

Bloques de concreto con aditivos bituminosos para sobrecimiento

Concrete blocks with bitumen emulsion for foundation walls

Hernán Darío Cañola*

Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia

César Echavarría**

Universidad Nacional de Colombia

* Magíster en Construcción Universidad Nacional de Colombia. Profesor Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia. Hernan.canola@colmayor.edu.co

** Ph.D. École Polytechnique Fédérale de Lausanne Suisse. Profesor Asociado Universidad Nacional de Colombia. Cachavarrial@unal.edu.co

Correspondencia: Escuela de Construcción, Universidad Nacional de Colombia, Calle 59A No 63-20 Bloque 24, Medellín, 050010 Colombia. Cachavarrial@unal.edu.co

Resumen

Los muros del primer nivel de las edificaciones presentan frecuentemente problemas de humedad como consecuencia de la exposición a la lluvia y la absorción de agua del suelo de los bloques de sobrecimiento. Infortunadamente, los bloques de concreto convencionales, adquiridos en el mercado, usados como sobrecimiento, tienen coeficientes de absorción capilar altos y resistencias a la penetración de agua bajas.

En esta investigación, se produjeron y analizaron experimentalmente bloques y probetas cilíndricas, se fabricaron con arena de concreto lavada, cemento Portland tipo 1, emulsión asfáltica en frío y una relación agua-cemento de 0,40 en peso. Se estudiaron bloques y cilindros sin adición de emulsión asfáltica y con 10%, 20%, 30% y 40% de adición de emulsión asfáltica respecto al peso del cemento. Se ejecutaron ensayos de absorción capilar, de resistencia a la penetración de agua y de resistencia a la compresión y se realizó un análisis comparativo de los resultados obtenidos para determinar la proporción óptima de adición de emulsión asfáltica.

Se determinó que los bloques con emulsión asfáltica presentan mejores propiedades que los bloques convencionales sin aditivos y que podrían reducir los problemas de humedad en los muros pues tienen un coeficiente de absorción capilar bajo.

Palabras clave: Absorción capilar, bloque de concreto, emulsión asfáltica, penetración de agua, sobrecimiento.

Abstract

The walls of the first level of the building often exhibit moisture problems as a result of exposure to rain and water absorption in the soil by the foundation wall. Unfortunately, conventional concrete blocks, purchased on the market and used as foundation wall, have a high coefficient of capillary suction and a low resistance to water penetration. In this research, concrete blocks and cylinders were produced and analyzed experimentally. They were manufactured with washed concrete sand, type I Portland cement, cold bitumen emulsion and a 0,40 water-to-cement (w/c) ratio by weight. Blocks and cylinders were analyzed first without the addition of bitumen emulsion and then with the addition of 10 %, 20 %, 30 % and 40 % of bitumen emulsion by weight of the cement. Capillary water absorption test, resistance to water penetration test and compressive strength test were completed. A comparative analysis of the results was performed in order to determine the optimum addition of bitumen emulsion. It was determined that the blocks with bitumen emulsion have better properties than conventional blocks without additives. Furthermore, it was concluded that the blocks with cold bitumen emulsion reduce moisture problems in the walls since these blocks have a low coefficient of capillary suction.

Keywords: Capillary suction, cold bitumen emulsion, compressive strength, concrete block, foundation wall, water penetration.

Fecha de recepción: 28 de julio de 2016
Fecha de aceptación: 9 de marzo de 2017

I. INTRODUCCIÓN

Las humedades en las edificaciones, en especial la de absorción capilar, provocan daños al interior de la estructura que requieren elevadas inversiones económicas para su reparación. El concreto, los bloques, los ladrillos, el bahareque, la tierra comprimida, la madera y otros materiales de construcción utilizados en los muros absorben fluidos a través de sus canales capilares. Las patologías asociadas a la humedad provocan daños estructurales y estéticos y también afectan de forma negativa la comodidad en el interior de la edificación.

La humedad capilar en los muros es un fenómeno patológico que se produce por la absorción y la difusión de agua proveniente del suelo. La absorción facilita el ascenso del agua a través del sobrecimiento y los muros de la edificación quedan expuestos a la humedad.

El sobrecimiento se construye con bloques de concreto apoyados sobre las vigas de cimentación y tiene como función secundaria aislar a los muros externos de la humedad generada por el salpique del agua lluvia y separar los muros del suelo. Los bloques de concreto para sobrecimiento son elementos modulares fabricados con arena, cemento y agua. Infortunadamente, los bloques de concreto convencionales para sobrecimiento utilizados hasta ahora tienen una absorción capilar alta y una resistencia a la penetración de agua baja. El agua transita entonces con relativa facilidad desde el suelo hasta la parte superior de los muros.

Se ha evidenciado que los elementos de concreto sufren una reducción apreciable de sus propiedades físico-mecánicas y de su durabilidad en presencia de una alta concentración de humedad [1]-[12]. Los bloques de concreto son entonces inapropiados para estar en contacto directo con el suelo como consecuencia de su estructura física porosa. Los bloques para sobrecimiento pueden sin embargo usarse en contacto con el suelo cuando todo el sistema presente características de impermeabilidad. La impermeabilización del sobrecimiento se logra con el uso de barreras externas físicas (mantos asfálticos) o químicas (emulsiones asfálticas). La instalación de estas barreras demanda no obstante gran cantidad de recursos (tiempo, operarios, equipo especializado y herramienta menor).

Con el fin de evitar los problemas de durabilidad ocasionados por la presencia de humedad en las edificaciones y para mejorar las características de absorción capilar de los muros, se han desarrollado diversas investigaciones en el área de los concretos y de los morteros.

Lanzón *et al.* [8] estudiaron el uso de jabones metálicos en polvo y siliconas para controlar la absorción de agua en los morteros. En este trabajo se analiza la eficacia de varios tipos de impermeabilización después de 7, 14 y 28 días de curado. La eficiencia se analiza mediante experimentos de absorción de agua por capilaridad, mientras que la durabilidad es evaluada después de exponer las muestras a diferentes condiciones externas (agua y soluciones de ácido clorhídrico). Para simular el efecto de la lluvia ácida se usó una combinación de ácido sulfúrico-nítrico. Después de diez ciclos de exposición, se confirmó que la silicona en polvo mostró la mejor resistencia al ataque ácido. Además, las soluciones sulfúrico-nítrico atacaron las capas externas de las muestras con la formación de yeso. Los efectos sobre las muestras fueron verificados y cuantificados a través de los ciclos. Infortunadamente, esta investigación estudia exclusivamente los morteros.

Książek [6] realizó un análisis experimental para determinar la penetración de agua en concretos. En esta investigación, se utilizó azufre polimerizado como aditivo (una de las ventajas de este material era su reutilización a nivel industrial). Se determinó que los concretos con adiciones de azufre polimerizado lograban una disminución considerable en la penetración de agua y reducía la absorción capilar del concreto. Arrojó igualmente altas propiedades de resistencia a la compresión pero baja rigidez con módulos de elasticidad bajos. En otros estudios, se experimentó con elementos de concreto impermeables para minimizar los problemas derivados de la humedad. La disminución de la permeabilidad de estos elementos se ha logrado con la utilización de compuestos químicos a base de calcio, zinc, sodio, polímeros hidrofóbicos y siliconas [9]. También se ha verificado que la utilización de compuestos de silicona orgánica como aditivo en los materiales de construcción (concreto, ladrillo y materiales pétreos) puede incrementar la repelencia al agua hasta en un 99% [1]. En nuestro medio, sería relativamente oneroso utilizar estos aditivos.

Bołtryk *et al.* [13] realizaron un análisis experimental con mezclas con emulsión asfáltica para obtener un mortero impermeabilizado que protegiera

cubiertas y elementos estructurales expuestos a las afectaciones del suelo. En esta investigación se utilizó cemento Portland y una emulsión asfáltica resistente a los álcalis y a la mayoría de ácidos. La emulsión asfáltica fue adicionada con los siguientes porcentajes según la masa del cemento: 0 %, 2 % y 4 %. Se estableció que el uso de las emulsiones mejoraba la impermeabilidad del concreto pero generaba reducciones en sus propiedades mecánicas. Esta solución es bastante eficaz pero los porcentajes de adición de emulsión asfáltica se aseveran bajos.

Mukhopadhyaya *et al.* [14] realizaron un estudio sobre el efecto de la temperatura y la absorción de humedad en materiales de construcción. Determinaron un coeficiente de absorción capilar promedio de $0,184 \text{ (kg / (s}^{1/2} \text{ m}^2))$ en los concretos estudiados a temperatura ambiente. Roels *et al.* [15] estudiaron la absorción de humedad en un medio poroso fracturado y estimaron un coeficiente de absorción capilar en concretos de $0,018 \text{ (kg / (s}^{1/2} \text{ m}^2))$. Díaz *et al.* [16] efectuaron un análisis experimental para determinar la resistencia mecánica y la durabilidad de mezclas ternarias de cemento Portland, escoria de alto horno y piedra caliza. Se determinó el coeficiente de absorción capilar de las muestras a los 90 días y se hallaron valores entre $0,010$ y $0,021 \text{ (kg / (s}^{1/2} \text{ m}^2))$. Silva *et al.* [17] experimentalmente determinaron las propiedades físicas de concretos autocompactantes con lodos calcáreos provenientes de la industria papelera. Se estudió el coeficiente de absorción capilar en probetas de concreto con dichos lodos calcáreos y se encontraron valores entre $0,013$ y $0,017 \text{ (kg / (s}^{1/2} \text{ m}^2))$.

Estos y otros autores encuentran generalmente un coeficiente de absorción capilar que varía entre $0,010$ y $0,200 \text{ (kg / (s}^{1/2} \text{ m}^2))$ en concretos. Sería sin embargo conveniente fabricar un bloque de concreto para usar como sobrecimiento con coeficientes de absorción capilar más pequeños. Zürcher *et al.* [18] indican que un material de construcción con un coeficiente de absorción capilar menor que $0,030 \text{ (kg / (s}^{1/2} \text{ m}^2))$ se considera repelente al agua y con un coeficiente de absorción capilar menor que $0,008 \text{ (kg / (s}^{1/2} \text{ m}^2))$ se considera hidrófugo.

De otro lado, Zanchet *et al.* [19] estudian la penetración y las fugas de agua en paredes de mampostería y determinan una velocidad de absorción capilar entre $0,09 \times 10^{-4}$ y $0,27 \times 10^{-4} \text{ (m/s}^{1/2})$ en los bloques de concreto estudiados. Gopalan [4] estudió la velocidad de absorción capilar como parámetro de

durabilidad en concretos con y sin adiciones de cenizas volantes. Determinó para los concretos sin cenizas volantes una velocidad de absorción capilar entre $2,01 \times 10^{-4}$ (m/s^{1/2}) y $2,35 \times 10^{-4}$ (m/s^{1/2}) y con adiciones de cenizas volantes entre $2,55 \times 10^{-4}$ (m/s^{1/2}) y $3,15 \times 10^{-4}$ (m/s^{1/2}). Badogiannis *et al.* [20] determinaron, en su investigación sobre la durabilidad del metacaolín en concretos autocompactantes, una velocidad de absorción capilar entre $0,13 \times 10^{-4}$ y $0,31 \times 10^{-4}$ (m/s^{1/2}). Wilson *et al.* [21] investigaron también la absorción capilar en materiales de construcción porosos y estimaron una velocidad de absorción capilar para morteros entre $0,89 \times 10^{-4}$ y $1,86 \times 10^{-4}$ (m/s^{1/2}).

Los valores de velocidad de absorción capilar en morteros y concretos con y sin adiciones son disímiles, según los autores citados, en un rango de $0,09 \times 10^{-4}$ (m/s^{1/2}) y $3,15 \times 10^{-4}$ (m/s^{1/2}).

Infortunadamente, las investigaciones previas tratan los morteros, los elementos de protección de cubiertas y las mezclas de concreto estructurales pero no han estudiado específicamente el comportamiento de los bloques de concreto usados para sobrecimiento: estos bloques tienen por lo demás una geometría particular.

En este artículo se estudia entonces un bloque de concreto con un coeficiente de absorción capilar y una velocidad de absorción capilar más bajos que los encontrados usualmente en los bloques convencionales que se encuentran en el mercado. Es evidente que un bloque de concreto con un coeficiente de absorción capilar pequeño y una resistencia a la penetración de agua grande (ver Fig. 1) sería más durable que uno de concreto convencional porque dificulta la penetración de agentes agresivos que producirían su degradación.



Figura 1. Bloque de concreto con emulsión asfáltica.

II. METODOLOGÍA

Dada la importancia del problema, en este artículo se estudia la porosidad efectiva, la resistencia a la penetración de agua, el coeficiente de absorción capilar, la velocidad de absorción capilar y la resistencia a la compresión de bloques de concreto con aditivos bituminosos para ser usados como sobrecimiento.

Se produjeron y analizaron experimentalmente 100 bloques y 100 probetas cilíndricas. Todos los bloques y las probetas cilíndricas se fabricaron con arena de concreto lavada, cemento Portland tipo 1, emulsión asfáltica en frío y una relación agua-cemento de 0,40 en peso (ver Fig. 2). Pequeños cambios en la relación agua-cemento pueden significar apreciables diferencias en la permeabilidad del bloque de concreto. La relación escogida en esta investigación es frecuentemente utilizada en la industria de los bloques porque permite desmoldarlos sin dificultad y garantiza una resistencia a la compresión adecuada.

Algunas de las propiedades del cemento Portland tipo 1 se muestran en la Tabla 1. La densidad de la emulsión asfáltica se presenta en la Tabla 2.

El desarrollo experimental se dividió en cuatro etapas: una primera etapa de caracterización de la granulometría del árido para la fabricación de las mezclas de concreto de acuerdo con la norma ASTM D422 [22]; una segunda etapa de análisis de succión capilar en las probetas bajo parámetros de la norma UNE PRUNE 83.982 [23] y la norma ASTM C1585-04 [24]; en la tercera etapa se hicieron ensayos de penetración de agua en los bloques mediante la utilización del método RILEM CPC 11.2 [25] y en la cuarta etapa se realizaron ensayos de compresión en los bloques de acuerdo con la norma ASTM C90 [26].



Figura 2. Materiales utilizados para la fabricación de los bloques.

Tabla 1. Propiedades del cemento portland tipo 1

Resistencia a la compresión a los 28 días (MPa)	24
Densidad (kg/m ³)	3.150

Tabla 2. Propiedades de la emulsión asfáltica

Densidad (kg/m ³)	1.060
-------------------------------	-------

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para el análisis granulométrico se utilizó una muestra de 1000 gramos de arena de concreto lavada y una serie de tamices, con diferentes diámetros ensamblados entre sí en disposición vertical, que se somete a vibración y a movimientos rotatorios intensos en una máquina de vibración rotatoria. Al terminar el ensayo, se obtuvo el porcentaje de material retenido y pasante en cada tamiz, con lo cual se determinó un módulo de finura equivalente a 2,98. Se estimó entonces que el material analizado pertenece a una arena media ya que su módulo de finura se encuentra entre 2,30 y 3,10.

Con el estudio de succión capilar se evaluó la porosidad, la resistencia a la penetración del agua, el coeficiente de absorción capilar y la velocidad de absorción capilar de las muestras. Para este análisis se utilizaron probetas cilíndricas por cada tipo de mezcla de concreto con y sin adición de emulsión asfáltica. Para calcular el tamaño de la muestra experimental, ver por ejemplo la norma ASTM D2915-10 [27], se asume un coeficiente de variación de 20 %, una precisión estimada de 5 % y un valor crítico estadístico de 1,173 para un intervalo de confianza de 75 %. Se realizaron entonces 20 ensayos por cada grupo de muestras de concreto con y sin adición de emulsión asfáltica. En este ensayo, se usaron muestras cilíndricas de 50 mm de altura y 100 mm de diámetro cortadas con sierra diamantada de cilindros de concreto de 200 mm de altura y 100 mm de diámetro (ver Fig. 3).

Mediante el análisis de succión capilar establecido en la norma UNE PrUNE 83.982 [23] se determinó para cada probeta:

La resistencia a la penetración del agua:

$$m = \frac{t_n}{h^2} \quad (1)$$

El coeficiente de absorción capilar:

$$k = \frac{Q_n - Q_0}{\sqrt{t_n}} \frac{1}{A} \quad (2)$$

La porosidad efectiva:

$$\varepsilon = \frac{Q_n - Q_0}{Ah\rho} \quad (3)$$

Además, la velocidad de absorción capilar S se calculó según la norma ASTM C1585-04 [24], que equivale a la pendiente de una recta entre el origen y el punto crítico de saturación en la gráfica definida por la ecuación (4):

$$\frac{Q_t - Q_0}{\rho A} \text{ vs } \sqrt{t} \quad (4)$$

El cambio de masa de la probeta en el tiempo fue constante hasta llegar al punto crítico de saturación y una vez superado este punto de inflexión el cambio de masa de la probeta disminuyó gradualmente hasta llegar a 0.

Donde,

m : Resistencia a la penetración del agua (s / m²)

k : Coeficiente de absorción capilar (kg / (s^{1/2}m²))

ξ : Porosidad efectiva (%)

S : Velocidad de absorción capilar (m / s^{1/2})

t : Tiempo de saturación de la probeta (s)

t_n : Tiempo en el punto crítico de saturación de la probeta (s)

h : Altura o espesor total de la probeta (m)

Q_i : Masa de la probeta en el tiempo t (kg)

Q_n : Masa de la probeta en el punto crítico (kg)

Q_0 : Masa de la probeta al inicio (kg)

A : Área de succión de la probeta (m²)

ρ : Densidad del agua (kg / m³)



Figura 3. Muestras cilíndricas cortadas con sierra diamantada.

Las muestras cortadas se sometieron a un proceso de curado y se secaron en el horno a una temperatura constante de 105°C hasta alcanzar un peso invariable. Posteriormente, fueron enfriadas en un desecador para ser impermeabilizadas en su cara lateral con un hidrófugo comercial, garantizando una impermeabilización lateral completa. Después se colocaron sobre un recipiente con 5 mm de agua durante todo el ensayo. Las muestras se pesaron inicialmente antes de ser puestas en contacto con el agua (ver Fig. 4) y después se pesaron cada 10 segundos para registrar la cantidad de agua absorbida. Todos los ensayos se realizaron con una temperatura ambiente promedio de 25°C y una humedad relativa promedio de 65 %.



Figura 4. Muestras cilíndricas de 100 mm. de diámetro y 50 mm. de altura.

Para cada muestra ensayada, se determinó la densidad y la porosidad (ver Tabla 3).

Tabla 3. Resultados del ensayo de succión capilar – porosidad efectiva

Muestra	Número de probetas	Adición de emulsión asfáltica respecto al peso del cemento (%)	Densidad (kg/m ³)	Porosidad efectiva ξ (%)
1	20	0	1.900	29
2	20	10	1.900	25
3	20	20	2.000	13,4
4	20	30	1.900	8,9
5	20	40	1.800	7,8

También se determinaron la resistencia a la penetración del agua, el coeficiente de absorción capilar y la velocidad de absorción capilar para cada muestra analizada (ver Tabla 4).

La absorción capilar de las muestras de concreto respecto al tiempo de saturación se muestra de forma indirecta en la Fig. 5; usualmente se utiliza la masa de la probeta en el tiempo. El gradiente de la velocidad de absorción capilar es constante hasta llegar al punto crítico y la velocidad de absorción capilar, una vez superado este punto de inflexión, disminuye gradualmente hasta llegar a 0. Se evidencia que la adición de emulsión asfáltica reduce drásticamente la absorción capilar de las muestras. Hay una disminución de la porosidad efectiva de 73 % para las probetas con 40 % de adición de emulsión asfáltica, de 69 % para probetas con 30 % de adición, de 54 % para probetas con 20 % de adición y de 14 % para probetas con 10 % de adición respecto a las probetas sin adición de emulsión asfáltica.

Tabla 4. Resultados del ensayo de succión capilar

Muestra	Número de probetas	Adición de emulsión asfáltica respecto al peso del cemento (%)	Resistencia a la penetración del agua m (10^6 s / m ²)	Coefficiente de absorción capilar k (kg / (s ^{1/2} m ²))	Velocidad de absorción capilar S (10^{-4} m / s ^{1/2})
1	20	0	9,21	0,096	0,70
2	20	10	88,45	0,026	0,12
3	20	20	132,67	0,011	0,04
4	20	30	309,58	0,004	0,02
5	20	40	442,25	0,004	0,02

Se evidencia una disminución del coeficiente de absorción capilar de 96% para las probetas con 40 % de adición de emulsión asfáltica, de 96 % para probetas con 30 % de adición, de 89 % para probetas con 20% de adición y de 73 % para probetas con 10 % de adición respecto a las probetas sin adición de emulsión asfáltica. Se encuentra una disminución de la velocidad de absorción capilar de 97 % para las probetas con 40 % de adición de emulsión asfáltica, de 98 % para probetas con 30 % de adición, de 94 % para probetas con 20 % de adición y de 82 % para probetas con 10% de adición respecto a las probetas sin adición de emulsión asfáltica. Los mejores resultados se obtienen entonces con el 30% y el 40% de adición de emulsión asfáltica. La incorporación de aditivos bituminosos contribuye notablemente a disminuir la absorción capilar en los morteros y concretos que los incorporan.

Como se había mencionado previamente, diversos autores encuentran un coeficiente de absorción capilar entre 0,010 y 0,200 (kg / (s^{1/2} m²)) y determinan una velocidad de absorción capilar entre $0,09 \times 10^{-4}$ y $3,15 \times 10^{-4}$ (m/s^{1/2}) en varios tipos de morteros y concretos. En este estudio, si la adición de emulsión asfáltica es superior al 20 %, los bloques exhiben coeficientes de absorción capilar y velocidades de absorción capilar pequeños. Específicamente, los bloques de concreto con 30 % y 40 % de adición de emulsión asfáltica presentan un coeficiente de absorción capilar de 0,004 (kg / (s^{1/2} m²)) y se clasifican entonces como un material hidrófugo (ver Zürcher *et al.* [18]).

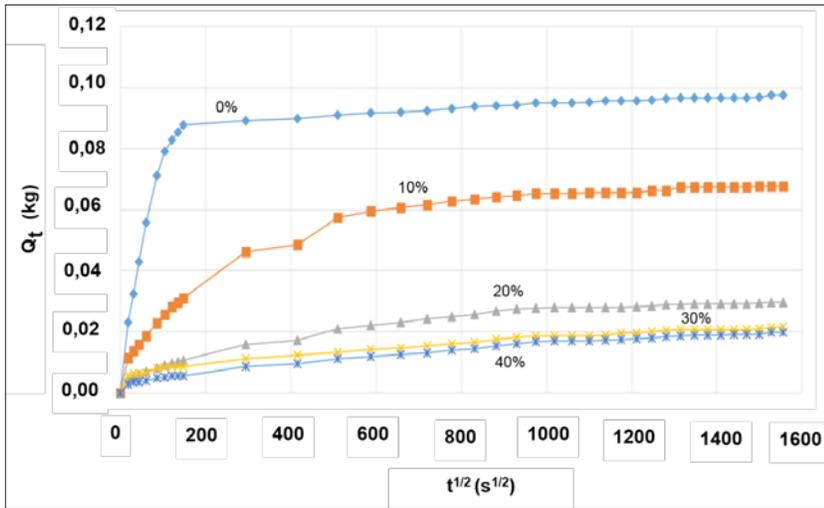


Figura 5. Absorción capilar de las muestras en función del tiempo (0, 10, 20, 30 y 40 % de adición de emulsión asfáltica).

Se hicieron también ensayos de penetración de agua con el método RILEM CPC 11.2 [25] para determinar la penetración de agua en los bloques de concreto.

Todos los bloques para sobrecimiento fabricados en esta investigación son aligerados con perforación vertical y tienen una anchura de 120 mm., una altura de 200 mm. y una longitud de 400 mm. (ver Fig. 6). Se estudiaron 20 bloques sin adición de emulsión asfáltica, 20 bloques con un 10 % de adición de emulsión asfáltica respecto al peso del cemento, 20 bloques con un 20 % de adición, 20 bloques con un 30 % de adición y 20 bloques con un 40 % de adición. En la fabricación de los bloques y de las probetas, la emulsión asfáltica es mezclada con el agua y posteriormente es incorporada a la mezcla de cemento y arena. Para los ensayos de penetración de agua se utilizó una pipeta de Karsten de 1 cm² de área transversal y una capacidad volumétrica de 5 cm³ (ver Fig. 7). La pipeta se adhiere a la superficie de los bloques de concreto usando una masilla impermeable. Inicialmente, se garantiza que la superficie de los bloques se encuentre seca y limpia y se verifica la ausencia de fugas entre la pipeta, la masilla impermeable y la superficie de contacto del bloque. También se evaluó la penetración de agua en bloques convencionales, de una marca reconocida, adquiridos en el mercado.



Figura 6. Bloque de concreto aligerado para sobrecimiento.

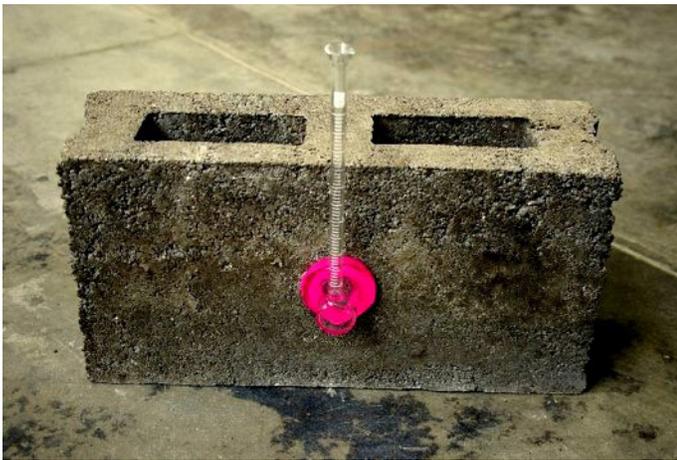


Figura 7. Pipeta de Karsten en ensayo de penetración de agua.

Se cuantifica la penetración de agua durante 10 minutos, se registran y grafican los resultados. Se ejecutan dos ensayos de penetración de agua por cada bloque para un total de 220 ensayos y se determina así el promedio por cada tipo de muestra (ver Fig. 8).

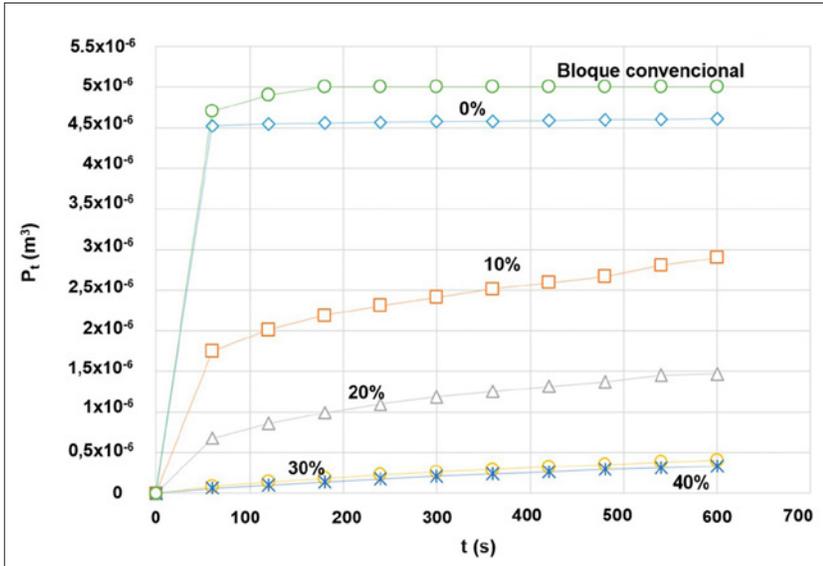


Figura 8. Penetración de agua método RILEM (Bloque convencional, 0, 10, 20, 30 y 40 % de adición de emulsión asfáltica).

t : Tiempo de penetración (s)

P_t : Penetración de agua en el tiempo t (m^3)

En la Tabla 5 se muestran los valores promedios de máxima penetración de agua después de 10 minutos de ensayo en cada muestra. Se estima una disminución de la penetración de agua de 95 % para los bloques de concreto con 40 % de adición de emulsión asfáltica, de 95 % para los bloques con 30 % de adición, de 74 % para los bloques con 20 % de adición y de 48 % para los bloques con 10 % de adición respecto a las probetas sin adición de emulsión asfáltica. La penetración de agua promedio en los bloques convencionales, adquiridos en el mercado, es idéntica a la penetración de agua en los bloques sin adición de emulsión asfáltica fabricados en esta investigación. Los mejores resultados se obtienen nuevamente con el 30 % y el 40 % de adición de emulsión asfáltica.

Tabla 5. Resultados del ensayo de penetración de agua

Muestra	Número de bloques	Adición de emulsión asfáltica respecto al peso del cemento (%)	Penetración de agua promedio P_t (10^{-6} m^3)
Bloque convencional	20	0	4,5
1	20	0	4,2
2	20	10	2,2
3	20	20	1,1
4	20	30	0,2
5	20	40	0,2

Finalmente, se realizaron ensayos de compresión en todas las muestras con la norma para bloques de concreto de uso no estructural ASTM C90 [26]. La Tabla 6 muestra la resistencia a la compresión a los 28 días de las cinco muestras analizadas. También se evaluó la resistencia a la compresión en los bloques convencionales, adquiridos en el mercado, y se obtuvo un valor promedio de 12,85 MPa. En todas las muestras se obtuvieron valores bajos de resistencia a la compresión pero similares a los valores de los bloques convencionales comerciales. El Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10) [28] recomienda valores de resistencia entre 10 MPa y 13 MPa respecto al área neta de los bloques de concreto estructurales con perforación vertical.

También se estimaron los módulos de elasticidad de cada bloque con ultrasonido (ver Fig. 9 y Tabla 7). Se evaluó adicionalmente el módulo de elasticidad en los bloques convencionales y se obtuvo un valor promedio de 21,28 GPa.

Tabla 6. Resultados del ensayo de resistencia a la compresión

Muestra	Número de bloques	Adición de emulsión asfáltica respecto al peso del cemento (%)	Resistencia a la compresión promedio en área neta (MPa)
Bloque convencional	20	0	12,85
1	20	0	11,40
2	20	10	10,67
3	20	20	10,12
4	20	30	7,85
5	20	40	5,92



Figura 9. Ultrasonido.

Tabla 7. Resultados del ensayo de módulo de elasticidad

Muestra	Número de bloques	Adición de emulsión asfáltica respecto al peso del cemento (%)	Módulo de elasticidad promedio (GPa)
1	20	0	23,98
2	20	10	22,03
3	20	20	21,83
4	20	30	19,72
5	20	40	18,86

IV. CONCLUSIONES

En esta investigación, se produjeron y analizaron experimentalmente bloques y probetas cilíndricas, se fabricaron con arena de concreto lavada, cemento Portland tipo 1, emulsión asfáltica en frío y una relación agua-cemento de 0,40 en peso. Se estudiaron bloques y cilindros sin adición de emulsión asfáltica y con 10 %, 20 %, 30 % y 40 % de adición de emulsión asfáltica respecto al peso del cemento. Se ejecutaron ensayos de absorción capilar, de resistencia a la penetración de agua y de resistencia a la compresión y se realizó un análisis comparativo de los resultados obtenidos para determinar la proporción óptima de adición de emulsión asfáltica.

Se encuentra que el porcentaje óptimo de adición de emulsión asfáltica es 30 % ya que no penaliza excesivamente la resistencia a la compresión de los bloques y presenta valores ideales de absorción capilar y de penetración de agua. Los resultados cuando la adición de emulsión asfáltica es 40 % son idénticos a los de 30 % de adición.

Para las probetas con 30% de adición de emulsión asfáltica respecto a las probetas sin adición hay una disminución de la porosidad efectiva de 69 %, una disminución de la velocidad de absorción capilar de 98 % y una disminución del coeficiente de absorción capilar de 96 %. Igualmente, se estima una disminución de la penetración de agua de 95 % para los bloques con 30 % de adición de emulsión asfáltica respecto a las probetas sin adición.

Los bloques para sobrecimiento aligerados con perforación vertical y con una anchura de 120 mm, una altura de 200 mm y una longitud de 400 mm fabricados en esta investigación y con una adición de emulsión asfáltica de 30 % reducirían drásticamente la absorción capilar y eliminarían los posibles daños en los muros por la humedad del suelo o la lluvia. Son un material de construcción hidrófugo.

En una investigación futura se debe comparar el costo económico de la solución propuesta aquí respecto a otras alternativas. También se debe estudiar el comportamiento a largo plazo de los bloques con las adiciones de emulsión asfáltica.

Sería también interesante producir industrialmente los bloques de concreto con la adición de emulsión asfáltica para fabricar un muro y verificar los diferentes parámetros de absorción y de resistencia estudiados en este artículo. Adicionalmente, se podría validar el comportamiento del muro con un modelo numérico que incluya también las propiedades del mortero.

REFERENCIAS

- [1] F. Bamoharram, M. Heravi, S. Saneinezhad, A. Ayati, "Synthesis of a nano organo-silicon compound for building materials waterproofing using heteropolyacids as a green and eco-friendly catalyst", *Prog. Org. Coat*, vol. 76, no. 2-3, pp. 384-387, 2013. doi: 10.1016/j.porgcoat.2012.10.005.
- [2] L. Falchi, U. Muller, P. Fontana, C. Izzo, E. Zendri, "Influence and effectiveness of water-repellent admixtures on pozzolana-lime mortars for restoration application", *Construction and Building Materials*, vol. 49, no. 12, pp. 272-280, 2013. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.08.030.
- [3] T. Gonen, S. Yazicioglu, "The influence of compaction pores on sorptivity and carbonation of concrete", *Construction and Building Materials*, vol. 21, no. 5, pp. 1040-1045, 2007. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2006.02.010.
- [4] M. Gopalan, "Sorptivity of fly ash concretes", *Cement and Concretes Research*, vol. 26, no. 8, pp. 1189-1197, 1996. doi:10.1016/0008-8846(96)00105-6.
- [5] J. Howland, A. Martín, "Investigación de la absorción capilar de hormigones con áridos calizos cubanos", *Revista Cubana de Ingeniería*, vol. 3, no. 2, pp. 17-24, 2012.
- [6] M. Książek, "The biocorrosion of city sewer collector impregnated special polymer sulfur binder - Polymerized sulfur applied as the industrial waste material", *Construction and Building Materials*, vol. 68, no. 10, pp. 558-564, 2014. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.06.077.
- [7] A. Izaguirre, J. Lanas, J. Álvarez, "Ageing of lime mortars with admixtures: durability and strength assessment", *Cement and Concrete Research*, vol. 40, no. 7, pp. 1081-1095, 2010. doi: 10.1016/j.cemconres.2010.02.013.
- [8] M. Lanzón, R. García, "Effectiveness and durability evaluation of rendering mortars made with metallic soaps and powdered silicone", *Construction and Building Materials*, vol. 22, no. 12, pp. 2308-2315, 2008. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2007.10.001.
- [9] M. Lanzon, R. García, "Evaluation of capillary water absorption in rendering mortars made with powdered waterproofing additives", *Construction and Building Materials*, vol. 23, no. 10, pp. 3287-3291, 2009. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.05.002.

- [10] B. Liu, *Concrete technology*. Beijing, Traffic Press, 1998.
- [11] Z. Lu, X. Zhou, J. Zhang, "Study on the performance of a new type of water-repellent admixture for cement mortar", *Cement and Concrete Research*, vol. 34, no. 11, pp. 2015-2019, 2004. doi: 10.1016/j.cemconres.2004.02.019.
- [12] E. A. Correa, R. M. Montoya, S. L. Peñaranda, F. Echeverría, J. G. Castaño, "Deterioro atmosférico del concreto en ambientes urbanos colombianos de diferente agresividad", *Revista Científica Ingeniería y Desarrollo*, no. 23, pp. 1-9, 2008.
- [13] M. Boltryk, D. Małaszkiwicz, "Application of anionic asphalt emulsion as an admixture for concrete", *Construction and Building Materials*, vol. 40, no. 3, pp. 556-565, 2013. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.11.110.
- [14] P. Mukhopadhyaya, K. Kumaran, N. Normandin, P. Goudreau, "Effect of surface temperature on water absorption coefficient of building materials", *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, vol. 26, no. 2, pp. 179-195, 2002.
- [15] S. Roels, K. Vandersteen, J. Carmeliet, "Measuring and simulating moisture uptake in a fractured porous medium", *Advances in Water Resources*, vol. 26, no. 3, pp. 237-246, 2003. doi: 10.1016/S0309-1708(02)00185-9.
- [16] J. Díaz, S. Izquierdo, "Mezcla ternaria de cemento portland, escoria de alto horno y piedra caliza: resistencia mecánica y durabilidad", *Revista de la Construcción*, vol. 12, no. 3, pp. 53-60, 2013. doi: 10.4067/S0718-915X2013000300006.
- [17] Y. Silva, D. Burgos, W. Valencia, S. Delvasto, J. Álvarez, "Concretos autocompactantes a partir de lodo calcáreo de la industria papelera", *Revista de la Construcción*, vol. 12, no. 2, pp. 166-176, 2013. doi: 10.4067/S0718-915X2013000200013.
- [18] C. Zürcher, T. Frank, *Physique du bâtiment: construction et énergie*. Zürich, Vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, 2014.
- [19] P. Zanchet, M. Cheriaf, R. Cavalcante, N. Musteliet, "Measurements of water penetration and leakage in masonry wall: experimental results and numerical simulation", *Building and Environment*, vol. 61, no. 3, pp. 18-26, 2013. doi: 10.1016/j.buildenv.2012.11.017.
- [20] E. Badogiannis, I. Sfikas, T. Voukia, S. Tsivilis, "Durability of metakaolin self-compacting concrete", *Construction and Building Materials*, vol. 82, no. 5, pp. 133-141, 2015. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.02.023.
- [21] M. Wilson, W. Hoff, C. Hall, "Water movement in porous building materials - XI. Capillary absorption from a hemispherical cavity", *Building and*

Environment, vol. 29, no. 1, pp. 99-104, 1994. doi:10.1016/0360-1323(94)90058-2.

- [22] *American Society for Testing and Materials (ASTM), D 422. Standard test method for particle - Size analysis of soils.* ASTM Annual book of standards, West Conshohocken, Pa, 2007.
- [23] *Durabilidad del hormigón. Determinación de agua por capilaridad del hormigón endurecido, Método Fagerlund, UNE PrUNE 83.982.,* 2007.
- [24] *American Society for Testing and Materials (ASTM), C 1585-04. Standard test method for measurement of rate of absorption of water by hydraulic-cement concretes.* ASTM Annual book of standards, West Conshohocken, Pa, 2007.
- [25] *Absorption of water by concrete by capillarity, RILEM CPC 11.2,* 1982.
- [26] *American Society for Testing and Materials (ASTM), C 90. Standard specification for load bearing concrete masonry units.* ASTM Annual book of standards, West Conshohocken, Pa, 2015.
- [27] *American Society for Testing and Materials (ASTM), D2915-10. Standard practice for sampling and data-analysis for structural wood and wood-based products.* ASTM Annual book of standards, West Conshohocken, Pa, 2003.
- [28] *Reglamento colombiano de construcción sismo resistente, NSR-10.* Diario oficial. Decreto 926 del 19 de marzo de 2010.