

# Efectos de la adición de Poliestireno Expandido Reciclado (REPS) en las propiedades físicas y mecánicas de un mortero con dosificación cemento-arena 1:3

## *Effects of the Addition of Recycled Expanded Polystyrene (REPS) on the Physical and Mechanical Properties of a Mortar with Cement–Sand Dosage of 1:3*

J.C. Chanchí Golondrino<sup>1\*</sup>, C.S. Canabal Cordero<sup>2</sup>

### Resumen

Se describe el comportamiento de un mortero con dosificación cemento – arena 1:3 adicionado con partículas prismáticas angulosas de poliestireno expandido reciclado (REPS) obtenidas al rallar manualmente bloques de poliestireno expandido. Ensayos de densidad, absorción, compresión, tensión indirecta y compresión residual post-fuego a temperaturas de exposición entre 50°C - 500°C fueron ejecutados sobre 320 cubos de arista 5cm y sobre 56 cilindros de diámetro 5cm y altura 10cm adicionados con porcentaje en volumen de REPS entre el 10% - 80%. Resultados muestran que mientras la densidad, la compresión, la tensión indirecta y la compresión residual post-fuego del mortero reducen hasta el 23%, 83%, 76% y 19%-54%, respectivamente, con aumentos en el porcentaje en volumen de REPS; la absorción del mortero aumenta hasta el 308%. Un modelo bilineal que predice el efecto de incrementar el porcentaje en volumen de REPS sobre las propiedades físicas y mecánicas del mortero es discutido.

**Palabras clave:** residuos plásticos, mortero adicionados con residuos plásticos, poliestireno expandido reciclado, mortero adicionado con poliestireno expandido reciclado.

### Abstract

*Behaviour of a mortar with cement – sand dosage of 1:3 added with prismatic angular particles of recycled expanded polystyrene (REPS) obtained by manually grating expanded polystyrene blocks is described. Density, absorption, compression, indirect tension, and residual post-fire compression at temperatures of 50°C - 500°C when testing were performed on 320 cubes of side 5cm and on 56 cylinders with a 5cm diameter and 10cm high added with REPS percentages in volume of 10% - 80%. Results show that while the density, compression, indirect tension, and post-fire residual compression of the mortar goes down to 23%, 83%, 76% y 19%-54%, respectively, with increments in the volume percentage of REPS; the absorption of the mortar increases by 308%. A bilinear model that predicts the effect of increasing the percentage in volume of REPS on the physical and mechanical properties of the mortar is discussed.*

**Keywords:** plastic waste, mortar added with plastic waste, recycled expanded polystyrene, mortar added with recycled expanded polystyrene.

## 1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años el consumo de plástico alrededor del mundo ha aumentado sustancialmente y consecuentemente la producción de residuos plásticos. Por tal razón, surge la necesidad de buscar alternativas de reciclaje de residuos plásticos (Saikia & De Brito 2012). La importancia del reciclaje de residuos plásticos está basada en que este tipo de residuos son en su mayoría no biodegradables y su reciclaje contribuiría a la protección del medio ambiente (Da Silva et al. 2014). Una de las alternativas de reciclaje de residuos plásticos es su incorporación en

la producción de materiales como morteros y concretos. Entre los residuos plásticos considerados como alternativa en la producción de estos materiales se encuentran aquellos provenientes de poliestireno expandido (EPS) (Saikia & De Brito 2012).

El EPS es un hidrocarburo termoplástico estable en la presencia de diferentes químicos exceptuando los ácidos, solventes orgánicos y compuestos alifáticos (Ferrández-Mas et al. 2016) El EPS es comúnmente usado como material de embalaje y aislamiento térmico en diferentes aplicaciones industriales debido a su baja densidad, buen aislamiento térmico, resistencia a la humedad, durabilidad, absorción acústica y baja conductividad térmica (Kaya & Kar 2016, Chen et al. 2015). A pesar de estas propiedades benéficas, este material es regularmente desechado después de haber sido usado, esta condición sumada al hecho que este material es difícil de degradar por medios naturales conlleva a que el reciclaje de este sea esencial, no solo en

\* Autor de contacto: [jcchanchigo@unal.edu.co](mailto:jcchanchigo@unal.edu.co)

<sup>1</sup> Profesor Asociado Departamento de Ingeniería Civil- Universidad Nacional de Colombia-Sede Manizales.

<sup>2</sup> Ingeniero Civil – Egresado de la Universidad Nacional de Colombia-Sede Manizales.

términos económicos, sino también en términos ambientales (Kaya & Kar 2016).

El reciclaje de residuos plásticos provenientes de EPS se puede agrupar en dos categorías. La primera categoría consiste en usar estos residuos para reemplazar parcial o totalmente el agregado convencional de concretos o morteros y la segunda categoría consiste en reciclar estos residuos a través de métodos mecánicos, químicos y/o térmicos (Kaya & Kar 2016). Dada la facilidad, la baja inversión y los bajos niveles de contaminación para reciclar estos residuos en la producción de concretos y morteros, esta opción de reciclaje se considera como la más sostenible económicamente (Saikia & De Brito 2012, Kaya & Kar 2016). En la primera categoría de reciclaje, los residuos de EPS pueden ser adicionados al concreto o al mortero como esferas en su estado virgen; alternativamente, los residuos de EPS pueden ser adicionados al concreto o al mortero como material triturado industrialmente. Para el caso en el cual los residuos de EPS se agregan en estado virgen, investigaciones previas demuestran que el incremento en el porcentaje de EPS reduce en el mortero o en el concreto la densidad, la absorción, la resistencia a compresión, la resistencia a tensión (Kaya & Kar 2016, Ferrándiz-Mas & García-Alcocel 2013, Giosué et al. 2014, Guzman 2015). Para el caso en el cual los residuos de EPS se agregan como material triturado industrialmente, con tamaños de partículas entre 0,5mm y 8,0mm, investigaciones previas demuestran que las reducciones sobre la densidad, la absorción, la resistencia a compresión y la resistencia a tensión del mortero o concreto no son tan severas como aquellas observadas cuando usando EPS en estado virgen (Ferrándiz-Mas & García-Alcocel 2013, Giosué et al. 2014, Wang & Meyer 2012, Ferrándiz-Mas & García-Alcocel 2012, Ferrándiz-Mas et al. 2014). La existencia de una dependencia entre el tamaño del EPS reciclado, la reducción en las propiedades mecánicas de morteros y los aumentos en la ductilidad del mortero cuando sometidos a cargas axiales también han sido reportados (Wang & Meyer 2012, Ferrándiz-Mas et al. 2014). Recientes investigaciones de la resistencia residual a compresión post-fuego de morteros adicionados con residuos de EPS triturados con tamaños de partículas entre 3mm y 15mm con porcentajes en volumen entre el 10% y el 30% y expuestos a temperaturas entre el 150°C y 550°C, demuestran que la resistencia residual a compresión post-fuego disminuye con el aumento de la temperatura de ensayo. Sin embargo, no mayor diferencia fue notada entre la reducción en resistencia a compresión post-fuego entre morteros adicionados con el 10% y el 30% de EPS y morteros sin adición de EPS (Sancho et al. 2014).

A partir del estado del arte antes mencionado para morteros adicionados con residuos de EPS como material triturado industrialmente, se puede observar que extensa investigación se ha realizado con el fin de describir el cambio de propiedades físicas y mecánicas del mortero con el incremento del porcentaje en volumen de EPS. Sin embargo, no existe a la fecha estudios que reporten el uso de EPS rallado con una técnica manual de bajo costo y de fácil acceso a comunidades de bajos recursos económicos y de poca formación técnica que puedan acceder a los beneficios de morteros adicionados con residuos de EPS. De igual manera, no existe a la fecha estudios que reporten un modelo matemático predictor simple de la variación con el aumento del porcentaje en volumen de EPS de las propiedades físicas y mecánicas tales como: densidad, absorción,

resistencia a tensión, resistencia a compresión, resistencia residual a compresión post-fuego en este tipo de morteros. Existe también incertidumbre del efecto del porcentaje en volumen de EPS en la resistencia residual a compresión post-fuego para morteros adicionados con porcentajes superiores al 30% en volumen de EPS.

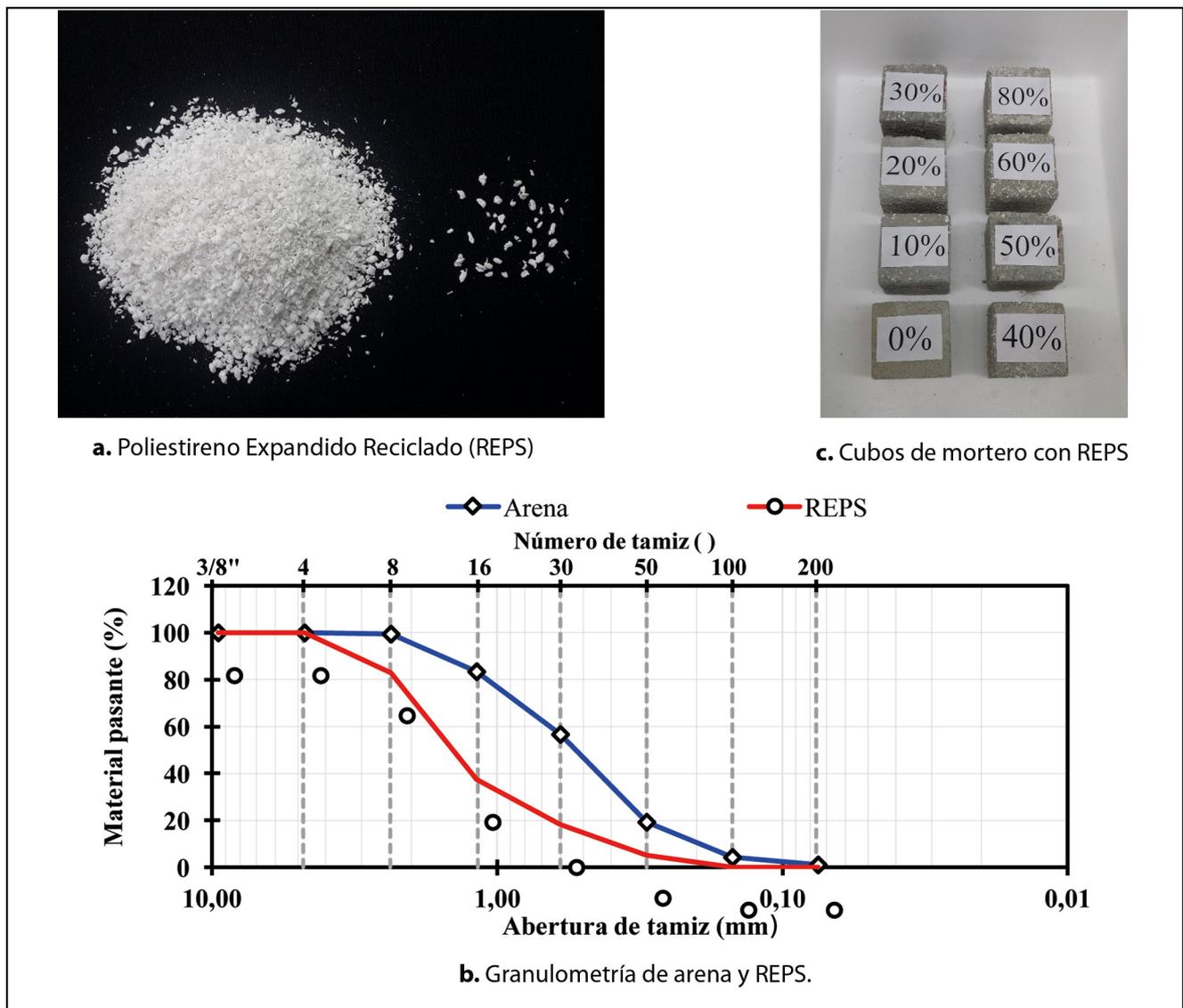
Con el fin de direccionar los cuestionamientos antes descritos se desarrolló un programa experimental sobre un mortero con dosificación cemento – arena 1:3 adicionado con partículas prismáticas angulosas de poliestireno expandido reciclado (REPS) en porcentajes en volumen entre 10% - 80% y obtenidas al rallar manualmente bloques de poliestireno expandido. Este programa experimental es resumido en el presente artículo y pretende responder las siguientes preguntas:

1. ¿Cuál es el efecto de aumentar del porcentaje en volumen de REPS en la densidad y en el porcentaje de absorción del mortero?
2. ¿Cuál es el efecto de aumentar del porcentaje en volumen de REPS en la compresión y tensión indirecta del mortero?
3. ¿Cuál es el efecto de aumentar del porcentaje en volumen de REPS en la compresión residual post-fuego del mortero?
4. ¿En qué tipo de obras civiles se podría aplicar el mortero adicionado con REPS?
5. ¿Cuál es un modelo simple para predecir las propiedades físicas y mecánicas de un mortero adicionado con REPS?

## 2. MATERIALES

### 2.1. Materiales usados para elaborar el mortero y dosificación

El mortero fue elaborado con cemento Portland tipo I de masa unitaria suelta de 3100kg/m<sup>3</sup>, agua potable de densidad 1000kg/m<sup>3</sup> y con arena de río de módulo de finura de 2,37 y de masa unitaria suelta de 1394kg/m<sup>3</sup>. El REPS fue obtenido rallando bloques de Poliestireno Expandido (EPS) con una lámina metálica de espesor 1mm perforada con agujeros con bordes en relieve hechos con clavos de diámetro 2mm y espaciados centro a centro 10mm. Las partículas obtenidas de este proceso se denominaron Poliestireno Expandido Reciclado (REPS) y se caracterizaron por una forma prismática angulosa irregular. Las partículas de REPS se caracterizaron por una masa unitaria suelta de 16kg/m<sup>3</sup>, un tamaño máximo definido por la abertura del tamiz #8 (2,36mm) y un módulo de finura de 3,56 (figura 1a). La figura 1b muestra la granulometría de la arena y del REPS. Para elaborar el mortero el cemento y la arena fueron mezclados en las proporciones 1:3 usando la cantidad de agua suficiente para generar una fluidez de 100% ± 10%. El mortero fue adicionado con porcentajes en volumen de REPS que variaron entre 10% y 80% del volumen de la mezcla de mortero. Para elaborar el mortero, el cemento, la arena y el agua se mezclaron inicialmente y fueron adicionados con las partículas de REPS en una mezcla dispuesta al azar. Una vez fundidos los especímenes de prueba fueron curados en inmersión total en agua durante 28 días. La figura 1c muestra cubos de 6cm de lado fundidos con diferentes porcentajes de REPS.



**Figura 1.** Poliestireno Expandido Reciclado (REPS), granulometría de materiales y cubos de mortero adicionados con porcentaje en volumen de REPS entre 10% y 80%.

## 2.2. Tipo y cantidad de especímenes de prueba

Cubos de 6cm de lado y cilindros de 5cm de diámetro y 10 cm de altura se usaron como especímenes de prueba. Los cubos y los cilindros fueron elaborados con mortero adicionado con porcentajes en volumen de REPS de 0%, 10%, 20%, 30%,

40%, 50%, 60% y 80%. Para cada uno de los grupos de mortero adicionado con REPS se elaboraron 40 cubos y 7 cilindros. Los cubos se destinaron a los ensayos de densidad, absorción, compresión y resistencia residual a compresión post-fuego y los cilindros al ensayo de tensión indirecta. La distribución de especímenes por ensayo se muestra en la tabla 1.

**Tabla 1.** Distribución de especímenes de prueba por ensayo

REPS adicionado en volumen (%)	Densidad y absorción	Compresión	Tensión indirecta	Resistencia residual a compresión post-fuego a temperaturas entre 50°C y 500°C				
	Cantidad de Cubos	Cantidad de Cubos	Cantidad de Cilindros	Cantidad de Cubos por temperatura				
				50°C	100°C	200°C	300°C	500°C
0	10	10	7	4	4	4	4	4
10	10	10	7	4	4	4	4	4
20	10	10	7	4	4	4	4	4
30	10	10	7	4	4	4	4	4
40	10	10	7	4	4	4	4	4
50	10	10	7	4	4	4	4	4
60	10	10	7	4	4	4	4	4
80	10	10	7	4	4	4	4	4

### 3. METODOS DE ENSAYO

#### 3.1. Ensayos de Densidad y Absorción

$$\delta = \frac{m}{v} \quad [1]$$

$$Ab = \left[ \frac{m_{\text{saturado}} - m}{m} \right] \times 100\% \quad [2]$$

Para cada una de las 8 dosificaciones de mortero adicionado con REPS 10 ensayos de densidad fueron realizados sobre cubos de arista 6cm. La densidad ( $\delta$ ) fue obtenida como el cociente entre la masa del cubo en estado seco ( $m$ ) y el volumen del cubo ( $v$ ) [ecuación 1].

La masa en estado seco del cubo se obtuvo después de someter el cubo a un proceso de secado en una estufa a una temperatura de 60°C hasta masa constante (AENOR 2000).

El volumen del cubo se obtuvo a partir del promedio de las 8 aristas medidas con un calibrador.

El ensayo de absorción fue ejecutado sobre cada una de las 8 dosificaciones de mortero adicionado con REPS. Las probetas usadas en este ensayo para cada dosificación correspondieron a los 10 cubos a los cuales previamente se le obtuvo la densidad. El ensayo de absorción se realizó saturando los cubos de mortero por ebullición en una olla a presión de uso doméstico (García Verduch 1975) (figura 2b). La absorción ( $Ab$ ) se obtuvo dividiendo la diferencia entre la masa en estado saturado ( $m_{\text{saturado}}$ ) y la masa en estado seco ( $m$ ) entre la masa en estado saturado [ecuación 2]. La masa en estado saturado se obtuvo después de bullir a presión durante 30 minutos los cubos de mortero y retirar el exceso de agua en las caras de los cubos con un trapo húmedo.



Figura 2. Ensayos de Densidad y Absorción sobre mortero adicionado con porcentajes en volumen de REPS entre 0% y 80%.

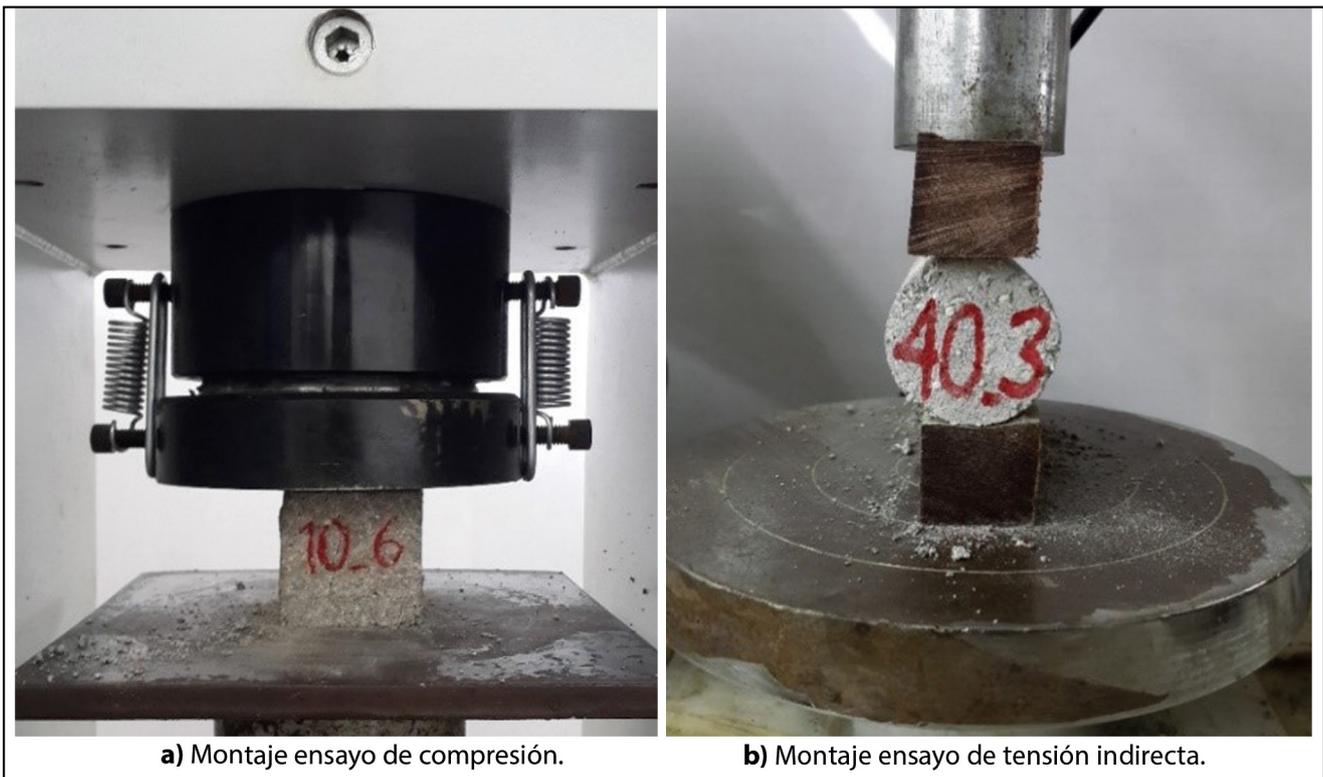
#### 3.2. Ensayos de Compresión y Tensión Indirecta

Para cada una de las 8 dosificaciones de mortero adicionado con REPS 10 ensayos de compresión sobre cubos de arista 6cm y 7 ensayos de tensión indirecta sobre cilindros de diámetro 5cm y de altura 10cm fueron realizados. Los ensayos de compresión y tensión indirecta fueron ejecutados en una máquina universal siguiendo los lineamientos de las normas (ICONTEC 2004, ICONTEC 2000), respectivamente (figura 3a, b). La resistencia a compresión ( $\sigma_c$ ) fue obtenida dividiendo la carga compresiva que falló el cubo ( $P_c$ ) entre el cuadrado de la arista del cubo ( $l$ ) [ecuación 3].

$$\sigma_c = \frac{P_c}{l^2} \quad [3]$$

$$\sigma_t = \frac{2 \times P_t}{\pi \times d \times l} \quad [4]$$

La resistencia a tensión indirecta ( $\sigma_t$ ) en función de la carga compresiva que falló el cilindro diametralmente ( $P_t$ ), del diámetro del cilindro ( $d$ ) y de la altura del cilindro ( $h$ ) [ecuación 4].



a) Montaje ensayo de compresión.

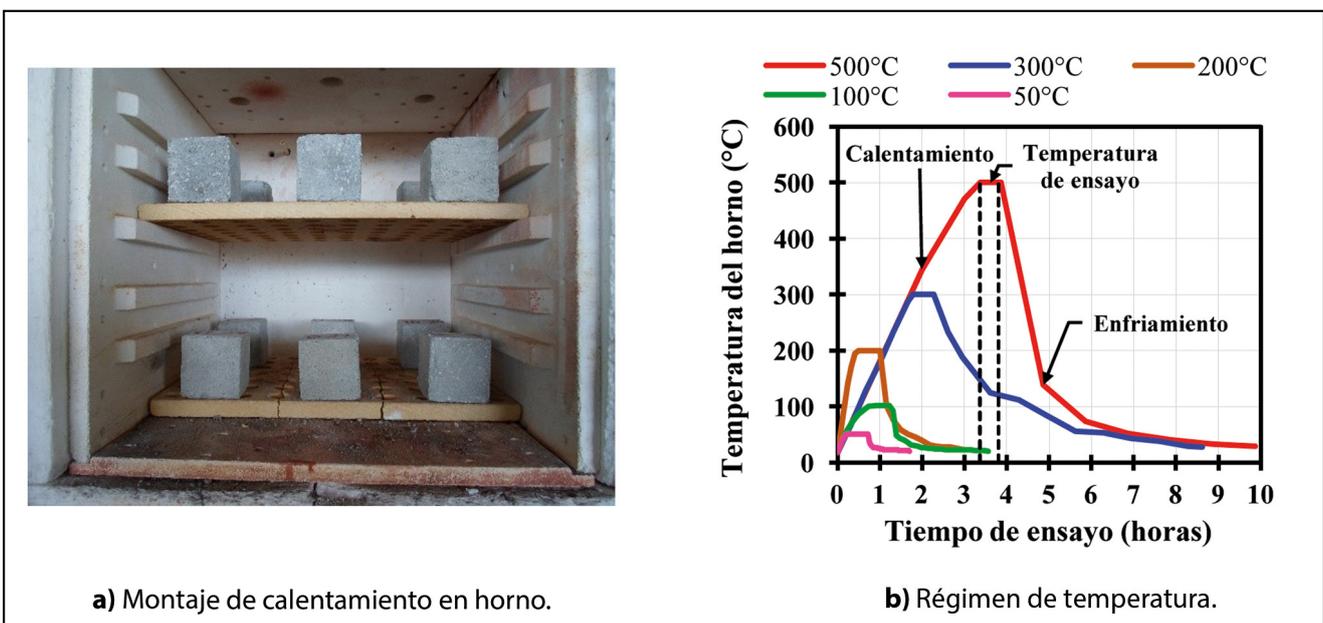
b) Montaje ensayo de tensión indirecta.

**Figura 3.** Ensayos de Compresión y de Tensión Indirecta sobre mortero adicionado con porcentajes en volumen de REPS entre 0% y 80%.

### 3.3. Ensayo de Resistencia Residual a Compresión Post-Fuego

Para cada una de las 8 dosificaciones de mortero adicionado con REPS 20 ensayos de resistencia residual a compresión post-fuego sobre cubos de arista 6cm fueron realizados. En cada dosificación los 20 cubos de mortero se dividieron en 5 grupos correspondientes a temperaturas de ensayo de 50°C, 100°C, 200°C, 300°C y 500°C generadas en un horno eléctrico con control digital de temperatura. Los cubos fueron localizados en el horno de tal manera que el espaciamiento entre cubos fue igual a la arista del cubo (figura 4a).

El régimen de temperatura se basó en introducir los cubos de mortero al horno a temperatura ambiente hasta lograr la temperatura de ensayo. Esta temperatura de ensayo fue sostenida por un tiempo de 30 minutos, periodo después del cual la puerta del horno fue abierta permitiendo la libre circulación del aire y el enfriamiento de los cubos de mortero hasta temperatura ambiente (figura 4b). La resistencia residual a compresión post-fuego del mortero adicionado con REPS fue obtenida sometiendo los cubos a un ensayo de compresión siguiendo el procedimiento descrito en la sección 3.2, después de haber sido calentados y enfriados.



**Figura 4.** Ensayo de calentamiento a temperaturas entre 50°C y 500°C sobre cubos de mortero adicionados con porcentajes en volumen de REPS entre 0% y 80%.

#### 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

##### 4.1. Densidad y absorción del mortero adicionado con REPS

En las figuras 5a, b los resultados de los ensayos de densidad y absorción para las 8 dosificaciones de mortero adicionado con REPS son presentados. Se puede observar que aumentos en el porcentaje en volumen de REPS generan disminuciones en la densidad y aumentos en la absorción del mortero. Reducciones de hasta el 28% en la densidad y aumentos de hasta el 308% en la absorción fueron observadas cuando el porcentaje en volumen de REPS varió del 0% al 80%. Aumentos en la porosidad y en la tendencia a la disgregación al tacto de la superficie exterior del mortero también fueron observados.

La disminución en la densidad del mortero con el aumento del porcentaje en volumen de REPS es atribuida al gran volumen con baja masa que ocupa el REPS en la matriz del material. El aumento en la absorción del mortero con el aumento del porcentaje en volumen de REPS es atribuido a la exacerbación de la porosidad del material debido a la irregularidad de la forma de las partículas de REPS y la baja adherencia en la interface entre el mortero y las partículas de REPS.

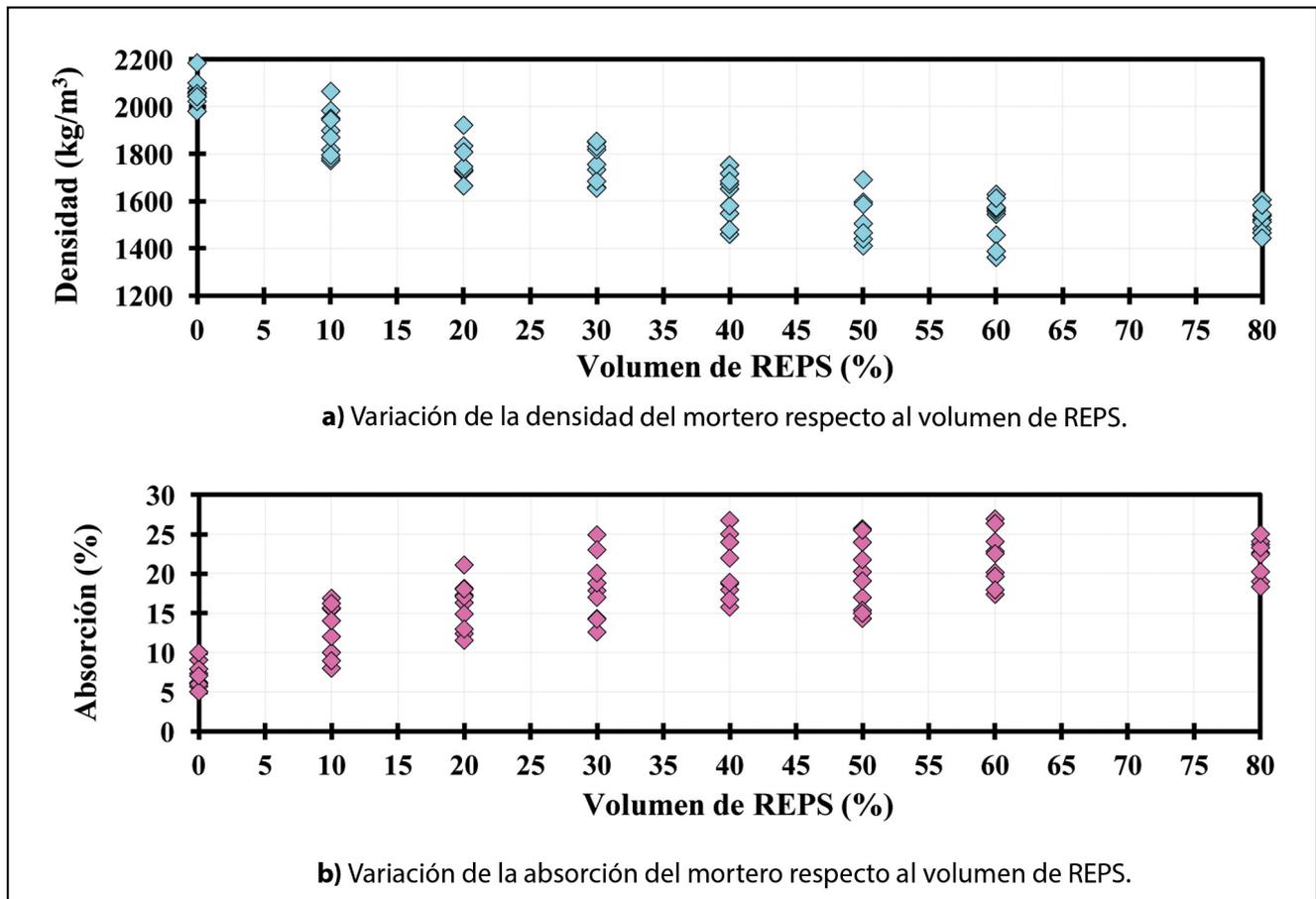
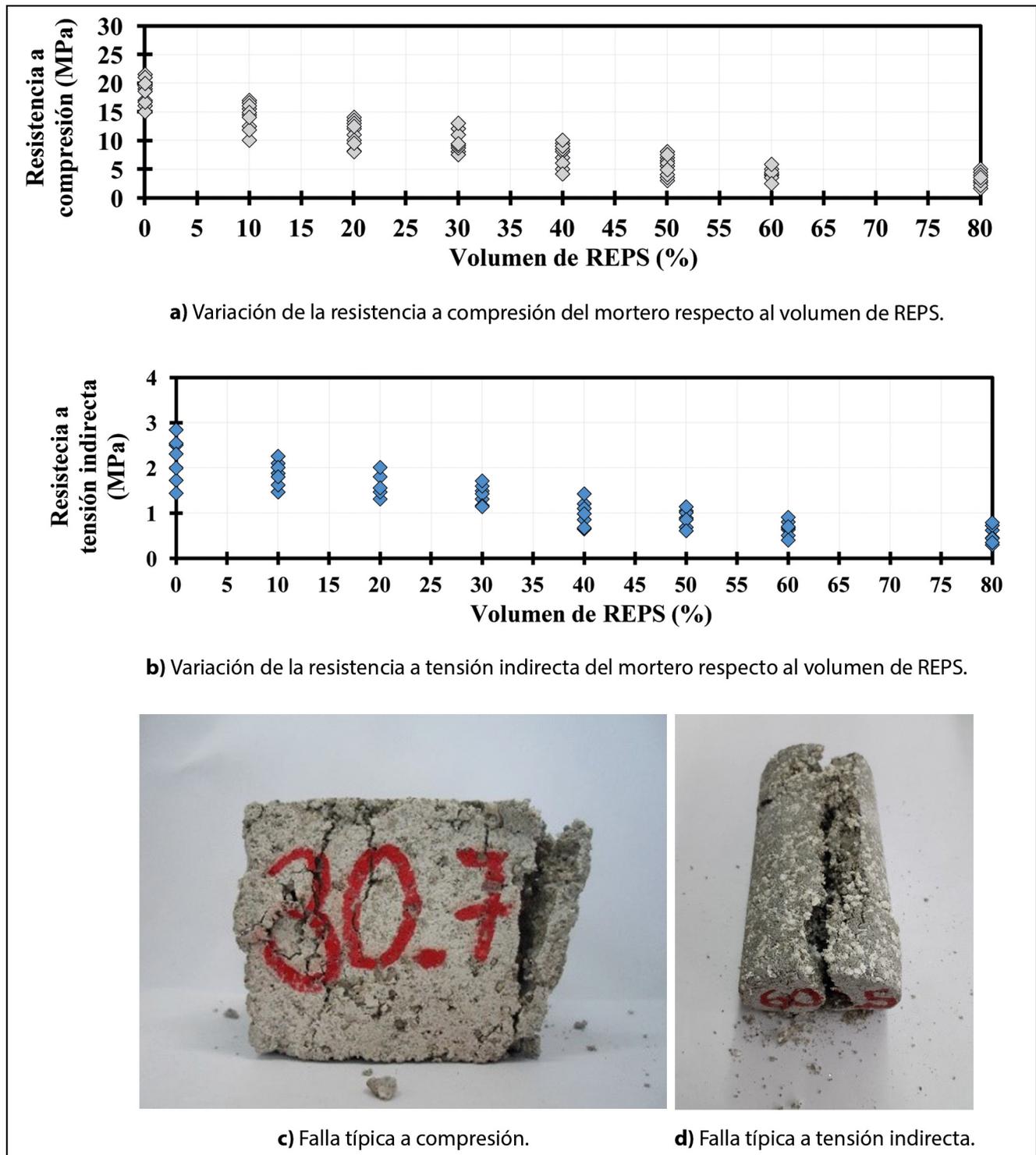


Figura 5. Densidad y absorción de mortero adicionado con porcentajes en volumen de REPS entre 0% y 80%.

#### 4.2. Resistencia a compresión y tensión indirecta del mortero adicionado con REPS

En las figuras 6a, b los resultados de los ensayos de compresión y tensión indirecta para las 8 dosificaciones de mortero adicionado con REPS son presentados. Se puede observar que aumentos en el porcentaje en volumen de REPS generan disminuciones tanto en la resistencia a compresión como en la resistencia a tensión indirecta del mortero. Reducciones de hasta el 83% y 76% fueron observadas en la resistencia a compresión y tensión indirecta, respectivamente cuando el porcentaje en volumen de REPS varió del 0% al 80%.

Se evidenció que el aumento del porcentaje en volumen de REPS disminuyó la fragilidad de la falla del mortero y aumentó la deformabilidad del mismo. Los planos de falla de compresión y tensión indirecta se iniciaron y propagaron a través de zonas con mayor concentración de REPS (figura 6c, d). La disminución en la resistencia a compresión y tensión indirecta del mortero con el aumento del porcentaje en volumen de REPS es atribuida a la baja contribución en resistencia que ofrecen las zonas ocupadas por el REPS y al aumento de las discontinuidades en la matriz del material.



**Figura 6.** Resistencia a compresión, resistencia a tensión indirecta y mecanismo de falla de mortero adicionado con porcentajes en volumen de REPS entre 0% y 80%.

### 4.3. Resistencia residual a compresión post-fuego del mortero adicionado con REPS

En las figuras 7a, b, c los resultados de los ensayos de resistencia a compresión a temperatura ambiente de 20°C se presentan con cada uno de los resultados de los ensayos de resistencia residual a compresión post-fuego a temperaturas de ensayo de 50°C, 300°C y 500°C para las 8 dosificaciones de mortero adicionado con REPS.

Se puede observar que aumentos en la temperatura de ensayo generan disminuciones en la resistencia residual a compresión post-fuego del mortero. Reducciones en resistencia a compresión de 0% - 24%, 15% - 45% y 19% - 54% fueron observadas con incrementos de temperatura de ensayo de 50°C, 300°C y 500°C, respectivamente cuando el porcentaje en volumen de REPS varió del 0% al 80%. Este resultado indica que para temperaturas de ensayo superiores a 50°C los morteros más susceptibles a reducir la resistencia a compresión debido a incrementos de temperatura son aquellos con altos porcentajes en volumen de REPS. Se evidenció que el aumento de la temperatura de ensayo:

1. Cambió el color de las probetas de gris a marrón claro, aumentó la porosidad de la superficie de las probetas (figura 7d);
2. No tuvo incidencia en el patrón de grietas del mortero cuando comparado con el patrón de grietas de morteros sin exposición a temperaturas de ensayo (figura 7e,6c);
3. Aumentó la deformabilidad del mortero.

La disminución en la resistencia residual a compresión con el aumento en la temperatura de ensayo es atribuida a cambios de volumen que sufren las partículas de REPS con aumentos de temperatura. Estos cambios de volumen aumentan las discontinuidades del mortero produciendo reducciones en su resistencia a compresión.

### 4.4. Posibles aplicaciones en obras civiles de mortero adicionado con REPS

Aplicaciones principales y secundarias se pueden definir para morteros adicionados con REPS de acuerdo a los resultados presentados en las secciones 4.1 – 4.3. Las aplicaciones principales corresponden a aquellas que usan morteros adicionados con porcentajes de REPS hasta el 30%, en donde la reducción en resistencia y en densidad respecto al mortero sin adición es inferior al 50% y al 20%, respectivamente, como muestran las figuras 5 y 6. Estos morteros pueden ser usados como morteros de pega o morteros para elaborar unidades de mampostería de muros no estructurales o divisorios. Esta aplicación es posible debido a que la resistencia en este tipo de muros debe ser baja con el fin de soportar únicamente su peso propio y las cargas sísmicas derivadas de su peso propio.

Las aplicaciones secundarias corresponden a aquellas que usan morteros adicionados con porcentajes de REPS superiores al 30%, en donde la resistencia y la densidad del mortero adicionado respecto al mortero sin adición varían entre 50% - 80% y 20% - 28%, respectivamente, como muestran las figuras 5 y 6. Estos morteros pueden ser usados para revestimiento de muros, revestimiento de losas, pega de enchapes, pega de

baldosines en paredes y pega de baldosas en pisos sometidos a tráfico liviano. Esta aplicación es posible debido a que la resistencia requerida en este tipo de elementos debe ser baja dado que sus cargas solicitantes son bajas.

Las aplicaciones primarias y secundarias de morteros adicionados con REPS son deseables debido a que la reducción en densidad de estos morteros contribuye a reducciones en la carga muerta de edificaciones, generando de esta manera reducción de costos en la cimentación de estructuras ubicadas en zonas de baja actividad sísmica y la reducción de costos en el sistema de resistencia sísmica de estructuras ubicadas en zonas de mediana y alta actividad sísmica.

No se recomienda usar morteros adicionado con REPS como morteros impermeabilizantes debido a que la adición de REPS aumenta significativamente la absorción y la porosidad del mortero como se estableció en la sección 3.1, generando de esta manera morteros muy permeables. Tampoco se recomienda usar morteros adicionado con REPS como morteros de pega para mampostería estructural o como morteros para confección de unidades para mampostería estructural. Esta aplicación nos es posible debido a que la adición de REPS disminuye la resistencia a compresión, disminuye la resistencia a tensión y aumenta la deformabilidad axial del mortero como se estableció en la sección 3.2, generando de esta manera mampostería de baja resistencia y altamente deformable, características que son indeseables para mampostería estructural, en donde las cargas axiales y sísmicas son significativas.

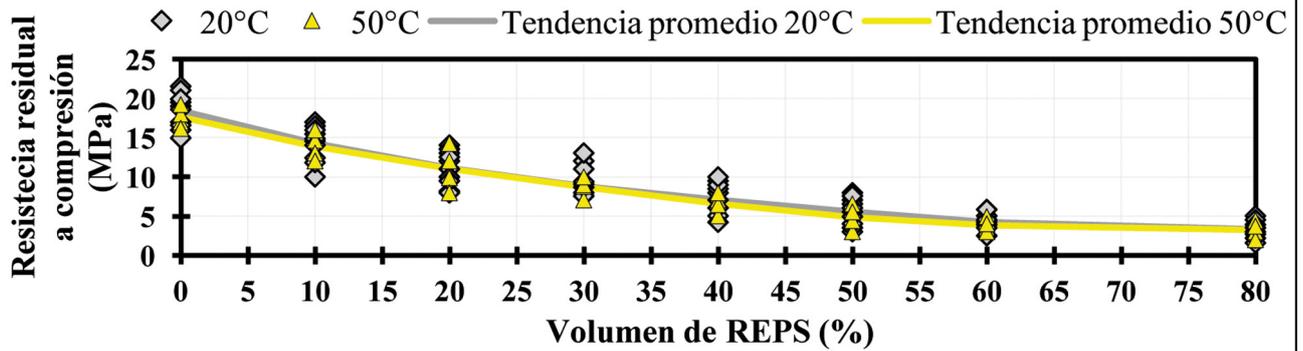
## 5. MODELO TEÓRICO

Sobre los datos experimentales de absorción, densidad, tensión indirecta, compresión y compresión residual post-fuego a temperaturas entre 50°C y 500°C obtenidos para el mortero adicionado con porcentaje en volumen de REPS entre 0% y 80%, un modelo bilineal que se acercó a la tendencia promedio de los datos experimentales fue propuesto (figura 8 y figura 9). En este modelo bilineal, un porcentaje en volumen de REPS del 40% fue considerado como frontera entre una zona lineal inicial con porcentajes en volumen de REPS entre 0% y 40% y una zona lineal final con porcentajes en volumen de REPS entre 40% y 80%. Este porcentaje en volumen del 40% de REPS fue asumido debido a que la variación observada en las propiedades antes mencionadas con el incremento en el porcentaje en volumen de REPS en la zona inicial es significativa cuando comparada con la variación observada en la zona final como se puede verificar en la figura 8 y figura 9. La variación de cada una de las propiedades antes mencionadas en la zona inicial y en la zona final fue representada con las funciones lineales definidas por las ecuaciones 5 y 6, respectivamente. Los valores de las pendientes,  $m_{inicial}$ ,  $m_{final}$  y de los interceptos con el eje que define la propiedad,  $b_{inicial}$ ,  $b_{final}$ , de las funciones lineales para cada una de las propiedades antes mencionadas son presentados en la tabla 2.

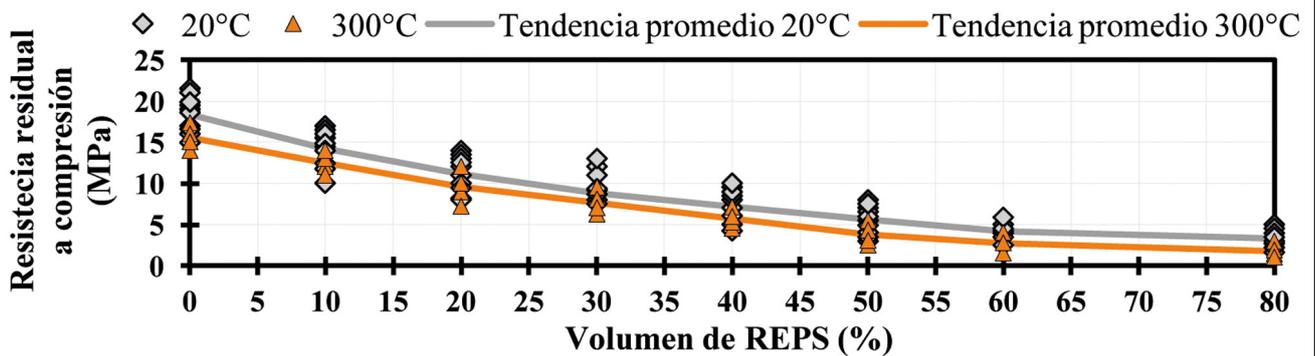
$$Propiedad\ zona\ inicial = (m_{inicial} \times \%REPS) + b_{inicial} \quad [5]$$

$$Propiedad\ zona\ final = (m_{final} \times \%REPS) + b_{final} \quad [6]$$

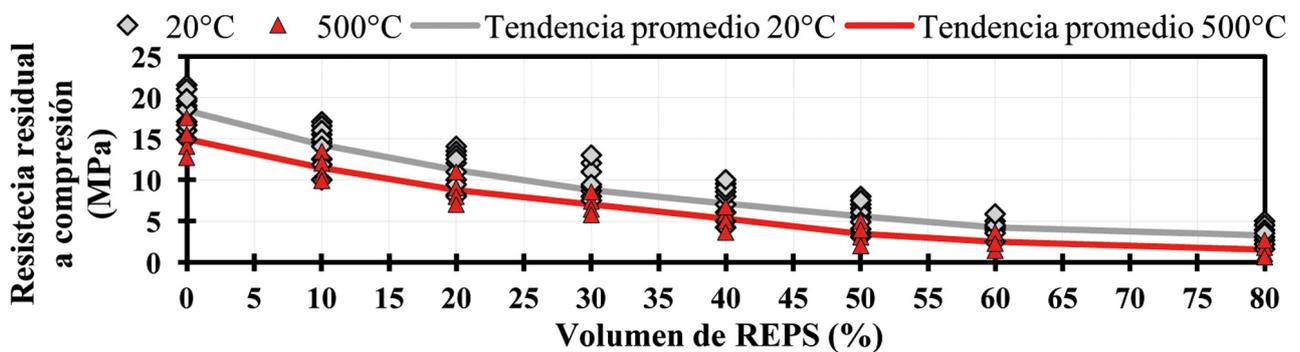
En la tabla 2 se puede observar que las pendientes de la zona inicial y de la zona final de las funciones lineales



a) Variación de la resistencia residual a compresión post-fuego del mortero respecto al volumen de REPS para una temperatura de 50°C.



b) Variación de la resistencia residual a compresión post-fuego del mortero respecto al volumen de REPS para una temperatura de 300°C.



c) Variación de la resistencia residual a compresión post-fuego del mortero respecto al volumen de REPS para una temperatura de 500°C.



d) Mortero después de calentamiento a 500°C.



e) Falla a compresión post-fuego.

Figura 7. Resistencia residual a compresión post-fuego y mecanismo de falla de mortero adicionado con porcentajes en volumen de REPS entre 0% y 80%.

**Tabla 2.** Coeficientes de modelo de propiedades de mortero adicionado con porcentajes en volumen de REPS entre 0% y 80%

			Pendiente zona inicial	Pendiente zona final	Intercepto zona inicial	Intercepto zona final	Coficiente envolvente superior	Coficiente envolvente inferior
	Propiedad inicial o final	Unidad de propiedad	$m_{inicial}$ [*]	$m_{final}$ [*]	$b_{inicial}$ [**]	$b_{final}$ [**]	$\alpha$ [---]	$\beta$ [---]
Propiedades a temperatura ambiente	Densidad	[kg/m <sup>3</sup> ]	-12.000	-0.600	2070	1614	1.10	0.90
	Absorción	[%]	0.300	0.010	9.0	20.5	1.35	0.60
	Tensión indirecta	[MPa]	-0.028	-0.006	2.0	1.1	1.35	0.60
	Compresión	[MPa]	-0.280	-0.060	17.4	8.7	1.35	0.60
compresión residual post-fuego a diferentes temperaturas	50°C	[MPa]	-0.280	-0.060	17.0	8.3	1.35	0.60
	100°C	[MPa]	-0.280	-0.060	16.5	8.0	1.35	0.60
	200°C	[MPa]	-0.280	-0.060	16.5	7.7	1.35	0.60
	300°C	[MPa]	-0.280	-0.060	16.0	7.5	1.35	0.60
	500°C	[MPa]	-0.280	-0.060	15.5	7.0	1.35	0.60

[\*]: Con unidad igual a la unidad de la propiedad sobre porcentaje en volumen de REPS.

[\*\*]: Con unidad igual a la unidad de la propiedad.

[---]: Sin unidades.

que representan la compresión y la compresión residual post-fuego a temperaturas entre 50°C y 500°C fueron asumidas del mismo valor. También se puede observar en la tabla 2 que las pendientes de la zona inicial y de la zona final de la función lineal que representa la tensión indirecta son el 10% de las pendientes asumidas para la compresión. Los factores antes mencionados indican que existe una relación directa entre la tensión indirecta, la compresión residual post-fuego y la compresión a temperatura ambiente.

Con el fin de envolver los datos experimentales para considerar la dispersión de estos respecto al modelo bilineal propuesto, dos coeficientes no dimensionales, uno que amplifica y otro que reduce el modelo bilineal denominados respectivamente coeficiente envolvente superior,  $\alpha$  y coeficiente envolvente inferior,  $\beta$ , fueron propuestos para cada una de las propiedades del mortero adicionado con REPS como se indica en la tabla 2. Estos coeficientes pueden ser usados para determinar el valor mínimo y el valor máximo de las propiedades del mortero adicionado con REPS cuando el porcentaje de volumen de REPS varía entre el 0% y el 80% de acuerdo a las ecuaciones 7 y 8.

$$\text{Propiedad zona inicial}_{\text{minimo,maximo}} = \quad [7]$$

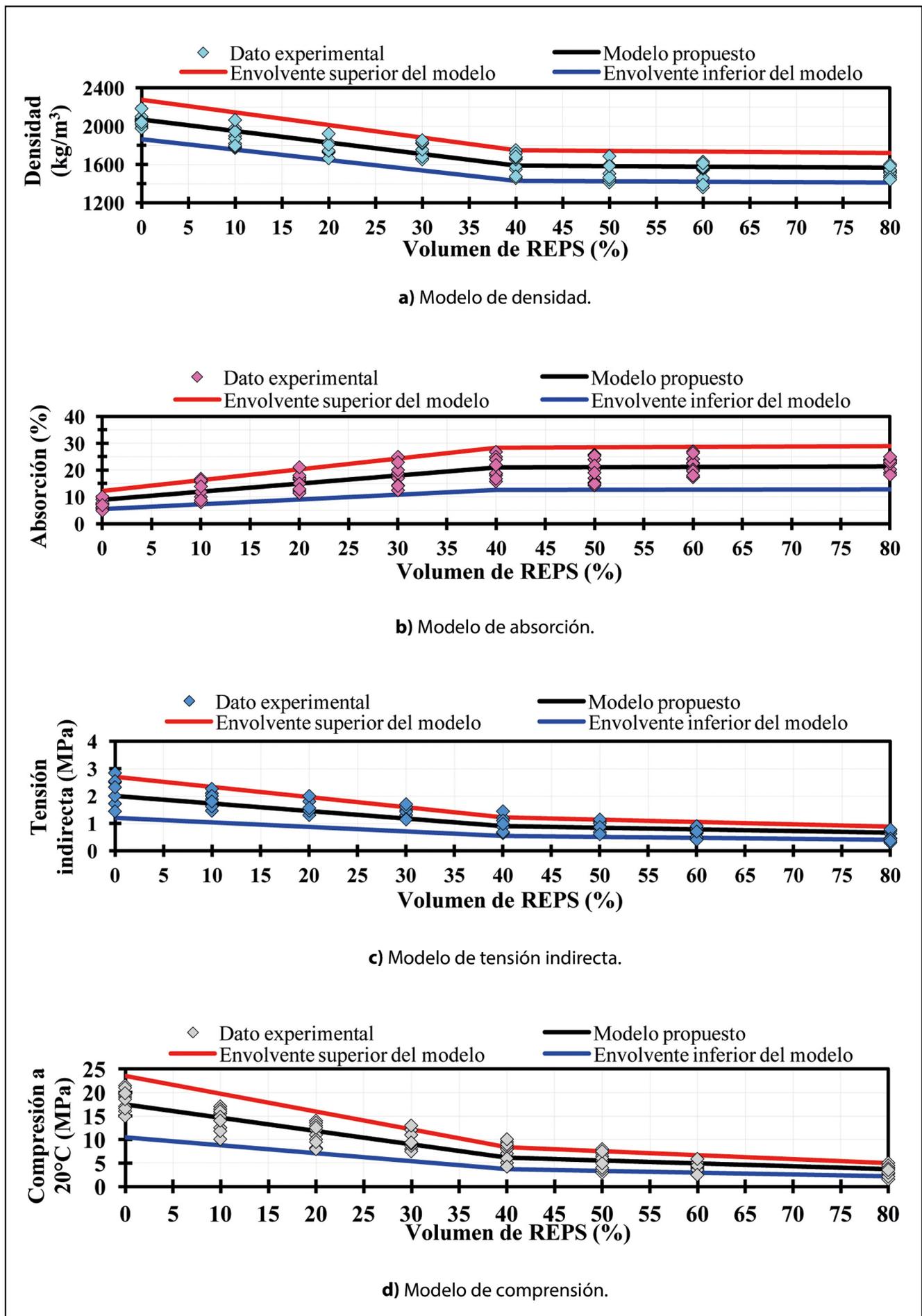
$$= (\alpha, \beta) \times [(m_{inicial} \times \%REPS) + b_{inicial}]$$

$$\text{Propiedad zona final}_{\text{minimo,maximo}} = \quad [8]$$

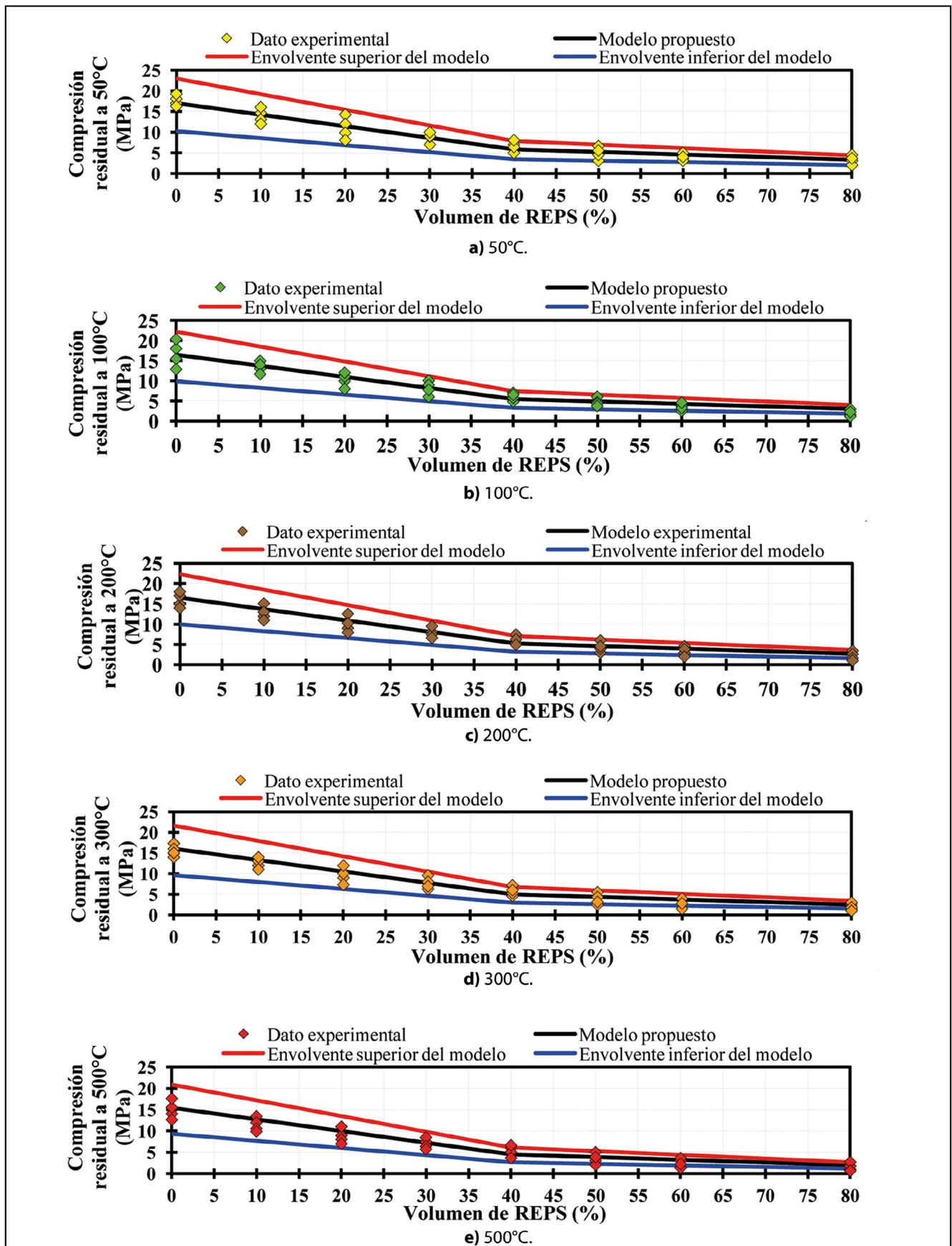
$$= (\alpha, \beta) \times [(m_{final} \times \%REPS) + b_{final}]$$

Las ecuaciones 7 y 8 que definen el límite superior e inferior de las propiedades del mortero adicionado con porcentaje en volumen de REPS entre 0% y 80% fueron aplicadas sobre los datos experimentales de absorción, densidad, tensión indirecta y compresión en la figura 8 y sobre los datos experimentales de compresión residual post-fuego a temperaturas entre 50°C y 500°C en la figura 9.

Las figuras 8 y 9 muestran que el modelo propuesto se ajusta con una muy buena aproximación a los datos experimentales. Este modelo sólo es aplicable para predecir las propiedades de dosificaciones de mortero 1:3 adicionado con partículas de REPS de forma prismática angulosa irregular de tamaño máximo definido por la abertura del tamiz #8 (2,36mm) y debe ser verificado para dosificaciones y tamaños máximos de partículas de REPS diferentes a los aquí definidos.



**Figura 8.** Modelo a temperatura ambiente de densidad, absorción, tensión indirecta y compresión de mortero adicionado con porcentajes en volumen de REPS entre 0% y 80%.



**Figura 9.** Modelo de compresión residual post-fuego a diferentes temperaturas de mortero adicionado con porcentajes en volumen de REPS entre 0% y 80%.

**6. CONCLUSIONES**

Este artículo describe el efecto de la adición en porcentajes en volumen entre el 0% y 80% de Poliestireno

Expandido Reciclado (REPS) en las propiedades físicas y mecánicas de un mortero. Se demostró que:

1. El aumento del porcentaje en volumen de REPS disminuye la densidad del mortero y aumenta el porcentaje de absorción del mortero. Reducciones de hasta el 28% en la densidad y aumentos de hasta el 308% en la absorción fueron observadas. Aumentos en la porosidad y en la tendencia a la disgregación al tacto de la superficie exterior del mortero también fueron observados.
2. El aumento del porcentaje en volumen de REPS disminuye la resistencia a compresión del mortero y la resistencia a tensión indirecta del mortero. Reducciones de hasta el 83% y 76% fueron observadas en la resistencia a compresión y tensión indirecta, respectivamente. Reducciones en la fragilidad de la falla del mortero, aumentos en la deformabilidad del mortero y la propagación de los planos de fallas a través de zonas con mayor concentración de REPS también fueron observados.
3. El aumento del porcentaje en volumen de REPS disminuye la resistencia residual a compresión post-fuego en morteros expuestos a temperaturas superiores a 50°C. Reducciones en la resistencia residual entre 19% y 54% fueron reportadas cuando el mortero fue expuesto a temperaturas entre 50°C y 500°C. Para este rango de temperaturas también se observaron cambios de color de la superficie exterior del mortero, aumentos en la porosidad del mortero y aumentos en la deformabilidad del mortero cuando sometido a compresión.
4. Morteros adicionados con porcentajes hasta del 30% de REPS pueden ser usados como morteros de pega de mampostería no estructural o para la confección de unidades de mampostería no estructural. Morteros adicionados con porcentajes superiores al 30% de REPS pueden ser usados para revestimiento de muros, revestimiento de losas, pega de enchapes, pega de baldosines en paredes y pega de baldosas en pisos sometidos a tráfico liviano. No se recomienda el uso de morteros adicionados con REPS como morteros impermeabilizantes o morteros de pega en mampostería estructural o para la confección de unidades de mampostería estructural.
5. Un modelo bilineal que predice con buena aproximación las propiedades físicas y mecánicas del mortero fue propuesto considerando un porcentaje en volumen de REPS del 40% como frontera entre las dos zonas lineales. Los valores que definen las funciones lineales de las dos zonas del modelo indican una relación directa entre la tensión directa, la compresión residual post-fuego y la compresión. Coeficientes no dimensionales que amplifican y reducen el modelo bilineal fueron propuestos para considerar la dispersión de los datos experimentales y permiten estimar el valor máximo y mínimo de las propiedades del mortero.

## 7. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar sus agradecimientos al señor Jesús María Salazar por fabricar y suministrar las probetas requeridas para el desarrollo del componente experimental de la investigación asociada a este artículo. También desean expresar sus agradecimientos al cuerpo técnico del Laboratorio de Materiales de la Universidad Nacional de Colombia-Sede Manizales por su contribución en la asistencia técnica en el desarrollo experimental de esta investigación.

## 8. REFERENCIAS

- AENOR (2000). *UNE-EN 1015-10:2000* Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 10: Determinación de la densidad aparente en seco del mortero endurecido. Madrid: Asociación Española de Normalización (AENOR).
- Chen, W., Hao, H., Hughes, D., Shi, Y., Cui, J., y Li, Z. (2015). Static and dynamic mechanical properties of expanded polystyrene. *Materials & Design*, vol. 69, pp. 170-180.
- Da Silva, A., de Brito, J., y Veiga, R. (2014). Incorporation of fine plastic aggregates in rendering mortars. *Construction and Building Materials*, vol. 71, pp. 226-236.
- Ferrándiz-Mas, V., Bond, T., García-Alcofel, E., y Cheeseman, C. (2014). Lightweight mortars containing expanded polystyrene and paper sludge ash. *Construction and Building Materials*, vol. 61, pp. 285-292.
- Ferrándiz-Mas, V., y García-Alcofel, E. (2012). Caracterización física y mecánica de morteros de cemento Portland fabricados con adición de partículas de poliestireno expandido (EPS). *Materiales de Construcción*, vol. 62, n° 308, pp. 547-566.
- Ferrándiz-Mas, V., y García-Alcofel, E. (2013). Durability of expanded polystyrene mortars. *Construction and Building Materials*, vol. 46, pp. 175-182.
- Ferrándiz-Mas, V., Sarabia, L., Ortiz, M., Cheeseman, C., y García-Alcofel, E. (2016). Design of bespoke lightweight cement mortars containing waste expanded polystyrene by experimental statistical methods. *Materials & Design*, vol. 89, pp. 901-912.
- García Verduch, A. (1975). Testing procedure to determine the water absorption capacity of bricks (H2T 2/75c). *Materiales de Construcción*, vol. 25, n° 159, pp. 97-100.
- Giosuè, C., Mobili, A., Di Perna, C., y Tittarelli, F. (2014). Comparison of lightweight mortars manufactured with virgin or recycled polystyrene. En *Young Researchers' Forum II: Construction Materials, London, 19 February*, pp. 21-26.
- Guzman, A. (2015). Mechanical Response of Portland Cement Mortars with added Expanded Polystyrene Spheres (EPS) under Accelerated Attack. En *International Conference on Structural, Mechanical and Materials Engineering (ICSMME 2015), Dalian, 6-8 de November*, pp. 215-218.
- ICONTEC (2000). *NTC 722* Concretos. Método de ensayo para determinar la resistencia a la tensión indirecta de especímenes cilíndricos de concreto. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. Santafé de Bogotá: ICONTEC.
- ICONTEC (2004). *NTC 220* Determinación de la Resistencia de morteros de cemento hidráulico usando cubos de 50 mm o 50,8 mm de lado. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. Santafé de Bogotá: ICONTEC.
- Kaya, A., y Kar, F. (2016). Properties of concrete containing waste expanded polystyrene and natural resin. *Construction and Building Materials*, vol. 105, pp. 572-578.
- Saikia, N., y De Brito, J. (2012). Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: A review. *Construction and Building Materials*, vol. 34, pp. 385-401.
- Sancho, R., Castillo, Á., Maciá, M., y Corral, R. (2014). Changes of Mechanical Properties of Lightweight Cement Mortar Mixed with Recycled Expanded Polystyrene and Subjected to High Temperatures. *Advanced Materials Research*, vol. 1051, pp. 752-756.
- Wang, R., y Meyer, C. (2012). Performance of cement mortar made with recycled high impact polystyrene. *Cement and Concrete Composites*, vol. 34, n° 9, pp. 975-981.