

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

*Recibido: 20 de noviembre de 2020. Recibido en revisión: 04 de diciembre de 2020. Aceptado: 08 de febrero de 2021.*

*DOI:*

Luis Ángel Jaimes Leal<sup>1</sup>, Karina Paola Torres Cervera<sup>1</sup>, Pedro Juan Torres Flores<sup>1</sup>

## 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 físico-químicas 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.

Lo anterior expuesto permitió determinar que se puede brindar una alternativa diferente para el reciclaje ya que el GCR puede ser usado como posible sustituto de agregado fino, debido a que 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.

**Palabras clave:** Agregados reciclados, Experimentación, Dosificación, Elementos constructivos, Norma Técnica Colombiana (NTC).

## Use of recycled rubber grain for the elaboration of ecological paving stones as alternative to the constructive industry

### Abstract

This work was developed from the hypothesis of recycled aggregates, recycled rubber grain substituting the fine aggregate, as an ingredient of mortars in the manufacture of constructive elements, example of this, the paving stones. Its contents cover the results of the research on physicochemical properties of different dosages whose aggregate content was partially replaced by GCR in different percentages. The evaluation of the mechanical properties of the dosages in study with conventional replicas by means of absorption, flexo-traction and compression tests is evidenced.

---

<sup>1</sup> Facultad de Ingenierías y Tecnologías, Universidad Popular del Cesar, Valledupar, Colombia. [luisjaimes2510@gmail.com](mailto:luisjaimes2510@gmail.com), [karinaportres@unicesar.edu.co](mailto:karinaportres@unicesar.edu.co) <https://orcid.org/0000-0003-2646-2871>, [pedrotorres@unicesar.edu.co](mailto:pedrotorres@unicesar.edu.co)

The foregoing allowed to determine that a different alternative for recycling can be provided as the GCR can be used as a possible substitute for fine aggregate, due to the obtained ecological paving stones with 5, 7 and 9 percent in substitution of sand, which showed an absorption and resistance to bending above the requirements of the Colombian technical standard.

**Keywords:** GCR, recycling, substitute, fine aggregate, elaboration, ecological paving stones.

## **Introducción**

En la actualidad, el sector del transporte es considerado una herramienta de consumo masivo debido que a través de este medio que 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 en donde más se consumen derivados del petróleo como combustibles y lubricantes, se industrializan gran cantidad de residuos como llantas, aceites y baterías, además de generar el 80 por ciento 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 reprocesado 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 lo menos armoniosos posible visualmente y sirven como habitat para proliferación de vectores como ratones, moscas y dengue, siendo estos letales al momento de afectar la salud pública de la población aledaña (Cardona y Sánchez, 2011).

Es de anotar, que el problema ambiental no solo recae en la explotación de asentamientos mineros, sino que también destaca el tema de generación de residuos como lo son las llantas las cuales aumentan proporcionalmente con el parque automotor (Guía Para el Manejo de Llantas Usadas,2006).

De este modo, teniendo en cuenta la panorámica anterior del ser, la generación desmedida de llantas y escasez de recursos pétreos, se podría considerar una medida para contribuir al beneficio ambiental con la reutilización de las llantas para elaboración de adoquines.

El proyecto, está pensado en los siguientes factores: primero se identificaran los aspectos e impactos ambientales ocasionados a casusa del post-consumo de la llanta, el segundo momento se explicará la elaboración de un adoquín ecológico con las dosificaciones más apropiadas de grano de caucho reciclado, arena, cemento, y finalmente se busca evaluar sus propiedades y características mediante pruebas de laboratorio (Prueba de absorción de agua, resistencia a flexo-tracción y compresión) conforme a lo establecido en la norma técnica colombiana (NTC,2017).

Este proyecto se enfoca en evaluar que tan viable es incorporar estos residuos provenientes de las llantas como materiales para la elaboración de adoquines, y evaluar la viabilidad técnica para este propósito. Se ejecuta la caracterización tanto física como mecánica de este agregado reciclado, este proyecto mediante los lineamientos de saneamiento ambiental propone el aprovechamiento de llanta residual en diseño de nuevos materiales para la construcción, en última instancia, se propongan sus distintos usos ya sean: parques recreacionales, andenes peatonales y zonas de tránsito vehicular pasivo.

## **Metodología**

La tipología del estudio es experimental o cuasi experimental, precisamente como les mencione anteriormente, lo que hacen es probar distintas concentraciones de material tipo caucho y el enfoque es cuantitativo. 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.

La investigación tuvo un enfoque de carácter cuantitativo, ya que trata de cuantificar el problema y entender que tan generalizado esta mediante la búsqueda de resultados proyectables, que normalmente buscan medir la magnitud y van tras resultados estadísticos que se interpretan objetivamente.

Para la evaluación de impactos ambientales, se utilizó la metodología propuesta por Conesa lo 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 que ellos emplean para la fabricación de adoquines; empleando el método convencional de vaciado en moldes o formaletas, ya que es más factible debido a sus bajos costos y que puede 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 el punto de que se tenga una homogenización de la mezcla.
- Posterior a la homogenización se vierte la mezcla en el molde.
- Se debe enrasar la cara superior externo del adoquín con el fin de garantizar la figura del adoquín.
- Se debe esperar en promedio de 8 a 12 horas para garantizar un fraguado adecuado.

Una vez realizado el desmante es necesario exponerlo a periodos continuos de agua para que así se obtenga un curado adecuado y en consecuencia el aumento de la resistencia del adoquín para una edad de 28 días como estipula la norma (Di marco, 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 las características de un 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 la 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 Dunnet 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.

En la figura 1 se presentan los resultados de la valoración de impactos ambientales a raíz de la disposición inadecuada de las llantas.

Figura 1. Valoración de Impactos Ambientales

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				-23		-32								-22	-44	-45	

Fuente: Elaboración propia

Para determinar el valor de cada casilla 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.

Calculada la importancia de cada uno de los impactos, y consignados estos valores en la matriz, se procede a análisis cualitativo de los resultados complementando el proceso de la valoración. La categorización de los impactos ambientales evaluados e identificados, se ha realizado respecto al valor de cada uno. Para este acometido se han conformado 2 categorías de acuerdo a la siguiente tabla.

**Tabla 1** Categorización de los impactos

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

Fuente: Elaboración propia

Según la tabla anterior; el 33,33% son impactos compatibles (16,66% correspondiente al componente biótico y el otro 16,66% al abiótico) y el 66,66% son impactos moderados (aplicando 16,66% al componente social y los otros 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 ultimo un impacto compatible al componente abiótico implicado a 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 1m<sup>3</sup> 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 m<sup>3</sup>

<b>MATERIAL</b>	<b>MASA(KG)</b>	<b>DENSIDAD</b>	<b>VOLUMEN(m<sup>3</sup>)</b>	<b>P. PESO</b>	<b>P. VOLUMEN</b>
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 m<sup>3</sup>

<b>MATERIAL</b>	<b>MASA(KG)</b>	<b>DENSIDAD</b>	<b>VOLUMEN(m<sup>3</sup>)</b>	<b>P. PESO</b>	<b>P. VOLUMEN</b>
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 m<sup>3</sup>

MATERIAL	MASA(KG)	DENSIDAD	VOLUMEN(m <sup>3</sup> )	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 m<sup>3</sup>

MATERIAL	MASA(KG)	DENSIDAD	VOLUMEN(m <sup>3</sup> )	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 del mismo 5%, 75 y 9%, respecto al agregado fino mezclado. El material reciclado utilizado como agregado fino en las mezclas de ensayo se adicionará de acuerdo a 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 favorecer 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 5 muestras de cada mezcla por dosificación para realizar la prueba de absorción de agua, cada uno de los adoquines fueron designados con un número del 1 al 5 y el porcentaje de material reciclado que tenían. Posteriormente se le tomó su peso seco a cada espécimen. Luego las muestras de ensayo se sumergieron durante 24 horas dentro de un recipiente lleno de agua, cumplido este tiempo se secaron superficialmente con un trapo y sin perder tiempo se procedió al pesaje de cada adoquín saturado y superficialmente seco.

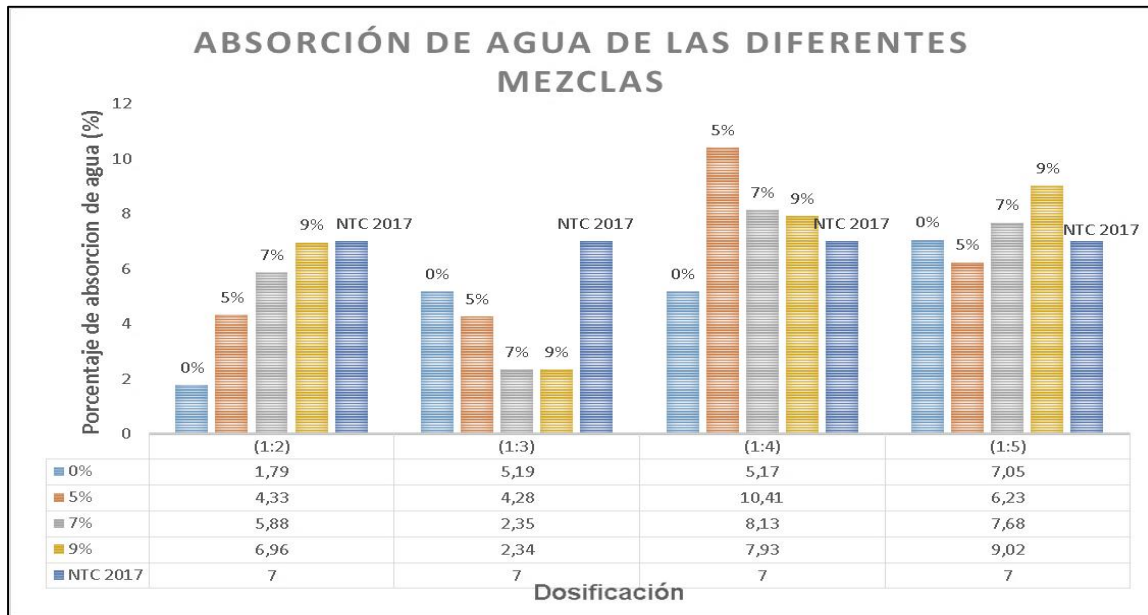
Figura 2. Saturación por 24h y pesaje de los adoquines



La Figura 3. Comparación de Absorción de agua para las diferentes mezclas presenta el comportamiento obtenido entre los 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 3. Comparación de Absorción de agua para las diferentes mezclas



Para la interpretación de los resultados se comenzó por la dosificación 1:2, lo cual hace evidente que a mayor adición de GCR se 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 obtuvo 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)**

Luego de 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 4. Montaje para ensayo de flexo-tracción a 28 días

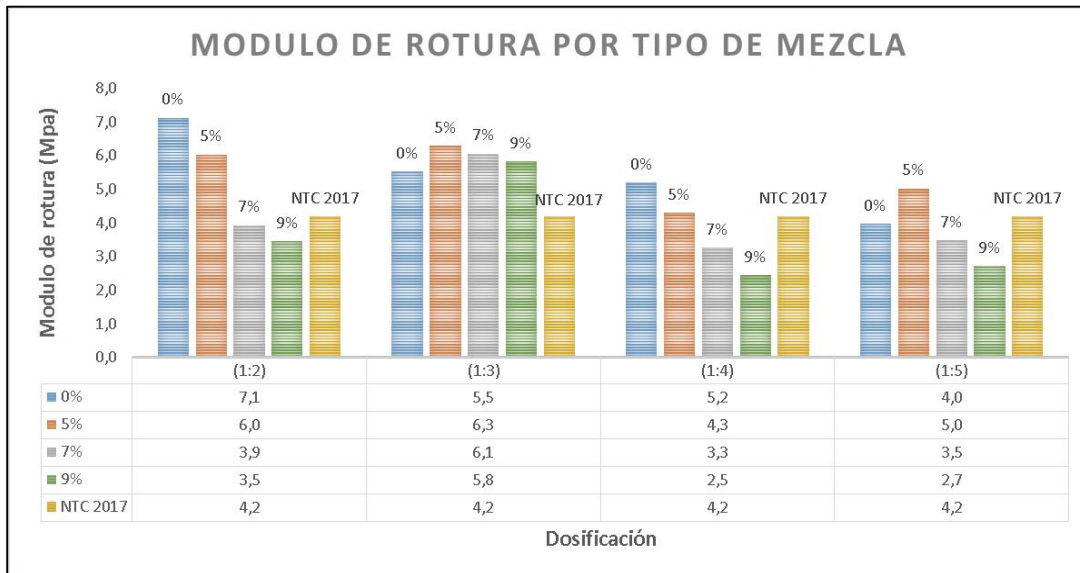


Los resultados expuestos son un resumen del proceso de cálculo posterior a la elaboración de cada ensayo en las instalaciones del laboratorio SOAL INGENIERIAS S.A.S.

Figura 5. Resultado patológico al fallar por flexión el adoquín



Figura 6. Comparación de las Resistencias al módulo de rotura (Mr) en los adoquines



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

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 (Mr) en la sustitución del material reciclado crece conforme se sustituye mayor cantidad de GCR evidenciando rendimientos de (14,54% para el 5%), (10,9% para el 7%) y (5,45% para el 9%) por encima del 5,5 Mpa del valor promedio de los testigos.

Analizando la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.6** se observa que en la dosificación 1:4 a mayor sustitución de agregado pétreo por GCR se obtuvo 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 NTC, 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 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 1 al 5 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 7. Montaje para ensayo de Compresión a 28 días

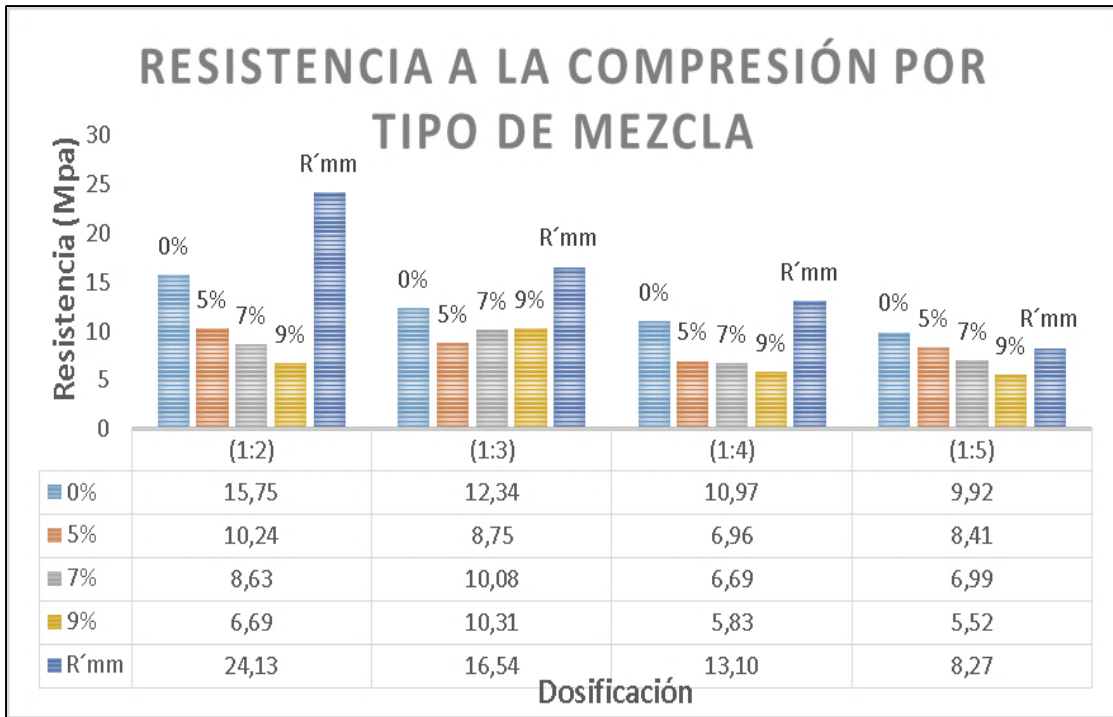


Los resultados se muestran a continuación son un resumen del proceso de cálculo posterior a la elaboración de cada ensayo en las instalaciones del laboratorio SOAL INGENIERIAS S.A.S.

Figura 8. Resultado patológico al fallar por compresión el adoquín



Figura 9. 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 obstante, 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 los adoquines para la dosificación 1:3 tuvo el mejor rendimiento con la adición de GCR en todos los ensayos a los que fueron sometidos.

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	
		T0 - T1	2.10	>1.89	SIG	
	1;3	T0 - T2	2.83	>1.89	SIG	Hay diferencias entre tratamientos al adicionar (5.7.9)% , concluyéndose que mayor sustitución rece la absorción en los adoquines
		T0 - T3	2.84	>1.89	SIG	
		T0 - T1	-5.24	>2.19	SIG	
	1;4	T0 - T2	-2.96	>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 - 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	

Prueba	Dosificación	Resultado prueba <i>Dunnet</i>			Análisis de Resultados	
		T0 – T1	T0 – T2	T0 – T3		
<b>Flexotracción</b>	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		
<b>Compresión</b>	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 al 7% como valor promedio de cinco especímenes; los resultados obtenidos a 28 días arrojaron que solo las dosificaciones 1:2 y 1:3 cumplen 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) porciento. 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 porciento 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. A demás 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 más 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 mejorar 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**

Le agradecemos primeramente a Dios, a nuestra familia, en primera instancia 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

1. Cámara de Comercio de Bogotá. (2006). Guía Para el Manejo de Llantas Usadas,» Bogotá, D.C., Primera Edición.
2. Cardona y Sánchez. (2011). Aprovechamiento de llantas usadas para la fabricación de pisos decorativos
3. C. Fernández. ( 1995). Método Conesa simplificado
4. D. C. Montgomery. (2004). Diseño y Análisis de Experimentos, Arizona: Limusa Wiley.
5. 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.
6. J. Fallas.(2012). Análisis de varianza comparando tres o más medias.
7. NTC. (2017). Norma técnica Colombiana. INCONTEC
8. Rivera.(2013). CONCRETO SIMPLE, Cali,