

## EMPLEO DE JAL COMO CEMENTANTE EN LA ELABORACIÓN DE UN CONCRETO PERMEABLE

L. Lizárraga-Mendiola<sup>1</sup>, C. A. Bigurra-Alzati<sup>2\*</sup>, D. F. Paz-Casas<sup>3</sup>, S. Montiel-Palma<sup>1</sup>, M. R. González-Sandoval<sup>1</sup>, I. E. Castañeda-Robles<sup>1</sup>, L. D. López-León<sup>1</sup>, F. J. Olguín-Coca<sup>1</sup>, F. O. Lagarda-García<sup>2</sup>

<sup>1</sup>CA de Ingeniería Civil Sustentable y Tecnología de Materiales, UAEH, Mineral de la Reforma, Hgo lililga.lm@gmail.com; silvia\_montiel@uaeh.edu.mx; cuquisglezs@gmail.com; navicr@hotmail.com; wisdaimir@gmail.com; jolguin77@gmail.com

<sup>2</sup>Grupo de Investigación Arquitectura, Tecnología y Habitabilidad, UAEH, Mineral de la Reforma, Hgo carlos.a.bigurra.alzati@gmail.com; arqlagarda@yahoo.com

<sup>3</sup>Licenciatura en Ingeniería Civil, UAEH, Mineral de la Reforma, Hidalgo pacd86@hotmail.com

\* Autor de correspondencia: carlos.a.bigurra.alzati@gmail.com

### RESUMEN

El concreto permeable es buen sustituto del pavimento en vialidades de tránsito ligero. En este trabajo se empleó residuo minero (jal) como sustituto de arena (25%) y cemento (20%) en el diseño de mezcla para obtener un material con resistencia a la compresión, permeabilidad y porosidad adecuadas. Se compararon las mezclas con un concreto permeable normal piloto (arena-grava-cemento-agua). Se elaboraron los especímenes por triplicado conforme a normas nacionales. A las 24 horas de su elaboración, se desmoldaron los especímenes y se sometieron al proceso de curado convencional (28 días sumergidos en agua templada) y curado acelerado (24 horas en agua hirviendo). Se midió su resistencia a la compresión simple (14 y 28 días), así como su permeabilidad y porosidad. Se alcanzó la máxima resistencia a los 28 días a) en el concreto permeable (88.32 kg/cm<sup>2</sup>), b) con 20% de jal como cementante (103.35 kg/cm<sup>2</sup>) y c) 25% de jal como arena (86 kg/cm<sup>2</sup>). La permeabilidad y porosidad más altas se obtuvieron en el concreto con 20% de jal como cementante (118.49 L/min/m<sup>2</sup> y 19.63%, respectivamente). De lo anterior se concluye que el concreto permeable con 20% de jal como cementante es adecuado para utilizarse en andadores, ciclovías y vialidades.

**Palabras Clave:** concreto permeable, jal, cementante, tránsito ligero.

### 1. INTRODUCCIÓN

El constante crecimiento urbano actual conlleva una reducción de las zonas permeables, las cuales anteriormente facilitaban la infiltración del agua de escorrentía superficial hacia el subsuelo. Hoy en día estas superficies están cubiertas por edificaciones, estacionamientos y vialidades, principalmente. La construcción de estas superficies impermeables causa diversos impactos a través del ciclo hidrológico urbano: encharcamientos e inundaciones, canalización y conducción del agua de lluvia hacia el drenaje público, transporte de basura y erosión de suelo, así como el transporte de contaminantes (hidrocarburos y metales pesados) provenientes principalmente de los vehículos. La sustitución del pavimento convencional por concreto o pavimento permeable ofrece una alternativa para ayudar a disminuir los impactos negativos al ciclo hidrológico urbano. Entre las ventajas que pueden obtenerse están: reducción de los volúmenes de escorrentía superficial, infiltración hacia el subsuelo y recarga de acuíferos, así como una reducción en las concentraciones de contaminantes que

son transportados superficialmente debido a las actividades antropogénicas antes descritas. Además, éstos tienen buenas propiedades acústicas y de absorción de calor [1, 2]. Algunas de sus principales aplicaciones son: vialidades para tránsito ligero, ciclovías, estacionamientos, banquetas, control de erosión y estabilización de taludes. Su función básica consiste en recolectar el agua de escorrentía superficial, filtrar las sustancias contenidas en esta e infiltrar el agua hacia el subsuelo o recolectar el agua tratada para uso municipal, principalmente.

Un concreto permeable se compone básicamente de agua, agregados gruesos y cemento Portland, con una mínima cantidad de agregados finos que proporcionan su porosidad. Las relaciones promedio de agua: cemento varían entre 0.25-0.35, cemento: agregado entre 18.0 y 23.0, con un contenido de vacíos entre 11%-35% [2, 3]; aunque otros autores mencionan que una porosidad óptima debe ser superior al 25% [1]. El tamaño de sus poros se ve afectado por la granulometría de la mezcla, la cantidad de agua y cemento, así como su nivel de compactación. Su vida media suele ser menor a la de un pavimento convencional, debido al deterioro que sufren por la escorrentía superficial, infiltración de aire y la subsecuente oxidación de sus componentes químicos. Sin embargo, con un buen plan de mantenimiento, su vida útil puede extenderse. Drake et al. [4] determinaron que el concreto permeable es capaz de mejorar la calidad del agua infiltrada con buenos resultados en la reducción de hidrocarburos, metales pesados y nutrientes.

Existen diversos estudios que han buscado mejorar sus propiedades mecánicas e hidráulicas con el fin de proporcionar una opción para sustituir al asfalto. Tal es el caso de Brattebo y Booth [5], quienes diseñaron un concreto permeable estructuralmente duradero, capaz de reducir la cantidad de materia particulada y grasas a través de su medio filtrante. Las propiedades comúnmente estudiadas son el esfuerzo a la compresión, la permeabilidad, la densidad y su volumen de vacíos. Algunos estudios han empleado distintas técnicas ASTM para mejorar la relación porosidad: permeabilidad del concreto [6]. En cuanto a la distribución y el tamaño de partículas en el diseño de mezcla, éstos parámetros juegan un papel importante en las propiedades hidráulicas del material (evaporación, drenaje y retención del agua de escorrentía superficial) [7].

Nguyen et al. [8] diseñaron un concreto controlando la cantidad de cementante, con lo que consiguieron mejorar su permeabilidad hasta 1 mm/s. Otros autores señalan que la adición de pequeñas cantidades de finos (5%-7% del total de agregados) pueden ayudar a mejorar la resistencia a la compresión sin disminuir considerablemente su relación porosidad: permeabilidad [2]. En otros estudios se sustituyeron agregados por residuos de llanta, obteniendo capacidades de infiltración similares a las de un concreto permeable normal (cerca de 15%) [9]. En general, en estos estudios se ha demostrado que este tipo de pavimentos permeables tienen buena capacidad de absorción, pudiendo reducir escorrentías pico hasta en un 42% [10].

Por otra parte, el uso de materiales adicionales para mejorar sus propiedades mecánicas e hidráulicas se ha vuelto muy común. Por ejemplo, se empleó el uso de un geotextil en la base de un pavimento permeable para prevenir la migración de agregados finos, que suelen reducir su vida útil [10]. También desde hace algunos años, se ha recomendado el uso de aditivos para mejorar sus propiedades mecánicas tales como el humo de sílice, súper-plastificantes, así como algunos polímeros [2, 11]. En general, los estudios sobre el concreto permeable se enfocan en mejorar tanto sus propiedades mecánicas como hidráulicas, ya que es importante conservar su capacidad como medio de infiltración en zonas urbanas, buscando mantener una resistencia mínima necesaria o aumentarla para generalizar su utilización.

En las ciudades de Pachuca de Soto y Mineral de la Reforma existen diversos depósitos de jal (residuo minero) depositados al aire libre, que fueron tomados en cuenta en este trabajo como una opción para su reutilización en el diseño de mezclas de un concreto permeable. Debido a la importancia de buscar mejorar sus propiedades mecánicas e hidráulicas, el objetivo de este trabajo consiste en incorporar residuo minero como sustituto de cementante (20%) y de arena (25%) en el diseño de mezcla de un concreto permeable normal, con resistencia a la compresión y permeabilidad adecuadas para utilizarse en andadores, ciclovías y vialidades con tránsito ligero.

## 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

### 2.1 Trabajo de campo

Para este estudio se eligió el depósito de jal Dos Carlos, localizado en el municipio de Mineral de la Reforma, Hidalgo, para extraer la muestra de residuo minero. Este sitio se seleccionó con base en un estudio previo, que lo define como material con bajo riesgo ambiental, ya que en un análisis de sus lixiviados, sólo el cadmio tuvo concentración cercana al límite permisible para agua potable [12]. Después de retirar los primeros 50 cm de su superficie (para retirar la capa intemperizada), la muestra de jal se extrajo manualmente a lo largo de un perfil vertical, con la ayuda de palas, una charola de acero inoxidable y bolsa de polietileno previamente etiquetada [13]. El peso de la muestra fue de aproximadamente cinco kilogramos y se transportó al laboratorio de Resistencia de Materiales de la UAEH, donde fue almacenada a temperatura ambiente hasta ser analizada.

### 2.2 Trabajo de laboratorio

Para seleccionar los distintos tamaños de agregados gruesos y finos necesarios para elaborar los especímenes de concreto, se determinó su granulometría utilizando los tamices con diámetros de 1/2" (12.5 mm), 3/8" (10 mm), 1/4" (6.3 mm) y #4 (5 mm) [14]. El criterio utilizado para el diseño de los especímenes por triplicado, con una relación agua: cemento de 0.5 y agregados: cemento de 3.9 fue el siguiente [15]: 1) espécimen piloto (concreto permeable con arena, grava, cemento y agua), 2) espécimen sustituyendo el 25% de arena con jal y 3) espécimen sustituyendo el 20% de cemento con jal. Para determinar las cantidades de material a utilizar en la elaboración de las mezclas de concreto permeable, se utilizaron cilindros con diámetro de 15 cm x 30 cm de altura (volumen = 0.005 m<sup>3</sup>). En la Tabla 1 se enlistan las cantidades de material utilizado para elaborar los distintos especímenes:

**Tabla 1.** Proporciones de materiales utilizados para elaborar mezclas de concreto permeable.

Material	Especimen piloto	Especimen sustitución 25% arena con jal	Especimen sustitución 20% cemento con jal
Claves *	E3CC, E4CC E1CV, E2CV	E3CC%A, E4CC%A, E1CV%A, E2CV%A	E4CC%C, E5CC%C E1CV%C, E2CV%C
Jal (kg/m <sup>3</sup> )	0	0.2	0.4
Arena (kg/m <sup>3</sup> )	0.8	0.6	0.8
Grava (kg/m <sup>3</sup> )	7.0	7.0	7.0
Cemento (kg/m <sup>3</sup> )	2.0	2.0	1.6
Agua (kg/m <sup>3</sup> )	0.001	0.001	0.001

\* E: Especimen                      1: Número de especimen                      CC: Curado convencional  
CV: Curado en agua hirviendo                      %C: Sustitución de cemento por un 20% de jal  
%A: Sustitución de arena por un 25% de jal

### 2.2.1 Elaboración de los especímenes de concreto

Se siguió la metodología sugerida por la norma mexicana para la elaboración y ensayo de especímenes de concreto [16]. Se utilizó una revolvedora mecánica para elaborar la mezcla, agregando primero el agregado fino (arena para el concreto normal, jal para los especímenes con sustitución de arena y cemento, respectivamente); enseguida el agregado grueso (gravas); posteriormente el cemento, hasta obtener una mezcla homogénea. Se agregó el agua y se revolvió la mezcla durante un minuto y medio. El relleno de los cilindros con mezcla se realizó en tres capas diferentes, aplicando en cada una de ellas 25 golpes con ayuda de una varilla punta de bala (16 mm de diámetro y 600 mm de longitud), para una distribución uniforme de la mezcla. Los especímenes se dejaron reposar durante 24 horas en el laboratorio de Resistencia de Materiales.

### 2.2.2 Curado de cilindros de concreto

El curado del concreto es el proceso que se realiza durante su fraguado para asegurar su adecuada humedad. El período de curado debe durar 28 días para no tener problemas en la resistencia proyectada del concreto. Sin embargo, se determinó su resistencia a la compresión a los 14 y 28 días para medir su resistencia intermedia. El curado debe durar hasta que, como mínimo, el concreto haya alcanzado el 70% de la resistencia esperada. En este trabajo se utilizó el método convencional para el curado de muestras (los especímenes sumergidos en agua durante 28 días), y como medio de comparación se empleó también el método de curado en agua hirviendo, que tiene como finalidad acelerar el proceso de curado del concreto de 28 días a sólo 24 horas.

#### Curado convencional:

Después de desmoldar los cilindros de concreto permeable 24 horas posteriores a su elaboración, se introdujeron en un bote con agua a temperatura ambiente, para mantener una temperatura y un contenido de humedad promedio durante los 14 y 28 días después de su elaboración [16].

#### Curado acelerado:

El método de curado acelerado o curado en agua hirviendo se aplicó con agua a temperatura de 94 °C [15]. Se retiraron los cilindros de los moldes en las siguientes 24 horas posteriores a su elaboración. Éstos se introdujeron en la cámara de curado (Marca Controls, temperatura máxima 100 °C), llenada con agua previamente hasta una altura suficiente para que los especímenes quedaran sumergidos. A continuación, se puso a hervir el agua durante 7 horas llegando a la temperatura máxima de 94 °C. Pasado ese tiempo se apagó y se dejó enfriar durante 24 horas, manteniendo la cámara de curado sellada con las muestras en su interior. 24 horas después se extrajeron los cilindros de la cámara y, después de enfriarlas durante 1 hora en el exterior, se etiquetaron y se almacenaron a temperatura ambiente.

### 2.2.3 Resistencia a la compresión simple

Para obtener la resistencia a la compresión, se realizó la prueba a los 14 y 28 días de tiempo de curado de los especímenes. El procedimiento consistió en retirar los especímenes de su almacenamiento húmedo y realizar el ensaye inmediatamente, para prevenir la pérdida excesiva de humedad. Para su ensaye, se colocaron los cilindros en una máquina universal marca Controls (rango de temperatura y resistencia hasta 1,100 °C y 10,000 kg, respectivamente) mediante la aplicación de presión hasta llegar a la falla del espécimen. Para ello, se limpiaron las superficies de las placas superior e inferior y las cabezas del espécimen de prueba. Se colocó este último sobre la placa inferior, alineando su eje cuidadosamente con el centro de la placa de carga con asiento esférico; mientras tanto, la placa superior se bajó hacia el espécimen asegurándose que se tenga un contacto suave y uniforme. Se aplicó la carga

con una velocidad uniforme y continua sin producir impacto ni pérdida de carga. La velocidad de carga debe estar dentro del intervalo de 84 kg/cm<sup>2</sup>/min a 210 kg/cm<sup>2</sup>/min. Esta es equivalente para un diámetro estándar de 15 cm [17].

#### 2.2.4 Determinación de la porosidad de los especímenes

Se midió el volumen del espécimen de concreto permeable y se introdujo en una cubeta (volumen inicial,  $V_t$ ). Enseguida, se llenó un recipiente con agua y se registró su peso. Este volumen se vertió en la cubeta hasta cubrir el espécimen de concreto. Se volvió a medir el volumen de agua sobrante. La diferencia entre el volumen inicial de agua y el volumen restante se registró como  $V_v$ . El contenido de poros del espécimen de concreto permeable se calculó mediante la siguiente ecuación 1:

$$\% \text{Poros} = V_t \div V_v \quad (\text{ec. 1})$$

#### 2.2.5 Determinación de la permeabilidad de los especímenes

La prueba de permeabilidad se realizó recubriendo el espécimen con una película de plástico muy delgado, que no dejara escurrir el agua por sus lados. Luego, éste se colocó en la parte superior de una cubeta sobre una base de dos varillas. Enseguida, se vertieron 15 L de agua, midiendo el tiempo que tardó este volumen en atravesar el espécimen y escurrir en la cubeta. La prueba se repitió cinco veces en cada espécimen para promediar el valor [18].

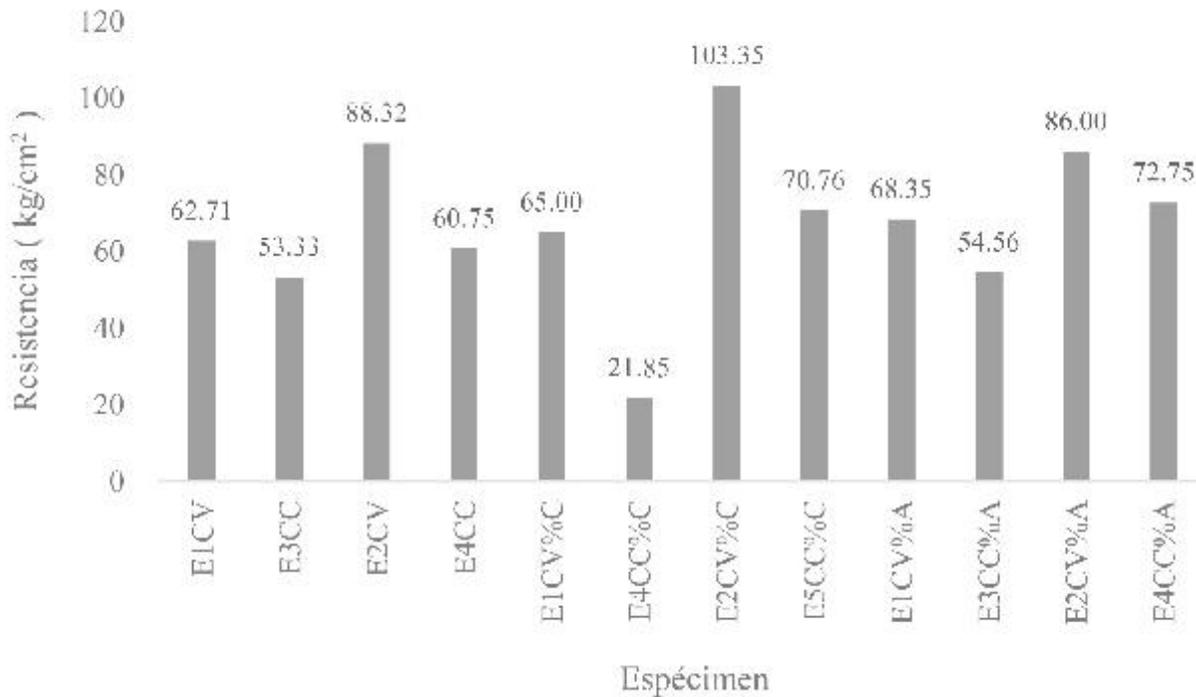
### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En numerosos estudios recientes se ha comprobado que la sustitución de alguno de los agregados o cementante en los componentes del concreto permeable contribuye a mejorar o, al menos, igualar sus propiedades mecánicas (resistencia a la compresión) e hidráulicas (permeabilidad, porosidad, conductividad hidráulica), aportando un valor agregado principalmente de tipo ambiental [7, 11, 19, 20]. A continuación, se presentan los resultados producto de la caracterización mecánica e hidráulica de un concreto permeable con adición de jal como sustituto de arena (25%) y de cemento (20%).

#### 3.1 Resistencia a la compresión

En el análisis de los tres especímenes de concreto permeable curados por el método convencional y por el método acelerado o en agua hirviendo, los valores promedio de la resistencia a la compresión a los 14 y 28 días fueron los siguientes (figura 1):

Se observa que los especímenes de concreto permeable curado por el método acelerado (E1CV) tuvieron una resistencia 15% mayor que aquellos curados por el método convencional (E3CC); mientras que a los 28 días de curado, nuevamente aquellos curados en agua hirviendo (E2CV) tuvieron una resistencia 31% superior a los curados por el método convencional (E4CC). En el caso de los especímenes donde se sustituyó un 20% de cemento con jal, indican resultados promedio muy variados a 14 y 28 días de curado. Se observa que, a los 14 días, el espécimen E1CV%*C* presentó una disminución del 66% en su resistencia con relación al que fue curado por el método convencional (E4CC%*C*), mientras que a los 28 días, los especímenes E2CV%*C* y E5CC%*C* tuvieron una disminución de 31.5%, también en aquellos curados por el método convencional. El comportamiento de la resistencia a la compresión en los valores promedio de los especímenes elaborados con un 25% de sustitución de arena con jal fue muy similar a las experimentaciones anteriores (figura 1). Para los especímenes curados en agua hirviendo, las resistencias fueron más altas a 14 y 28 días, mostrando una diferencia de 20% a los 14 días y de 15% a los 28 días.



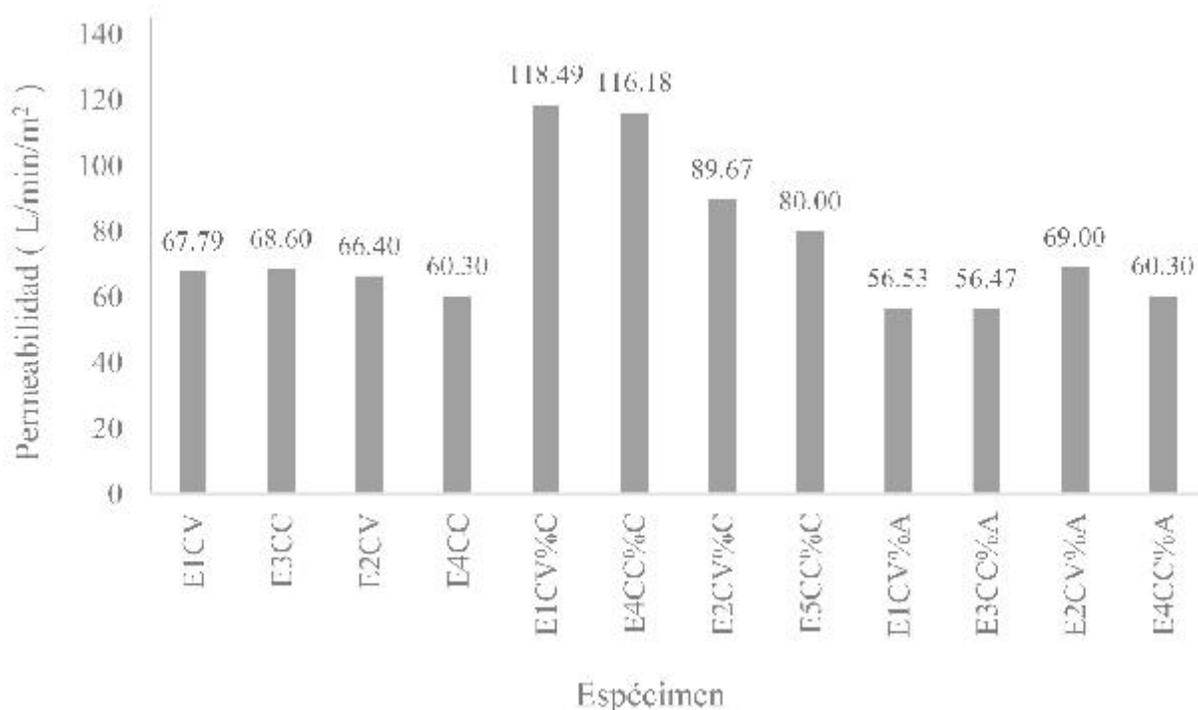
**Figura 1.** Comparación de resistencias a la compresión (kg/cm<sup>2</sup>) en especímenes: a) Concreto permeable normal (E1CV, E3CC, E2CV y E4CC), b) Sustitución 20% cemento con jal (E1CV%C, E4CC%C, E2CV%C y E5CC%C), c) Sustitución 25% arena con jal (E1CV%A, E3CC%A, E2CV%A y E4CC%A).

De los tres experimentos realizados, puede resaltarse que el comportamiento de la resistencia a la compresión fue muy similar en el diseño del concreto permeable normal y el concreto permeable con sustitución de un 25% de arena con jal. En el caso del concreto permeable donde se sustituyó un 20% de cemento con jal, su comportamiento fue muy irregular, con valores muy bajos (21.85 kg/cm<sup>2</sup>) y muy altos (103.35 kg/cm<sup>2</sup>).

### 3.2 Permeabilidad del concreto

De la misma manera que se analizó la resistencia a la compresión en especímenes con concreto permeable normal, con sustitución de jal por cemento y arena, así como en ambos métodos de curado, se realizó la determinación de su permeabilidad. A continuación, se presentan los resultados promedio obtenidos (figura 2):

A los 14 días, el concreto permeable curado por el método convencional obtuvo una permeabilidad 1.18% superior a los especímenes curados en agua hirviendo. Sin embargo, a los 28 días el comportamiento fue inverso, ya que la permeabilidad fue 9.18% superior en los especímenes curados en agua hirviendo que en aquellos curados por el método convencional. La permeabilidad de los especímenes (con sustitución del contenido de cemento con 20% de jal) fue mayor en aquellos curados en agua hirviendo con respecto a los que fueron curados por el método convencional (1.92% a los 14 días y 10.78% a los 28 días). Los especímenes con 25% de jal como sustituto de arena curados en agua hirviendo también tuvieron mayor permeabilidad (0.10% a los 14 días y 12.60% a los 28 días).



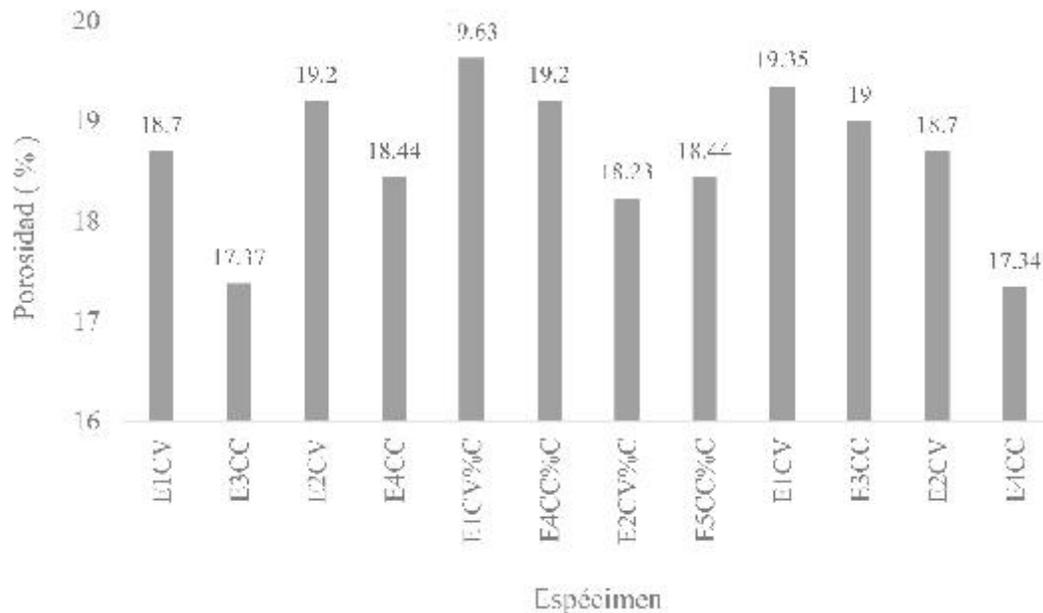
**Figura 2.** Comparación de la permeabilidad en especímenes: a) Concreto permeable normal (E1CV, E3CC, E2CV y E4CC), b) Sustitución 20% cemento con jal (E1CV%C, E4CC%C, E2CV%C y E5CC%C), c) Sustitución 25% arena con jal (E1CV%A, E3CC%A, E2CV%A y E4CC%A).

En general, en el concreto elaborado con 25% de sustitución de arena con jal, la permeabilidad aumentaba con el tiempo de curado (a los 28 días), mientras que este valor disminuía a los 28 días del curado, tanto en el concreto permeable normal como en aquel con 20% de sustitución de cemento con jal. Sin embargo, la mayor capacidad de infiltración la obtuvo el concreto permeable elaborado con 20% de jal en sustitución de cemento.

### 3.3 Porosidad del concreto

La porosidad, al igual que la resistencia a la compresión y la permeabilidad, tuvo un comportamiento muy homogéneo, donde se pudo apreciar que en aquellos especímenes curados en agua hirviendo, sus valores fueron superiores a los especímenes curados por el método convencional (figura 3).

La porosidad fue mayor a los 28 días que a los 14 días. Con relación a los tipos de curado, los especímenes curados en agua hirviendo a 14 días tuvieron una porosidad 7.11% superior a los curados por el método convencional. A los 28 días, los primeros fueron 3.96% superiores a los curados por el método convencional. Los especímenes donde se sustituyó el jal con cemento en un 20%, tuvieron una porosidad 2.19% superior en los que fueron curados en agua hirviendo; mientras tanto a los 28 días, la relación fue inversa, ya que los especímenes curados por el método convencional tuvieron una porosidad 1.13% superior a los especímenes curados en agua hirviendo. En el caso del concreto permeable con sustitución del 25% de jal por arena, tanto a los 14 como a los 28 días, la porosidad fue superior en aquellos especímenes curados en agua hirviendo. A los 14 días, su porosidad fue 1.8% mayor en los especímenes curados en agua hirviendo, mientras que a los 28 días, la porosidad fue 7.27% superior que en los especímenes curados por el método convencional.



**Figura 3.** Comparación de la porosidad (%) en especímenes: a) Concreto permeable normal (E1CV, E3CC, E2CV y E4CC), b) Sustitución 20% cemento con jal (E1CV%C, E4CC%C, E2CV%C y E5CC%C), c) Sustitución 25% arena con jal (E1CV%A, E3CC%A, E2CV%A y E4CC%A).

La porosidad determinada en todos los especímenes tuvo un comportamiento similar a la permeabilidad, donde se observó un aumento en su porcentaje con relación al tiempo de curado (28 días). En ambos experimentos donde se sustituyó jal por 20% de cemento y 25% de arena, la porosidad fue superior que en el concreto permeable normal, siendo mayor en el concreto con 20% de jal como sustituto de cemento.

### 3.4 Discusión

Al comparar los resultados obtenidos con respecto a un concreto permeable normal con las mismas relaciones agua: cemento (0.5) y agregados: cemento (3.9), se observaron algunas diferencias importantes: a) en el concreto permeable con sustitución del 25% de arena con jal, la resistencia fue mayor que en el concreto permeable con sustitución del 20% de arena con cemento. Sin embargo, sus propiedades hidráulicas (permeabilidad y porosidad) indicaron lo contrario: a mayor resistencia a la compresión, se obtuvo menor porosidad y permeabilidad. Esto puede deberse al porcentaje de poros, ya que, como se menciona en algunos estudios [7, 19], concretos permeables con porosidad baja (<15%) suelen tener resistencias mayores. Además, la relación agua: cemento y agregados: cemento influye en su capacidad para permitir el paso del agua a través de sus poros, ya que, a mayor relación agua: cemento, los poros pueden bloquearse con agregados finos [19]. Por otro lado, Bonicelli et al. [2] mencionan que cuando se aplican diferentes energías de compactación, o los tiempos entre el curado y la medición de la resistencia a la compresión varían, las propiedades mecánicas de un concreto permeable pueden variar también. Esto podría explicar las diferencias tan grandes que se encontraron en los especímenes entre un experimento y otro (Figuras 1, 2 y 3), ya que, en ocasiones, no era posible utilizar el laboratorio en los horarios programados para realizar las pruebas.

Debido a lo anterior, puede establecerse que un concreto permeable con sustitución de un 20% de cemento con jal es apto para instalarse en superficies como andadores, ciclovías y estacionamientos de tránsito ligero (resistencias mínimas de 20.4 kg/cm<sup>2</sup>), siempre y cuando se tenga en cuenta que una baja resistencia a la compresión y la posibilidad de que sus poros se saturan con material fino, representan la

necesidad de un mantenimiento continuo para preservar su vida útil [21]. Además, Kamali et al. [20] mencionan que, una vez que el concreto permeable se instala, la conductividad hidráulica se ve disminuida naturalmente por su uso continuo en corto tiempo (alrededor de 3 años), lo que corrobora la necesidad de un mantenimiento continuo (al menos una vez al año).

#### 4. CONCLUSIONES

En este estudio se analizó la posibilidad de reutilizar un residuo minero como parte de un concreto permeable. Se determinó que es factible reutilizar el jal como sustituto de un porcentaje (20%) de cemento y (25%) de arena en la mezcla para un concreto permeable, con relación agua:cemento (0.5) y agregados:cemento (3.9). De estas dos combinaciones, la sustitución de jal como cementante representa la mejor posibilidad de obtener un material constructivo con un valor agregado adicional, ya que se incorpora un residuo minero. El método de curado en agua hirviendo empleado en los especímenes de concreto influyó para que sus propiedades mecánicas (resistencia a la compresión simple) e hidráulicas (permeabilidad y porosidad) fueran superiores con respecto al método de curado convencional. Sin embargo, cabe señalar que el curado en agua hirviendo sólo es posible realizarse en un laboratorio, lo que dificultaría curar un concreto permeable para su colocación inmediata *in situ*. Los resultados de este estudio experimental dan pauta para desarrollar nuevas combinaciones de mezclas (jal, ceniza volante, residuos de la construcción y la demolición, plásticos, residuos de llanta, residuos agroindustriales, entre otros), así como la búsqueda de la mejora en sus propiedades hidráulicas, que ayuden a elaborar un nuevo material constructivo como el concreto permeable, cuyas propiedades hidráulicas pueden ayudar a reducir la escorrentía superficial urbana y reincorporarla al ciclo hidrológico urbano de una forma más equilibrada.

#### AGRADECIMIENTOS

Los integrantes del Cuerpo Académico Ingeniería Civil Sustentable y Tecnología de Materiales agradecen a la Dirección de Superación Académica, PRODEP, por el financiamiento para la consolidación de Cuerpos Académicos (2016-2017).

#### BIBLIOGRAFÍA

- [1] X. Kuang and Yanrong Fu: Hydrol. Process. 2013, vol. 27, pp. 532-540.
- [2] A. Bonicelli, Filippo Giustozzi and Maurizio Crispino: Con. and Build. Mat., 2015, vol. 91, pp. 102-110.
- [3] B.J. Putman and Andrew I. Neptune: Con. and Build. Mat., 2011, vol. 25, pp. 3480-3485.
- [4] J. Drake, Andrea Bradford and Tim Van Seters: J. Env. Man., 2014, vol. 139, pp. 69-79.
- [5] B.O. Brattebo and Derek B. Booth: Water Res., 2003, vol. 37, pp. 4369-4376.
- [6] M. Safiuddin and Nataliya Hearn: Cem. Concr. Res., 2005, vol. 35, pp. 1008-1013.
- [7] A. Kia, Hong S. Wong and Christopher R. Cheeseman: J. Env. Man., 2017, vol. 193, pp. 221-233.
- [8] D.H. Nguyen, Nassim Sebaibi, Mohamed Boutouil, Lydia Leleyter and Fabienne Baraud: Con. and Build. Mat., 2014, vol. 73, pp. 271-282.
- [9] S. Kumar, Ajay K. Sharma, Deepak Sherawat, Mohit Dutt and Ramesh C. Gupta: Con. and Build. Mat., 2017, vol. 145, pp. 311-317.
- [10] M. Scholz and Piotr Grabowiecki: Build. Env., 2007, vol. 42, pp. 3830-3836.
- [11] Y.J. Kim, Adel Gaddafi and Isamu Yoshitake: Mat. Des., 2016, vol. 100, pp. 110-119.
- [12] L. Lizárraga-Mendiola, Diana E. Ángeles-Chávez, Alberto Blanco-Piñón, Màrius Ramírez-Cardona, Francisco J. Olgún-Coca and María R. González-Sandoval: Int. J. Geosc., 2014, ser. 3, vol. 5, pp. 296-312.

- [13] Diario Oficial de la Federación (DOF). NOM-141-SEMARNAT-2003: publicada el 13 de septiembre de 2004. [http://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=661988&fecha=13/09/2004](http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=661988&fecha=13/09/2004).
- [14] American Society for Testing and Materials (ASTM). ASTM D2487-11: publicada en 2011. <https://www.astm.org/Standards/D2487.htm>.
- [15] Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. (IMCYC). Norma Mexicana NMX-C-160-ONNCCE- 2004: publicada en 2010. <http://www.imcyc.com/revistacyt/pdfs/problemas39.pdf>.
- [16] Diario Oficial de la Federación (DOF). NMX-C-159-ONNCCE-2016 y NMX-C-305-ONNCCE-2016: publicada el 22 de julio de 2016. [http://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5445530&fecha=22/07/2016](http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5445530&fecha=22/07/2016).
- [17] Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. (IMCYC). NMX-C-083-ONNCCE 2002: publicada en 2008. <http://www.imcyc.com/ct2008/nov08/PROBLEMAS.pdf>.
- [18] American Society for Testing and Materials (ASTM). ASTM C1701 / C1701M-17a: publicada en 2017. <https://www.astm.org/Standards/C1701.htm>.
- [19] A.K. Chandrappa and Krishna P. Biligiri: *Con. and Build. Mat.*, 2016, vol. 123, pp. 627-637.
- [20] M. Kamali, Madjid Delkash and Massoud Tajrishy: *J. Env. Man.*, 2017, vol. 187, pp. 43-53.
- [21] J. Li, Yi Zhang, Guanlan Liu and Xinghai Peng: *Con. and Build. Mat.*, 2017, vol. 138, pp. 479-485.