

# Lightweight concrete masonry blocks produced with: tire rubber and metakaolin

## Bloques de mampostería de hormigón liviano fabricados con caucho de neumáticos y metacaolín

C. Fioriti<sup>1</sup>\*, R. Segantini\*, J. Pinheiro \*, J. Akasaki \*, F. Spósito \*

\* Universidade Estadual Paulista – São Paulo, BRASIL

Fecha de Recepción: 05/04/2019  
Fecha de Aceptación: 14/06/2020  
PAG 295-307

### Abstract

*This paper presents the evaluation of lightweight concrete masonry blocks, incorporated with tire rubber and metakaolin, aiming reduce its bulk density and obtaining dimensional values of compressive strength and water absorption in according to the Brazilian standard ABNT NBR 6136: 2016. Three mixtures of concrete were produced by the replacement of 9%, 18% and 27% (by volume) of the fine aggregate by tire rubber, and one mixture without rubber (reference). In all mixtures the procedure of replacing 10% (by weight) of cement to metakaolin was adopted. Family M-15x30 of concrete blocks were performed using an entirely manual process, with PVC molds and PET bottle devices to casting the hollow characteristic of blocks. The results indicated that the concretes produced with rubber and metakaolin provided bulk density values lower than 2000 kg/m<sup>3</sup>, thus featuring lightweight concrete characteristics. In the dimensional verification, all the blocks series produced reached of requirements of the current standard. Although only the R0, R1 and R2 series had structural function, however all mixtures achieved water absorption ratio lower than 13%. Therefore, the tire rubber as fine aggregate in concrete masonry blocks is thought to be a good alternative for reuse of this waste material.*

**Keywords:** Masonry block; lightweight concrete; waste tire rubber; metakaolin; alternative material

### Resumen

Este artículo evalúa bloques de mampostería de hormigón liviano, a los cuales se les ha incorporado caucho y metacaolín con el objeto de reducir su densidad aparente y obtener valores dimensionales de resistencia a la compresión y absorción de agua, en conformidad con la norma brasileña ABNT NBR 6136: 2016. Se fabricaron tres mezclas de hormigón, reemplazando el 9%, 18% y 27% (en volumen) del agregado fino por caucho de neumáticos y además una mezcla sin caucho (referencia). En todas las mezclas, se adoptó el procedimiento de reemplazar el 10% (en peso) de cemento por metacaolín. Los bloques de hormigón del tipo M-15x30 se fabricaron manualmente, utilizando moldes de PVC y elementos de botellas PET para moldear huecos de los bloques. Los resultados indican que los hormigones fabricados con caucho y metacaolín arrojan valores de densidad aparente menores a 2000 kg/m<sup>3</sup>, presentando así características de hormigón liviano. En cuanto al análisis de las dimensiones, todas las series de bloques producidas cumplieron con los requisitos de la norma vigente. Si bien solo las series R0, R1 y R2 tienen función estructural, todas las mezclas obtuvieron tasas de absorción de agua inferiores al 13%. Por lo tanto, se considera que el caucho de neumáticos como agregado fino en los bloques de hormigón es una buena alternativa para reutilizar este material de desecho.

**Palabras clave:** Bloque de mampostería; hormigón liviano; caucho de neumáticos de desecho, metacaolín; material alternativo

## 1. Introducción

Actualmente, el sector de la construcción consume una gran cantidad de materias primas para construir sus edificios, lo que genera un gran volumen de materiales de desecho. Por lo tanto, este sector tiene gran interés en disminuir el consumo de recursos naturales, promoviendo técnicas constructivas que se rijan por la sustentabilidad.

Al mismo tiempo, el uso de caucho de neumáticos en la producción de hormigón contribuye a resolver uno de los problemas ambientales más cruciales, como es la eliminación de desecho sólido. La acumulación de neumáticos desechados en el ambiente es una gran preocupación, debido a que el caucho no se degrada fácilmente. En este escenario, el hormigón merece un capítulo, ya que es el material más utilizado debido a su versatilidad, bajo costo, fácil fabricación, mayor resistencia mecánica y durabilidad. Con respecto a su contribución a la sustentabilidad, el hormigón muestra un potencial enorme, debido a su capacidad para incorporar en su estructura materiales reciclados y desecho industrial. Además, colabora con la reducción de CO<sub>2</sub> en la atmósfera y se puede reciclar infinitamente.

<sup>1</sup> Autor de correspondencia:

Universidade Estadual Paulista – São Paulo, BRASIL  
E-mail: fioriti@fct.unesp.br



Existen varios artículos sobre la producción de hormigón con caucho de neumáticos que destacan las posibilidades de este material para reemplazar parcialmente los agregados de origen natural, contribuyendo así al medio ambiente a través del uso de un desecho contaminante en vez de materiales naturales finitos. Sin embargo, se observaron cambios en el comportamiento del hormigón en su estado fresco y endurecido, al compararlo con los hormigones sin incorporación de caucho de neumáticos.

En general, estas investigaciones mostraron que la producción de hormigón con caucho de neumáticos implica una disminución significativa de la densidad aparente, la resistencia a la compresión y a la flexión. Por otra parte, se observa un mejoramiento de la resistencia al impacto y de la aislación térmica (Pelisser et al., 20011); Fioriti et al., 2010).

(Rossignolo y Oliveira, 2007) afirman que el hormigón liviano se puede aplicar en varias áreas de la construcción, donde su uso se puede justificar para reducir la densidad aparente del hormigón, minimizando las cargas aplicadas a los edificios.

De acuerdo con (Albuquerque et al., 2008), el comportamiento característico del hormigón con caucho de neumáticos, con respecto a la resistencia a la flexión y al módulo de elasticidad, se atribuye a la capacidad del caucho de soportar una gran deformación elástica antes de que el hormigón se fracture. (Granzotto y Souza, 2013) reportaron que la pérdida de resistencia a la compresión en el hormigón con caucho de neumáticos se puede atribuir al módulo de elasticidad y a la débil adherencia entre la matriz de cemento y el caucho.

(Selung et al., 2013) también observaron una significativa reducción de la resistencia a la compresión en los hormigones que incorporaron hasta un 25% de caucho de neumáticos y manteniéndose prácticamente constante hasta el 35%. La disminución promedio de la resistencia a la compresión de sus mezclas con 15%, 25% y 35% de caucho, comparado con la mezcla de referencia, fue de 51%, 88% y 89%, respectivamente. Por ende, los autores concluyen que en la mezcla con 15% de caucho, la resistencia a la compresión cumple con los requisitos mínimos de la antigua norma brasileña; es decir, la norma clase C ( $\geq 3,0$  MPa) relativa a la función estructural en elementos de mampostería sobre el nivel del suelo. En cambio las otras mezclas, con incorporación de caucho de 25% y 35%, no cumplieron con las especificaciones de ABNT NBR 6136:2007.

Además, en relación con la reducción de la resistencia a la compresión, (Peliesser et al., 2012) introdujeron un 10% de metacaolín en reemplazo del cemento, con el objeto de compensar la pérdida debido al uso de caucho de neumáticos, facilitando así el proceso de fabricación de los paneles de fachada y alcanzando valores de resistencia a la compresión mayores a 20 MPa. Este estudio se realizó con mortero en vez de hormigón para poder fabricar paneles más delgados.

(Rossignolo y Oliveira, 2007) reportaron que la adición de un 10% de metacaolín en reemplazo del cemento aumentó la resistencia a la compresión y el desempeño de la resistencia a la tracción por compresión diametral, aumentó la durabilidad del hormigón liviano sin cambiar significativamente los valores del módulo de elasticidad, indicando así que incluso en el hormigón liviano, donde el agregado grueso es el principal factor limitante de la resistencia mecánica, los cambios promovidos por el metacaolín en la matriz de cemento mejoraron el desempeño de esas propiedades.

(Xie et al., 2020) utilizaron hormigón reciclado, reemplazando el agregado grueso por agregado de hormigón reciclado y el cemento por nano metacaolín y encontraron que el aumento en la dosificación de nano metacaolín mejoró la resistencia mecánica. En el hormigón con reemplazo del 100% del agregado reciclado y un 7% de nano metacaolín, se produjo un aumento de la fuerza mecánica de un 27,1%, con un 45,9 MPa. No obstante, de acuerdo con (Muduli y Mukharjee, 2020), el reemplazo de cemento por un 15% de metacaolín en el hormigón con 50% de agregado de hormigón reciclado, en vez del agregado grueso natural, condujo a valores similares de resistencia a la compresión, comparado con el hormigón de referencia.

(Pelisser et al., 2012) concluyeron que en el mortero u hormigón liviano, el uso de caucho de neumáticos y metacaolín favorece la reducción del consumo de materias primas y además ayuda al reciclaje de esos materiales, que a su vez permiten la producción de materiales de construcción con mayor eficiencia térmica.

(Fioriti et al., 2010) realizaron bloques entrelazados para pavimentación, reemplazando los agregados por caucho de neumáticos en 0%, 8%, 10%, 12% y 15% (en volumen) y obtuvieron tasas promedio de absorción de agua de 3,43%, 3,89%, 3,12%, 3,96% y 6,30% respectivamente. Los autores también mencionaron que al utilizar caucho con distinta granulometría en el hormigón, las partículas de caucho influyen directamente en la capacidad de absorción de agua, produciendo cambios debido a la menor absorción de agua de las partículas más finas.

Con respecto a la estructura menos porosa del caucho de neumáticos y la propiedad de repelencia al agua, (Santos et al., 2010) reportaron que cuando este material es incorporado a los hormigones, aumenta su durabilidad.

Sin embargo, en los hormigones fabricados con caucho de neumáticos se observó una disminución de la permeabilidad debido al agregado no higroscópico, mejorando así significativamente la durabilidad de los hormigones que tienen procesos de degradación asociados a la penetración de agentes agresivos y  $\text{CO}_2$ . Aunque presentaron una pérdida de resistencia a la compresión, siendo el mayor problema el aumento del consumo de cemento para la misma clase de resistencia. Por ende, este estudio evalúa bloques de hormigón liviano para



mampostería, que incorporan caucho de neumáticos y metacaolín, destinados a reducir la densidad aparente, obtener valores dimensionales, resistencia a la compresión y absorción de agua en conformidad con la norma ABNT NBR 6136:2016.

## 2. Materiales y metodos

El estudio experimental caracterizó física de los materiales utilizados. Además, se fabricó el hormigón y se evaluó el ensayo de asentamiento, el contenido de aire y la densidad aparente en estado fresco. Se preparó la mezcla de los bloques de mampostería para evaluar su peso, dimensiones, resistencia a la compresión y absorción de agua en el estado endurecido.

### 2.1 Propiedades de los materiales

#### 2.1.1 Cemento

Se usó cemento CPV-ARI, el cual otorga un desmoldado rápido y agiliza el proceso de producción. La caracterización física del cemento consistió en los siguientes ensayos: superficie específica – Blaine (ABNT NBR NM 76:1998), fraguado final (ABNT NBR 16607:2018), gravedad específica (ABNT NBR 16605:2017) y resistencia a la compresión del cemento (ABNT NBR 7215:2019). La (Tabla 1) muestra los resultados obtenidos.

Tabla 1. Características físicas del cemento CPV-ARI

<b>Tamiz No. 200 (% retenido)</b>			1,53
<b>Tamiz No. 350 (% retenido)</b>			6,14
<b>Área específica – Blaine (cm/g)</b>			3766
<b>Densidad aparente (g/cm)</b>			1,05
<b>Gravedad específica (g/cm)</b>			3,03
<b>Fraguado inicial (h:min)</b>			2:05
<b>Fraguado final (h:min)</b>			3:04
<b>Resistencia a la compresión uniaxial (MPa)</b>	<b>Consistencia</b>	<b>Gramo</b>	150
		<b>a/c</b>	0,48
	<b>Deformación (MPa)</b>	<b>3 días</b>	38,70
		<b>7 días</b>	39,80
		<b>28 días</b>	51,70

#### 2.1.2 Agregados

Se utilizó arena de río como agregado fino. Se realizaron los siguientes ensayos para la caracterización: determinación del material con finura menor al tamiz de 75  $\mu\text{m}$  mediante lavado (ABNT NBR NM 46:2003), densidad aparente y gravedad específica (ABNT NBR NM 52:2009), absorción de agua (ABNT NBR NM 30:2001) y determinación del contenido de impurezas orgánicas (ABNT NBR NM 49:2001).

Se utilizó grava de origen basáltico como agregado grueso. Se realizaron los siguientes ensayos para la caracterización: densidad aparente (ABNT NBR NM 45:2006), gravedad específica (ABNT NBR NM 53:2009), absorción de agua (ABNT NBR NM 30:2001) y determinación de terrones de arcilla y contenido de materiales desmenuzables (ABNT NBR 7218:2010). La (Tabla 2) presenta los resultados obtenidos de la caracterización de dichos agregados.

Tabla 2. Características de los agregados

Agregados	SSS (g/cm)	Densidad aparente (g/cm)	Gravedad específica (g/cm)	Absorción de agua (%)	Impurezas orgánicas (%)	Pulverizado (%)
Fino	2,627	1,532	2,644	0,38	+ light	0,40
Grueso	2,945	1,585	3,014	1,15	–	1,20

\*s.s.s = saturado superficialmente seco



### 2.1.3 Metacaolín

Una empresa ubicada en Jundiaí-SP proporcionó el metacaolín; la (Tabla 3) muestra los valores de la caracterización, que cumplen con los límites estipulados en la norma ABNT NBR 15894-1:2010.

Tabla 3. Características del metacaolín

<b>Tamiz para desechos No. 325 (% retenido)</b>	5
<b>Superficie específica (cm<sup>2</sup>/g)</b>	240000
<b>Densidad aparente (g/cm<sup>3</sup>)</b>	0,62
<b>Gravedad específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2,58
<b>Desempeño con cemento – 7 días (%)</b>	115
<b>Método Chapelle para determinar la actividad puzolánica (mg Ca(OH)<sub>2</sub>/g)</b>	1000

### 2.1.4 Caucho de neumáticos

El caucho de neumáticos utilizado fue proporcionado por una empresa de recauchaje ubicada en Ilha Solteira-SP, la cual realiza el proceso mecánico de recauchaje de neumáticos de camiones y maquinaria pesada exclusivamente.

Con el objeto de observar el efecto de este material en las mezclas de hormigón, el caucho de neumáticos fue sometido a un proceso de tamizado, utilizando un tamiz No. 6,3 para pasar el material, como se muestra en la (Figura 1).



Figura 1. Proceso de tamizado

La (Tabla 4) señala los resultados del ensayo de densidad aparente (ABNT NBR NM 45:2006) y gravedad específica (ABNT NBR NM 52:2009) del caucho de neumáticos.

Tabla 4. Características del caucho

<b>Densidad aparente (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Gravedad específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>
0,348	1,090





### 2.1.5 Procedimiento de mezclado y dosificación de la mezcla

En este trabajo se usaron mezclas en volumen de los materiales secos, reemplazando el 9%, 18% y 27% (en volumen) del agregado fino por caucho de neumáticos. El contenido de caucho representa una cantidad significativa, debido a que la gravedad específica del caucho es menor a la del agregado fino. Otras investigaciones sobre compuestos de cemento con caucho de neumáticos utilizaron entre 3% y 30% de contenido en volumen (Pelisser et al., 2011); (Fioriti et al., 2010); (Sukontasukkul y Chaikaew, 2006).

Además, en todas las mezclas se reemplazó el 10% (en peso) del cemento por metacaolín, con el fin de obtener un hormigón más liviano con densidad aparente menor a 2000 kg/m<sup>3</sup>. El estudio disponía de una mezcla de referencia (sin caucho) para poder comparar. El consumo de cemento se estableció en 350 kg/m<sup>3</sup>; este valor fue estudiado en cuatro fábricas de elementos prefabricados en el estado de Sao Paulo, donde el consumo de cemento para la fabricación de bloques de mampostería varía entre 250 y 425 kg/m<sup>3</sup> aproximadamente. Sin embargo, ese límite de consumo es variable, ya que depende del tipo de maquinarias utilizadas por las fábricas de bloques y la calidad de los materiales.

Inicialmente se realizó la transformación de la mezcla en volumen por masa, usando los valores de gravedad específica del cemento, agregados finos y gruesos, metacaolín y caucho. La relación agua/cemento (a/c) se estableció en 0,70, con el objeto de facilitar el colado de bloques sin la ayuda de compactadores vibratorios. Adicionalmente, en todas las mezclas, la trabajabilidad del hormigón se fijó en 140 ± 20 mm sin modificar la relación a/c, usando para ello un superplastificante a base a policarboxilato. Por último, el trabajo incluyó el colado de cuatro mezclas de hormigón, donde tres mezclas utilizaron caucho y una no contenía caucho (referencia). Las (Tabla 5) y (Tabla 6) muestran la dosificación de los materiales de todas las mezclas en volumen y masa, respectivamente.

**Tabla 5.** Cantidad de materiales utilizada en las mezclas, en volumen

Mezcla	Mezcla en volumen	
	Cemento : agregado fino : caucho : agregado grueso : a/c	Caucho (%)
R0	1 : 4,95 : 0,00 : 0,68 : 0,629	0
R1	1 : 4,43 : 0,50 : 0,68 : 0,629	9,2
R2	1 : 3,94 : 1,00 : 0,68 : 0,629	18,0
R3	1 : 3,44 : 1,50 : 0,68 : 0,629	26,8

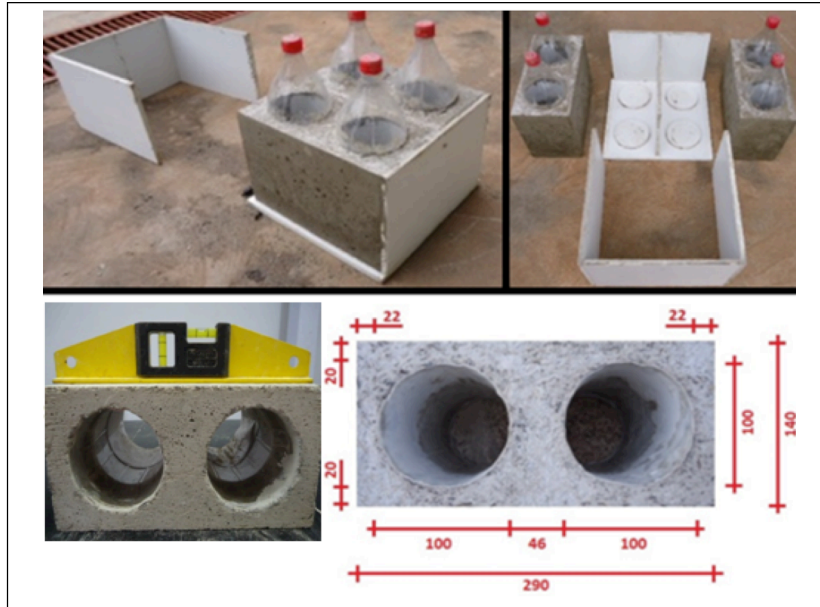
**Tabla 6.** Cantidad de materiales utilizada en las mezclas, en masa

Mezcla	Mezcla en masa (kg/m <sup>3</sup> )							
	Cemento	Metacaolín	Arena	Caucho	Arcilla	Agua	Aditivo	Caucho (%)
R0	315,00	35,00	1506,28	0,00	228,14	222,72	1,89	0,00
R1	315,00	35,00	1349,63	64,78	228,14	222,72	0,95	9,00
R2	315,00	35,00	1199,00	127,07	228,14	222,72	0,95	18,00
R3	315,00	35,00	1048,37	189,36	228,14	222,72	0,95	27,00

### 2.1.6 Fabricación de los moldes y colado de los bloques de mampostería

Los moldes usados para el colado manual de los bloques se confeccionaron con losetas de PVC blando (cloruro de polivinilo) y botellas PET (terefalato de polietileno) para moldear los huecos los bloques. Las dimensiones de los moldes fueron iguales a la familia de bloques del tipo M-15x30: (14 cm x 19 cm x 29 cm) espesor, altura y longitud, respectivamente, de acuerdo con la norma ABNT NBR 6136:2016. En la (Figura 2) se observan los moldes y muestras de los bloques de mampostería con sus medidas en milímetros.





**Figura 2.** Moldes de PVC y botellas PET, así como el bloque de mampostería con sus medidas en milímetros

El proceso de densificación de los bloques se realizó en una mesa vibratoria de compactación de dos etapas; primero, llenando el 50% de la altura del molde y, segundo, con llenado completo del molde y se mantuvieron en condiciones de laboratorio. Los bloques se desmoldaron a las 24 horas y se colocaron en una cámara húmeda a una temperatura de  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  durante 21 días.

## 2.2 Programa experimental

### 2.2.1 Ensayo de asentamiento

El ensayo de asentamiento se condujo de acuerdo con la norma ABNT NBR NM 67:1998. La (Figura 3) muestra la medición del ensayo de asentamiento.



**Figura 3.** Evaluación del ensayo de asentamiento

### 2.2.2 Contenido de aire

En todas las mezclas, el contenido de aire se ensayó mediante el método de presión, según la norma ABNT NBR NM 47:2002. La (Figura 4) muestra este ensayo.

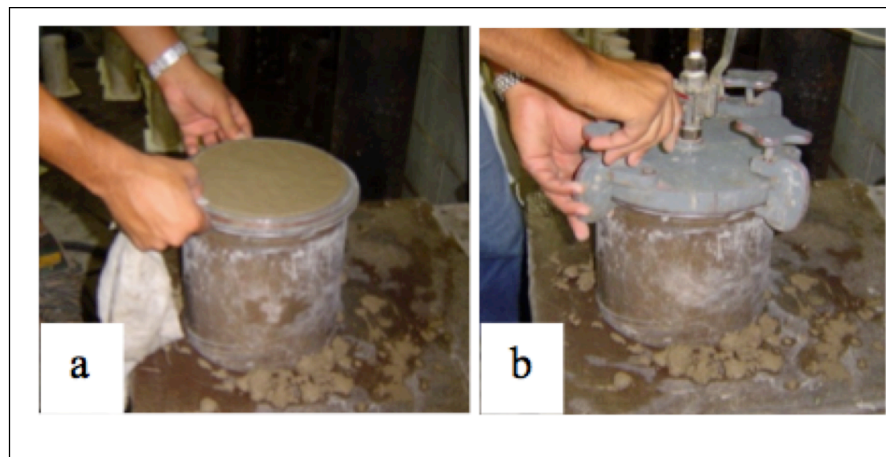


Figura 4. a) Ensayo inicial; b) Aplicación de presión

### 2.2.3 Dimensiones de los bloques

El análisis de las dimensiones se realizó de acuerdo con la norma ABNT NBR 12118:2014. Para este ensayo se utilizó una regla y un pie de metro para medir el ancho, longitud y espesor de los bloques, además de una pesa digital para verificar la masa. El ensayo se llevó a cabo con ocho bloques por cada mezcla a los 28 días. La (Figura 5) muestra la medición de los bloques.



Figura 5. Mediciones de los bloques

### 2.2.4 Peso y densidad aparente

La evaluación del peso de los bloques se hizo pesando cada una de las muestras a los 28 días y se estudió la densidad aparente de los hormigones.

### 2.2.5 Resistencia a la compresión

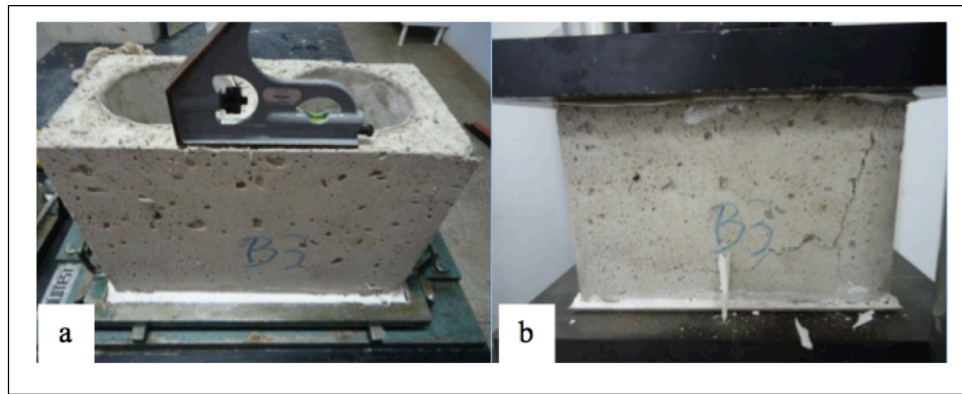
El ensayo se realizó según la norma ABNT NBR 12118:2014. Dado que la cara superior de los bloques presenta irregularidades, se refrentaron con pasta de yeso, como se muestra en la (Figura 6). También se utilizaron ocho bloques por mezcla que se ensayaron a los 28 días. La resistencia a la compresión característica del bloque ( $f_{bk}$ ), referida al área bruta, se determinó mediante la (Ecuación 1).

$$f_{bk} = f_{bm} - 1,65 \cdot sd \quad (1)$$

Donde:

$f_{bm}$  = Resistencia a la compresión promedio del bloque

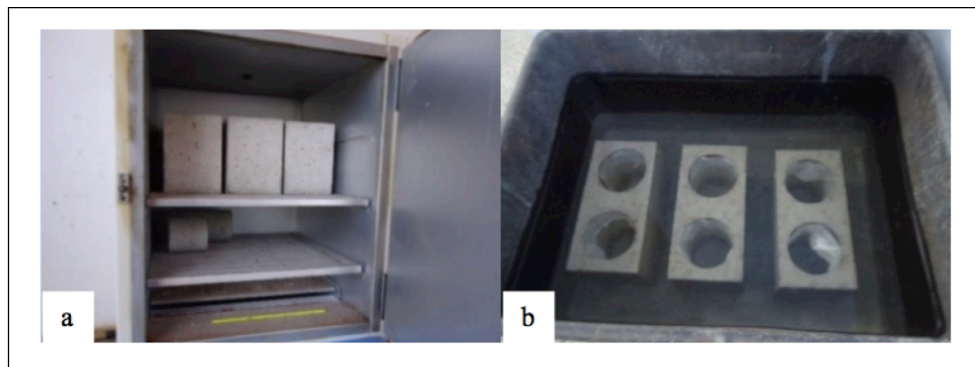
$sd$  = desviación estándar.



**Figura 6.** a) Refrentado de los bloques; b) Bloques durante el ensayo

### 2.2.6 Absorción de agua

La absorción de agua se midió de acuerdo con la norma ABNT NBR 12118:2014 y se utilizaron ocho muestras por mezcla a los 28 días. El porcentaje de absorción se obtuvo mediante la relación agua absorbida/masa secada en horno. La (Figura 7) muestra los pasos de este ensayo.



**Figura 7.** a) Bloques secándose en el horno; b) Bloques inmersos en agua

## 3. Resultados y discusión

### 3.1. Ensayo de asentamiento

La (Tabla 7) muestra que los valores del ensayo de asentamiento disminuyeron al aumentar la dosificación de caucho de neumáticos, disminuyendo así la trabajabilidad de la mezcla, donde la referencia logró un asentamiento de 21,95% más que la R3.

Esta reducción de la trabajabilidad también se puede explicar por la forma y textura del caucho de neumáticos, las que dificultan el empacamiento de las partículas. Sin embargo, todas las mezclas alcanzaron el asentamiento (S) esperado de  $140 \pm 20$  mm; por lo tanto, las mezclas se pueden especificar según la clase de fluidez S100 ( $100 \leq S < 160$  mm) de acuerdo con la norma ABNT NBR 7212:2012. Además, esto ayudó al colado de los bloques.

(Granzotto y Souza 2013) comprobaron que la incorporación de caucho en el hormigón disminuyó la trabajabilidad debido a que el área específica del caucho es mayor al área específica de la arena; por ende, los autores aumentaron, cuando fue necesario, la relación a/c para mantener la misma trabajabilidad.



### 3.2 Contenido de aire

La (Tabla 7) revela que a mayor proporción de caucho, mayor es el contenido de agua en las mezclas. Las mezclas con caucho (R3, R2 y R1) muestran porcentajes más altos de contenido de aire, 47%, 27% y 13% respectivamente, comparadas con la mezcla de referencia; estos resultados concuerdan con (Santos et al., 2010); (Granzotto y Souza, 2013). Con respecto a la cantidad de aire, si bien mejora la trabajabilidad y contribuye a reducir la densidad aparente, esta cantidad afecta directamente a la resistencia a la compresión (Cintra et al., 2014).

**Tabla 7.** Resultados del ensayo de asentamiento y del contenido de aire

Mezcla	R0	R1	R2	R3
Ensayo de asentamiento (mm)	150	149	134	123
Contenido de aire (%)	15	17	19	22

### 3.3. Dimensiones de los bloques

En las (Tabla 8) y (Tabla 9) se presentan las dimensiones de los bloques, que cumplen con todos los requisitos de la norma ABNT NBR 6136:2016. Una vez desmoldados los bloques, es posible observar uniformidad en todos los puntos y la ausencia de bordes afilados y grietas u otros defectos.

**Tabla 8.** Resultados promedio de las dimensiones de los bloques

Mezcla	Ancho (mm)	Altura (mm)	Longitud (mm)
R0	140,0	189,0	291,0
R1	140,0	189,0	290,0
R2	141,0	188,0	290,0
R3	139,0	190,0	291,0

Nota: Según la norma ABNT NBR 6136:2016, la tolerancia admisible en el ancho es de  $\pm 2,0$  mm; en la longitud y altura son de  $\pm 3,0$  mm

**Tabla 9.** Resultados promedio de las dimensiones de las paredes de los bloques

Mezcla	Paredes longitudinales (mm)	Paredes transversales	
		Paredes (mm)	Espesor equivalente (mm/m)
R0	20,1	29,0	300,0
R1	20,1	30,0	310,3
R2	19,5	29,3	303,4
R3	20,0	29,7	306,9

Nota: Según la norma ABNT NBR 6136:2016, en la clase C – M15x30, el espesor mínimo de las paredes longitudinales y transversales es de 18,0 mm y el espesor equivalente de las paredes transversales es de 135 mm/m. La tolerancia admisible en las dimensiones de la pared para cada valor individual es de  $\pm 1,0$  mm

### 3.4 Peso y densidad aparente

Los resultados indicados en la (Figura 8) muestran que un mayor contenido de caucho en el bloque de hormigón disminuye su peso. Se verificó que la reducción de peso de los bloques de hormigón con caucho R1, R2 y R3 fue de 16%, 20% y 29%, respectivamente, en comparación con la referencia.





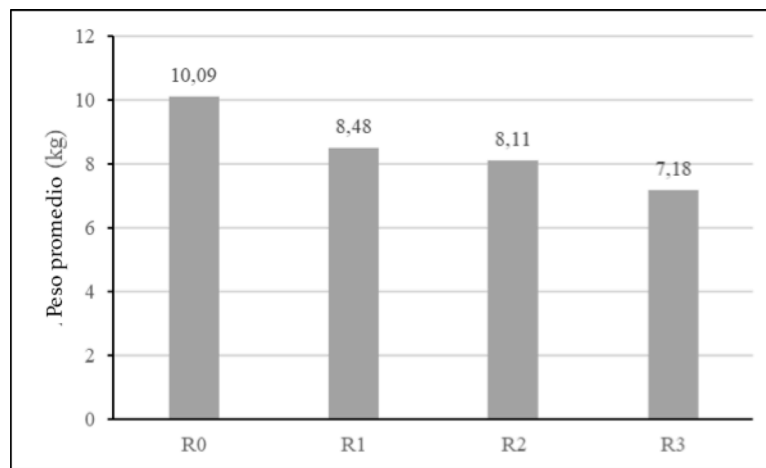


Figura 8. Peso promedio de los bloques

Como se indica en la (Figura 9), la densidad aparente de los hormigones permaneció bajo los 2000 kg/m<sup>3</sup> y por ende concuerda con las características del hormigón liviano. Además, se observa una menor densidad aparente de los bloques (R1, R2 y R3) de 14%, 18% y 20%, respectivamente, comparado con la referencia.

Estas propiedades se relacionan con la incorporación de caucho y metacaolín, que tienen una menor gravedad específica que la arena y el cemento, respectivamente, lo que contribuye a reducir la densidad aparente de los hormigones. Por otra parte, la cantidad de aire, según se indica en la (sección 3.2), conduce a una disminución de estos valores, evidenciando así la posibilidad de utilizar caucho y metacaolín en la producción de hormigones livianos. Estos resultados son consistentes con (Santos et al., 2010); (Granzotto y Souza, 2013).

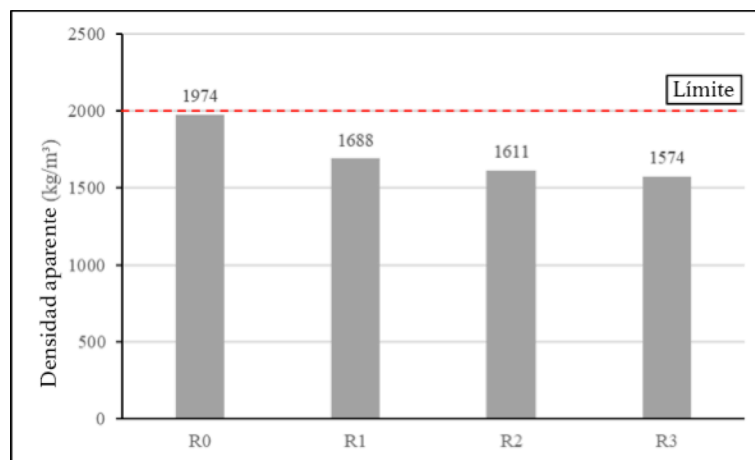


Figura 9. Densidad aparente de hormigones en estado fresco

### 3.5. Resistencia a la compresión

La (Figura 10) muestra la resistencia a la compresión promedio de los bloques ( $f_{bk}$ ), donde solo las mezclas R0, R1 y R3 cumplen con los requisitos de la norma ABNT NBR 6136:2016 para uso en mampostería estructural, debido a que presentan  $f_{bk}$  mayor a 3 MPa. Por ende, las clasificaciones de las series son: R0 – clase A ( $\geq 8,0$  MPa, con función estructural); R1 – clase B ( $4,0 \leq f_{bk} < 8,0$  MPa, con función estructural); R2 – clase C ( $\geq 3,0$  MPa, con función estructural) and R3 – clase C ( $< 3,0$  MPa, con función no estructural).

Además, los resultados promedio de  $f_{bk}$  con contenido de caucho disminuyen a medida que aumenta el contenido de caucho, donde la serie R0 alcanza el valor más alto. La mayor reducción en los porcentajes se produce entre R0 y R3, con una disminución del 81%. Asimismo, el porcentaje entre R0 y R1 y R2 también disminuye en un 67% y 76% respectivamente. Esta pérdida de  $f_{bk}$  se puede atribuir a la débil adherencia entre la matriz de cemento y el



caucho. Estos resultados concuerdan con (Sukontasukkul y Chaikaew, 2005). Por otro lado, (Fioriti y Akasaki, 2004) evaluaron bloques de mampostería y concluyeron que la cantidad ideal de caucho es una proporción del 13% (en volumen), donde la mezcla consume 245 kg/m<sup>3</sup> de cemento y alcanza resultados de hasta 5,0 MPa.

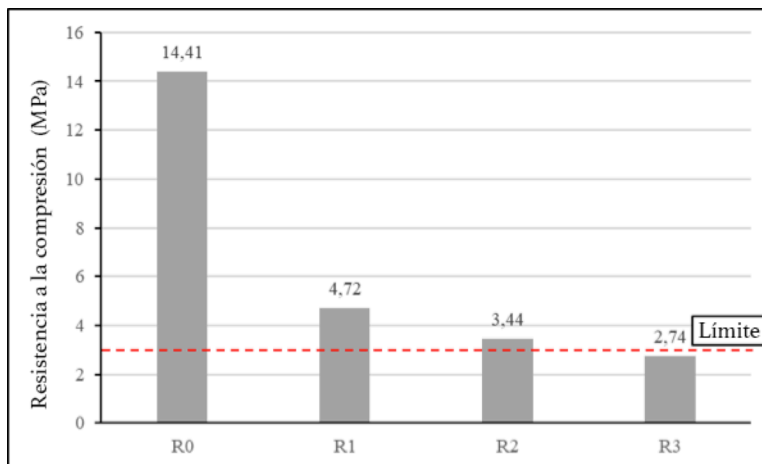


Figura 10. Resistencia a la compresión promedio de los bloques ( $f_{bk}$ )

En general, los bloques de hormigón con y sin caucho presentaron un comportamiento diferente en el ensayo de resistencia a la compresión. Los bloques de hormigón con caucho mostraron un aumento de volumen, pero a pesar de ello demostraron una menor capacidad de tracción, evitando mayores deformaciones, es decir, prácticamente mantuvieron su integridad. Por otro lado, los bloques de hormigón sin caucho sufrieron fallas abruptas que destrozaron el hormigón.

### 3.6 Absorción de agua

La (Figura 11) indica los resultados relativos a la absorción de agua promedio de los bloques de hormigón, los cuales permiten concluir que todas las mezclas presentan tasas de absorción menores al 13% especificado en la norma ABNT NBR 6136:2016. También muestran una diferencia insignificante entre los bloques de hormigón con caucho. Al comparar los bloques de hormigón, la mayor diferencia porcentual se da entre R0 y R2, lo cual evidencia que la capacidad de absorción de agua de R2 fue 21% más alta que la de R0, con un valor de absorción de agua del 8,10%. El comportamiento creciente es natural, ya que el contenido de aire aumenta, como se señala en la (sección 3.2).

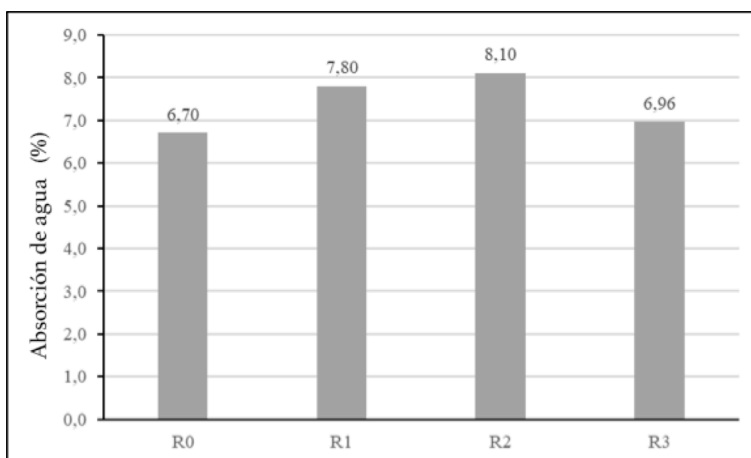


Figura 11. Absorción de agua promedio en los bloques de hormigón

La mayor absorción de agua también fue evaluada por (Fioriti et al., 2010) y (Selung et al., 2013), donde la incorporación de 15%, 25% y 35% de caucho en los bloques de hormigón aumentó la absorción de agua



promedio en 4,7%, 6,1% y 6,4% respectivamente. Por lo tanto, la incorporación de caucho no evidenció cambios significativos.

## 4. Conclusiones

Los principales aspectos observados en este artículo son los siguientes:

- a) Debido a que disminuye la trabajabilidad cuando se aumenta la proporción de caucho incorporada al hormigón, se utilizó un superplastificante a base de policarboxilato para obtener la trabajabilidad deseada de  $140 \pm 20$  mm.
- b) Al aumentar la proporción de caucho en la mezcla se redujo el valor del ensayo de asentamiento y aumentó el contenido de aire; estos resultados se asocian con la forma y textura del caucho de neumáticos.
- c) El hormigón producido con caucho y metacaolín proporcionó valores de densidad aparente menores a  $2000 \text{ kg/m}^3$ , que caracterizan al hormigón liviano. La mezcla R3 obtuvo la menor densidad aparente con  $1574 \text{ kg/m}^3$ , es decir, una reducción del 20% comparada con la R0. Por lo tanto, se concluye que un mayor contenido de caucho lleva a valores más bajos de densidad aparente; esto se debe a que el caucho tiene una menor gravedad específica que la arena.
- d) En términos del análisis dimensiones, todos los bloques cumplen con los requisitos establecidos por la norma ABNT NBR 6136:2016.
- e) Con respecto a la resistencia a la compresión de los bloques de hormigón, la R0 alcanzó el valor más alto con 14,41 MPa; sin embargo, se observó una disminución de la resistencia al aumentar la proporción de caucho. Este comportamiento se atribuye a la débil adherencia entre la matriz de cemento y el caucho. En relación con la función estructural, solo las R0, R1 y R2 mostraron esta característica, mientras que la R3 tuvo 2,74 MPa, por lo que no obtuvo la función estructural según lo establece la norma ABNT NBR 6136:2016.
- f) El ensayo de absorción de agua mostró que todas las mezclas cumplieron con los requisitos establecidos en la norma ABNT NBR 6136:2016, ya que la absorción de agua promedio fue menor al 13%. No obstante, estos resultados no mostraron cambios significativos en la absorción de agua.
- g) Por último, los resultados y comportamientos descritos revelan la necesidad de realizar nuevos estudios que confirmen la factibilidad de usar caucho de neumáticos en los bloques de mampostería de hormigón.

## 5. Agradecimientos

Este estudio fue parcialmente financiado por la Coordinación de Perfeccionamiento de Personal de Nivel Superior (CAPES-Brasil) – Código Financiero 001.

## 6. Referencias

- Albuquerque, A. C.; Calmon, J. L.; Silva filho, I. C. P.; Graça, N. G. A. (2008).** Caracterização mecânica de CCR com borracha de pneu. In: 50° CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, RCC SYMPOSIUM, setembro de 2008, Salvador.15p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2014).** NBR 12118 Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – Métodos de ensaio. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2010).** NBR 15894-1: Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2017).** NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2018).** NBR 16607: Cimento Portland – Determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2016).** NBR 6136: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – Requisitos. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2012).** NBR 7212: Execução de concreto dosado em central – Procedimento. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2019).** NBR 7215: Cimento Portland –Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2010).** NBR 7218: Agregados – Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2001).** NBR NM 30: Agregado miúdo – Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2006).** NBR NM 45: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2003).** NBR NM 46: Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem. Rio de Janeiro.



- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2002).** NBR NM 47: Concreto – Determinação do teor de ar em concreto fresco – Método pressométrico. Rio de Janeiro, 2002.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2001).** NBR NM 49: Agregado miúdo – Determinação de impurezas orgânicas. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas.(2009).** NBR NM 52: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1998).** NBR NM 67: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1998).** NBR NM 76: cimento portland – determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de blaine). Rio de Janeiro.
- Cintra, C. L. D.; Paiva, A. E. M.; Baldo, J. B. (2014).** Argamassas de revestimento para alvenaria contendo vermiculita expandida e agregados de borracha reciclada de pneus – propriedades relevantes. *Cerâmica*, v. 60, n. 353, p. 69-76.
- Fioriti, C. F.; Akasaki, J. L. (2004).** Manufacture of concrete structural blocks with residues of tire rubber. *Holos Environment*, v. 4, n. 2, p. 145-156.
- Fioriti, C. F.; Ino, A.; Akasaki, J. L. (2010).** Análise experimental de blocos intertravados de concreto com adição de resíduos do processo de recauchutagem de pneus. *Acta Scientiarum – Technology*, v. 32, n. 3, p. 237-244.
- Granzotto, I.; Souza, R. A. D. (2013).** Mechanical properties of structural concrete with partial replacement of fine aggregate by tire rubber. *Acta Scientiarum – Technology*, v. 35, n. 1, p. 39-44.
- Pelisser, F.; Barcelos, A.; Santos, D.; Peterson, M.; Bernardin, A. M. (2012).** Lightweight concrete production with low portland cement consumption. *Journal of Cleaner Production*, v. 23, p. 68-74, 2012.
- Pelisser, F.; Zavarise, N.; Longo, T. A.; Bernardin, A. M. (2011).** Concrete made with recycled tire rubber: effect of alkaline activation and sílica fume addition. *Journal of Cleaner Production*, v. 19, p. 757-763.
- Rodrigues, J. P. C.; Santos, C. C. (2013).** Resistência à compressão a altas temperaturas do betão com agregados reciclados de borracha de pneu. In: 2º CONGRESSO IBERO LATINO AMERICANO SOBRE SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO, Coimbra. Anais... Coimbra. 10p.
- Rosignolo, J. A.; Oliveira, I. L. (2007).** Efeito do metacaulim nas propriedades do concreto leve estrutural. *Acta Scientiarum – Technology*, v. 29, p. 55-60.
- Santos, M. R.; Fazzan, J. V.; Melges, J. L. P.; Akasaki, J. L.; Bertolino Junior, R. (2010).** Avaliação de flechas de protótipos de lajes treliçadas sem e com adição de resíduo de borracha de pneu. *Revista Internacional Construlink*, v. 8, p. 5-16.
- Felung, C. S.; Menegotto, M. L.; Menegotto, A. G. F.; Pavan, R. C. (2013).** Avaliação de blocos de concreto para alvenaria com adição de resíduos de borracha de pneus. *Holos Environment*, v. 13, n. 2, p. 212-223.
- Sukontasukkul, P.; Chaikaew, C. (2006).** Properties of concrete pedestrian block mixed with crumb rubber. *Construction and Building Materials*, v. 20, n. 7, p. 450-457.
- Xie, J.; Heng, Z.; Duan, L.; Yang, Y.; Yan, J.; Shan, D.; Liu, X.; Pang, J.; Chen, Y.; Li, X.; Zhang, Y. (2020). Effect of nano metakaolin on compressive strength of recycled concrete. *Construction and Building Materials*, v. 256, p. 119393.
- Muduli, R.; Mukharjee, B. B. (2020).** Performance assessment of concrete incorporating recycled coarse aggregates and metakaolin: A systematic approach. *Construction and Building Materials*, v. 233, p. 117223, 2020.

