

Determinación de propiedades de baldosas de grano lavado, usando una mezcla de cemento, granito y caucho triturado en la capa de desgaste

Determination of the properties of washed grain tiles, using a mixture of cement, granite, and crushed rubber in the wear layer

M. Á. Granada-Mejía  ; S. E. Arbeláez-Ríos  ; L. S. Arias-Maya  ; L. V. Vanegas-Useche 

DOI: <https://doi.org/10.22517/23447214.24505>

Artículo de investigación científica y tecnológica

Abstract— Used tires constitute an environmental problem, since they are visually contaminating, they attempt against public health and can be fire generators. The purpose of this work is to evaluate the technical feasibility of incorporating rubber from used tires as a raw material in the elaboration of the wear layer of washed grain two-layer tiles. For the wear layer composed of gray cement and aggregate (granite and crushed rubber), three mixtures were designed with granite substitution by crushed rubber in percentages of 0%, 30%, and 50%. Physical and mechanical properties were evaluated, using as reference document the standard NTC 2849: Tiles with grain surface (terrazzo). The results show that wear resistance is not affected or favored by the addition of rubber and that impact resistance improves with the increase in the percentage of granite replaced by rubber. Also, it was found that density decreases and water absorption increases with the addition of rubber. The present study indicates that the incorporation of crushed rubber into the wear layer of washed grain tiles is feasible and can help in reducing environmental contamination.

Index Terms—Composites, concrete, recycling, rubber, tiles.

Resumen— Las llantas fuera de uso constituyen un problema ambiental, ya que son visualmente contaminantes, atentan contra la salud pública y pueden ser generadoras de incendios. El propósito de este trabajo es evaluar la viabilidad técnica de incorporar el caucho proveniente de llantas fuera de uso como materia prima en la elaboración de la capa de desgaste de baldosas bicapa de grano lavado. Para la capa de desgaste compuesta de cemento gris y agregado (granito y caucho triturado), se diseñaron tres mezclas con sustitución de granito por caucho triturado en porcentajes de 0%, 30% y 50%. Se evaluaron propiedades físicas y mecánicas, usando como documento de referencia la norma NTC 2849: Baldosas con superficie de grano (terrazo). Los resultados demuestran que la resistencia al desgaste no se ve afectada ni favorecida por la adición de caucho y que la resistencia al impacto

mejora conforme al aumento del porcentaje de granito sustituido por caucho. También, se encontró que la densidad disminuye y la absorción de agua aumenta con la incorporación de caucho. El estudio realizado indica que la incorporación de caucho triturado en la capa de desgaste de baldosas de grano lavado es viable y puede aportar a reducir la contaminación ambiental.

Palabras claves— Baldosas, caucho, compuestos, concreto, reciclaje.

I. INTRODUCCIÓN

LAS llantas fuera de uso (LLFU), al ser consideradas un desecho sólido, constituyen uno de los graves problemas medioambientales en el mundo, por ser visualmente contaminantes, atentar contra la salud pública y ser generadoras de incendios. En la actualidad existen técnicas para recuperar o aprovechar este desecho, una de ellas es la trituración mecánica, proceso por el cual se obtiene un material apropiado para ser usado en la elaboración de materiales compuestos.

Existen numerosos estudios que investigan la posibilidad de incorporar caucho triturado proveniente de LLFU a mezclas de concreto estructural, reemplazando parcialmente el agregado fino o grueso. En general, los resultados demuestran la disminución de algunas propiedades mecánicas, tales como la resistencia a la tracción y a la compresión.

En [1] desarrollaron un trabajo de investigación sobre cuatro mezclas de concreto donde se reemplazó 0%, 10%, 20% y 30% en volumen del agregado fino por caucho, encontrando que tanto la resistencia a la compresión como a la flexión disminuyen con la adición de caucho en la mezcla.

En [2] diseñaron 6 mezclas de hormigón con adición de caucho a partir de una dosificación estándar de hormigón de referencia. Para la confección del hormigón se sustituyó 5%,

Este manuscrito fue enviado el 02 de octubre de 2020 y aceptado el 23 de diciembre de 2021. Este trabajo fue financiado con recursos propios de los investigadores. La Universidad Tecnológica de Pereira suministró los equipos para la realización de los ensayos.

M. Á. Granada Mejía. Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira (Colombia). (e-mail: miguel-granada93@utp.edu.co).

S. E. Arbeláez Ríos. Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira (Colombia). (e-mail: seesarbelaez@utp.edu.co).

L. S. Arias Maya. Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira (Colombia) (e-mail: stellarias@utp.edu.co).

L. V. Vanegas Useche. Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira (Colombia) (e-mail: lvanegas@utp.edu.co).



10% y 15% de agregado fino (arena) por caucho, así como 5%, 10% y 15% de agregado grueso (grava) por caucho. En este trabajo se concluye que la resistencia a la compresión disminuye con la incorporación de caucho, y que dicha pérdida de resistencia se ve favorecida cuando el tamaño del grano de caucho aumenta. Por otra parte, la resistencia a la tracción del hormigón presenta una disminución más discreta que aquella de la resistencia a la compresión. Además, al sustituir el agregado por un material mucho menos rígido como el caucho, el módulo de elasticidad disminuye a medida que aumenta el contenido de caucho

En [3] estudiaron el comportamiento mecánico de concreto no estructural, teniendo como resistencia objetivo 15 MPa, sustituyendo de manera parcial el agregado fino por caucho molido recubierto con y sin polvo calcáreo en proporciones de 5%, 10% y 15%. Los resultados permitieron concluir que el concreto con sustitución del agregado fino por caucho entre el 5% y 10% tratado con polvo calcáreo puede ser usado en la elaboración de concreto no estructural.

En [4] presentan una visión general de las propiedades del hormigón que contiene chatarra-neumáticos. Como conclusión, se plantea que la reducción de la resistencia a la compresión del hormigón fabricado con caucho puede limitar su uso en aplicaciones estructurales, sin embargo, se resaltan algunas características que pueden ser deseables y ventajosas en la construcción de calzadas y vías de bajo tráfico.

Considerando lo anterior, este proyecto va encaminado a evaluar la viabilidad técnica de incorporar el caucho proveniente de LLFU como material para elaboración de la capa de desgaste en baldosas de grano lavado, reemplazando parte del granito por caucho y manteniendo un mortero base de arena y cemento intacto, de manera que no se vean afectadas en gran medida las propiedades mecánicas como la resistencia a la flexión.

Las diferentes secciones estarán numeradas con números romanos. En caso que deba separar una sección en subsecciones, adopte el estilo utilizado en estas instrucciones.

II. METODOLOGÍA

A. Materiales

Los materiales usados para la fabricación de baldosas son: arena media de río, granito, caucho triturado, cemento y agua. Las Fig. 1 a 3, así como la tabla I [5], detallan la información técnica del cemento y las curvas granulométricas de la arena, el granito y el caucho.

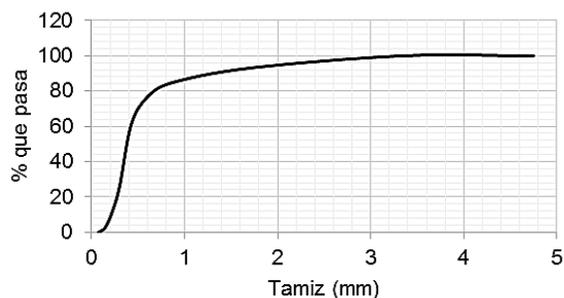


Fig. 1. Curva granulométrica de la arena. Fuente: Autores.

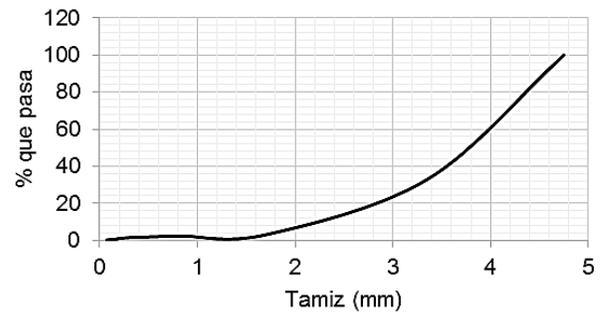


Fig. 2. Curva granulométrica del granito. Fuente: Autores.

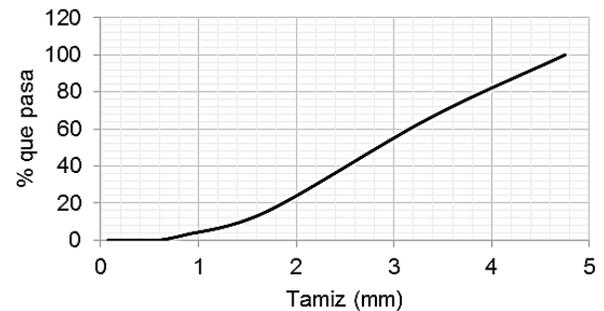


Fig. 3. Curva granulométrica del caucho triturado. Fuente: Autores.

TABLA I
INFORMACIÓN TÉCNICA DEL CEMENTO GRIS DE USO GENERAL CEMEX.
INFORMACIÓN TOMADA DE [5]

Resistencias a la compresión (kgf/cm ²)		
1 día	60 – 100	N.A.
3 días	130 – 190	Mínimo 80
7 días	170 – 240	Mínimo 150
28 días	245 – 300	Mínimo 240
Análisis físicos	Rango resultados	Requisitos norma NTC121*
Superficie específica Blaine (cm ² /g)		Mínimo 2800
Tiempos de fraguado Vicat (min)	3000 – 6000	
Inicial	100 – 180	Mínimo 45
Final	180 – 260	Máximo 480
Expansión en autoclave (%)	0,00 – 0,20	Máximo 0,80
Análisis químicos		Requisitos norma NTC321*
% SO ₃	1,50 – 3,00	Máximo 3,5
% MgO	1,00 – 3,00	Máximo 7,0

*Normas NTC 121 y 321 para Cemento Portland Tipo L

Fuente: Autores.

B. Fabricación de baldosas

Para llevar a cabo el método experimental se toma como base la NTC 2849 [6], de la cual se determinó que el tamaño de la muestra mínima para realizar los ensayos por cada mezcla a evaluar es de doce unidades.

La dosificación de las baldosas bicapa consta de dos partes. La capa base, que está constituida por un mortero de cemento y arena, se dosifica de acuerdo con la proporción en volumen 1:2, siendo éste un mortero con alto contenido de cemento que proporciona gran resistencia. Sin embargo, presenta alta retracción en el secado, es decir, es muy susceptible de agrietarse [7]. La capa de desgaste está constituida por cemento

de uso general y un agregado de granito y caucho triturado en tres diferentes proporciones de volumen. La empresa ACGRANITO facilita las especificaciones necesarias para realizar pisos de granito vaciado, recomendando una proporción de cemento y agregado de 1:1,5 en volumen [8], teniendo en cuenta que una parte del agregado (granito) será remplazado por caucho triturado. Para mantener un adecuado registro de las probetas, se establece una codificación para las tres proporciones en volumen como se presenta en la Tabla II.

TABLA II
NOMENCLATURA DE LAS MUESTRAS

Código	Proporción en volumen
	(arena, granito y caucho triturado)
M-00%	1,00: 1,50: 0,00
M-30%	1,00: 1,05: 0,45
M-50%	1,00: 0,75: 0,75

Fuente: Autores.

Las dimensiones de las baldosas que serán fabricadas se presentan en la Fig. 4. La capa de desgaste tiene un espesor de diez milímetros.

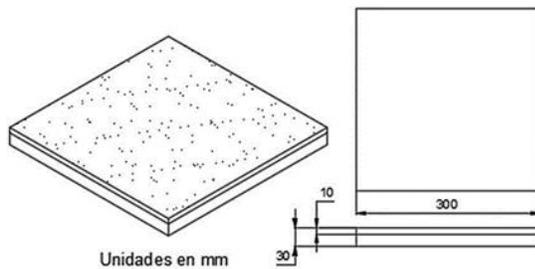


Fig. 4. Dimensiones en mm de las baldosas. Fuente: Autores.

Cabe aclarar que las capas que constituyen la baldosa son morteros hechos "in situ". Estos morteros están compuestos por los componentes primarios, dosificados, mezclados y amasados con agua en el lugar de trabajo sin contar con un sistema de compactación.

C. Ensayos realizados

En esta sección se describen los ensayos realizados para evaluar la influencia en las propiedades físicas y mecánicas que tiene la adición de caucho triturado en la capa de desgaste de las baldosas a una edad de curado superior a los 28 días.

1) Densidad

Para evaluar la densidad aparente de la totalidad del material que constituye las baldosas, se requiere de una muestra constituida por 5 baldosas enteras en estado seco.

En primer lugar, se miden las dimensiones reales de las baldosas; largo, ancho y espesor total para calcular el volumen aparente de las baldosas (ortopedro).

Para medir las dimensiones de longitud y ancho se toma la muestra de 5 baldosas enteras para cada tipo de mezcla. Para la cara vista y revés se tomaron tres medidas con un flexómetro Stanley Power Lock 10'-3 m, resolución de 1/16" / 1 mm: una en el centro y otras a 20 mm de los dos vértices; es decir que

por cada espécimen se registran seis datos. Una vez completada la medición de toda la muestra, los datos se promediaron para definir la dimensión del lado de cada baldosa. Para el espesor total, se realiza la medición sobre la muestra constituida por 5 baldosas enteras, con un calibrador Vernier 6"-150 mm Mitutoyo, resolución de 0,0005"/0,01 mm. Se tomaron tres datos por cada vista lateral: uno en el centro y los otros dos a 50 mm de cada uno de los dos vértices, para un total de 12 medidas por espécimen, los cuales se promediaron para definir el espesor total de cada espécimen [6].

Luego se pesó cada espécimen que conforma la muestra en una balanza digital Lexus modelo Fenix, con una precisión de 1 g; se registró la información y se determinó la masa promedio de cada tipo de baldosa. Posteriormente se calculó la densidad aparente usando (1):

$$\rho = \frac{1000^2 \times m}{V} \quad (1)$$

Donde ρ es la densidad aparente (kg/m^3), m es la masa (g) y V es el volumen aparente (m^3).

2) Absorción de agua cara vista

De cada tipo de mezcla se extraen tres baldosas; de éstas se obtiene un espécimen por baldosa, cuyas dimensiones son de 100 mm \times 50 mm, a los cuales se les retira la capa de revés o base completamente, de forma que se deja únicamente la capa de desgaste o cara vista.

La muestra se ubicó dentro de un horno de laboratorio Thermo Scientific, con rango de temperatura: 50 a 250 °C, con una separación no inferior a 25 mm entre especímenes y las paredes del horno. Después de alcanzar una temperatura de 105 °C \pm 3 °C, la muestra se mantuvo durante 24 horas, hasta obtener una masa constante, la cual se pesó para ser registrada como M_1 . Posteriormente se dejaron enfriar, en un recinto aireado, con una temperatura de 20 °C \pm 2 °C durante 24 h \pm 1/2 h. Luego se sumergieron en un recipiente metálico con agua a la misma temperatura del recinto. Usando una estufa de inducción, se calentó el agua hasta el punto de ebullición, punto en el cual se mantuvo por 1 h, para luego dejarla enfriar hasta una temperatura de 20 °C \pm 2 °C. Después de 12 h \pm 1/4 h de permanencia dentro del agua, se retiró la muestra, y con un paño húmedo se secó el excedente de agua en la superficie; se pesó y se registró como M_2 [6].

La absorción de agua para cada espécimen se calculó con (2):

$$Av = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \times 100 \quad (2)$$

Donde Av es la absorción de agua de la cara vista (%), M_2 es la masa final del espécimen (g) y M_1 es la masa constante del espécimen (g).

El resultado final de absorción de cara vista para la muestra se define como el promedio de los resultados en los especímenes.

3) Absorción total

Para el ensayo, se tomaron tres baldosas por cada tipo de mezcla, de cada una se extrajeron dos especímenes cuyas dimensiones son de 100 mm × 50 mm.

La muestra se ubicó dentro de un horno de laboratorio Thermo Scientific, con rango de temperatura: 50 °C a 250 °C, con una separación no inferior a 25 mm entre especímenes y las paredes del horno. Después de que se alcanzara una temperatura de 105 °C ± 3 °C, la muestra se mantuvo durante 24 horas, hasta obtener una masa constante, la cual se pesó y se registró como M_3 . Posteriormente, se dejó enfriar, en un recinto aireado, con una temperatura de 20 °C ± 2 °C durante 24 h ± ½ h. Luego, se sumergió en un recipiente con agua, sin apilarse con otras muestras, a la misma temperatura del recinto, con la cara vista hacia arriba y paralela a la superficie del agua. Después de 24 h ± ½ h de permanencia dentro del agua, se retiró la muestra, y con un paño húmedo se secó el excedente de agua en la superficie; se pesó y se registró como M_4 [6].

La absorción de agua para cada espécimen se calculó con (3):

$$At = \frac{M_4 - M_3}{M_3} \times 100 \quad (3)$$

Donde At es la absorción total de agua de la baldosa (%), M_4 es la masa final del espécimen (g) y M_3 es la masa constante del espécimen (g).

El resultado final de absorción de cara vista para la muestra se define como el promedio de los resultados en los especímenes.

4) Resistencia al desgaste

Según la norma NTC 2849 la máquina de ensayo debe constar de un disco vertical de desgaste, de 200 mm de diámetro y 10 mm de espesor, que gira 75 veces en un minuto [6]. Sin embargo, la máquina para ensayo de desgaste abrasivo disponible en el Laboratorio de Tribología está construida bajo los requerimientos de la norma ASTM G65, la cual consta de un disco vertical de desgaste, de acero SAE 1020, 9 pulgadas (228,6 mm) de diámetro y 0,5 pulgadas (12,7 mm) de espesor [9]. Por lo tanto, como el ensayo consiste en provocar una huella en la cara de desgaste para medir luego la longitud de la huella, es necesario realizar un ajuste en el tiempo de exposición de la probeta con el disco. Esto se indica a continuación.

Bajo la norma NTC 2849 se debe mantener la probeta 1 min en contacto con el disco girando 75 veces por minuto [6]. Realizando la equivalencia en función de la distancia recorrida, ésta dada por (4):

$$\begin{aligned} \text{Distancia} &= \text{RPM} \times \text{Tiempo} \times \pi \times \text{Diámetro} \quad (4) \\ &= 75 \frac{\text{r}}{\text{min}} \times 1 \text{ min} \times \pi \times 200 \text{ mm} \\ &= 75 \frac{\text{r}}{\text{min}} \times T \text{ min} \times \pi \times 228,6 \text{ mm} \\ T &= 1 \text{ min} \times \frac{200 \text{ mm}}{228,6 \text{ mm}} \times \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} = 52,493 \text{ s} \cong 53 \text{ s} \end{aligned}$$

De esta manera se obtiene un ensayo equivalente manteniendo la probeta 53 segundos en contacto con el disco, girando 75 veces por minuto. Por lo tanto, se tomó una muestra de 5 baldosas por tipo de mezcla, de las cuales se extrae una

probeta por baldosa, cuyas dimensiones son de 25 mm × 100 mm.

La preparación requirió que los especímenes estuvieran sumergidos en agua durante 48 h. Luego de sacarlos del agua se pintó la cara vista con un lápiz rojo, con el fin de facilitar la medición de la huella. Respecto a la máquina, la tolva se llenó con arena sílice con un tamaño de grano comprendido entre tamices 100 y 70 según ASTM E11 y las siguientes condiciones de trabajo: velocidad de giro del disco de 75 vueltas por minuto, una fuerza de 20 N para mantener el espécimen en contacto con el disco [6] y un tiempo de exposición de 53 segundos.

Finalizado el ensayo y retirada la probeta, con un calibrador Vernier 6"- 150 mm Mitutoyo, resolución de 0,0005"/0,01 mm se midió la longitud de la huella, y como resultados de ensayo se registran los valores obtenidos y el promedio de los valores de todos los especímenes que conforman la muestra.

5) Resistencia a la flexión

El ensayo se efectúa sobre una muestra constituida por seis baldosas enteras, las cuales se han mantenido al ambiente del sitio de ensayo un mínimo de 48 h. La mitad de los especímenes se deben ensayar para la cara vista y la otra mitad para el revés, es decir, la mitad de los especímenes se deben ensayar con el esfuerzo a tracción actuando en la cara vista, y la otra mitad con el esfuerzo a tracción actuando en el revés [6].

La separación de los ejes de los rodillos del dispositivo de flexión se obtiene mediante (5):

$$L_1 = L - 2h \quad (5)$$

Donde L_1 es la separación de los ejes de los rodillos (mm), L es el lado mayor del espécimen (mm) y h es el espesor del espécimen (mm).

Dado que los especímenes son de sección cuadrada con una longitud de 300 mm y un espesor total de 30 mm, al remplazar en (5), se determina que la separación entre apoyos es de 240 mm. (véase la Fig. 5).

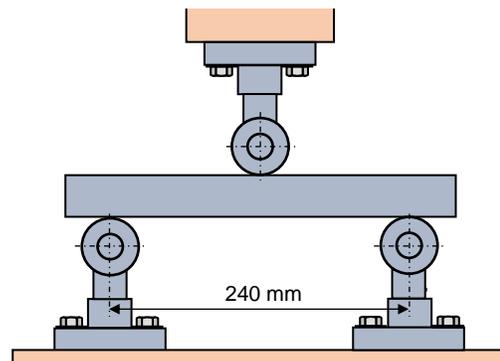


Fig. 5. Dispositivo para determinar la resistencia a la rotura por flexión (vista frontal) [6]. Fuente: Autores.

Inicialmente se digita en el software de la máquina de ensayo universal Ibertest modelo UMIB-600SW la información correspondiente a las dimensiones de las baldosas y la separación entre apoyos, de manera que se obtenga en pantalla una vez finaliza el ensayo la fuerza de rotura y el módulo de

rotura. El valor del módulo de rotura puede ser verificado mediante (6):

$$MR = \frac{3 \times P \times L_1}{2 \times b \times h^2} \quad (6)$$

donde: *MR* es el módulo de rotura (MPa), *P* es la carga en el instante de rotura (N), *L₁* es la separación entre ejes de los apoyos (mm), *b* es el ancho de la baldosa (mm) y *h* es el espesor de la baldosa (mm).

A continuación, se ubicó el espécimen centrado sobre el dispositivo de flexión, con la cara vista o el revés hacia abajo, según la capa sobre la cual se ejerció tracción durante el ensayo de flexión y se aplicó una carga creciente y continua hasta alcanzar la rotura del espécimen bajo las siguientes condiciones: precarga de 50 N y una velocidad de carga de 75 N/s [6].

6) *Resistencia al impacto*

El ensayo consiste en determinar la capacidad de resistencia al impacto de la baldosa mediante la caída libre de una masa esférica de 1 ± 0,01 kg a determinadas alturas [6].

Inicialmente se ubicó el espécimen sobre una capa de fieltro de 10 mm de espesor mínimo. La altura de liberación se midió desde el plano definido por la cara vista de la baldosa hasta el centro de la esfera, garantizándose una caída libre sobre el centro de la baldosa. La altura inicial de caída de la esfera es de 400 mm, la mínima requerida para un uso normal. Si con esta altura de caída no se produce fisura en la baldosa se deja caer nuevamente la esfera sobre ella, aumentando gradualmente la altura de liberación en 100 ± 5 mm, hasta conseguir la rotura de la baldosa o, si ésta no se produce, hasta alcanzar una altura máxima de 1000 mm [6].

El valor que obtener como resultado de este ensayo se toma como la altura en el instante donde la baldosa presenta fisuras, la cual se define como una hendidura igual o superior a 3 mm, una longitud igual o superior a 50 mm y una profundidad igual o superior a 4 mm en su cara vista [6].

III. RESULTADOS

A. *Densidad*

En la Tabla III se presenta la información de la masa para cada uno de los especímenes y la masa promedio, mientras que en la Tabla IV se suministran el volumen aparente, obtenido a partir de las dimensiones reales, la masa y la densidad aparente de cada tipo de baldosa.

Los resultados confirman lo esperado, la incorporación de caucho en la cara vista reduce su masa y, por lo tanto, su densidad, siendo menor a medida que aumenta el porcentaje de granito sustituido por caucho.

TABLA III
MASAS DE LAS BALDOSAS

Probeta	Masa (g)		
	M-00%	M-30%	M-50%
P1	5872	5586	5714

P2	5632	5680	5728
P3	5940	5790	5748
P4	5912	5644	5320
P5	5840	5724	5422
Promedio	5839	5685	5586

Fuente: Autores.

TABLA IV
VOLUMEN APARENTE, MASA Y DENSIDAD APARENTE DE CADA DENOMINACIÓN

Denominación	Volumen (mm ³)	Masa (g)	Densidad (kg/m ³)
M-00%	2775696	5839	2104
M-30%	2851617	5685	1994
M-50%	2850215	5586	1960

Fuente: Autores.

B. *Absorción de agua cara vista*

En las Tablas V y VI se muestran los resultados obtenidos en el ensayo de absorción cara vista.

TABLA V
DATOS ABSORCIÓN DE AGUA CARA VISTA; MASA EN GRAMOS

Probeta	M-00%		M-30%		M-50%	
	M ₁	M ₂	M ₁	M ₂	M ₁	M ₂
P1	99	108	120	134	83	92
P2	118	128	125	138	100	113
P3	93	100	105	115	98	112

Fuente: Autores.

TABLA VI
PORCENTAJE DE ABSORCIÓN CARA VISTA

Probeta	M-00%	M-30%	M-50%
	Av	Av	Av
P1	9,09	11,67	10,84
P2	8,47	10,40	13,00
P3	7,53	9,52	14,29
Promedio	8,36	10,53	12,71

Fuente: Autores.

Teniendo en cuenta los resultados de la Tabla VI, se confirma que la baja adherencia entre el cemento y el caucho triturado, la falta de compactación de los morteros y la retracción permiten la aparición de intersticios, burbujas y defectos tipo grieta, que pueden ser apreciados en la Fig. 6 los cuales, al momento de realizar el ensayo, son ocupados por agua. Esto resulta en un mayor porcentaje de absorción de agua a medida que aumenta el porcentaje en volumen del caucho triturado, como es de esperar.

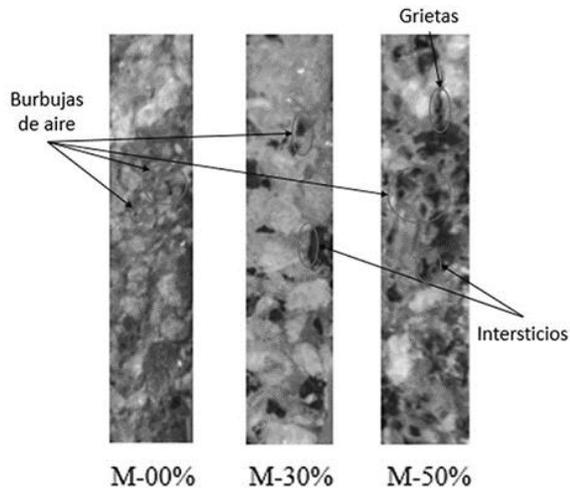


Fig. 6. Defectos internos cara vista, inspección visual. Fuente: Autores.

C. Absorción de agua total

En la Tablas VII y VIII se muestran los resultados obtenidos en el ensayo de absorción total.

TABLA VII
DATOS ABSORCIÓN TOTAL; MASA EN GRAMOS

Probeta	M-00%		M-30%		M-50%	
	M_3	M_4	M_3	M_4	M_3	M_4
P1	306	339	305	344	314	350
P2	285	316	306	343	291	326
P3	299	332	293	329	295	333
P4	300	333	289	327	281	316
P5	290	321	290	326	312	349
P6	294	326	298	336	298	335

Fuente: Autores.

TABLA VIII
PORCENTAJE DE ABSORCIÓN TOTAL

Probeta	M-00%	M-30%	M-50%
	At	At	At
P1	10,78	12,79	11,46
P2	10,88	12,09	12,03
P3	11,04	12,29	12,88
P4	11,00	13,15	12,46
P5	10,69	12,41	11,86
P6	10,88	12,75	12,42
Promedio	8,36	10,53	12,71

Fuente: Autores.

Con base en los resultados de la Tabla VIII, nuevamente se evidencia que las probetas con incorporación de caucho presentan un porcentaje de absorción mayor. Sin embargo, en este caso el aumento en el porcentaje de absorción no depende del porcentaje de caucho sustituido. Esto es realmente interesante, ya que se puede deber a una disminución en la porosidad del mortero debido a una mejor relación agua cemento (a/c) en la mezcla, lo que significa que en la fabricación de baldosas con la incorporación de caucho triturado con la correcta relación a/c, y sometidos a un proceso de compactación, permitiría obtener mejores resultados.

D. Resistencia al desgaste

Los valores de desgaste o longitud de la huella obtenidos para cada espécimen y el promedio de los valores se muestran en la Tabla IX.

TABLA IX
RESULTADOS LONGITUD DE HUELLA

Probetas	M-00%	M-30%	M-50%
	(mm)	(mm)	(mm)
P1	21,9	24,1	19,6
P2	25,4	24,5	23,05
P3	22,3	26,7	23,2
P4	25,3	22,5	23,35
P5	22,2	22,4	24,4
Promedio	23,42	24,04	22,72

Fuente: Autores.

De los resultados se encuentra que bajo las condiciones de fabricación a las que fue sometida la capa de desgaste con la sustitución parcial del granito por caucho triturado, no se presenta diferencia significativa con el objeto de referencia; es decir, no es posible concluir que la adición de caucho mejora o perjudica la resistencia al desgaste de la cara vista.

E. Resistencia a la flexión

En las Tablas X, XI y XII se presentan los valores obtenidos directamente del software de la máquina de ensayo universal Ibertest modelo UMIB-600SW de la fuerza de rotura y módulo de rotura de cada espécimen y el promedio de los valores de todos los especímenes que conforman la muestra.

TABLA X
RESULTADOS ENSAYO FLEXIÓN PARA LA MUESTRA M-00%.

Flexión muestra M-00%		
Probeta	Fuerza (N)	Módulo de rotura (MPa)
Tracción Cara revés	P1	2228,10
	P2	2984,30
	P3	2358,50
Promedio		3,36
Flexión muestra M-00%		
Probeta	Fuerza (N)	Módulo de rotura (MPa)
Tracción Cara vista	P1	710,00
	P2	2572,30
	P3	871,40
Promedio		1,85

Fuente: Autores.

TABLA XI
RESULTADOS ENSAYO FLEXIÓN PARA LA MUESTRA M-30%

Flexión muestra M-30%		
Probeta	Fuerza (N)	Módulo de rotura (MPa)
Tracción Cara revés	P1	2340,10
	P2	1079,20
	P3	359,40
Promedio		1,68

	Probeta	Fuerza (N)	Módulo de rotura (MPa)
Tracción Cara vista	P1	341,30	0,46
	P2	2069,60	2,76
	P3	1107,80	1,48
	Promedio		1,57

Fuente: Autores.

TABLA XII
RESULTADOS ENSAYO FLEXIÓN PARA LA MUESTRA M-50%

Flexión muestra M-50%			
	Probeta	Fuerza (N)	Módulo de rotura (MPa)
Tracción Cara revés	P1	1662,20	2,22
	P2	2860,70	3,81
	P3	2878,50	3,84
	Promedio		3,29
	Probeta	Fuerza (N)	Módulo de rotura (MPa)
Tracción Cara vista	P1	2101,30	2,8
	P2	1151,10	1,53
	P3	2267,20	3,02
	Promedio		2,45

Fuente: Autores.

Al revisar los valores individuales del módulo de rotura para una misma mezcla, se observa una gran variabilidad en los resultados; este comportamiento es típico de los materiales cerámicos. Mirando los resultados, la cara revés (tracción) tiene mayor módulo de rotura; esto indica que la cara revés tiene mayor resistencia a la tracción. Este comportamiento es el esperado, ya que el caucho se comporta como una inclusión o porosidad en el material que genera, al igual que el granito, concentración de esfuerzos y reduce el volumen efectivo que está soportando el esfuerzo. Sin embargo, los resultados no son satisfactorios debido a defectos en los especímenes como se detalla a continuación.

En primer lugar, en el sitio de la fractura con una simple inspección visual, como se muestra en la Fig. 7, se logró identificar en el mortero inferior la existencia de cavidades o vacíos correspondientes a burbujas de aire, cuyo principal efecto es una evidente reducción de la resistencia del material, además de producir un mortero más permeable.

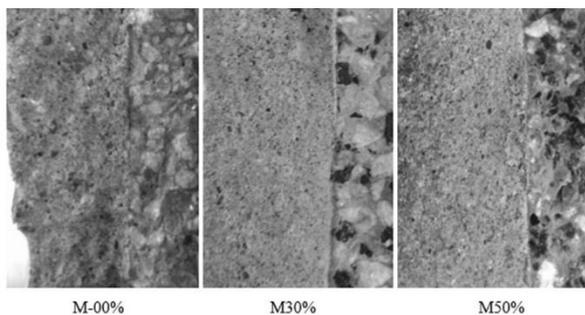


Fig. 7. Vacíos o cavidades en el mortero inferior; inspección visual. Fuente: Autores.

Situación que se presentó en el ensayo de absorción total, en el cual la muestra M-30% presentó mayor permeabilidad y que en el ensayo de flexión arrojó los peores resultados.

Adicionalmente, en la muestra M-30% se identificó que en los especímenes se presenta agrietamiento fino (Fig. 8), probablemente como resultado de un secado rápido, es decir, una baja humedad y temperatura elevada durante el fraguado, debido a las condiciones típicas del ambiente en el lugar de trabajo.

Otra evidencia clara de un exceso de aire en las baldosas es que, en todas las muestras, independiente del porcentaje de caucho, en el respaldo se presentan defectos superficiales (Fig. 9).

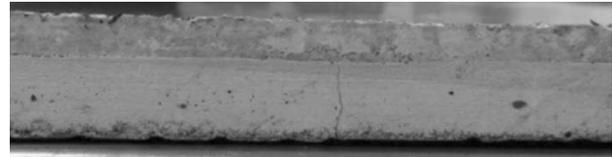


Fig. 8. Agrietamiento fino. Fuente: Autores.

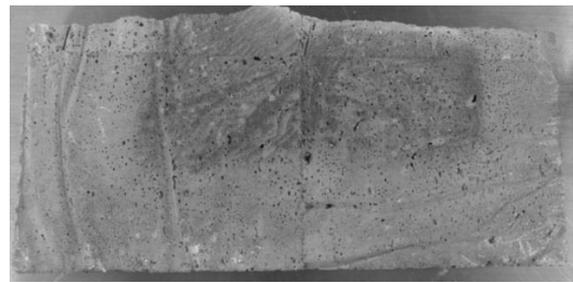


Fig. 9. Defectos superficiales. Fuente: Autores.

Por otra parte, al comparar el comportamiento de la cara vista a tracción de la mezcla de referencia M-00% con la de la mezcla M-50%, los resultados, si bien no son favorables en ningún caso, son equivalentes, lo cual fortalece el objetivo central de este trabajo, que consiste en incorporar el caucho nuevamente a un ciclo productivo.

F. Resistencia al impacto

Las alturas a las cuales se presentaron fracturas sobre las baldosas se muestran en la Tabla XIII.

TABLA XIII
ALTURAS DE LIBERACIÓN PARA LAS CUALES SE OBSERVARON ROTURAS

Probeta	Altura de liberación (mm)		
	M-00%	M-30%	M-50%
P1	600	600	900
P2	600	600	800
P3	600	700	900

Fuente: Autores.

En la Tabla XIII se puede observar cómo las baldosas que contienen caucho triturado en su cara vista tienen mayor resistencia al impacto. Sin embargo, con respecto a los valores

obtenidos en las mezclas M-30%, sólo un espécimen mejoró respecto a las baldosas con mezcla de referencia M-00%. Estos resultados pueden ser atribuidos a una distribución no uniforme del caucho en la capa de desgaste y al mal estado del mortero inferior, ya evidenciado en los ensayos previos. Lo contrario se observa en la baldosa con mezcla M-50%, (ver Fig. 10) con la cual se obtuvieron mejores resultados.

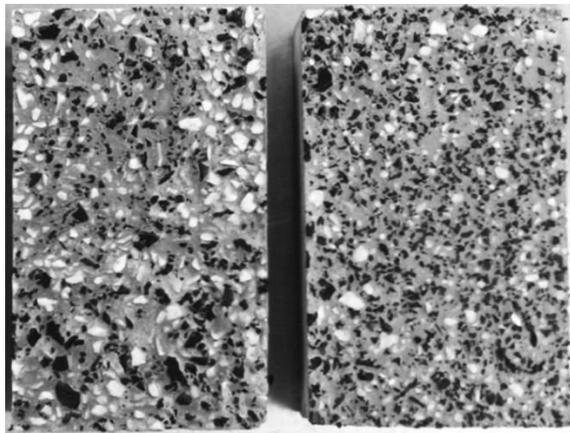


Fig. 10. Distribución del caucho triturado a) Izquierda M-30%, b) Derecha M-50%. Fuente: Autores.

Por otra parte, en aquellos especímenes que tenían caucho incorporado en su capa de desgaste, no se presentaron fracturas limpias, en comparación con la mezcla de referencia M-00%, dado que la fractura iniciaba en el mortero inferior, se presentaba hundimiento de la cara vista e incluso se producía desprendimiento, condiciones que demuestran una mejora de la resistencia al impacto en aquellas capas que tiene caucho triturado.

IV. ANÁLISIS

La evaluación que se realiza a continuación, toma como referencia los requisitos mínimos para baldosas de grano lavado descritos en la norma NTC 2849 [6].

A. Densidad

La densidad, en estado seco, de la totalidad del material que constituye las baldosas debe tener un valor promedio de, al menos, 2000 kg/m^3 [6]. Valor que, como se muestra en la Tabla XIV, no se cumple con las baldosas fabricadas con un 30% y 50% de caucho; sin embargo, la diferencia es mínima, teniendo en cuenta que las baldosas no fueron sometidas a un proceso de compactación.

Denominación	Densidad (kg/m^3)
M-00%	2104
M-30%	1994
M-50%	1960

Fuente: Autores.

B. Absorción de agua

La norma [6] define dos valores de absorción: cara vista y total, los cuales no deben ser mayores a los valores definidos en la Tabla XV.

Tipo de Baldosa	Uso	Cara Vista	Total
Baldosa de grano bicapa	Normal	$\leq 6,5 \%$	$\leq 8,5 \%$
	Intenso	$\leq 6,5 \%$	$\leq 8,5 \%$
	Industrial	$\leq 6,0 \%$	$\leq 8,0 \%$
	Exteriores	$\leq 6,0 \%$	$\leq 8,0 \%$
Baldosa de grano monocapa	Normal	$\leq 6,5 \%$	No aplica
	Intenso	$\leq 6,5 \%$	No aplica
	Industrial	$\leq 6,0 \%$	No aplica
	Exteriores	$\leq 6,0 \%$	No aplica
Baldosa de cemento	Normal	No aplica	$\leq 10,0 \%$
	Intenso	No aplica	$\leq 10,0 \%$

Fuente: Autores.

Los resultados presentados en las Tablas VI y VIII, correspondientes a la absorción de agua cara vista y total de baldosas de grano bicapa respectivamente, no cumple con los requerimientos mínimos de los cuatro posibles usos clasificados por la norma. Esto los hace susceptibles a sufrir un deterioro producto de agentes externos, sin embargo, esta desventaja puede ser aprovechada en aplicaciones donde se requiere fabricar pisos permeables de bajo tráfico.

C. Resistencia al desgaste

La norma [6] establece que la longitud promedio de la huella producida en la cara vista durante el ensayo de desgaste no debe ser mayor a los valores mostrados en la Tabla XVI.

Tipo de baldosa	Uso	Individual	Promedio
		(mm)	(mm)
Baldosa de cemento	Normal	37,0	36,0
	Intenso	35,0	34,0
Baldosa de grano	Normal	35,0	34,0
	Intenso	33,5	32,5
	Industrial	32,0	31,0
	Exteriores	32,0	31,0

Fuente: Autores.

Los valores obtenidos de longitud de huella durante el ensayo de desgaste para cada tipo de baldosas con o sin la incorporación de caucho de la Tabla IX son menores a los establecidos en cada uno de los cuatro posibles usos que clasifica la norma para baldosas de grano.

D. Resistencia a la rotura por flexión

Según la norma [6], el módulo de rotura, como valor promedio para todos los especímenes de la muestra, no debe ser inferior al indicado en la Tabla XVII. Dado que los resultados del ensayo de flexión no son satisfactorios en ningún de los casos, se concluye que las baldosas no cumplen con los requerimientos mínimos de la baldosa de grano bicapa en ninguno de los cuatro usos que clasifica la norma debido a que los valores obtenidos durante el ensayo son menores a los

establecidos por la NTC 2849. Sin embargo, cabe aclarar que el bajo módulo de rotura obtenido no es producto de la incorporación de caucho sino a defectos en el mortero base, por tal razón, para futuros estudios es importante realizar un proceso de compactación que permita reducir el porcentaje de burbujas en la mezcla y un retraso en el secado para evitar la aparición de fisuras.

TABLA XVII
VALORES DEL MÓDULO DE ROTURA MÍNIMO

Tipo de baldosas	Uso	Módulo de rotura promedio (MPa)	
		Cara vista	Revés
Baldosa de cemento	Normal	4,0	3,0
	Intenso	4,0	3,0
Baldosa de grano bicapa	Normal	4,5	3,5
	Intenso	5,0	4,0
	Industrial	6,0	5,0
Baldosa de grano monocapa	Exteriores	6,0	5,0
	Normal	5,0	No aplica
	Intenso	6,0	No aplica
	Industrial	7,0	No aplica
	Exteriores	7,0	No aplica

Fuente: Autores.

E. Resistencia al impacto

La pieza no debe presentar fisura o fisuras para las alturas de caída indicadas en la Tabla XVIII [6].

TABLA XVIII
ALTURA INICIAL DE CAÍDA DE LA ESFERA

Uso previsto	Altura de caída
	(mm)
Normal	400
Intensivo	500
Industrial	600
Exteriores	500

Fuente: Autores.

Los resultados obtenidos durante el ensayo de impacto, previamente presentados en la Tabla XIII, indican que para cada tipo de baldosa se cumple con el requisito mínimo exigido. También, se observa que para las baldosas con 0% y 30% de caucho la mínima altura a la que se ha producido la primera fisura es de 600 mm; sin embargo, no se recomendaría su uso industrial ya que no existiría capacidad de exceso sobre su requerimiento, es decir, el factor de seguridad no sería un valor mayor a uno. El caso contrario ocurre con las baldosas con un 50% de caucho, dado que la primera fisura se ha producido a 800 mm o más.

V. CONCLUSIONES

Tras haber realizado ensayos para evaluar la influencia de la sustitución parcial del granito por caucho proveniente de llantas fuera de uso en la capa de desgaste de baldosas de grano lavado, los resultados indican que:

La densidad en las baldosas se ve disminuida con el aumento del porcentaje de sustitución de granito por caucho. Esto se debe a la diferencia de densidades entre el caucho y el agregado que fue reemplazado.

Los resultados obtenidos en el ensayo de absorción indican claramente que el aumento en el porcentaje de absorción de agua es proporcional al aumento en la cantidad de agregado de caucho en la capa de desgaste. El aumento se debe a la formación de intersticios por la baja adherencia entre el caucho y el cemento, aparición de vacíos o burbujas de aire debido a una baja compactación de mezclas y al agrietamiento debido a la retracción del cemento en condiciones de baja humedad.

Con respecto a la resistencia al desgaste, no se puede dar un dictamen del efecto que tiene el caucho en la capa de desgaste, dado que el tamaño de la huella que deja sobre la superficie de las mezclas con incorporación de caucho no presenta variaciones considerables con respecto a la mezcla sin caucho o de referencia.

La resistencia al impacto se ve favorecida con el aumento en el porcentaje de caucho presente en la baldosa, llegando a obtenerse primero la fractura en la capa base. Sin embargo, en las baldosas con un 30% de caucho la mejora respecto a la mezcla sin caucho es mínima, no siendo proporcional a los resultados obtenidos para la mezcla con 50% de caucho.

Con respecto a la resistencia a la flexión, si bien no se presentaron resultados favorables, tal vez por la presencia de defectos en el mortero, no es posible atribuir una disminución importante en la resistencia producto de la incorporación de caucho en la capa de desgaste. Por lo tanto, se requieren nuevos ensayos con un mortero base que se encuentre en mejores condiciones.

Puede concluirse entonces que la posibilidad de reincorporar el caucho proveniente de llantas fuera de uso en la capa de desgaste de baldosas de terrazo o pisos vaciados no debe ser descartado, debido a que la resistencia al impacto se ve altamente favorecida, la resistencia al desgaste no presenta cambios y sólo la absorción de agua se ve perjudicada producto de la incorporación de caucho, el cual puede ser solucionado sometiendo la capa vista a un proceso de compactación o aplicando una capa impermeabilizante; sin embargo, esta deficiencia podría ser aprovechada en la fabricación de pisos permeables de bajo tráfico para exteriores.

Para futuros estudios, se recomienda realizar un proceso de compactación de los morteros que conforman las baldosas, que permita desalojar la mayor cantidad de burbujas de aire posible, con el fin de conseguir una mayor resistencia de los morteros bajo pruebas mecánicas como la flexión, además de una reducción en el porcentaje de absorción. También se recomienda retrasar el secado del mortero con un curado en agua, preferiblemente con una inmersión completa en agua, con el fin de controlar el agrietamiento y la formación de fisuras.

REFERENCIAS

- [1] H.A. Torres Ospina, "Valoración de propiedades mecánicas y de durabilidad de concreto adicionado con residuos de llantas de caucho," Tesis M.S, Esc. Col. de Ing. Julio Garavito, Bogotá, D.C., 2014.
- [2] M. Barra Bizinotto, F. Jordana Riba, V. Royano García y E. Vázquez Ramonich, "Realización de ensayos de laboratorio de hormigón con caucho procedente de neumáticos fuera de uso (NFU)," [En línea]. Disponible: <http://hdl.handle.net/2117/6046>, 2009.
- [3] H. Eraso Valencia y N. Ramos Rojas, "Estudio del comportamiento mecánico del concreto, sustituyendo parcialmente el agregado fino por

- caucho molido recubierto con polvo calcáreo,” Tesis de pregrado, Dep. de Ing. Civil e Industrial, Pont. U. Javeriana, Santiago de Cali, Valle, 2015.
- [4] R. Siddique y T.R. Naik, “Properties of concrete containing scrap-tire rubber - an overview,” *Waste Mgmt.*, vol. 24, no. 6, pp. 563-569, 2004, DOI:10.1016/j.wasman.2004.01.006.
- [5] CEMEX, “Cemento uso general,” [En línea]. Disponible: <http://www.cemexcolombia.com/SolucionesConstructor/files/UsosGenerales.pdf>.
- [6] Norma Técnica Colombiana ICONTEC Baldosa con Superficie de Grano (Terrazo), NTC 2849, 1997.
- [7] L. Gutiérrez de López, *El concreto y otros materiales para la construcción*. Manizales, Colombia: Universidad Nacional de Colombia sede Manizales, 2003, pp. 115-129.
- [8] A. Campitelli. “Acgranito.com - Revestimientos de pisos y fachadas,” [En línea]. Disponible: <http://www.acgranito.com/contactenos.html>, 2008.
- [9] Standard Practice for Conducting Dry Sand/Rubber Wheel Abrasion Tests. ASTM International. Pennsylvania, 2012.

Miguel Á. Granada Mejía es un profesional en Ingeniería Mecánica, egresado en el año 2017 de la Universidad Tecnológica de Pereira, con bases investigativas en materiales y la reutilización de desechos en aplicaciones de ingeniería. Actualmente es supervisor de mantenimiento en Graneles y Carga S.A, en Yotoco (Valle del Cauca).
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8450-2136>.

Sergio E. Arbeláez Ríos es un profesional en Ingeniería Mecánica, egresado en el año 2017 de la Universidad Tecnológica de Pereira, con bases investigativas en materiales y la reutilización de desechos en aplicaciones de ingeniería.

Estudió una maestría en Desarrollo y Diseño de Productos en la universidad UACJ (Ciudad Juárez, México).
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2482-3645>.

Luz S. Arias Maya se graduó en Ingeniería Mecánica en 1994 en la Universidad Tecnológica de Pereira (Pereira, Colombia). Posee un M.Sc. en Materiales para Aplicaciones de Ingeniería de la Universidad de Surrey (Guildford, Reino Unido). Sus intereses de investigación incluyen ciencia e ingeniería de materiales y procesos de fabricación. Es profesora en la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Tecnológica de Pereira.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5030-3999>.

Libardo V. Vanegas Useche se graduó en Ingeniería Mecánica en 1994 en la Universidad Tecnológica de Pereira (Pereira, Colombia). Posee un M.Sc. en Tecnología Avanzada de Fabricación y Gestión de Sistemas en 1999 de la Universidad de Manchester (Manchester, Reino Unido). Obtuvo su Ph.D. en la Universidad de Surrey (Guildford, Reino Unido). Realizó una estancia postdoctoral en la Universidad de Gante (Bélgica) en 2019. Sus intereses de investigación incluyen fatiga, mecánica de fractura, diseño mecánico y modelado de elementos finitos. Es profesor en la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Tecnológica de Pereira.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5891-8696>.