

Aprovechamiento del grano de caucho reciclado para la elaboración de adoquines ecológicos como alternativa a la industria constructiva

Using Recycled Rubber Grain for Making Ecological Paving Stones as an Alternative for the Construction Industry

Recibido: 20 de noviembre de 2020. Recibido en revisión: 04 de diciembre de 2020.

Aceptado: 08 de febrero de 2021.

DOI: <https://doi.org/10.33132/27114260.1911>

Luis Ángel Jaimes Leal, Karina Paola Torres Cervera.

Pedro Juan Torres Flores¹²

Resumen

Este trabajo tuvo desarrollo a partir de la hipótesis de agregados reciclados, Grano de Caucho Reciclado sustituyendo el agregado fino, como ingrediente de morteros en la fabricación de elementos constructivos, ejemplo de ello, los adoquines. Su contenido abarca los resultados de la investigación sobre las propiedades fisicoquímicas de distintas dosificaciones cuyo contenido de árido se sustituyó parcialmente por GCR en distintos porcentajes. Se evidencia la evaluación de las propiedades mecánicas de las dosificaciones en estudio con las réplicas convencionales mediante ensayos de absorción, flexo-tracción y compresión.

Se determinó que puede brindar una alternativa diferente para el reciclaje ya que el GCR puede ser usado como posible sustituto de agregado fino; se obtuvieron adoquines ecológicos con 5, 7 y 9 por ciento en sustitución de arena, que presentaron una absorción y resistencia a la flexión por encima de lo exigido por la norma técnica colombiana.

¹² Facultad de Ingenierías y Tecnologías, Universidad Popular del Cesar, Valledupar, Colombia. luisjaimes2510@gmail.com, kari-naptorres@unicesar.edu.co <https://orcid.org/0000-0003-2646-2871>. pedrotorres@unicesar.edu.co

Palabras clave: Agregados reciclados, elementos constructivos, experimentación, dosificación, Norma Técnica Colombiana (NTC).

Abstract

This work derives from the hypothesis that recycled aggregates, recycled rubber grain (RRG), can replace fine aggregates as an ingredient of mortars in manufacturing construction materials, e.g., paving stones. Its content includes the research results on the physicochemical properties of different dosages whose aggregate content was partially replaced by RRG in different percentages. It also assesses the mechanical properties of the studied dosages with the conventional replicas using absorption, flexotraction, and compression tests. Thus, we could determine a different alternative for recycling since RRG can be used as a potential substitute for fine aggregate. Ecological paving stones were obtained with 5, 7, and 9 percent sand substitution, showing absorption and bending strength levels above the requirements of the Colombian Technical Standard.

Keywords: Recycled aggregates, experimentation, dosage, construction elements, Colombian Technical Standard (NTC).

Introducción

El sector transporte es una herramienta masiva a través de la cual se logra la movilización de productos de uso personal, alimenticios y, normalmente personas. Según los estudios del departamento técnico administrativo del medio ambiente, en nuestro país esta actividad económica, aparte de crear una gran cantidad de empleos y ser el sustento de miles de familias, también ocasiona un grave impacto sobre los recursos naturales, ya que es el sector que más consume deri-

vados del petróleo como combustibles y lubricantes; industrializa gran cantidad de residuos como llantas, aceites y baterías, además de generar 80 % de la contaminación atmosférica en ciudades que cobijan grandes asentamientos poblacionales como es el caso de Bogotá (Guía Para el Manejo de Llantas Usadas, 2006).

Durante muchos años mientras un porcentaje de los neumáticos ha sido re-procesado y utilizado, otro tanto de estos ha sido ubicado en lugares de disposición especial o normalmente botados a cielo

abierto y quemados, lo que en consecuencia crea escenarios devastadores visualmente y sirven como hábitat para proliferación de vectores como ratones, moscas y dengue, siendo estos de letal afectación sobre la salud pública de la población aledaña (Cardona y Sánchez, 2011).

Es de subrayar que el problema ambiental no solo recae en la explotación de asentamientos mineros; también destaca la generación de residuos como llantas, los cuales aumentan proporcionalmente con el crecimiento del parque automotor (Guía Para el Manejo de Llantas Usadas, 2006).

En todo caso, la generación desmedida de llantas y escasez de recursos pétreos puede crear una medida para contribuir al beneficio ambiental con la reutilización de las llantas para elaboración de adoquines.

De acuerdo con esto, primero identificamos aspectos e impactos ambientales del post-consumo de la llanta, luego explicamos la elaboración de un adoquín ecológico con dosificaciones más apropiadas de grano de caucho reciclado, arena, cemento y, finalmente, evaluamos sus propiedades y características mediante pruebas de laboratorio (Prueba de absorción de agua, resistencia a flexo-tracción y com-

presión) conforme a lo establecido en la norma técnica colombiana (NTC,2017).

Este proyecto se enfoca en evaluar que tan viable es incorporar residuos provenientes de llantas como material para la elaboración de adoquines y la viabilidad técnica de este propósito. La caracterización tanto física como mecánica de este agregado reciclado se ejecutó ateniendo lineamientos de saneamiento ambiental donde se propone el aprovechamiento de llanta residual en diseño de nuevos materiales para la construcción. Por último, proponemos distintos usos en parques recreacionales, andenes peatonales y zonas de tránsito vehicular pasivo.

Metodología

La tipología del estudio es experimental o cuasi experimental. Se probaron distintas concentraciones de material tipo caucho y el enfoque es cuantitativo. Con el fin de corroborar los resultados obtenidos se empleó un diseño de experimento completamente aleatorizado, ya que la fuente de variabilidad perturbadora se conoce y es controlable (condiciones ambientales), no hay un gradiente que afecte, se mantiene constante.

El enfoque de carácter cuantitativo ayudó a cuantificar el problema y entender que tan generalizado está mediante

la búsqueda de resultados proyectables que normalmente buscan medir la magnitud y van tras datos estadísticos que se interpretan objetivamente.

Para la evaluación de impactos ambientales se utilizó la metodología propuesta por Conesa la cual plantea la obtención de valores a partir de la valoración cualitativa y cuantitativa de los impactos ambientales identificados, obteniendo una matriz de interacción para los impactos ocasionados (C. Fernández, 1995).

El proceso de elaboración de los adoquines ecológicos se realizó en las instalaciones del laboratorio SOAL INGENIERIAS S.A.S., teniendo en cuenta la metodología convencional que ellos emplean para la fabricación de adoquines vaciado en moldes o formaletas, ya que es más factible debido a su bajo costo y la posibilidad de alcanzar altos volúmenes de producción.

Dentro de los procesos empleados se debe cumplir con lo siguiente:

- Los materiales debidamente pesados deben ser introducidos en un recipiente.
- Debe mezclarse hasta alcanzar homogeneidad.

- Después de la homogenización se vierte la mezcla en el molde.
- Se debe enrasar la cara superior externa del adoquín con el fin de garantizar la figura.
- Esperar entre 8 y 12 horas para garantizar un fraguado adecuado.

Una vez realizado el desmante es necesario exponerlo a períodos continuos de agua para que así se obtenga un curado adecuado y en consecuencia aumente la resistencia del adoquín para una edad de 28 días como estipula la norma (Dimarco, R. M. (2015)).

Se obtuvieron ciento noventa y dos adoquines utilizando cinco replicas por dosificación para cada prueba con el fin de aumentar los grados de libertad del experimento y en consecuencia disminuir el error experimental en el diseño para que sea sensible a diferencias entre tratamientos.

Como se pretende evaluar el comportamiento del agregado reciclado en la composición de la mezcla, se suplió en tres porcentajes diferentes el contenido de este 5%, 7% y 9% por ciento con respecto al agregado fino convencional.

Se efectuaron doce réplicas con características de adoquín comercial 0 % (Testigo), doce al 5 % de grano de caucho, doce al 7 % de grano de caucho y doce al 9 % de grano de caucho “por dosificación de mezcla”, ya que los moldes son de doce adoquines y así contar con dos unidades sobrantes en caso de adoquines defectuosos o la necesidad de repetir alguna prueba, todo esto con el fin de aumentar la confiabilidad en los datos experimentales, es decir, cinco sometidos a prueba de absorción, al no ser una prueba destructiva podrán ser aprovechados para la prueba de flexo-tracción y por último, cinco sometidos a una rotura por compresión.

Con el fin de corroborar los resultados obtenidos experimentalmente se empleó un diseño de experimento completamente aleatorizado, ya que la fuente de variabilidad perturbadora se conoce y es controlable (condiciones ambientales), no hay un gradiente que afecte, se mantiene constante (D. C. Montgomery, 2004).

Obtenidos los resultados del análisis de varianza del “DCA” se procedió a utilizar la prueba de Dunnett siendo esta la ideal a emplear cuando uno de los tratamientos es testigo y así comparar las medias entre tratamientos (J. Fallas, 2012)

Discusión y resultados

Identificación de los aspectos e impactos ambientales a causa del post-consumo de la llanta

Teniendo en cuenta los factores ambientales que pueden ser afectados por acciones de la inadecuada disposición final de las llantas, se representó la acción y los componentes del ambiente afectados, dando como resultado la intercepción con cada celda en función del impacto ambiental existente.

La figura 1 presenta los resultados de la valoración de impactos ambientales a raíz de la disposición inadecuada de las llantas.

Para determinar el valor de cada celda en la matriz se multiplicaron las calificaciones propuestas subjetivamente, precedidas de signos según sea adverso o positivo cada impacto aplicando la ecuación de la importancia de un impacto ambiental.

En la matriz de impactos se obtiene la interrelación de la actividad con cada componente ambiental en consideración. Se producen para la presente actividad diecisiete (17) interacciones causa-efecto de las cuales únicamente seis (6) se interrelacionan generando impacto negativo.

ACCIONES DEL PROYECTO.	BIOTICO						ABIOTICO						SOCIAL				
	Fauna			Flora			Aire			Suelo		Agua		Paisaje.	Demográfico	Cultural	
	Diversidad	Migraciones	Abundancia	C. Vegetal	Comunidades vegetales	Calidad	Nivel de olor	N. de ruido	C. de uso del suelo	Erosión	Calidad	Cantidad	Calidad	Contraste	Calidad de vida	Nivel de empleo	Cambios de estilo de vida
Disposición de las llantas						-32					-41			-44	-45		

Figura 1. Valoración de impactos ambientales. Fuente: elaboración propia.

Calculada la importancia de cada uno de los impactos y consignados estos valores en la matriz, se procede a un análisis cualitativo de los resultados complementando el proceso de valoración. La categorización de los impactos ambientales evaluados e identificado, se ha realizado respecto al valor de cada uno. Para esto se han conformado dos categorías de acuerdo con la siguiente tabla.

Tabla 1. Categorización de los impactos.

RANGOS	I	CÓDIGO
Compatible	(-10 > < -25)	C
Compatible	(-10 > < -25)	C
Moderado	(-25 > > -50)	M
Moderado	(-25 > > -50)	M
Moderado	(-25 > > -50)	M
Moderado	(-25 > > -50)	M

Fuente: elaboración propia.

Según la tabla anterior; 33,33 % son impactos compatibles (16,66% correspondiente al componente biótico y otro

16,66% al abiótico) y 66,66 % son impactos moderados (aplicando 16,66 % al componente social y otro 49,99 % pertenecientes al abiótico) arrojando las siguientes conclusiones.

La disposición inadecuada de las llantas podría generar un impacto compatible afectando al componente biótico asociado a la cobertura vegetal.

Esta actividad podría generar un impacto moderado afectando al componente abiótico asociado a la calidad del aire, así mismo a la calidad suelo, el contraste del paisaje (estas últimas con el mayor valor de este componente) y por último, un impacto compatible con el componente abiótico implicado en la calidad del agua.

Disponer de forma inadecuada las llantas podría generar un impacto moderado afectando al componente social asociado a la calidad de vida.

Elaboración de un adoquín ecológico con las dosificaciones más apropiadas de GCR, arena, cemento y agua

Diseño de mezcla

Como se pretende evaluar el comportamiento del agregado reciclado en la composición de la mezcla, se elaboraron cuatro dosificaciones de mezcla para

1m³ de mortero con el fin de analizar a detalle el rendimiento de los especímenes en cada una de las pruebas.

De acuerdo con Rivera (2013) el diseño de mezcla se realizó por peso y por volumen. A continuación, se expone de manera detallada las cantidades requeridas en una mezcla convencional para lograr la resistencia demandada.

Tabla 2. Diseño de mezcla para la dosificación 1:2 por m³.

MATERIAL	MASA(KG)	DENSIDAD	VOLUMEN(m ³)	P. PESO	P. VOLUMEN
Cemento	610	3080	0,198	1	1
Agua	366	1000	0,366	0,6	1,8
A. Fino	1100	2500	0,44	1,8	2

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Diseño de mezcla para la dosificación 1:3 por m³.

MATERIAL	MASA(KG)	DENSIDAD	VOLUMEN(m ³)	P. PESO	P. VOLUMEN
Cemento	515	3080	0,167	1	1
Agua	329,6	1000	0,33	0,6	2
A. Fino	1,250	2500	0,5	2,43	3

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4. Diseño de mezcla para la dosificación 1:4 por m³.

MATERIAL	MASA(KG)	DENSIDAD	VOLUMEN(m ³)	P. PESO	P. VOLUMEN
Cemento	434	3080	0,141	1	1
Agua	290,7	1000	0,2910,57	0,7	2,1
A. Fino	1425	2500		3,28	4,0

Fuente: elaboración propia.

Tabla 5. Diseño de mezcla para la dosificación 1:5 por m³.

MATERIAL	MASA(KG)	DENSIDAD	VOLUMEN(m ³)	P. PESO	P. VOLUMEN
Cemento	373	3080	0,121	1	1
Agua	272,29	1000	0,272	0,7	2,2
A. Fino	1525	2500	0,61	4,09	5,0

Fuente: elaboración propia.

Ya que se pretende evaluar el comportamiento del grano de caucho reciclado en la composición de la mezcla, se suplió en tres porcentajes diferentes el contenido de este: 5 %, 7 % y 9%, respecto al agregado fino mezclado. El material reciclado utilizado como agregado fino en las mezclas de ensayo se adicionará de acuerdo con los porcentajes de la siguiente tabla.

Tabla 6. Porcentaje a utilizar de GCR.

Grano de caucho reciclado	Porcentaje utilizado
GCR Grueso (1-4) mm	75
GCR Fino (0-1) mm	25

Fuente: elaboración propia.

La decisión de utilizar estos porcentajes fue tomada por los investigadores, ya que al no contar con ningún antecedente relacionado y este ser un ensayo netamente experimental, fueron empleados estos valores.

El objetivo de estos porcentajes va encaminado a que, al poseer el GCR grueso un mayor diámetro de partículas,

esto indicaría una mayor área irregular por grano y en consecuencia favorecería la adherencia entre la mezcla y evitar posibles desmoronamientos en el adoquín. Sin olvidar que se utilizó fino para favorecer el aspecto estético del mismo.

Evaluación de las propiedades y características de los adoquines mediante pruebas de laboratorio (prueba de absorción de agua, resistencia a flexo-tracción y compresión) conforme a lo establecido en la NTC 2017

Absorción de agua

Se tomaron cinco muestras de cada mezcla por dosificación para realizar la prueba de absorción de agua, cada uno de los adoquines fue designado con un número del uno al cinco y el porcentaje de material reciclado que tenía. Posteriormente, se tomó el peso seco a cada espécimen. Las muestras de ensayo se sumergieron luego durante 24 horas dentro de un recipiente lleno de agua.



Figura 11. Saturación por 24h y pesaje de los adoquines.

Cumplido este tiempo se secaron superficialmente con un trapo y sin perder tiempo se procedió al pesaje de cada adoquín saturado y superficialmente seco.

La figura 12 presenta el comportamiento obtenido entre distintos porcentajes reemplazados de GCR por agregado natural respecto a la absorción por los

adoquines, utilizando el valor promedio obtenido para esta, como indica la Norma Técnica Colombiana “los adoquines de concreto deben tener una absorción de agua total (Aa%) (Para todo el volumen del espécimen) no superior al 7 % como valor promedio para los especímenes de la muestra” (NTC, 2017).

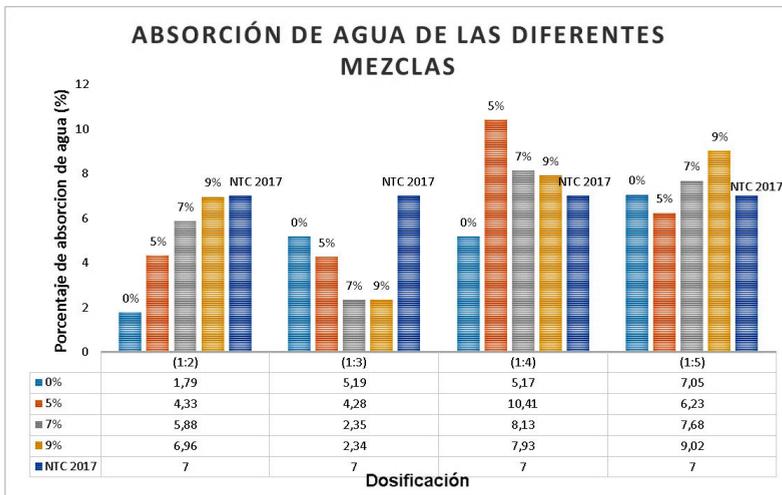


Figura 12. Comparación de absorción de agua para las diferentes mezclas.

Para interpretar los resultados se comenzó por la dosificación 1:2, la cual hace evidente que a mayor adición de GCR aumenta la absorción en los especímenes, sin embargo, la adición del material no perjudica en términos generales el resultado ya que todos valores satisfacen la norma al ser inferiores a 7%.

La dosificación 1:3 evidencia que a mayor sustitución de agregado pétreo por GCR se obtiene una menor absorción de agua por promedio de cinco especímenes, lo que indica que para esta dosificación hay mayor afinidad con el GCR en términos de adherencia, además de cumplir con la Norma Técnica Colombiana (NTC, 2017). En conclusión, esta fue la dosificación con mayor rendimiento en la prueba de absorción.

Se puede observar que la dosificación 1:4 fue la de peor rendimiento, ya que ninguna dosificación (a excepción de la testigo) cumplió con lo indicado en la norma, sin omitir que a mayor adición de GCR era menor la absorción de los adoquines.

Respecto a la última dosificación se aprecia que incluso la dosificación sin GCR adicionado (testigo) incumple con el límite máximo permisible para absorción, solo una dosificación satisface y es la de menor porcentaje sustituido. A

mayor remplazo de GCR crecía la absorción en los adoquines lo cual no es ventajoso.

Resistencia a la flexo-tracción (módulo de rotura)

Una vez terminada la prueba de absorción inmediatamente se utilizaron las cinco réplicas para someterlas al ensayo de flexión (finalizada la marcación de la luz de 10 mm de lado y lado representado en la figura 3, como indica la norma para aprovechar el proceso de saturado superficialmente seco. El montaje ejecutado en esta prueba se presenta a continuación:



Figura 13. Montaje para ensayo de flexo-tracción a 28 días.

Los resultados expuestos son un resumen del proceso de cálculo posterior a la elaboración de cada ensayo en las instalaciones del laboratorio SOAL INGENIERIAS S.A.S.



Figura 14. Resultado patológico al fallar por flexión el adoquín.

Los resultados obtenidos en el ensayo del módulo de rotura para la dosificación 1:2 se esperaban más cercanos a lo exigido por la norma, ya que posee más cemento que las demás dosificaciones y solo el testigo (se esperaba que cum-

pliera) y la sustitución de 5 % de GCR excedió el valor de 4,2 Mpa. Cabe resaltar que los valores para 7% y 9% no se alejan tanto del objetivo, están muy cercanos al exigido por la norma técnica colombiana.

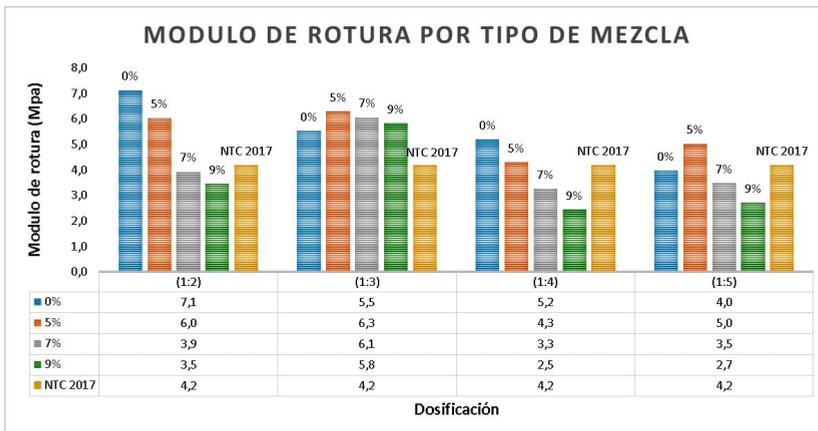


Figura 15. Comparación de las resistencias al módulo de rotura (Mr) en los adoquines.

La dosificación 1:3 evidencia que a mayor sustitución de agregado pétreo por GCR se obtuvo un módulo de rotura menor por promedio de cinco especímenes, sin embargo, superan el valor promedio del testigo lo cual no solo excede el valor, sino que también el nuevo adoquín con GCR supera los alcances de resistencia que los actuales adoquines tradicionales. De lo anterior también se puede concluir que la dispersión del (M_r) en la sustitución del material reciclado crece conforme se sustituye mayor cantidad de GCR evidenciando rendimientos de (14,54 % para 5 %), (10,9 % para 7 %) y (5,45 % para 9 %) por encima del 5,5 Mpa del valor promedio de los testigos.

Analizando la figura 6 se observa que en la dosificación 1:4 a mayor sustitución de agregado pétreo por GCR se obtiene un módulo de rotura menor por promedio de cinco especímenes; únicamente satisface el promedio testigo lo indicado en la norma, lo cual indica que al realizar adoquines reciclados con 5 %, 7 % y 9 % a edad de 28 días no se obtiene la resistencia exigida por la norma.

Con un valor de 5,0 Mpa para la mezcla 1:5 y un contenido de 5 % de GCR, fue el único valor superior en comparación con el 4.2 Mpa exigido por la norma técnica colombiana, inclusive

por encima del valor testigo que también presentó un mal desempeño en esta prueba. Básicamente, por tener un material poco homogéneo en la mezcla de mortero, el comportamiento estructural del adoquín produce resultados muy dispersos con fallas repentinas para el módulo de rotura.

Resistencia a la compresión

Para realizar este ensayo se tomaron las cinco réplicas respectivas por dosificación y porcentaje sustituido de GCR, para luego fallarlo en la maquina universal como se muestra en la figura 6. Cada adoquín fue designado con un número del uno al cinco y el porcentaje de material reciclado que tenían. Los adoquines fueron ensayados a la edad de 28 días, misma edad de ensayo para las pruebas anteriores.



Figura 16. Montaje para ensayo de compresión a 28 días.



Figura 17. Resultado patológico al fallar por compresión el adoquín.

Los resultados que se muestran a continuación son un resumen del proceso de cálculo posterior a la elaboración

de cada ensayo en las instalaciones del laboratorio SOAL INGENIERIAS S.A.S.

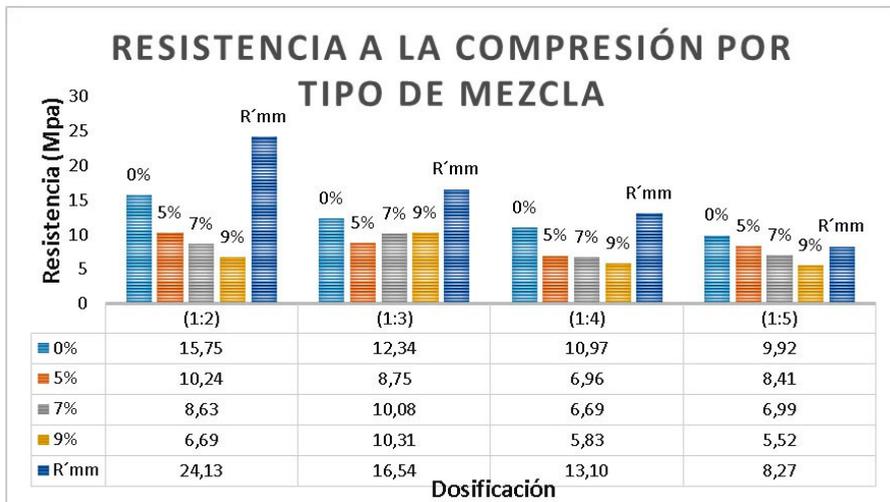


Figura 18. Comparación de las resistencias a la compresión en los adoquines.

Evaluando las muestras obtenidas a los 28 días de haberse fundido los diferentes adoquines, todas las dosificaciones resultaron insatisfactorias a la resistencia a compresión para la que fue proyectado el mortero (R´mm) al momento de emplear la metodología usada por Rivera (2013). A mayor sustitución de agregado pétreo por GCR, en general, se obtuvo una menor resistencia por promedio de cinco especímenes, no obs-

tante, se evidenció que las mezclas con contenido de agregado reciclado de 5 %, 7 % y 9 % para la dosificación 1:3 se comportaron de forma similar a la prueba por absorción de agua (a medida que aumenta el % a sustituir de GCR, crece la resistencia), siendo indiscutible que el adoquín para la dosificación 1:3 tuvo el mejor rendimiento con la adición de GCR en todos los ensayos a los que fue sometido.

Tabla 7. Resultados del diseño experimental (Prueba de Dunnet).

Prueba	Dosificación	Resultado prueba Dunnet			Análisis de Resultados	
Absorción	1;2	T0 - T1	-2.54	>2.02	SIG	Hay diferencias entre tratamientos al adicionar (5.7.9)% , concluyéndose que mayor sustitución rece la absorción en los adoquines
		T0 - T2	-4.09	>2.02	SIG	
		T0 - T3	-5.18	>2.02	SIG	
	1;3	T0 - T1	2.10	>1.89	SIG	Hay diferencias entre tratamientos al adicionar (5.7.9)% , concluyéndose que mayor sustitución rece la absorción en los adoquines
		T0 - T2	2.83	>1.89	SIG	
		T0 - T3	2.84	>1.89	SIG	
	1;4	T0 - T1	-5,24	>2.19	SIG	Son significativos los tratamientos al adicionar (5.7.9)% , ya que a mayor %a sustituir decrece la absorción; pero el que se escoja no superará el testigo.
		T0 - T2	-2,96	>2.19	SIG	
		T0 - T3	-2,75	>2.19	SIG	
	1.,5	T0 - T1	0.82	<3.00	N SIG	No hay diferencia significativa entre los tratamientos 1, 2 y 3, pero si diferencias entre sí, ya que la sustitución del tratamiento 1 resultó satisfactoria en la prueba.
		T0 - T2	-0.64	<3.00	N SIG	
		T0 - T3	-1.97	<3.00	N SIG	

(Continúa)

Prueba	Dosificación	Resultado prueba Dunnet			Análisis de Resultados	
Flexotracción	1;2	T0 – T1	1.08	<1.18	N SIG	Hay significancia para los tratamientos 2 y 3, indicando que a mayor GCR, menor (Mr). Sin embargo, no hay significancia en el tratamiento 1, probando lo contrario.
		T0 – T2	3.18	>1.18	SIG	
		T0 – T3	3.66	>1.18	SIG	
	1;3	T0 – T1	-0,76	<1.46	N SIG	No hay diferencia significativa en probar (5.7.9)% ya que cualquier valor a sustituir superará el testigo
		T0 – T2	-0,50	<1.46	N SIG	
		T0 – T3	-0,30	<1.46	N SIG	
	1;4	T0 – T1	0.88	<1.17	N SIG	Hay significancia para los tratamientos 2 y 3, indicando que a menor GCR menor (Mr) Sin embargo no hay significancia en el tratamiento 1.
		T0 – T2	1.90	>1.17	SIG	
		T0 – T3	2.72	>1.17	SIG	
	1;5	T0 – T1	-1.04	>0.90	SIG	Hay significancia en los tratamientos 1 y 3, indicando que a mayor GCR menor (Mr), pero no hay significancia en el tratamiento 2, probando un valor intermedio
		T0 – T2	0.50	<0.90	N SIG	
		T0 – T3	1.24	>0.90	SIG	
Compresión	1;2	T0 – T1	5.51	>1.33	SIG	Hay diferencia significativa entre tratamientos al adicionar (5.5.9) % , concluyéndose que a mayor sustitución decrece la Compresión en los adoquines
		T0 – T2	7.13	>1.33	SIG	
		T0 – T3	9.06	>1.33	SIG	
	1;3	T0 – T1	3.79	>1.74	SIG	Son significativos los tratamientos al adicionar (5.7.9) % ya que a mayor % a sustituir crece la compresión, pero el que se escoja no superará al testigo
		T0 – T2	2.46	>1.74	SIG	
		T0 – T3	2.23	>1.74	SIG	
	1;4	T0 – T1	4.01	>1.95	SIG	Hay diferencia significativa entre tratamientos al adicionar (5.7.9) % , concluyéndose que a mayor sustitución decrece la compresión de los adoquines
T0 – T2		4.28	>1.95	SIG		
		T0 – T3	5.13	>1.95	SIG	

Fuente: elaboración propia.

De manera que los resultados obtenidos en el diseño de experimento y la aplicación de la prueba de Dunnet fueron conexos a los obtenidos experimentalmente, y en ese orden de ideas, los datos obtenidos experimentalmente se justificaron estadísticamente.

Conclusiones

Se diseñaron cuatro dosificaciones de mezcla y fabricamos adoquines peatonales con 5 %, 7 % y 9 % de grano de caucho reciclado en proporción volumen a la arena de cada diseño, y se fabricaron adoquines sin grano de caucho reciclado

para comparar los resultados (testigos). Según la norma nacional NTC 2017 la absorción de agua para los adoquines no debe ser superior a 7 % como valor promedio de cinco especímenes; los resultados obtenidos a 28 días arrojaron que solo las dosificaciones 1:2 y 1:3 cumplan satisfactoriamente lo exigido por la norma, mientras que las dosificaciones 1:4 y 1:5 no satisfacen el valor mínimo como indica la norma (con excepción de 1:5 con 5 % de remplazo) para este caso el porcentaje de absorción tiende a ser elevado, y en consecuencia, desfavorable. Esto puede atribuirse a que las dosificaciones calculadas para 1:4 y 1:5 requieren de mayor cantidad de agregado fino para la mezcla, en términos de volumen se incrementaban los porcentajes a sustituir de (5, 7, 9) por ciento. La mezcla de diseño con mejor rendimiento según los resultados obtenidos fue la 1:3 con 9 % de GCR, seguidamente su remplazo en 7 % de GCR y luego en 5 % de GCR.

Los módulos de rotura (Mr.) más altos y en cumplimiento con la Norma Técnica Colombiana —NTC— que se alcanzaron con las pruebas realizadas a los adoquines con material reciclado, fueron los obtenidos nuevamente por de la dosificación 1:3, esta vez con 5 % de GCR, seguidamente su remplazo en 7 %

de GCR y luego en un 9 % de GCR por ciento de sustitución, superiores incluso a su muestra testigo lo que prueba que para las cantidades de material de la dosificación 1:3 el GCR aporta características especiales que contribuyen al aumento del módulo de rotura. Además, se probó que al sustituir un 5 % de GCR en las dosificaciones 1:2, 1:4 y 1:5 se satisface el valor exigido en la norma de 4,2 Mpa.

Se comprobó que al someter los adoquines al ensayo a compresión para una resistencia que fueron proyectados inicialmente, los adoquines no obtienen resultados provechosos este indicador adicional en la investigación resultó fallido.

En este orden se estableció para la investigación, que la dosificación 1:3 obtuvo las proporciones óptimas con agregados reciclados (GCR) para la fabricación de adoquines que cumplan con la norma técnica colombiana NTC 2017. Se logró cumplir con la principal motivación del proyecto, brindar una alternativa diferente para el reciclaje del caucho (material no biodegradable por el ambiente) se comprobó la hipótesis que la utilización de agregados reciclados (GCR) es de fácil aplicación en pequeñas industrias de producción de adoquines "reemplazando pequeñas cantidades"

indicando un ahorro de agregado fino; y este ahorro de materia prima (arena), ambientalmente hablando, mitiga posibles impactos a raíz de actividades como “explotación de las canteras naturales” y evita crear escenarios que sean fuente de contaminación y deterioro ambiental.

Recomendaciones

Según Rivera (2013), emplear la dosificación 1:3 (uno de cemento por tres de arena) final del mortero para estudiar otros porcentajes mayores de sustitución, debido a que esta obtuvo los resultados óptimos y se restringió solo para 5 %, 7 % y 9 %.

Con relación al proceso de producción en los adoquines continuar con el proceso de vibro-compactación, ya que estas mezcladoras son excelentes para este tipo de mezclas y brindan homogeneidad y cohesión en los adoquines y en consecuencia, mejoran la resistencia final.

Es un factor preponderante que al realizar la mezcla de los materiales se debe realizar primero en seco, de esta forma se garantiza la homogeneidad de la mezcla durante la hidratación.

Agradecimientos

En primer lugar a Dios, nuestra familia; a la empresa SOAL INGENIERÍA S.A.S., al ingeniero Milcíades Soto, a los ingenieros Karina Torres, Eberto

Ortega y Pedro Torres. De esta manera a todos los docentes de la facultad de ingenierías y tecnologías que de una u otra manera nos colaboraron durante el desarrollo de nuestra tesis aportando sus experiencias y amplios conocimientos para su aplicación en este trabajo.

Referencias

- Cámara de Comercio de Bogotá. (2006). Guía Para el Manejo de Llantas Usadas,» Bogotá, D.C., Primera edición.
- Cardona y Sánchez. (2011). Aprovechamiento de llantas usadas para la fabricación de pisos decorativos
- Di Marco, R. M. (2015). Diseño y Elaboración de un Sistema de Adoquines de Bajo Costo y Material Reciclado para Construcciones en Núcleos Rurales. *ESAICA*, 30-38.
- Fallas, J. (2012). Análisis de varianza comparando tres o más medias.
- Fernández, C. (1995). Método Conesa simplificado.
- Montgomery, D.C. (2004). Diseño y Análisis de Experimentos, Arizona: Limusa Wiley.
- NTC. (2017). Norma Técnica Colombiana. ICONTEC.