cantidad de vacíos en su estructura.

Erazo y Ramos [34] en 2015, incorporan caucho triturado recubierto con polvo calcáreo, proveniente de la molienda de rocas minerales como reemplazo del agregado fino, destacando que el uso de este polvo tiene buenas propiedades de adherencia y cohesión; los autores usan una relación agua cemento de 0.53, para establecer su comportamiento con la adición del polvo en el concreto. En la tabla 6, se muestran los resultados de los ensayos de resistencia a la compresión y flexión, comparando el diseño mezcla del 5%, 10% y 15% de la sustitución de caucho, y otra mezcla con los mismos porcentajes pero añadiendo caucho y polvo calcáreo.

Tabla 6. Resultados de resistencia a flexión y a compresión con reemplazó al 5% 10% y 15% de caucho y polvo calcáreo como reemplazo del agregado fino.

%	RESISTENCIA A FLEXIÓN.	RESISTENCIA A COMPRESIÓN.
5% de sustitución del agregado fino por caucho.	240 PSI	2748 PSI
10% de sustitución del agregado fino por caucho.	227 PSI	2549 PSI
15% de sustitución del agregado fino por caucho.	169 PSI	1785 PSI
5% de sustitución del agregado fino por caucho y polvo calcáreo.	248 PSI	2819 PSI
10% de sustitución del agregado fino por caucho y polvo calcáreo.	233 PSI	2638 PSI
15% de sustitución del agregado fino por caucho y polvo calcáreo.	175 PSI	1863 PSI

Fuente: Elaboración propia.

Los autores muestran que la disminución de la resistencia a la compresión en las mezclas con solo reemplazo de caucho, se debe a que la adherencia entre el concreto y la pasta es baja, mientras que aquellas con polvo calcáreo presentan mayores resistencias garantizando mejor adherencia. Respecto a la resistencia a flexión no se observan

cambios significativos ya sea con solo adición de caucho o polvo calcáreo, concluyendo que la mejor mezcla que se comportó tanto a compresión como a flexión, fue la del polvo calcáreo y caucho al 5%.

Guzmán y Guzmán [35] en 2015, evalúan el comportamiento mecánico de las mezclas de concreto adicionando caucho, con tamaños de agregado grueso de 19mm y de agregado fino menores a 1,19 mm, usando una relación agua cemento de 0,48. Dentro de la metodología que realizaron los autores, primero elaboran cilindros de concreto con las correspondientes sustituciones de caucho y después realizan el fallamiento de los testigos obteniendo los resultados que se ilustran en la tabla 7.

Tabla 7. Resultados ensayos a compresión y flexión de reemplazo al 5%, 15% y 25% de caucho como sustitución del agregado fino y grueso.

%	RESISTENCIA A COMPRESIÓN.	RESISTENCIA A FLEXIÓN.
5% del agregado fino por caucho.	3726 PSI	413 PSI
15% del agregado fino por caucho.	2729 PSI	369 PSI
25% del agregado fino por caucho.	2233 PSI	302 PSI
5% del agregado grueso por caucho.	3330 PSI	408 PSI
15% del agregado grueso por caucho.	2477 PSI	329 PSI
25% del agregado grueso por caucho.	1817 PSI	291 PSI

Fuente: Elaboración propia.

Con los resultados obtenidos en la tabla, se observa que el caucho como sustituto del agregado fino obtiene valores de resistencia más altos comparados con los resultados del agregado grueso. De acuerdo a lo anterior, Guzman y Guzman realizan una modelación de un edificio de seis pisos en el software ETABS; tomando el valor con mejor resistencia que fue el de 5% de caucho del agregado fino; encontrándose dentro de un rango tolerable respecto al desplazamiento, pese a que disminuye un poco su resistencia a la compresión y módulo de elasticidad estático comparado con un concreto convencional.

Venegas [36] en el año 2016, realiza cilindros de hormigón sustituyendo el 5%, 10%, 15% y 20% de caucho del agregado grueso y fino, con tamaños entre 0,075 mm hasta 0,48 mm y una relación agua cemento de 0,5. De los porcentajes sustituidos la resistencia a compresión más alta que alcanza es de 1820 PSI correspondiente a el 5% de caucho en

el agregado fino y respecto al agregado grueso, el valor más alto, alcanza los 1948,6 PSI, con un reemplazo del 5% de caucho. Concluyendo que a medida que aumenta el porcentaje de adición de caucho, disminuye la resistencia a compresión, esto se debe a que no hay suficiente adherencia entre los materiales.

En el mismo año Estrada [37], busca estudiar la influencia de la sustitución de caucho de neumáticos como reemplazo del volumen del agregado fino, con tamaños no mayores a 0.6 mm y volumen del agregado grueso entre 0.5 mm y 2,5 mm. Realizan 6 mezclas con una relación agua cemento de 0.45, reemplazando del agregado fino y grueso porcentajes de sustitución de caucho del 5%, 10% y 15%; en cada mezcla se utiliza un aditivo acelerante llamado super plastificante CHRYSO FLUID PREMIA 196 reductor de agua, con el fin de mejorar la trabajabilidad del concreto. En la tabla 8 se observan los resultados de los ensayos de resistencia a compresión y a flexión.

Tabla 8. Resultados de los ensayos a compresión y flexión con sustitución del 5%, 10% y 15% de caucho reciclado con aditivo en reemplazo del agregado fino y grueso.

%	RESISTENCIA COMPRESIÓN.	RESISTENCIA FLEXIÓN.
Concreto+aditivo+5% agregado fino caucho.	3437 PSI	406 PSI
Concreto+aditivo+10% agregado fino caucho.	1899 PSI	291 PSI
Concreto+aditivo+15% agregado fino caucho.	1595 PSI	265 PSI
Concreto+aditivo+5% agregado grueso caucho.	6425 PSI	580 PSI
Concreto+aditivo+10% agregado grueso caucho.	6004 PSI	574 PSI
Concreto+aditivo+15% agregado grueso caucho.	4800 PSI	710 PSI

Fuente: Elaboración propia.

Respecto a la tabla 8, se evidencia la reducción de resistencia a la compresión y flexión, debido a la falta de adherencia y rigidez al homogeneizar los materiales; generando grietas alrededor del caucho disminuyendo la capacidad de tolerar cargas, provocando falla en los cilindros de hormigón, puesto que las partículas de caucho tienden a deformarse comparado con la mezcla convencional con el aditivo.

En el año 2016 Maldonado, Blanco y Ángel [38], realizan testigos de concreto con porcentajes de sustitución del 15% de caucho y otro con el mismo porcentaje de caucho pero incluyendo NaOH (Hidróxido de Sodio); como reemplazo del volumen total de la

mezcla, utilizando una relación agua cemento de 0,54. La inclusión de NaOH en el hormigón, tiene la ventaja de disipar impactos ante esfuerzos de compresión y flexión, por esta razón, los autores utilizan como complemento las partículas de caucho para que los especímenes se pueden deformar sin afectar su estructura; un ejemplo de esto, son los resultados arrojados para determinar su resistencia mecánica, soportando una resistencia de compresión con caucho de 1319 PSI y para la otra mezcla con caucho y NaOH alcanzó los 1583 PSI; respecto a la resistencia a flexión, el testigo con caucho resistió 15.9 PSI, mientras que la de caucho con NaOH soportó 17.4 PSI. Los autores concluyen, que estas mezclas se podrían usar en lugares que no requieran altas deformaciones, apreciando que el comportamiento de la mezcla con caucho y NaOH tiene mejores características, tanto a compresión como a flexión.

Liévano [39] en el mismo año, realiza 4 diseños de mezcla, con el objetivo de aplicar caucho de llanta reciclada en concreto modificado destinado a elementos estructurales, resumiendo su metodología en tres fases: La primera recopila información existente acerca del caucho como sustitución del agregado grueso; la segunda, determina los porcentajes necesarios de aplicación de aditivos como el Sika AER con la función de incorporar aire, Sbr Látex para mejorar la adherencia y superfluidificante Sikament para garantizar resistencias tempranas; y por último se realiza un análisis de resultados. A continuación en la tabla 9 se observan los resultados a flexión y compresión incorporando el 5%, 10% y 15% de caucho, con los aditivos descritos anteriormente variando su relación agua cemento.

Tabla 9. Resultados resistencia a compresión y flexión con sustitución de caucho y aditivo en el agregado grueso.

%	RELACIÓN AGUA CEMENTO	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.	RESISTENCIA A FLEXIÓN.
5% del agregado grueso con SBR LATEX	0.35	5801 PSI	116 PSI
10% del agregado grueso con SIKA AER	0.4	6767 PSI	906 PSI
15% del peso del agregado grueso por caucho y superfluidificante.	0.5	3625 PSI	1884 PSI
5% del agregado grueso por caucho y superfluidificante.	0.5	4858 PSI	754 PSI

Fuente: Elaboración propia.

Se evidencia que en la mezcla 1 y 2, la resistencia a la compresión de estos cilindros se eleva de manera significativa, obteniendo un valor máximo de 6767 PSI a compresión, ya que el Sika AER incorpora aire ayudando a homogeneizar el material. Según Liévano, esta mezcla podría ser usada en vías ya sea como subbase y base o como elemento de soporte para reducir las vibraciones causadas por el tránsito, mientras que la mezcla con mayor resistencia a flexión es la del 15% de sustitución del agregado grueso y superfluidificante que asegura mejor trabajabilidad.

En el año 2018 Farfán [40], después de caracterizar los agregados, propone un diseño de mezcla para cinco diferentes tipos de concreto con fragmentos de diámetros de caucho de 5 mm que se muestran en la tabla 10. El primero es concreto simple con relación agua cemento de 0,6; el segundo, es concreto simple añadiendo un aditivo plastificante llamado Sika CEM, con la función de impermeabilizar el concreto; por último, se elaboran tres mezclas sustituyendo el 5%, 10% y 15% de caucho con plastificante, correspondiente al volumen total de los agregados. Cabe destacar que en las mezclas con aditivo plastificante se usa una relación agua cemento de 0.48.

Tabla 10. Resultados de la resistencia a la compresión y flexión con porcentaje de caucho con plastificante al 5%,10% y 15%.

%	RESISTENCIA COMPRESIÓN.	RESISTENCIA FLEXIÓN.
Simple	3115 PSI	1188 PSI
Simple + aditivo	4206 PSI	1450 PSI
Simple + aditivo + 5% caucho	3107 PSI	1012 PSI
Simple + aditivo + 10% caucho	3020 PSI	1164 PSI
Simple + aditivo + 15% caucho	2828 PSI	1106 PSI

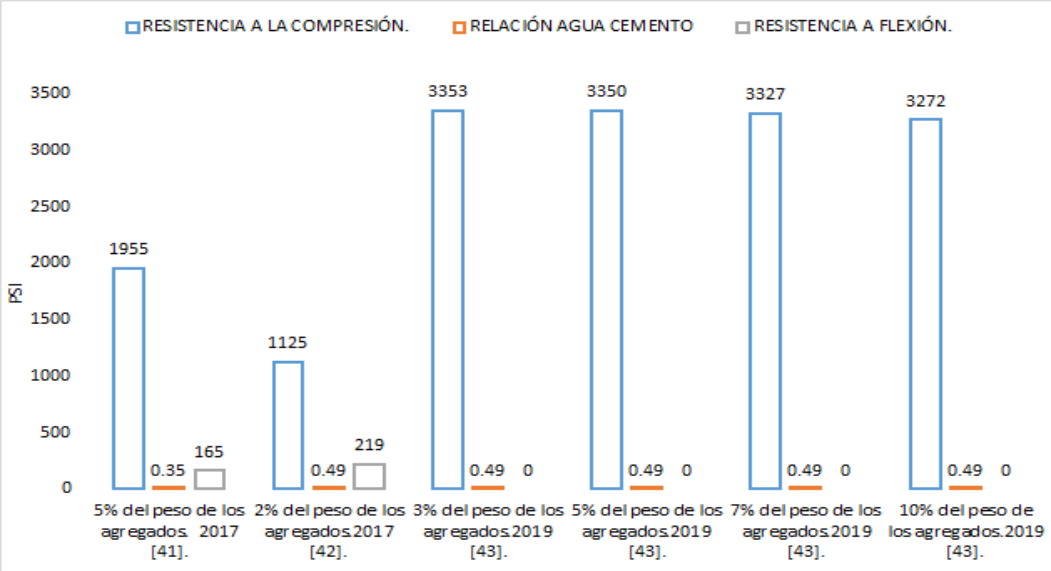
Fuente: Elaboración propia.

De la tabla anterior se evidencia, que la mezcla entre caucho reciclado y aditivo plastificante, fortalece significativamente la resistencia mecánica hasta en un 10%, ya que superó a las otras muestras con un valor de 4206 PSI. Según Farfán esto se debe a que los plastificantes son reductores de agua y aceleran la resistencia al concreto; respecto a las muestras de caucho solo las del 5% de resistencia a la compresión y 10% de resistencia a flexión, obtuvieron buena resistencia en sus propiedades mecánicas.

Por otro lado Soto y Marín [41] en el año 2019, González [42] en 2017 y Pérez y Arrieta en 2017 [43], tienen el objetivo de analizar el comportamiento del concreto con la

sustitución de caucho en el peso de los agregados, para ser usado en estructuras. Respecto a la metodología, realizan una caracterización de los agregados finos, gruesos y de caucho, elaborando ensayos de granulometría, desgaste en la máquina de los Ángeles y densidad; en base a esto, se realiza el diseño de mezcla para determinar el porcentaje adecuado de sustitución de caucho, que se debe reemplazar en el peso de los agregados, obteniendo los siguientes resultados plasmados en el gráfico 4.

Gráfica 4. Resultados ensayos a compresión y flexión con caucho como sustitución del peso de los agregados.



Fuente: Elaboración propia.

Al sustituir el porcentaje de los agregados por caucho, se observa que la resistencia más alta fue del 3% de sustitución del peso total de los agregados, con una relación de agua cemento de 0.49; esta resistencia se debe a la poca porosidad, adherencia y absorción de agua presentada por el caucho al reducir puntos de falla, recalcando que el caucho permite grandes deformaciones por sus propiedades elásticas, disminuyendo la aparición de grietas y permitiendo que el cilindro con reemplazo de caucho absorba mayor carga.

En el año 2019 Ordoñez, Loor & Salvatierra [44], realizaron la comparación entre un concreto convencional y uno con porcentajes de caucho reciclado en 5 probetas; la primera de ella con hormigón tradicional, las siguientes dos reemplazando el 5% y 10% de caucho reciclado en el agregado fino, con una relación agua cemento de 0.45 y las dos últimas, con agregado grueso con los mismos porcentajes pero con una relación agua cemento de 0,5. Dando como resultado, que con 5% de sustitución del agregado fino, la resistencia a compresión fue de 3385 PSI y de 1977 PSI al 10%. Por otra parte, en el reemplazo del agregado grueso al 5%, su resistencia alcanzó los 2289 PSI y al 10% resistió 1834 PSI. Los autores recomiendan utilizar estas mezclas en elementos no

estructurales, como pavimentos livianos y ciclo vías, debido a que la incorporación de caucho favorece a aquellos elementos que trabajan a flexión; de acuerdo a la resistencia a la compresión, los cilindros no representan un valor óptimo comparado con una mezcla tradicional.

En el año 2020 los autores Chávarri y Falen [45], buscan elaborar un pavimento a base de caucho reciclado, con el objetivo de analizar las propiedades del caucho, para establecer un diseño de mezcla y granulometría como reemplazo del agregado fino; tomando dos tipos de tamaño de caucho: El primero con tamaño de 25 mm, se reemplaza el 10%, 20%, 30%, 40% y 50% y el segundo de 20mm, se reemplaza el 10%, 20%, 30% y 40%, utilizando una relación agua cemento de 0.45. A continuación en la tabla 11 se muestran, los resultados de resistencia a la compresión.

Tabla 11. Resultados resistencia a la compresión con tamaño de caucho de 20 mm, y 25 mm.

%	RESISTENCIA COMPRESIÓN.	
	25mm	20 mm
10%	5504 PSI	5049 PSI
20%	4523 PSI	4229 PSI
25%	No realiza.	3712 PSI
30%	3754 PSI	3456 PSI
40%	2787 PSI	2147 PSI
50%	2119 PSI	No realiza.

Fuente: Elaboración propia.

Por lo anterior, se observa que a los 28 días la resistencia a la compresión al 10% de sustitución de caucho con tamaño de 25 mm, es la más alta; ya que en los cilindros hay un aumento de aire a medida que se incorpora el caucho. Los autores afirman que existe una disminución del 13% de resistencia a la compresión, por cada 10% de reemplazo del árido fino, comparado con un cilindro convencional, debido a que su resistencia disminuye cada vez más, al incorporar un alto porcentaje de caucho reciclado en las muestras.

Perspectivas de investigación.

En este último apartado, se establecen las perspectivas de investigación que se pueden desarrollar en el campo de la ingeniería civil, acerca del impacto ambiental que ha causado este material, tomando referentes de empresas que se han concientizado de esta problemática ambiental; puesto que año tras año millones de llantas o neumáticos de automóviles, tracto mulas, camiones y demás tipos de transporte, son desechados a la intemperie provocando una afectación ambiental significativa; ya que muy pocas personas y empresas, no pueden tratar este material por sus propiedades elastoméricas, produciendo daños nocivos y tóxicos, lo que supone una gran afectación en la salud de la humanidad [46].

De acuerdo a un estudio realizado por la importadora nacional de llantas (IMLLA), en Colombia se importan al año alrededor de 5.3 millones de llantas para automóviles, camionetas y camiones livianos y pesados, principalmente de las marcas Toyo Tires y Dunlop, dos fábricas Japonesas independientes, que son las más usadas a nivel nacional, ubicadas en seis puntos de distribución del país; Toyo Tires y Dunlop se encuentran como una de las mejores compañías productoras de llantas en el mundo ocupando el 4% del mercado; con registros de importación de 40 mil unidades hasta 2015 [47].

Según [48] Ortiz en 2015, en Boyacá no existe gran demanda de empresas productoras de neumáticos, pero sí aquellas dedicadas a la comercialización y distribución de llantas y lubricantes, que son de vital importancia en la economía del municipio de Duitama, conocida como un corredor en la industria del motor; en la cual, a la localidad llegan todo tipo de vehículos, principalmente aquellos destinados a transporte de pasajeros, maquinaria pesada y de carga, realizando actividades de reconstrucción y ensamble de carrocerías en el municipio.

En el año 2017 Parra, González y Sandoval [49], realizan algunos de los procesos de reciclaje del caucho de automóviles, correspondiente a una trituración atmosférica criogénica, en el cual se obtienen dos tamaños, gruesos y finos; los finos obtenidos de la desvulcanización, modificación de mezclas y resinas de intercambio iónico, mientras que los gruesos, se obtienen a partir de procedimientos de pirólisis.

A partir de esta problemática TIRES SpA [50], una empresa europea reconocida mundialmente, toma de ejemplo países como la Unión Europea, donde anualmente con 3.250.000 toneladas de piezas desechadas, destinan el 50% de los desechos al reciclaje, modificando el caucho en forma de gránulos y polvo, reutilizando este insumo en industrias como: Calzado, moda, campos deportivos (canchas sintéticas), parques públicos y sector construcción.

En 2017, se creó una de las plantas de reciclaje de llantas usadas de los automóviles más grandes de Colombia, que fue fundada por el Cerrejón e industria de reciclaje en Albania, municipio de la Guajira. Roberto Junquito, presidente de esta compañía, aclaró que la capacidad que tenía la empresa de triturar y procesar llantas anualmente era cerca a las 2400 unidades [51]. En cuanto a los programas más grandes que existen en el país que se dedican a la recuperación de llantas usadas, se encuentra la corporación Rueda Verde, que ha creado estrategias para un sistema sostenible de recuperación y recolección selectiva de caucho, para ayudar con el medio ambiente[52].

Actualmente, se han realizado varios estudios centrados en aumentar la productividad del reciclaje y la trituración del caucho para convertirlo en materia prima [53], formulando y diseñando propuestas de negocio para la disposición y distribución de las llantas, con sus respectivos requerimientos técnicos; ya que muchos pretenden realizar un montaje de planta trituradora disminuyendo el problema ambiental, analizando el plan de mercado operacional, administrativo y financiero [54]; creando una responsabilidad social ambiental en la industria del caucho, buscando métodos y estrategias enfocadas en empresas que trabajan con este tipo de material contemplando los impactos económicos [55].

Conclusiones:

Al consultar diferentes autores que han ensayado con la aplicación del caucho en el concreto, se puede afirmar que este puede ser reemplazado en parte de los agregados en una mezcla de hormigón, mediante el uso de cilindros y adoquines utilizados en vías con tránsito liviano o bajo. Al añadir grandes porcentajes de caucho reciclado a los cilindros, su desempeño disminuye al no alcanzar las resistencias de un concreto convencional, sin embargo, al adicionar aditivos o acelerantes mejoran los resultados en cuanto a ensayos de compresión y flexión, además de alivianar el peso de la mezcla.

De los antecedentes tanto nacionales como internacionales encontrados en las diferentes bases de datos, se muestra que predominan aquellos que aplican caucho reciclado como reemplazo del agregado fino y del volumen total de los agregados; tomando una relación agua-cemento promedio de 0.5, como un valor óptimo que garantiza altas resistencias. Se recomienda que el reemplazo del material no debe ser mayor al 10%, para sustitución como agregado fino o agregado grueso.

Con relación a la perspectiva de investigación, se concluye que la mayoría de estudios se inclinan hacia la evaluación de la sustitución de caucho como reemplazo de agregados finos y gruesos en especímenes de concreto, con el fin de disminuir progresivamente la problemática ambiental en el país. A pesar de que diferentes organizaciones y empresas en Colombia, han realizado estudios para darle una solución a esta problemática, no han sido suficientes para permitir un mejor aprovechamiento del

neumático desechado, por ejemplo utilizando sus características y propiedades en materiales de construcción en el área de la ingeniería civil y de esta manera mitigar el daño ambiental.

Referencias bibliográficas

1. P. J. Hernández, “Evaluación Del Comportamiento Mecánico de Mezclas Asfálticas Utilizando Pavimento Reciclado, Ligantes Hidráulicos y Emulsiones Asfálticas” ,Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá, 2014. DOI: http://bdigital.unal.edu.co/50476/1/80898105.2014.pdf.

2. M. S. Borsani, “Materiales Ecológicos estrategias, alcance y aplicación de los materiales ecológicos como generadores de hábitats urbanos sostenibles”, 2011, España.DOI:https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/13759/Borsani,%20Mar%C3%ADa%20Silvia.pdf

3. A. F. Torres, “Vulcanización de elastómeros con peróxidos orgánicos, Consejo superior de Investigaciones científicas”, Madrid, España, 2009. DOI:https://eprints.ucm.es/10597/1/T31825.pdf

4. F. L. Carrasquero, “Fundamentos de polímeros, Universidad de los Andes”, Venezuela, 2004.
DOI:https://www.researchgate.net/publication/262639386_FUNDAMENTOS_DE_POLIMEROS

5. J. A. Tapias y S. A. Ramírez , “Evaluación del comportamiento mecánico de un concreto no convencional adicionando caucho reciclado”, Colombia, 2018. DOI:https://repositorio.unibague.edu.co/handle/20.500.12313/735

6. N. A. Jaime, “Métodos de reutilización de llantas usadas: selección y elaboración de nuevos productos” , Colombia, 2018. DOI:http://repositorio.uniagustiniana.edu.co/bitstream/handle/123456789/221/JaimeHidalgo-NataliaAlejandra-2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y

7. G. Castro, “Reutilización, reciclado y disposición final de neumáticos”, 2007. DOI:https://campus.fi.uba.ar/file.php/295/Material_Complementario/Reutilizacion_Reciclado_y_Disposicion_final_de_Neumatico.pdf

8. I .Mesa y S. Patarroyo, “Plan de negocio dirigido a la recuperación de neumáticos usados y comercialización de grano de caucho reciclado (GCR) en la ciudad de Bogotá” , Colombia, 2016. DOI:https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/14107/PatarroyoDiazSamuel2016.pdf;jsessionid=FF3E84AB3C4E703FE591B84C3C88E293?sequence=1

9. S. A. Burbano y O. F. Centeno, “Caso aplicado de análisis de mercado para el negocio de reencauche en Colombia, como alternativa de solución al desecho generado por las llantas de camión”, Colombia, 2016. DOI:https://repository.cesa.edu.co/bitstream/handle/10726/1168/TMBA00375.pdf?sequence=2&isAllowed=y

10. M. A. Mansilla, “Influencia de la microestructura en las propiedades mecánicas y térmicas de mezclas de caucho natural y caucho estireno butadieno”, 2012, Argentina, DOI:https://bibliotecadigital.exactas.uba.ar/download/tesis/tesis_n5117_Mansilla.pdf

11. G. Castro, “Materiales y compuestos para la industria del neumático”, 2008. DOI:https://campus.fi.uba.ar/file.php/295/Material_Complementario/Materiales_y_Compuestos_para_la_Industria_del_Neumatico.pdf

12. G. Castro, “Reutilización, reciclado y disposición final de neumáticos, departamento de ingeniería mecánica F.I.U.B.A”, 2007. DOI:https://campus.fi.uba.ar/file.php/295/Material_Complementario/Reutilizacion_Reciclado_y_Disposicion_final_de_Neumatico.pdf

13. C. A. Castillo, “Preparación y estudio de propiedades en nanocompositos de caucho natural con refuerzo híbrido de montmorillonita y nanotubos de carbono de pared múltiple”, Chile, 2014. DOI:http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/129987/Preparacion-y-estudio-de-propiedades-en-nanocompositos-de-caucho.pdf?sequence=1&isAllowed=y

14. B. W. Moon, J. LEE and C. S. Seok , ”Study on the Aging Behavior of Natural Rubber/Butadiene Rubber (NR/BR) Blends Using a Parallel Spring Model”,2018, Korea. DOI: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6404147/

15. J. Mandelbaum, “Envejecimiento de artículos de caucho”, Industria y tecnología en América Latina”, Revista SLTCaucho, edición. 6, p. 12-13, Marzo, 2015. DOI: https://issuu.com/sltc/docs/revista-sltcaucho-marzo-2015

16. Y. Cai, M. X. Bing, H. Wang, & Z. Yu, “Impact of Thickness on Rubber Aging Life”, Beihang University, 2014, China . DOI: https://www.researchgate.net/publication/281026313_Impact_of_Thickness_on_Rubber_Aging_Life

17. W. U. Yepes, “Efecto del sistema de vulcanización en la cinética de reacción y en las propiedades físico-químicas de un caucho natural colombiano”, Colombia, 2014. DOI:https://repository.eafit.edu.co/xmlui/bitstream/handle/10784/2836/William_UrregoYepes_2014.pdf?sequence=1&isAllowed=y

18. A. M. González, “Aplicación del caucho reciclado como solución constructiva ecológica”, trabajo de grado, universidad politécnica de Valencia, 2015. DOI:https://riunet.upv.es/bitstream/handle

19. S. A .López, Uso de polvo de llanta como agregado fino en una mezcla de concreto para la elaboración de adoquines, 2010, Guatemala.DOI:http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_3195_C.pdf

20. A. M. Cuzco, Análisis comparativo de las propiedades mecánicas entre el adoquín convencional y el adoquín de caucho, 2015. DOI:http://200.12.169.19/bitstream/25000/5156/1/T-UCE-0011-194.pdf

21. A. E. Yugsi Toapanta, Análisis de las propiedades mecánicas de adoquines elaborados con hormigón y polvillo de caucho de neumáticos reciclados y su correlación con adoquines convencionales, Ecuador, 2018, DOI: http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/14416

22. L. A. Jaimes y K. P. Torres, Aprovechamiento del GCR para la elaboración de adoquines ecológicos como alternativa a la industria constructiva, Colombia ,2019. DOI:https://revistas.elpoli.edu.co/index.php/pol/article/view/1520/1222

23. N. G. Almeida, Utilización de fibras de caucho de neumáticos reciclados en la elaboración de bloques de mampostería para mitigar el impacto ambiental en el Cantón, Ambato, Ecuador, 2011, DOI:http://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/4346/1/Tesis%20670-Almeida%20Salazar%20Neyva%20Gissela.pdf

24. S. M. Plazas y G. A. Gamba, Caracterización de las propiedades mecánicas de adoquines de concreto con adición de residuo de caucho reciclado producto de llantas usadas, Colombia, 2015. DOI:http://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/3201

25. J. S. Izurieta y A. P. Rodríguez, Elaboración de un adoquín para revestimiento de camineras a partir del plástico pet 1 y caucho reciclados, Ecuador, 2018. DOI:http://repositorio.ulvr.edu.ec/bitstream/44000/2507/1/T-ULVR-2303.pdf

26. F. Ledezma y W. Yauri, "Diseño de mezcla del concreto para elaboración de adoquines con material reciclado de neumáticos en la provincia de Huancavelica" ,Perú,2018.DOI:http://repositorio.unh.edu.pe/handle/UNH/1800

27. E. D. Rey, "Propiedades físico-mecánicas de adoquines con polipropileno y caucho al 10% y 15% de reemplazo del agregado grueso, para su utilización en tránsito liviano en pavimentos articulados", Perú, 2018, DOI:https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/13848/Rey%20Angulo%20Erick%20Daniel.pdf?sequence=1&isAllowed=y

28. C. Albano, N Camacho, M. Hernández, A. J. Bravo y H. Guevara, "Estudio de concreto elaborado con caucho de reciclado de diferentes tamaños de partículas", Venezuela, 2008, DOI: https://es.slideshare.net/JuanCh5/concreto-de-caucho

29. H. A. Torres, "Valoración de las propiedades mecánicas y de durabilidad de concreto adicionado con residuo de llantas de caucho", 2014.DOI:https://www.semanticscholar.org/paper/Valoraci%C3%B3n-de-propiedades-mec%C3%A1nicas-y-de-de-con-de-Ospina-Andr%C3%A9s/f59f0e94f0b433827647febae698e79ce63b3bcf

30. C. R .Peñaloza, "Comportamiento mecánico de una mezcla para concreto reciclado usando neumáticos triturados como reemplazo del 10% y 30% del volumen del agregado fino para un concreto con fines de uso estructural" ,2015.DOI:https://repository.ucatolica.edu.co/handle/10983/2501

31. I. Suárez y E. A. Mujica, bloques de concreto con material reciclable de caucho para obras de edificación, Perú 2016. DOI:http://repositorio.unsaac.edu.pe/handle/UNSAAC/1336

32. E. R. Cabanillas, Comportamiento físico mecánico del concreto hidráulico adicionado con caucho reciclado, Perú, 2017 DOI:https://1library.co/document/yj741jmy-comportamiento-fisico-mecanico-concreto-hidraulico-adicionado-caucho-reciclado.html

33. M. J. García, D. F. Inga, F.A Moscoso y D. W. Ortiz, “Elaboración de hormigones con caucho reciclado”, S.F, DOI:http://www.amica.com.mx/issn/Tabasco/AMI-143.pdf.

34. H. F. Erazo y N. Ramos, Estudio del comportamiento mecánico del concreto, sustituyendo, parcialmente el agregado fino por caucho molido recubierto con polvo calcáreo, Colombia, 2015.DOI:http://vitela.javerianacali.edu.co/bitstream/handle/11522/3431/Estudio_comportamiento_mecanico.pdf?sequence=1

35. Y. J. Guzmán y E. L. Guzmán, Sustitución de los áridos por fibras de de caucho de neumáticos reciclados en la elaboración de concreto estructural en Chimbote, Perú.2015, DOI:http://repositorio.uns.edu.pe/bitstream/handle/UNS/2717/42984.pdf?sequence=1&isAllowed=y

36. L. C. Venegas, Evaluación del comportamiento del grano de caucho de llanta reciclada en la producción de concreto para la empresa Argos, 2016 DOI:http://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/432

37. J. C. Estrada, Estudio de propiedades físico mecánicas y de durabilidad del hormigón con caucho, 2016.DOI:https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/85500/TESIS%20DE%20MASTER.pdf

38. M. Maldonado, J. Blanco y S. Ángel, Análisis de la influencia del uso de caucho reciclado tratado con NaOH usado como adición en concreto normal,2016. DOI:https://docplayer.es/62177952-Analisis-de-la-influencia-del-uso-de-caucho-reciclado-tratado-con-naoh-usado-como-adicion-en-concreto-normal.html

39. L. M .Liévano, Análisis, estudio y concepción en la aplicación de concreto con agregado de llanta neumática reciclada en elementos arquitectónicos, Colombia, 2017, DOI:http://bdigital.unal.edu.co/61143/

40. E. L. Farfán, Caucho reciclado en la resistencia a la compresión y flexión de concreto modificado con aditivo plastificante, 2018.DOI:https://scielo.conicyt.cl/pdf/ric/v33n3/0718-5073-ric-33-03-241.pdf

41. M. Soto y J. P. Marín, Análisis del concreto con caucho como aditivo para aligerar elementos estructurales, 2019. DOI:https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/17858/ANALISIS%20DEL%20CONCRETO%20CON%20CAUCHO.pdf?sequence=1&isAllowed=y

42. J. G. González, Utilización de granulado de caucho reciclado como adición para concreto permeable para uso en estacionamientos vehiculares, 2017.DOI:http://www.repositorio.usac.edu.gt/8594/1/Jose%20Gerardo%20Gonz%C3%A1lez%20Qui%C3%B1onez.pdf

43. J. Pérez y Y. L .Arrieta, Estudio para caracterizar una mezcla de concreto con caucho reciclado en un 5% en peso comparado con una mezcla de concreto tradicional de 3500 PSI, 2017. DOI:https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/15486/1/Tesis.pdf

44. M. A. Ordoñez. F. Loor y A. B. Salvatierra, Análisis comparativo del comportamiento mecánico del hormigón tradicional vs. Hormigón con inclusión de caucho reciclado, Ecuador, 2019. DOI: http://repositorio.ulvr.edu.ec/handle/44000/2884

45. L. A. Chávarri y J.A Falen, Propuesta de concreto eco-sostenible con la adición de caucho reciclado para la construcción de pavimentos urbanos en la ciudad de Lima, Perú2020,DOI:https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/651661

46. Tires S.p.A, Introducción al reciclaje de neumáticos usados, 2013. DOI:http://www.tiresspa.com/es/empresa.html

47. K. Doku, El heraldo, ”Colombia importa 5,3 millones de llantas al año: IMLLA” 2016, DOI:https://www.elheraldo.co/economia/colombia-importa-5-millones-300-mil-llantas-al-ano-imlla-259135

48. D. J. Ortiz “Diagnostico del área financiera del sector lubricantes y llantas del departamento de Boyacá” , Tunja, Colombia, facultad de ciencias económicas y administrativas 2015. DOI: https://repositorio.uptc.edu.co/bitstream/001/1445/2/TGT-194.pdf

49. P. Parra, A. González y J. Sandoval, Estado del arte de métodos de gestión de residuos de llantas usadas en Colombia, 2017.DOI:http://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/6442/1/COL0033177-2017-1-IM.pdf

50. N. A. Jaime, Métodos de reutilización de llantas: Selección y elaboración de nuevos productos, 2017.DOI:http://repositorio.uniagustiniana.edu.co/bitstream/handle/123456789/221/JaimeHidalgo-NataliaAlejandra-2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y

51. L. Patiño y M. Rodríguez, Llantas usadas: materia prima para pavimentos y múltiples eco aplicaciones, revista Ontane, 5,p 73-114, 2017,DOI: https://journal.universidadean.edu.co/index.php/Revistao/article/view/2004

52. R. Suaréz, El reciclaje de llantas, un mercado que todavía falta por explorar, *El tiempo.*https://www.eltiempo.com/vida/ciencia/reciclaje-de-llantas-en-colombia-52722

53. C. Pinilla, D.C Torres, Plan de negocio de una empresa trituradora de llantas usadas para la industria asfaltera en Bogotá, Colombia, 2015, DOI:http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/3998/1/Trabajo%20de%20grado.pdf

54. C. Pinilla, D.C Torres, “proyecto de inversión: Implementación y puesta en marcha de una planta recicladora y trituradora de llantas en desuso para elaboración y comercialización del caucho granulado en el distrito de carabayllo-ciudad de lima 2018, Perú, 2018, DOI:http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/3998/1/Trabajo%20de%20grado.pdf

55. L. C. Avendaño y N. Echeverri, ”Responsabilidad social ambiental en la industria del caucho en Colombia”, trabajo de investigación ,Institución Universitaria Esumer, Medellin,2014,DOI:http://repositorio.esumer.edu.co/jspui/bitstream/esumer/1297/2/Esumer_responsabilidad.pdfra