



# UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

## INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

### LICENCIATURA EN INGENIERÍA CIVIL

#### **TESIS**

#### *USO DEL RESIDUO MINERO INDUSTRIAL PARA LA ELABORACIÓN DE CONCRETO PERMEABLE*

Para obtener el título de  
INGENIERA CIVIL

PRESENTA:

Yasbeth Paola Correa Castro

DIRECTOR:

Dr. Luis Daimir López León

CO-DIRECTORA:

Dra. Liliana Guadalupe Lizárraga Mendiola

Pachuca de Soto, Hgo., México., Marzo de 2023.



## **Dedicatoria**

*A mis abuelitos con mucho amor y cariño, les dedico todo mi esfuerzo y trabajo  
puesto para la realización de esta tesis.*

## **Agradecimientos**

*A mis abuelitos que son el motor que impulsa mis sueños y esperanzas, quienes siempre han creído en mis capacidades. Ustedes siempre estuvieron a mi lado desde el inicio, son los mejores guías de vida.*

*A mi mamá, por su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años que me han permitido llegar a cumplir mi meta. Gracias por apoyarme cuando más lo necesito.*

*A mis hermanos Norett y Tadeo por su cariño y apoyo incondicional, durante todo este proceso, por estar conmigo en todo momento gracias.*

*Agradezco al Dr. Luis Daimir López León y Dra. Liliana Guadalupe Lizárraga Mendiola, la oportunidad de poder trabajar con ustedes y de adquirir nuevos conocimientos, con su dirección, conocimiento y enseñanza permitió el desarrollo de este trabajo.*

*A la memoria de mi compañera Camila G. Sosa Tamayo, te agradezco tu amistad y paciencia. Te recordare siempre como una persona especial.*

<b>Índice</b>	
<b>Dedicatoria</b>	2
<b>Agradecimientos</b>	3
<b>Índice</b>	4
<b>Índice de tablas</b>	6
<b>Índice de figuras</b>	8
<b>Capítulo 1. INTRODUCCIÓN</b>	10
1.1 Introducción	9
1.2 Antecedentes	9
1.3 Planteamiento del problema	11
1.4 Justificación	11
1.5 Hipótesis	12
1.6 Objetivo General	12
1.7 Objetivos específicos	12
<b>Capítulo 2. MARCO TEÓRICO</b>	15
2.1 Conceptos básicos	14
2.2 El concreto hidráulico	14
2.2.1 Agregados	15
2.2.2 El cemento	16
2.3 Concreto permeable	17
2.3.1 Aplicaciones	18
2.3.2 Ventajas	19
2.3.3 Desventajas	19
2.4 Características del concreto permeable	20
2.5 Métodos del curado de concreto	22
2.5.1 Curado de concreto permeable	24
2.6 Aditivos del concreto	24
2.6.1 Aditivos minerales	25
2.7 Residuo minero (Jal)	28
<b>Capítulo 3. METODOLOGÍA</b>	34
3.1 Criterios para el diseño de una mezcla de concreto permeable	33

3.2 Diseño de mezcla	33
3.2.1 <i>Peso volumétrico de los materiales</i>	34
3.2.2 <i>Modulo de finura</i>	35
3.3 Elaboración de especímenes	36
3.4 Curado de cilindros de concreto permeable	37
3.5 Resistencia a la compresión	39
3.5.1 <i>Informe de la prueba</i>	39
3.6 Prueba de permeabilidad	40
3.6.1 <i>Informe de la prueba</i>	41
<b>4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>47</b>
4.1 Resultados de la resistencia a la compresión	44
4.2 Resultados de la prueba de permeabilidad	46
<b>5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>51</b>
<b>Referencias</b>	<b>54</b>

## Índice de tablas

Tabla 2.1 Composición química típica del humo de sílice.	27
Tabla 2.2 Estudios realizados en concreto permeable empleando humo de sílice	28
Tabla 2.3 Composición química promedio, escombreras Dos Carlos	30
Tabla 2.4 Investigaciones acerca de residuos mineros en la ciudad de Pachuca	31
Tabla 3.1 Rangos típicos de proporciones de materiales de concreto permeable	33
Tabla 3.2 Dosificaciones de materiales para la elaboración de la mezcla de concreto con 0% de jal por metro cúbico.	33
Tabla 3.3 Dosificaciones de materiales para la elaboración de la mezcla de concreto con 5% de jal por metro cúbico.	34
Tabla 3.4 Dosificaciones de materiales para la elaboración de la mezcla de concreto con 10% de jal por metro cúbico.	34
Tabla 3.5 Dosificaciones de materiales para la elaboración de la mezcla de concreto con 15% de jal por metro cúbico.	34
Tabla 3.6 Dosificaciones de materiales para la elaboración de la mezcla de concreto con 0% de jal por cilindro.	34
Tabla 3.7 Dosificaciones de materiales para la elaboración de la mezcla de concreto con 5% de jal por cilindro.	34
Tabla 3.8 Dosificaciones de materiales para la elaboración de la mezcla de concreto con 10% de jal por cilindro.	35
Tabla 3.9 Dosificaciones de materiales para la elaboración de la mezcla de concreto con 15% de jal por cilindro.	35
Tabla 3.10 Resultados de la prueba de compresión de cilindros con 0% jal	39
Tabla 3.11 Resultados de la prueba de compresión de cilindros con 5% jal	40
Tabla 3.12 Resultados de la prueba de compresión de cilindros con 10% jal	40
Tabla 3.13 Resultados de la prueba de compresión de cilindros con 15% jal	40
Tabla 3.14 Resultados de pruebas de permeabilidad en cilindros con 0% jal	41
Tabla 3.15 Resultados de pruebas de permeabilidad en cilindros con 5% jal	41
Tabla 3.16 Resultados de pruebas de permeabilidad en cilindros con 10% jal	42

Tabla 3.17 Resultados de pruebas de permeabilidad en cilindros con 15% jal	42
Tabla 4.1 Parámetros de Resistencia a la Compresión	45
Tabla 4.2 Prueba de Permeabilidad Promedio	46

## Índice de figuras

Figura 2.1 Componentes del concreto: cemento, agua, agregado fino, agregado grueso, son combinados para formar el concreto.	14
Figura 2.2 Varios tamaños de partículas que se encuentran en los agregados para uso en concreto.	15
Figura 2.3 El cemento Portland es un polvo fino que cuando se mezcla con el agua se convierte en un pegamento que mantiene los agregados unidos en el concreto.	16
Figura 2.4 Espécimen de concreto permeable.	18
Figura 2.5 Prueba de permeabilidad en concreto permeable.	21
Figura 2.6 Los aspersores de césped saturan la estopa con agua y mantienen el concreto continuamente saturado. La aspersión intermitente es aceptable si no ocurre secado de la superficie del concreto.	23
Figura 2.7 La película de polietileno es una barrera de humedad efectiva para el curado del concreto y se la puede aplicar fácilmente tanto en formas complejas como en sencillas. Para minimizar la decoloración, la película se debe mantener lo más llano posible sobre la superficie de concreto.	23
Figura 2.8 Demostración de curado con superficie de polietileno.	24
Figura 2.9 Ejemplos de aditivos minerales.	26
Figura 2.10 Polvo de humo de sílice.	27
Figura 2.11 Ubicación del área de estudio, jal de Mina Dos Carlos, ciudad de Pachuca.	30
Figura 3.1 Proceso de tamizado por medios mecánicos de residuo minero	35
Figura 3.2 Molde parara cilindros	36
Figura 3.3 Agregado grueso	36
Figura 3.4 Mezcla de Materiales en Revolvedora	37
Figura 3.5 Izquierda – Aplicación de desmoldante en cilindro metálico - Derecha – Eliminación de aire contenido en la mezcla	37
Figura 3.6 Izquierda – Desmolde de cilindro de concreto permeable.	- 41
Figura 3.7 Proceso de curado por inmersión – Cilindros de concreto permeable	39
Figura 3.8 Prueba de permeabilidad en cada cilindro	41

Figura 4.1 Resistencia a la compresión de los especímenes de concreto permeable elaborados con jal como cementante.	44
Figura 4.2 Prueba de permeabilidad en cada cilindro	45

# Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

## **1.1 Introducción**

Actualmente, en el ámbito de la construcción se busca innovar de manera ecológica, empleando materiales existentes y otorgándoles un nuevo uso, contemplando que presenten un bajo costo en su producción y que cumplan con las normas de calidad establecidas. El enfoque de la construcción sostenible se basa en el respeto al entorno y al ambiente, ya que usa eficientemente los recursos naturales, el agua y la energía (Puertas et al., 2020). Los cambios climáticos registrados a nivel mundial son el resultado del aumento progresivo de la urbanización de espacios que han contribuido a la problemática de escasez hídrica, inundaciones, contaminación de cuerpos de agua, entre otras (Drake et al., 2013). Además, se desaprovecha el recurso hídrico al no contar con un sistema de captación de agua de lluvia eficiente, que impide la evacuación adecuada de la escorrentía y genera problemas en la infraestructura vial (Fassman y Blackbourn, 2010). Entre los ejemplos más comunes para mitigar este problema puede mencionarse el pavimento permeable. Además de ser una superficie para la movilidad vial, este material puede facilitar el ingreso del agua de escorrentía urbana y mitigar los encharcamientos (Suriya y Mudgal, 2012); además, tienen la capacidad para depurar algunos contaminantes y promover fuentes de recarga al subsuelo (Ortega-Villar et al., 2019). Para mejorar sus propiedades, se han utilizado distintos enfoques con buenos resultados: a) cenizas de fondo para optimizar su rendimiento (Tan et al., 2022), b) polvo de desecho de mármol como sustituto del cemento (Oggu y Sai-Madupu, 2022), c) adsorbentes minerales para depurar aguas residuales infiltradas (Teymouri et al., 2020), entre otros.

Al mismo tiempo, como se mencionó previamente, es necesario disminuir el consumo de materiales vírgenes y aprovechar los residuos como opción para una construcción sostenible. De esta forma, la estrategia principal de este trabajo será incorporar residuos mineros como complemento cementante para la generación de mezclas de concreto permeable. Se eligió este residuo ya que, en Pachuca, Hidalgo se cuenta con jales de mina resultado de la acumulación de más de 200 años, dispuestos a través de la zona urbana sin algún tipo de gestión ambiental (Hernández et al., 2009).

## **1.2 Antecedentes**

La primera aplicación identificada de concreto permeable se empleó bajo el nombre de concreto sin finos para la elaboración de estacionamientos, muros de carga y casas. En Países Bajos fue construida la primera residencia con concreto permeable después de la Primera Guerra mundial; más tarde, en Escocia se empleó para construir casi 900 casas (Moss, 1979). Posterior a la Segunda Guerra Mundial, la limitada cantidad de cemento y de mano de obra calificada para la mampostería,

ayudaron a desarrollar una nueva técnica en Inglaterra creada por la compañía George Wimpey y Company Ltd., en la cual vaciaban concreto sin finos, con obreros no calificados. En este proceso, se edificaron más de 400,000 construcciones empleando ese sistema (Patiño, 2013).

Al crecer el uso de concreto sin finos en la construcción surgieron nuevas alternativas de empleo, como lo fue en 1960 donde se aplicó como capa de rodadura en una carretera en Nottinghamshire, Inglaterra, con la intención de conocer las propiedades de drenaje del sistema (Green, 2011). Los primeros reportes de su uso en América son desde 1960; se utilizó en la construcción de casas en Toronto, Canadá. En Estados Unidos, surgió hasta la década de 1970 como una solución ante el incremento de los niveles de escorrentía superficial producto del aumento de zonas urbanizadas con altos coeficientes hidráulicos. Al emplear el concreto permeable (o concreto sin finos) se obtuvieron resultados favorables ya que se transformó la escorrentía superficial en infiltración y se cumplió una función práctica dentro del desarrollo en las ciudades (Fernández-Arrieta y Navas-Carro, 2010). En 1974, este tipo de material se aplicó por primera vez en Japón, donde su topografía equivale a 80% de superficie ondulada y montañosa, y tiene una precipitación anual de 1500 mm. Dadas estas condiciones, se optó por medidas para minimizar la escorrentía de las zonas urbanas por medio de su adaptación. Por tal motivo, sus aceras, estacionamientos, plazas y en ocasiones vías de tráfico reducido, utilizaron los concretos permeables para permitir la infiltración de la lluvia en el terreno (Cruz-Palafox et al., 2014).

En otro estudio, se estudiaron las aplicaciones y propiedades del concreto permeable en 1976, obteniendo resultados acerca de su consistencia, dosificación de materiales, compactación y curado, para aumentar la permeabilidad de este tipo de concreto (Solano, 2009). Es en 1990 cuando el concreto permeable empezó a investigarse con mayor profundidad; su uso fue avalado por el Instituto Americano del Concreto (ACI, por sus siglas en inglés) y por la Sociedad Americana para Ensayos y Materiales (ASTM, por sus siglas en inglés) (Jimenez, 2019). Más recientemente, en un estudio se analizaron varias muestras aplicadas en sistemas de pavimentos y se comparó su resistencia y relación agua – cemento y agregado – cemento; finalmente, se emplearon estos resultados para encontrar espesores de diferentes subbases (Ghafoori, 1995). Más tarde, en 2006, la Asociación de Concreto Premezclado de Tennessee divulgó un conjunto de especificaciones para el uso de materiales, mezclas, procesos constructivos e inspecciones en la aplicación de concretos permeables. En ese mismo año, el Comité 522 del ACI publicó los distintos usos, aplicaciones y características que deben ser seguidas en la realización de mezclas (Solano, 2009).

En México, se publicó una tesis elaborada por el Ing. Daniel Pérez Ramos (2009), titulada “Estudio experimental de concretos permeables con agregados andesíticos”, realizando mezclas de concreto permeable con 15% y 20% de vacíos. Estas mezclas se elaboraron con agregados andesíticos, obteniendo que, a menor porcentaje de vacíos, tenían mayor resistencia y peso volumétrico, aunque se afectaba su permeabilidad (Perez-Ramos, 2009). En años posteriores (2014), se propuso otra aplicación como el “Sistema para la recuperación y aprovechamiento del agua pluvial por medios de pisos y pavimentos porosos,” creado por el ingeniero mexicano Jaime Grau Genesías, quien desarrolló un concreto permeable con aditivo Hidrocreto®; este material reacciona con el cemento y potencializa su resistencia durante sus primeros minutos de fraguado (Concreto Permeable Ecológico Ecocreto - Hidrocreto, 2018). De igual forma, se tiene registro de investigaciones como el “Diseño de un concreto permeable para la recuperación de agua” elaborada por catedráticos de la UAEH (Cruz-Palafox et al., 2014), en la cual se elaboraron especímenes de concreto permeable con aditivos de concreto, ceniza volante y arena de sílice. Este estudio diseñó un concreto permeable con la misma resistencia que el concreto hidráulico para su utilización en autolavados, recuperando el agua para su tratamiento y reutilización (Cruz-Palafox et al., 2014).

### **1.3 Planteamiento del problema**

El almacenamiento de los residuos provenientes de la extracción de minerales ubicados en distintos puntos de la ciudad de Pachuca de Soto, Hgo., no solo genera un problema visual, representa un problema de salud, debido a que este material puede ser transportado mediante viento o agua a la población (Hernández et al., 2014), por lo que actualmente se buscan soluciones para reducir su volumen y, al mismo tiempo, revalorizarlos empleándolos en materiales de construcción altamente empleados. En este estudio se implementará el jal minero como complemento cementante en la elaboración de un concreto permeable, que cumpla con las propiedades de resistencia y durabilidad, bajo la normativa nacional e internacional correspondientes.

### **1.4 Justificación**

Aunque no existen muchos estudios publicados en la actualidad, hay ejemplos de la sustitución del cemento con distintos materiales finos para mejorar la resistencia del concreto permeable a la compresión. En un estudio donde se empleó ceniza volcánica, ésta sustituyó un 2.5% el contenido de cemento obteniendo resistencias hasta de 21.28 MPa (Carrera-Saavedra y Lino-Solano, 2021). En otro estudio, se añadieron geopolímeros en sustitución del cemento y se diseñó una dosificación óptima donde la resistencia a la compresión y la permeabilidad obtenidas alcanzaron los rangos establecidos en la normativa (Elizondo-Martínez, 2020). Otro

estudio empleó el bagazo de caña en sustitución del 15% del cemento, obteniendo una resistencia a la compresión de 235.98 kg/cm<sup>2</sup> acorde con los rangos establecidos en la norma de diseño ACI 211 (Guevara-Coronel, 2020).

En la Ciudad de Pachuca de Soto, Hidalgo se tiene registro de jales que ocupan un volumen de 650 millones de metros cúbicos sin tratamiento previo, afectando la calidad del aire al contar con contaminantes como: dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre, ozono e incluyendo metales pesados (García, 2020). Además, cuentan con la presencia de cianuros, sustancia dañina para la salud y mantos acuíferos (Montoya, 2016). La necesidad de aplicar estos recursos y aprovecharlos eficazmente, permitirá reducir el impacto ambiental y el riesgo a la salud de su población. Asimismo, serán aplicados en la construcción para elaborar concreto permeable.

## **1.5 Hipótesis**

Es factible sustituir parcialmente al cemento con residuo minero para elaborar un concreto permeable que cumpla con las características establecidas por la normativa nacional e internacional.

## **1.6 Objetivo general**

Diseñar un concreto permeable incorporando jal como sustituto cementante en proporciones 0%, 5%, 10% y 15%, que pueda ser empleado como material para la construcción con propiedades mecánicas e hidráulicas similares a las de un concreto permeable común.

## **1.7 Objetivos específicos**

- Diseñar una mezcla de concreto permeable con una resistencia a la compresión de  $f'c=100$  kg/cm<sup>2</sup> para elaborar los especímenes de referencia.
- Elaborar especímenes de concreto permeable con 0%, 5%, 10% y 15% de residuo minero utilizando el diseño de mezcla propuesto para compararlos con los de referencia.
- Realizar pruebas de compresión y permeabilidad para revisar el efecto del jal en el concreto permeable.
- Comparar las propiedades mecánicas e hidráulicas del concreto permeable diseñado con jal con respecto a un concreto permeable convencional para determinar si se igualaron sus características.

## **Capítulo 2. MARCO TEÓRICO**

## 2.1 Conceptos básicos

En el desarrollo del siguiente capítulo se presentarán los conceptos y definiciones de los materiales empleados para el proceso experimental, con los cuales podremos delimitar la investigación.

## 2.2 El concreto hidráulico

El concreto hidráulico es un material pétreo artificial obtenido de la mezcla de materiales como arena, grava y cemento (Figura 2.1), el cual solo necesita agua para endurecerse y unir los agregados formando una masa sólida semejante a una roca, debido a la reacción química de sus componentes (Chan et al., 2003).



**Figura 2.1 Componentes del concreto: cemento, agua, agregado fino, agregado grueso, son combinados para formar el concreto.**

*Fuente: (Kosmatka et al., 2004).*

La calidad de este material es dependiente de las propiedades físicas y químicas de la pasta y el agregado, así como de su unión. Un concreto correctamente elaborado no presentará espacios entre las partículas de agregados (Kosmatka et al., 2004). En un inicio, es una estructura plástica y moldeable que posteriormente adquiere una consistencia rígida con propiedades aislantes resistentes, por lo que es considerado como un material ideal para la construcción (Pasquel, 1998).

El concreto hidráulico según la norma N·CMT·2·02·005/04 (N·CMT·2·02·005/04, 2004) puede ser clasificado de acuerdo a su función como:

- Concreto hidráulico - Clase 1 (para uso estructural cuando la resistencia del proyecto es de 250 kg/cm<sup>2</sup> o mayor).
- Concreto hidráulico - Clase 2 (para uso estructural, cuando la resistencia del proyecto es de: 100 a 250 kg/cm<sup>2</sup>).
- Concreto hidráulico - Hecho en obra.

- Concreto premezclado (se prepara desde la planta para aplicarse directamente en la obra).

Las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto (NTC, 2004) menciona cinco tipos de concreto:

- Concreto convencional
- Concreto prefabricado
- Concreto de alta resistencia (igual o mayor que 40 MPa)
- Concreto ligero (peso volumétrico en estado fresco es inferior a 1.9 t/m<sup>3</sup>).
- Concreto simple (no se permite su uso en columnas con fines estructurales)

### 2.2.1 Agregados

Los agregados son el componente con mayor volumen dentro de la mezcla; sus propiedades son dependientes de los procesos de explotación, manejo y transporte. Es considerado como un componente dinámico y crítico en el concreto ya que posee un efecto significativo en el comportamiento de las estructuras (Chan, 1993). Cumplen con importantes propiedades físicas cuando se utilizan en materiales de construcción, tales como: la porosidad, la absorción, la densidad, la adherencia, la resistencia, etc. (Chan, 1993). La granulometría (Figura 2.2) es de suma importancia en los agregados, tanto en el comportamiento del concreto en estado plástico, como en su estado endurecido (Kosmatka et al., 2004).



**Figura 2.2 Varios tamaños de partículas que se encuentran en los agregados para uso en concreto.**

*Fuente: (Kosmatka et al., 2004).*

Los agregados para el concreto hidráulico pueden ser clasificados de acuerdo con su tamaño, según la norma N·CMT·2·02·002/19 (N·CMT·2·02·002/19, 2019) como:

- *Agregado fino:* es arena natural seleccionada u obtenida mediante trituración y cribado, con partículas de tamaño entre 75 micrómetros (malla No. 200) y 4.74 milímetros (malla No. 4).
- *Agregado grueso:* puede ser grava natural seleccionada u obtenida mediante trituración y cribado, escorias de altos hornos enfriadas en aire o una

combinación de dichos materiales, con partículas de tamaño máximo de 19 milímetros (3/4") y 75 milímetros (3 pulgadas).

### 2.2.2 El cemento

El cemento Portland está compuesto principalmente de silicatos de calcio. Actualmente, se emplea como conglomerado ya que es una cal hidráulica perfeccionada (N·CMT·2·02·001/02, 2002). Es elaborado industrialmente, pulverizando a un grado de finura determinado que forma una mezcla fría de arcilla y materiales calcáreos, previamente sometida a cocción, conocida como clinker Portland. A esta mezcla se le agrega sulfato de calcio como anhidrita, yeso o hemihidrato para regular el tiempo de fraguado (N·CMT·2·02·001/02, 2002).

Durante la reacción, denominada hidratación, el cemento crea una mezcla con el agua y forma una masa similar a una roca, llamada pasta (Figura 2.3). Cuando se une los agregados con la pasta se forma el concreto; éste es el material para construcción más usado en el mundo (Ceballos-Arana, 2016). Su hidratación continuará mientras existan las condiciones favorables de temperatura y humedad; a medida que ésta continúe, el concreto se volverá más duro y resistente. Los materiales utilizados en su producción pueden poseer cantidades apropiadas de compuestos de calcio, sílice, alúmina y hierro, por lo que durante el proceso de creación es importante realizar análisis químicos a todos los materiales para garantizar su calidad (Kosmatka et al., 2004).



**Figura 2.3 El cemento Portland es un polvo fino que cuando se mezcla con el agua se convierte en un pegamento que mantiene los agregados unidos en el concreto.**

*Fuente: (Kosmatka et al., 2004).*

Los cementos Portland según la norma N·CMT·2·02·001/02 (N·CMT·2·02·001/02, 2002) pueden clasificarse de acuerdo con los materiales que los componen como:

- Tipo CPO - (cemento Portland ordinario).
- Tipo CPP - (cemento Portland puzolánico).
- Tipo CPEG - (cemento Portland con escoria granulada de alto horno).
- Tipo CPC - (cemento Portland compuesto).
- Tipo CPS - (cemento Portland con humo de sílice).

- Tipo CEG - (cemento con escoria granulada de alto horno).

Según la norma ASTM C 150, Especificaciones de Norma para el Cemento Portland, se fabrican ocho tipos de cemento de acuerdo con sus requisitos físicos y químicos para aplicaciones específicas (ASTM, 2007). De estos, el cemento Portland Tipo I es el más utilizado en concretos permeables (Torres-Flores, 2010):

- Tipo I - (normal).
- Tipo IA - (normal con aire incluido).
- Tipo II - (moderada resistencia a los sulfatos).
- Tipo IIA - (moderada resistencia a los sulfatos con aire incluido).
- Tipo III - (alta resistencia inicial).
- Tipo IIIA - (alta resistencia inicial con aire incluido).
- Tipo IV - (bajo calor de hidratación).
- Tipo V - (alta resistencia a los sulfatos).

### 2.3 Concreto permeable

El concreto permeable consiste en cemento Portland, agregado grueso, poco o ningún agregado fino, aditivos y agua (Figura 2.4). Al combinarse, estos producen un material endurecido con los poros conectados, cuyas partículas varían en tamaño de 0.08 a 0.32 pulgadas (2 a 8 mm), permitiendo que el agua pase fácilmente (ACI 522R-06, 2006). Este material presenta un contenido de vacíos que puede variar de 15% a 35%, con una resistencia a la compresión entre 28 a 280 kg/cm<sup>2</sup> (ACI 522R-06, 2006). Otra característica importante es su capacidad de drenaje (o permeabilidad), ya que puede cambiar según el tamaño del agregado y la densidad de la mezcla. Generalmente, se encuentra en un rango de 81 a 730 L/min/m<sup>2</sup> (Perez-Ramos, 2009).



**Figura 2.4** *Espécimen de concreto permeable.*

*Fuente:* (Green, 2011).

### **2.3.1 Aplicaciones**

El concreto permeable se emplea principalmente en pavimentación de superficies para uso vehicular y peatonal, donde se requiere tener áreas permeables para permitir que el agua de lluvia se infiltre libremente en el subsuelo, permitiendo la reducción o eliminación de los drenajes pluviales (Elizondo-Martínez et al., 2020). Este concreto se reconoce como una de las mejores opciones para reducir impactos ambientales en la calidad de la escorrentía superficial urbana (Ortega-Villar et al., 2019).

El concreto permeable tiene muchas aplicaciones, que incluyen (Perez-Ramos, 2009):

- Vialidades con tráfico ligero.
- Áreas de estacionamiento.
- Andadores y banquetas.
- Ciclistas.
- Patios y jardines.
- Muros estructurales que requieren peso ligero y aislamiento térmico.
- Muros y pisos con mejor absorción acústica.
- Zonas de lavado de autos.

Las áreas de oportunidad para explorar las aplicaciones de este material de construcción son diversas. Se han diseñado con recubrimientos fotocatalíticos para descontaminar la escorrentía urbana (Zhang et al., 2021). En otro estudio, se usó ceniza de fondo de carbón como sustituto parcial del cemento y se encontró una buena correlación entre la fluidez y la porosidad del material con una relación agua: cemento de 0.35 (Tan et al., 2022). También, hay trabajos que reportan la mejora en sus propiedades mecánicas incorporando fibra estructural como aditivos y recomiendan su empleo en vialidades y estacionamientos (Neduri et al., 2022). Otros autores han agregado plástico triturado y en gránulos como material adicional en la composición de la mezcla con el fin de diseñar un pavimento permeable ecológico (Vijayakumar et al., 2022).

### **2.3.2 Ventajas**

La utilidad principal del concreto permeable contra el convencional es la permeabilidad (Elizondo-Martínez et al., 2020); además, se contrae menos, posee un menor peso específico y tiene mejor aislamiento térmico que un concreto convencional (Elizondo-Martínez et al., 2020). Tiene características funcionales no estructurales como: disminución del ruido (Horoshenkov et al., 2003), mayor fricción, mejoramiento del drenaje para conducir aguas pluviales (Kriech y Osborn, 2022),

disminuye la resistencia de rodamiento contra los pavimentos flexibles y elimina la reflexión. Debido a estas características, puede emplearse como estrategia urbana para la disminución del calor, recarga de acuíferos y manejo de aguas pluviales urbanas, entre otras aplicaciones (Flores, 2010).

Posee ventajas adicionales sobre el concreto convencional como:

- Mejorar el confort térmico ambiental del cuerpo humano mediante el riego, para regular la humedad relativa (Liu et al., 2022).
- Filtrar agentes químicos que pueden contaminar las aguas subterráneas y dañar ecosistemas (Ortega-Villar et al., 2019).
- Reducir el escurrimiento de aguas pluviales (Torres et al., 2022).
- Facilitar la evaporación en zonas urbanas y, con ello, reducir el efecto de la isla de calor (Tziampou et al., 2020).
- Recuperar aguas pluviales en estacionamientos para fines de consumo no potables en edificios (Martins-Vaz et al., 2019).

### **2.3.3 Desventajas**

Aunque el concreto permeable tiene un comportamiento físico y mecánico adecuados para los usos antes descritos, también tiene limitaciones que deben considerarse al ser aplicado:

- Requiere de un mantenimiento constante por sus espacios vacíos, ya que pueden ser obstruidos por materiales finos, pigmentos o por la caída de hojas de árboles que reducen su vida útil (Xu et al., 2020).
- Tiene un desgaste mayor comparado al concreto convencional, por lo que su empleo debe ser en zonas de tránsito ligero (Kia et al., 2021).
- Aun no se ha logrado una caracterización satisfactoria, es necesario desarrollar mezclas lo bastante resistentes sin comprometer la seguridad y durabilidad a largo plazo.
- Su costo es mayor a los pavimentos comunes, por lo que restringe su elegibilidad (Kia et al., 2021).

## **2.4 Características del concreto permeable**

Sus propiedades mecánicas dependen primordialmente de su contenido de vacíos, denominado porosidad, y otros factores como su relación agua – cemento, nivel de compactación y calidad de agregado (Jimenez, 2019). Otra función esencial es su desempeño hidráulico, el cual ayuda a reducir el volumen de escorrentía producido por aguas pluviales y crea un sistema apto para el transporte (Xie et al., 2018).

Sus características físicas pueden ser clasificadas según el estado en que éste se encuentre (Perez-Ramos, 2009):

a) *Estado fresco*

- **Peso volumétrico:** Determinado mediante la norma ASTM C29, el peso volumétrico de las mezclas de concreto permeable es alrededor de 1600 a 2000 kg/m<sup>3</sup>, dependiendo de su porcentaje de vacíos.
- **Revenimiento:** La mezcla de concreto permeable en estado plástico es rígida comparada con el concreto convencional. El revenimiento, cuando es medido, generalmente varía de 0 a 1 cm, establecido de acuerdo con la norma ASTM C143.
- **Porosidad:** El contenido de huecos de aire se calcula como un porcentaje por el método gravimétrico (ASTM 138). Es dependiente de varios factores como: granulometría del agregado, contenido del material cementante, relación agua – cemento y compactación. El contenido de vacío puede oscilar entre 18 y 35%, con resistencias de compresión típicas de 2.8 a 28 MPa (ACI 522R-06, 2006).

b) *Estado endurecido*

- **Resistencia a compresión:** Es definido como la medida máxima de la resistencia a carga axial de especímenes de concreto, determinada mediante la norma ASTM C39 (2002). En el concreto permeable la resistencia a la compresión se ve deteriorada por las proporciones de la matriz y el esfuerzo de compactación en su colocación (3.5 a 28 MPa).
- **Resistencia a flexión:** Es una de las características más importantes del concreto permeable, ya que cuenta con un módulo de ruptura mayor que el concreto hidráulico ordinario. Algunos de los factores que influyen dentro de su resistencia a la flexión son: el grado de compactación, porosidad y la proporción agregado – cemento y los rangos establecidos son entre 1 y 3.8 MPa.
- **Permeabilidad:** Es la propiedad que permite la filtración de un fluido a través del concreto (Figura 2.5). En el concreto permeable su capacidad de infiltración depende de la selección de sus insumos, así como las proporciones a emplear, su preparación, colocación y curado. Los rangos aceptables son entre 0.20 y 0.54 cm/seg.
- **Absorción acústica:** La presencia de poros interconectados de tamaños considerables en el material, permite que el concreto sin finos sea efectivo en la absorción acústica.
- **Durabilidad:** Es la capacidad del concreto para resistir a la acción del medio ambiente, al ataque químico y a la abrasión, conservando sus propiedades. Existen pocos datos sobre su empleo en condiciones de congelación y deshielo.



**Figura 2.5 Prueba de permeabilidad concreto permeable**

*Fuente: (Kosmatka et al., 2004).*

## **2.5 Métodos del curado de concreto**

El curado es el proceso donde se cuida el concreto fresco después del vertido. El principio fundamental del curado es mantener las condiciones de humedad favorables con un rango de temperatura adecuado durante el proceso de hidratación del concreto. Esta etapa es importante para el desarrollo de la resistencia del concreto y en el control de los primeros cambios de volumen. Un curado realizado de manera eficaz asegura una buena hidratación, microestructura, resistencia adecuada y una buena estabilidad de volumen. Por otro lado, un proceso erróneo en el curado conduce a una inadecuada hidratación con defectos en la microestructura, resistencia insuficiente y dimensiones inestables. Descuidar el curado del concreto produce fenómenos como contracción plástica, dando como resultado una grieta temprana que proporciona iones y agentes nocivos en el cuerpo del concreto, ocasionando problemas de durabilidad (Li, 2011).

Se debe considerar la cantidad de agua a aplicar en el mezclado del concreto, al perder una cantidad excesiva de agua por la evaporación, reduciendo la cantidad de agua retenida a un nivel inferior al necesario. Los efectos secundarios son perjudiciales, deben evitarse ya sea mediante la aplicación de agua o impidiendo la evaporación (ACI-308, 2011).

La rapidez de hidratación del concreto es dependiente de la temperatura:

- Temperaturas inferiores a los 10 °C: son desfavorables para el desarrollo de la resistencia temprana.
- Temperaturas inferiores a los 5 °C: la resistencia temprana se retarda mucho.

- A 0 °C: se desarrolla muy poca resistencia.

La temperatura del concreto recién colado se ve deteriorada por factores como: la temperatura ambiente, absorción del calor del sol, la liberación del calor por hidratación del cemento, así como la temperatura inicial de los materiales. La evaporación del agua de mezclado o de curado en la superficie de concreto produce un efecto de enfriamiento que resulta benéfico, considerando que no cause daños en la resistencia final o agrietamiento por contracción plástica o por enfriamiento excesivo de la superficie. Es recomendable evitar temperaturas elevadas que la promedio del concreto, manteniendo una temperatura razonable y uniforme a través de toda la masa del concreto (ACI-308, 2011).

Los métodos de curado tienen el mismo fin, garantizar el contenido de humedad y temperatura para que se desarrollen favorablemente. Se clasifican de la siguiente manera (ACI-308, 2011):

- Continua o frecuente aplicación de agua por: anegamiento, aspersión, vapor o cubiertos de materiales saturados, con mantas de yute o algodón, alfombras, arena, aserrín, paja o heno (Figura 2.6).



**Figura 2.6 Los aspersores de césped saturan la estopa con agua y mantienen el concreto continuamente saturado. La aspersión intermitente es aceptable si no ocurre secado de la superficie del concreto**

*Fuente: (Kosmatka et al., 2004).*

- Evitando la pérdida excesiva de agua en la superficie del concreto, empleando hojas de plástico o papel impermeable, o mediante el uso de compuestos de curado formadores de membrana sobre el concreto recién curado (Figura 2.7).



**Figura 2.7** La película de polietileno es una barrera de humedad efectiva para el curado del concreto y se la puede aplicar fácilmente tanto en formas complejas como en sencillas. Para minimizar la decoloración, la película se debe mantener lo más plano posible sobre la superficie de concreto.

Fuente: (Kosmatka et al., 2004).

### 2.5.1 Curado de concreto permeable

El curado es un proceso fundamental en la elaboración de concreto permeable, ya que, al poseer una estructura porosa, ayuda a que el proceso de secado se realice de manera rápida (Perez-Ramos, 2009). Si este proceso se aplica erróneamente, puede afectar la durabilidad de la superficie un 60% dentro de los primeros 7 días. El proceso de curado comúnmente empleado, consiste en cubrir la superficie expuesta con polietileno claro de 0.15 mm o más grueso. Se debe tener en cuenta la dimensión a cubrir para no dejar espacios sin protección (Figura 2.8). No se debe recurrir a materiales tejidos, ya que no podrán retener la humedad del concreto, o componentes de curado a base de cera porque no producen resultados aceptables. Como secuencia continua se debe realizar el enrasado, compactación y curado, para evitar el secado de la superficie del concreto permeable.



**Figura 2.8** Demostración de curado con superficie de polietileno.

Fuente: (ACI 522R-06, 2006)

Después, se debe observar si el concreto perdió su brillo, y de ser así, deberá rociarse ligeramente con agua. Si se presentan condiciones adversas al clima como: alta temperatura, mucho viento o baja humedad, deberá rociarse ligeramente un retardante de evaporación en la superficie después del enrasado y antes de la compactación. El recubrimiento con hojas de polietileno debe traslaparse en todas las superficies expuestas de modo que pueda quedar fijo en el lugar; empleando varillas de refuerzo, madera o bloques para fijarlo de manera que no pueda ser levantado por el viento. Queda prohibido el empleo de tierra, arena o cualquier material granular, ya que este puede penetrar en los poros al ser removido. La superficie del concreto permeable deberá permanecer cubierta durante 7 días en caso de emplear concreto simple, y 10 días para mezclas que incorporan materiales suplementarios. Se deberá prohibir la remoción del curado y evitar el tránsito sobre el pavimento de concreto permeable (ACI 522R-06, 2006).

## **2.6 Aditivos del concreto**

Un aditivo es definido en ACI 116R (2005) y ASTM C125 como: “Un material distinto del agua, los agregados, los cementos hidráulicos y el refuerzo de fibra, utilizado como un ingrediente del concreto o del mortero y que se agrega a la mezcla inmediatamente antes o durante el mezclado” (ACI 212.3R-91, 1999). Importantes características del concreto, en estado fresco y endurecido, son modificadas ventajosamente gracias a la aplicación de los aditivos; aunque deben ser utilizados cuidadosamente teniendo en cuenta la propiedad que se quiere modificar (Metha y Monteiro, 1998).

La ASTM tiene especificaciones por separado para los tipos de aditivos, como la ASTM C 260 “Standard Specification for Air-Entraining Admixtures for Concrete”, informando acerca de los materiales propuestos a emplear como aditivos incorporadores de aire para ser agregadas al concreto. Se establecen límites en el efecto que el aditivo pueda ocasionar en el sangrado, tiempo de fraguado, resistencia a la compresión y tensión, retracción por secado y resistencia al congelamiento – descongelamiento (ASTM-C-260-06, 2006).

La ASTM C 494 “Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete”, da a conocer los límites en el tiempo de fraguado, resistencias a la compresión, flexión y retracción por secado. Separa a los distintos aditivos de acuerdo con las sustancias químicas para controlar el fraguado en (ASTM-C-494-04, 2004):

- Tipo A: reductor de aire.
- Tipo B: retardante.
- Tipo C: acelerante.
- Tipo D: reductor de agua y retardante.

- Tipo E: reductor de agua y acelerante.
- Tipo F: reductor de agua de alto rango.
- Tipo G: reductor de agua y retardante de alto rango.

En su homóloga mexicana N·CMT·2·02·004/04, solamente se añaden los siguientes aditivos químicos (N·CMT·2·02·004/04, 2004):

- Aditivos plastificantes
- Aditivos superfluidificantes y retardantes

### 2.6.1 Aditivos minerales

Los aditivos minerales son añadidos casi siempre al concreto en grandes cantidades, empleados para reducir costos, aumentar la trabajabilidad del concreto fresco, mejorar la resistencia del concreto al agrietamiento térmico, contrarrestar la expansión álcali-agregado y ataques de sulfatos (Metha y Monteiro, 1998).

La ASTM (Figura 2.9) cuenta con clasificación de este tipo de aditivos minerales, la cual se divide en tres tipos (ASTM-C618-19, 2019):

- Clase N: puzolanas naturales o calcinadas tales como las tierras diatomáceas, los horstenos opalinos y las lutitas, turbas y cenizas volcánicas o pumicita y los materiales calcinados como las arcillas y las lutitas.
- Clase F: ceniza volante generalmente producida por la quema de carbón de antracita o bituminoso.
- Clase C: ceniza volante generalmente producida por la quema de lignito o de carbón sub bituminoso (además de ser puzolánica, esta ceniza volante también es cementante).



**Figura 2.9 Ejemplos de aditivos minerales.**

Fuente: (Li, 2011).

Todos los aditivos minerales generan propiedades particulares en el concreto debido a su composición química y a las reacciones que producen al entrar en contacto con sus componentes químicos del cemento, más la reacción con el agua

(Yee-Armenta, 2018). No obstante, en este trabajo de investigación solo se mencionará el humo de sílice por sus características químicas.

El humo de sílice es un subproducto de la inducción de hornos de arco en las industrias del metal de silicio y de aleación de ferro-silicio. La disminución del cuarzo a silicio a temperaturas de hasta 2000 °C da origen a los vapores de SiO, los cuales se oxidan y condensan en la zona de baja temperatura en pequeñísimas partículas esféricas consistentes en sílice no cristalino (Metha y Monteiro, 1998). La distribución del tamaño típico del humo de sílice está proporcionado por un 20% por debajo de 0.05 µm, 70% debajo de 0.10 µm, 95% por debajo de 0.20 µm y 99% por debajo de 0.50 µm. Como la mayoría de las partículas de humo de sílice son inferiores a 100 nm, pueden ser consideradas como nanopartículas. La composición química del humo de sílice se muestra en la Tabla 2.1, y se puede observar que la sílice domina (>92%) en el material (Li, 2011).

**Tabla 2.1 Composición química típica del humo de sílice.**

<b>Composición química</b>	<b>Contenido típico por peso (%)</b>	<b>Desviación estándar</b>	<b>Mínimo (%)</b>	<b>Máximo (%)</b>
<i>SiO<sub>2</sub></i>	92.9	0.60	92.0	94.0
<i>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	0.69	0.10	0.52	0.86
<i>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	1.25	0.46	0.74	2.39
<i>CaO</i>	0.40	0.09	0.28	0.74
<i>MgO</i>	1.73	0.31	1.23	2.24
<i>K<sub>2</sub>O</i>	1.19	0.15	1.00	1.53
<i>Na<sub>2</sub>O</i>	0.43	0.03	0.37	0.49
<i>C</i>	0.88	0.19	0.01	0.03
<i>Cl</i>	0.02	0.01	0.01	0.03
<i>S</i>	0.20	-	0.10	0.30
<i>P</i>	0.07	-	0.03	0.12
<i>Otros</i>	1.18	0.26	0.79	0.73
<i>Humedad</i>	0.30	0.09	0.09	0.50

Fuente: (Li, 2011).

El humo de sílice (Tabla 2.1) puede ser suministrado de dos maneras: como polvo y en lodo (Figura 2.10). El lodo de humo de sílice se ha empleado anteriormente para evitar posibles problemas de salud, causados por la inhalación de las partículas cuando las personas trabajan con el material. Se ha aplicado desde 1980, convirtiéndose en un valioso material para el concreto de altas resistencias. El porcentaje normal de humo de sílice utilizado para reemplazar al cemento Portland es de 5 a 15% (Li, 2011).



**Figura 2.10 Polvo de humo de sílice.**

Fuente: (Kosmatka et al., 2004).

Aplicado en el concreto como una adición al cemento, el humo de sílice (Figura 2.10) actúa de dos formas principales (Lopez-Ramos, 1999)

- Como *filler*: consiguiendo una gran capacidad de adherencia entre los materiales; como resultado se presentan mayores resistencias mecánicas.
- Como puzolana: mezclándose con la cal libre genera silicatos hidratados muy similares a los producidos por el cemento Portland, por lo que disminuye la porosidad e incrementan sus resistencias físicas y químicas.

Algunos estudios realizados con humo de sílice en concreto permeable indican lo siguiente (Tabla 2.2):

**Tabla 2.2 Estudios realizados en concreto permeable empleando humo de sílice.**

<b>Material</b>	<b>Uso en el concreto permeable</b>	<b>Impacto en las propiedades del concreto permeable</b>
<i>Humo de sílice</i>	Reemplazo de cemento Portland en un 10 y 15%.	Menor resistencia a la compresión y a la tracción.

	Reemplazo de cemento Portland con 6% de humo de sílice (incluye el 20% de agregado fino).	Su fuerza a la compresión incrementó 157%.
	Reemplazo de cemento Portland con 6 – 10% de humo de sílice.	Mejor resistencia a la compresión y flexión en 90 días (superior que 30.5 y 5.10 Mpa).
	Reemplazo de cemento Portland con 10, 20 y 30% de humo de sílice.	Fuerza a la compresión reducida cuando el humo de sílice > 10%.
	Reemplazo de cemento portland con 5 y 10% de humo de sílice.	La dosis optima fue de 5% incluyendo 0.5% de súper plastificante con 0.26-0.3 relación agua-cemento.

*Fuente: (AlShareedah & Nassiri, 2020).*

## 2.7 Residuo minero (Jal)

La Norma Oficial Mexicana (NOM-141-SEMARNAT-2003, 2004), marca los lineamientos para la caracterización de los jales, especificaciones y criterios para la preparación del sitio, proyecto, construcción y operación de presas de jales. Define al jal como residuos sólidos generados en las operaciones primarias de separación y concentración de minerales (NOM-141-SEMARNAT-2003, 2004). Un jal es descrito como un desecho minero obtenido de un material rocoso que pasa por procesos de trituración, molienda y separación, con el fin de recuperar los metales o minerales. En la minería, la mayoría de material extraído de los yacimientos termina como jal, siendo el desecho minero con mayor volumen. Su disposición final se lleva a cabo generalmente en presas específicamente creadas para dicho fin, tienen una construcción semejante a las presas hidráulicas (Maldonado, 2008).

Estos residuos son producidos por la suspensión de partículas, es decir, suspensión en agua de sedimento de agregado fino. Los jales consisten, principalmente, en la eliminación de los minerales valiosos de una base de roca. Existen sólidos minerales no deseados como silicatos, óxidos, hidróxidos, carbonatos y sulfuros (Lottermoser, 2010). Sus propiedades físicas y químicas dependen considerablemente de la mineralogía del yacimiento y de los procesos fisicoquímicos empleados para extraer el producto. Entre sus diferencias se puede mencionar: la composición mineralógica y geoquímica, peso específico de las

partículas, granulometría, permeabilidad, densidad, plasticidad, consolidación, composición química del agua de poro, etc. (Lottermoser, 2010).

En la zona metropolitana de Pachuca, existen tres lugares que se vieron afectados por la acumulación de residuos mineros. Las presas de jales en Venta Prieta y El Venado en la parte sur de la ciudad; Dos Carlos, en Mineral de la Reforma; y el Estadio de fútbol Hidalgo y la Colonia Puerta de Hierro (Ortiz, 2014) (Figura 2.11). La Presa Dos Carlos, lugar de donde se recolectaron los jales empleados en este estudio se localiza en las coordenadas: 20°06' latitud norte y 98°43' longitud oeste a una altitud de 2437 m.s.n.m. Según datos de (Ortiz, 2014) la zona tiene un área de 23 ha, una altura promedio de 20 m y un volumen de 14,333,492 Ton (Figura 2.11).



**Figura 2.11** Ubicación del área de estudio, jal de Mina Dos Carlos, ciudad de Pachuca.

Los jales varían considerablemente en características físicas y mineralógicas, en relación con las características del yacimiento y proceso para la extracción del material económicamente redituable. En la composición del jal empleado en este estudio se puede observar la siguiente composición (Volpi-León, 2017):

**Tabla 2.3 Composición química promedio, Escombreras Dos Carlos**

Elemento	%	Elemento	%
SiO <sub>2</sub>	70.43	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.12
TiO <sub>2</sub>	0.53	K <sub>2</sub> O	0.08
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.32	CaO	0.69
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.80	Na <sub>2</sub> O	2.32
MnO	0.73	Ag	55 g Ag/t
MgO	0.54	Au	0.58 g Au/t

Fuente: (Volpi-León, 2017)

Se han elaborado distintas investigaciones acerca de los jales ubicados en la Ciudad de Pachuca, en relación con su posible aprovechamiento para la elaboración de materiales de construcción debido a las características físicas y químicas que presentan estos residuos mineros. En la Tabla 2.4 se muestran algunas investigaciones realizadas a los jales.

**Tabla 2.4 Investigaciones acerca de residuos mineros en la ciudad de Pachuca**

Autor	Título de la investigación	Objetivo
Hernández <i>et al.</i> (2009)	Vegetación, residuos de mina y elementos potencialmente tóxicos de un jal de Pachuca, Hidalgo, México.	Realizaron una caracterización física y química de residuos mineros del jal de la presa Dos Carlos; presentaron textura franco – arenosa, bajos niveles de materia orgánica y un pH medianamente alcalino.
Moreno, E. I. (2009)	Evaluación geoquímica de residuos mineros (jales o colas) de mineralización de tipo epitermal.	Hicieron un análisis químico y mineralógico a muestras obtenidas de los distintos jales de la ciudad de Pachuca. Se presenta el contenido de elementos como Mn, Cd, As, Cu, Bi, Ag, Sr, Ba, Ni, Co y Cr, Pb, Zn y Fe. De los elementos considerados como potencialmente tóxicos (EPTs) con concentraciones ambientalmente

		significativas, sobresale el Pb, aunque también están presentes elementos como Mn, Zn, Cu y Cd.
<i>Lizárraga-Mendiola, et al. (2018)</i>	Empleo de jal como cementante en la elaboración de un concreto.	Analizaron el empleo los residuos mineros como sustituto del agregado fino en un 25% y el cementante en un 20% para la elaboración de un concreto permeable destinado en un pavimento de tránsito ligero.

## **Capítulo 3. METODOLOGÍA**

En este apartado se explica el procedimiento que se llevó a cabo para la elaboración de especímenes de concreto, utilizando residuo minero como sustituto de cemento en proporciones de 0%, 5%, 10% y 15%. Se realizaron un total de 12 especímenes cilíndricos de concreto de 15 cm de diámetro por 30 cm de alto, de acuerdo con la norma ASTM C31 “Preparación y Curado de Especímenes de Ensayo de Concreto en la Obra” (ASTM C31, 2007). Se elaboraron 3 cilindros de concreto para cada proporción propuesta, sustituyendo el material cementante por el residuo minero.

### 3.1 Criterios para el diseño de una mezcla de concreto permeable

El comité ACI (American Concrete Institute, por sus siglas en inglés) (ACI 522-10, 2006) brinda un método para obtener las proporciones del concreto, estableciendo variables importantes que pueden afectar las propiedades mecánicas como: relación agua/cemento y el porcentaje de vacíos. La siguiente Tabla 3.1 proporciona los rangos típicos de los materiales en concreto permeables, estos son los valores de referencia.

**Tabla 3.1 Rangos típicos de proporciones de materiales de concreto permeable**

<b>Parámetro</b>	<b>Rango</b>
<i>Materiales cementantes (kg/m<sup>3</sup>)</i>	270 a 415
<i>Agregado (kg/m<sup>3</sup>)</i>	1190 a 1480
<i>Relación agua - cemento (en peso)</i>	0.26 a 0.45
<i>Relación agregado - cemento (en peso)</i>	4 a 4.5:1
<i>Relación agregado fino - agregado grueso (en peso)</i>	0 a 1:1

Fuente: (ACI 522R-06, 2006)

### 3.2 Diseño de mezcla

Se diseñó un concreto permeable empleando cemento Portland Ordinario Tipo I (ASTM C150-07), relación agua/cemento de 0.40 (ASTM C94), agregados gruesos 1/2”, 3/8”, y no.4 (ASTM 88), y una relación agregado grueso/cemento de 3.8. Después de elaborar la mezcla, las probetas se llenaron de concreto fresco en dos capas, proporcionando veinte golpes por capa (Tablas 3.2-3.5). El proceso de curado (28 días) se siguió de acuerdo con la norma ASTM C31.

**Tabla 3.2 Dosificaciones de materiales para la elaboración de la mezcla de concreto con 0% de jal por metro cúbico.**

<b>Relación agua - cemento</b>	<b>Agua (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Agregado grueso (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Cemento (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Jal (kg/m<sup>3</sup>)</b>
0.4	109.89	1000	247.25	0

**Tabla 3.3 Dosificaciones de materiales para la elaboración de la mezcla de concreto con 5% de jal por metro cúbico.**

<b>Relación agua - cemento</b>	<b>Agua (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Agregado grueso (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Cemento (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Jal (kg/m<sup>3</sup>)</b>
0.4	109.89	1000	260.98	13.74

**Tabla 3.4 Dosificaciones de materiales para la elaboración de la mezcla de concreto con 10% de jal por metro cúbico.**

<b>Relación agua - cemento</b>	<b>Agua (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Agregado grueso (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Cemento (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Jal (kg/m<sup>3</sup>)</b>
0.4	109.89	1000	247.25	27.47

**Tabla 3.5 Dosificaciones de materiales para la elaboración de la mezcla de concreto con 15% de jal por metro cúbico.**

<b>Relación agua - cemento</b>	<b>Agua (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Agregado grueso (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Cemento (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Jal (kg/m<sup>3</sup>)</b>
0.4	109.89	1000	233.51	41.21

### **3.2.1 Peso volumétrico de los materiales**

De acuerdo con la norma ASTM C150 – 07 “Especificación Normalizada para Cemento Portland”, se determinó el tamaño de los agregados, siendo para el agregado grueso de 12.5 - 10mm y el residuo minero 0.2 - 0.075 mm. Considerando el volumen del cilindro (0.0053 m<sup>3</sup>) y un porcentaje de desperdicio propuesto de 15%, se tiene un volumen total de 0.00609 m<sup>3</sup>. Posteriormente, se calculó el peso por cada material utilizando una báscula digital (Tablas 3.6 a 3.9).

**Tabla 3.6 Dosificaciones de materiales para la elaboración de la mezcla de concreto con 0% de jal por cilindro.**

<b>Relación agua - cemento</b>	<b>Agua (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Agregado grueso (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Cemento (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Jal (kg/m<sup>3</sup>)</b>
0.4	0.6699	6.0967	1.6749	0

**Tabla 3.7 Dosificaciones de materiales para la elaboración de la mezcla de concreto con 5% de jal por cilindro.**

<b>Relación agua - cemento</b>	<b>Agua (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Agregado grueso (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Cemento (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Jal (kg/m<sup>3</sup>)</b>
0.4	0.6699	6.0967	1.5911	0.0838

**Tabla 3.8 Dosificaciones de materiales para la elaboración de la mezcla de concreto con 10% de jal por cilindro.**

<b>Relación agua - cemento</b>	<b>Agua (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Agregado grueso (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Cemento (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Jal (kg/m<sup>3</sup>)</b>
0.4	0.6699	6.0967	1.5074	0.1675

**Tabla 3.9 Dosificaciones de materiales para la elaboración de la mezcla de concreto con 15% de jal por cilindro.**

<b>Relación agua - cemento</b>	<b>Agua (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Agregado grueso (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Cemento (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Jal (kg/m<sup>3</sup>)</b>
0.4	0.6699	6.0967	1.4236	0.2512

### **3.2.2 Módulo de finura**

De acuerdo con la norma ASTM C136 “Análisis de tamaño de partículas por tamizado de agregados fino y grueso y determinación de material más fino que el tamiz no. 200 (75 µm) en agregado mineral por lavado”, se realizó el tamizado del agregado y residuo minero (Figura 3.1), por medio de una tamizadora mecánica durante 10 minutos, para obtener el material retenido del tamaño de partícula deseado.



**Figura 3.1** Proceso de tamizado por medios mecánicos de residuo minero

### **3.3 Elaboración de especímenes**

En la elaboración de los especímenes de concreto, primero se tamizó el residuo minero para obtener las cantidades calculadas en las dosificaciones (Tablas 3.6 a 3.9). Se empleó el tamiz de malla No. 200 (0.075 mm), para sustituirlo por el material cementante. Se pesaron todos los materiales que serían utilizados para realizar la mezcla, de acuerdo con las cantidades necesarias, con relación al volumen del cilindro de dimensiones de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura (Figura 3.2).



**Figura 3.2** Molde para cilindros

Debido a la suciedad del agregado grueso (Figura 3.3), se lavó y secó en horno por medio día.



***Figura 3.3 Agregado grueso***

Posteriormente, se mezclaron los materiales en seco para colocarlos después en la revolvedora y agregar agua, logrando una mezcla homogénea (Figura 3.4).



***Figura 3.4 Mezcla de materiales en revolvedora***

Se colocó desmoldante en las paredes del molde cilindro, para después verter la mezcla a un tercio de este e introducir la varilla punta de bala por 10 veces para eliminar el aire contenido dentro de la mezcla (Figura 3.5).



*Figura 3.5 Izquierda – Aplicación de desmoldante en cilindro metálico  
Derecha – Eliminación de aire contenido en la mezcla*

### **3.4 Curado de cilindros de concreto permeable**

El curado en el concreto permeable es un proceso que requiere mayor atención y cuidado, ya que el secado puede ocurrir rápidamente; el procedimiento aplicado normalmente es cubrir la superficie expuesta con un material de polietileno claro de 0.15 mm o más grueso, al ser empleado para cubrir el ancho completo de un carril a lo largo de una distancia razonable (Perez-Ramos, 2009).

En este trabajo se empleó el método convencional para el curado de especímenes, el cual consiste en desmoldar los cilindros 24 horas después de su elaboración (Figura 3.6), para después introducirlos en un bote con agua a temperatura ambiente y así lograr una temperatura y un contenido de humedad promedio durante los 28 días después de su elaboración (Lizárraga-Mendiola et al., 2018).



***Figura 3.6 Izquierda – Desmolde de cilindro de concreto permeable.  
Derecha – Cilindro de concreto permeable.***

Este proceso de igual manera denominado como método de inmersión, sustituyó los botes con agua empleando una tina, dejando un tirante de 5 cm desde la superficie de los cilindros de concreto hasta la superficie libre de agua (Figura 3.7).



***Figura 3.7 Proceso de curado por inmersión – Cilindros de concreto permeable***

### 3.5 Resistencia a la compresión

Este procedimiento se realizó una vez terminado el periodo de curado, tomando en cuenta que debe ser efectuado después de retirar los cilindros de su almacenamiento; para prevenir la pérdida excesiva de humedad. El ensaye se realizó con una Máquina Universal Marca Controls; se limpiaron las superficies que tendrán contacto entre las placas (superior e inferior) y los especímenes de concreto permeable, colocándolos sobre la placa inferior alineados cuidadosamente con el centro de la placa; mientras que la placa superior se baja al cilindro asegurándose que se tenga un contacto uniforme.

#### 3.5.1 Informe de la prueba

En las siguientes Tablas 3.10-3.13, se muestran los datos de la prueba de resistencia a compresión de los especímenes empleando los distintos porcentajes de jal:

**Tabla 3.10 Resultados de la prueba de compresión de cilindros con 0% jal**

<b>Clave de identificación</b>	<b>Edad nominal del espécimen (días)</b>	<b>Masa del espécimen (kg)</b>	<b>Resistencia a la compresión (kgf/cm<sup>2</sup>)</b>
<i>E1CC%0</i>	28	8.49	59.06
<i>E2CC%0</i>	28	8.67	82.09
<i>E3CC%0</i>	28	8.84	83.78

*E: espécimen 1: Número de espécimen CC: Curado convencional  
%0: Sin sustitución de cemento*

**Tabla 3.11 Resultados de la prueba de compresión de cilindros con 5% jal**

<b>Clave de identificación</b>	<b>Edad nominal del espécimen (días)</b>	<b>Masa del espécimen (kg)</b>	<b>Resistencia a la compresión (kgf/cm<sup>2</sup>)</b>
<i>E4CC%5</i>	28	9.08	88.65
<i>E5CC%5</i>	28	9.01	88.72
<i>E6CC%5</i>	28	9.04	85.67

*E: espécimen 1: Número de espécimen CC: Curado convencional  
%5: Sustitución de cemento por un 5% de jal*

**Tabla 3.12 Resultados de la prueba de compresión de cilindros con 10% jal**

<b>Clave de identificación</b>	<b>Edad nominal del espécimen (días)</b>	<b>Masa del espécimen (kg)</b>	<b>Resistencia a la compresión (kgf/cm<sup>2</sup>)</b>
<i>E7CC%C10</i>	28	8.81	70.32
<i>E8CC%C10</i>	28	9.1	86.73
<i>E9CC%C10</i>	28	8.75	81.34

*E: espécimen 1: Número de espécimen CC: Curado convencional  
%C10: Sustitución de cemento por un 10% de jal*

**Tabla 3.13 Resultados de la prueba de compresión de cilindros con 15% jal**

<b>Clave de identificación</b>	<b>Edad nominal del espécimen (días)</b>	<b>Masa del espécimen (kg)</b>	<b>Resistencia a la compresión (kgf/cm<sup>2</sup>)</b>
<i>E10CC%C15</i>	28	8.9	66.90
<i>E11CC%C15</i>	28	8.93	69.26
<i>E12CC%C15</i>	28	8.76	68.73

*E: espécimen 1: Número de espécimen CC: Curado convencional  
%C15: Sustitución de cemento por un 15% de jal*

### **3.6 Prueba de permeabilidad**

La prueba de permeabilidad determina la tasa de filtración que se tiene en el concreto permeable, realizada según los parámetros descritos en la Norma ASTM C1701. Consiste en recubrir el espécimen con una capa de plástico muy delgada, que no permita el escurrimiento por sus lados (Figura 3.8). Se colocan en la parte superior de una cubeta dos varillas que sirvan como base para el espécimen, y se vertieron 5 litros de agua. Mientras esto ocurría se cronometró el tiempo desde que el agua toca la superficie del concreto permeable hasta que este deje de filtrar.



**Figura 3.8 Prueba de permeabilidad en cada cilindro**

### **3.6.1 Informe de la prueba**

Una vez cronometrado el tiempo se realizaron los cálculos de gasto (l/s), según la Norma ASTM C1701, como se observa en las siguientes tablas (Tablas 3.14-3.17).

**Tabla 3.14 Resultados de pruebas de permeabilidad en cilindros con 0% jal**

<b>Permeabilidad - Cilindros con 0% jal</b>		
<b>No. de pruebas</b>	<b>Tiempo (s)</b>	<b>Gasto (l/s)</b>
<b>1</b>	163.8	0.0305
<b>2</b>	179.4	0.0279
<b>3</b>	165.6	0.0302
<b>4</b>	159	0.0314
<b>5</b>	176.4	0.0283

**Tabla 3.15 Resultados de pruebas de permeabilidad en cilindros con 5% jal**

<b>Permeabilidad - Cilindros con 5% jal</b>		
<b>No. de pruebas</b>	<b>Tiempo (s)</b>	<b>Gasto (l/s)</b>
<b>1</b>	148.8	0.0336
<b>2</b>	151.8	0.0329
<b>3</b>	169.8	0.0294
<b>4</b>	153	0.0327
<b>5</b>	144.6	0.0346

**Tabla 3.16 Resultados de pruebas de Permeabilidad en cilindros con 10% jal**

<b>Permeabilidad - Cilindros con 10% jal</b>		
<b>No. de pruebas</b>	<b>Tiempo (s)</b>	<b>Gasto (l/s)</b>
<b>1</b>	133.8	0.0374
<b>2</b>	141	0.0355
<b>3</b>	131.4	0.0381
<b>4</b>	139.8	0.0358

5	145.2	0.0344
---	-------	--------

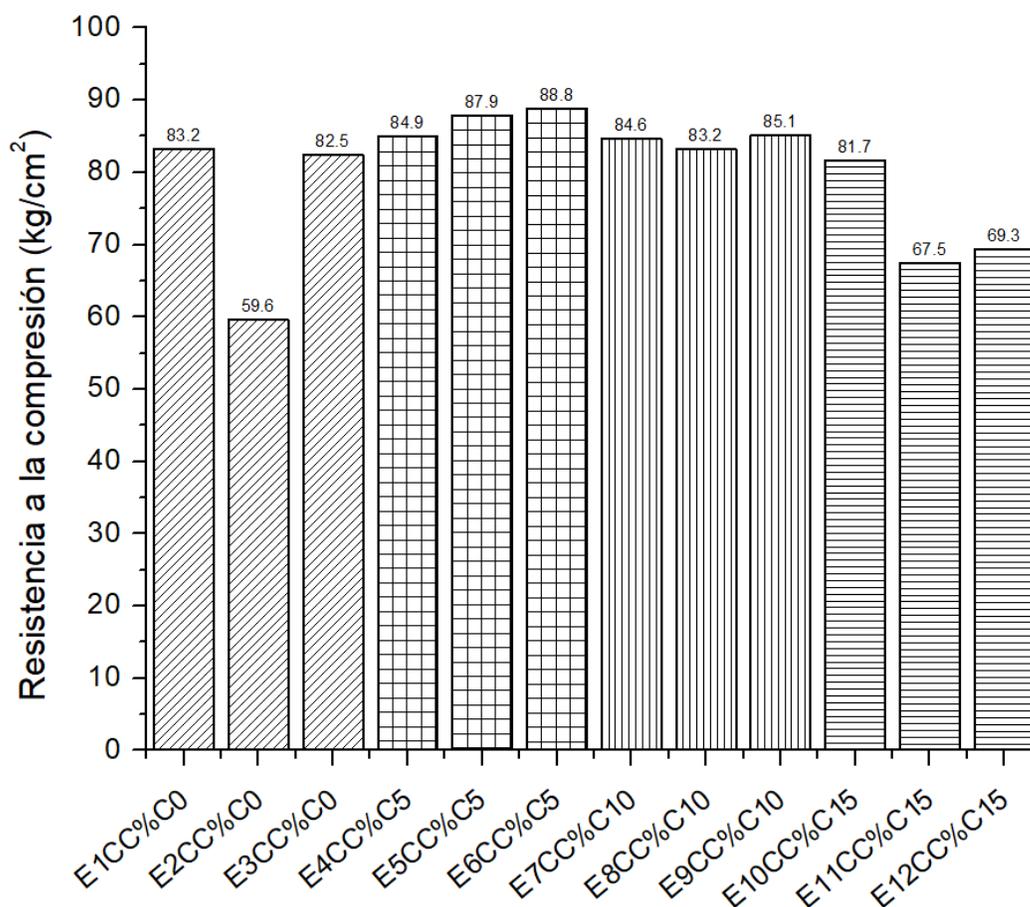
**Tabla 3.17 Resultados de pruebas de permeabilidad en cilindros con 15% jal**

<b>Permeabilidad - Cilindros con 15% jal</b>		
<b>No. de pruebas</b>	<b>Tiempo (s)</b>	<b>Gasto (l/s)</b>
1	129.6	0.0386
2	131.4	0.0381
3	132.6	0.0377
4	129	0.0388
5	137.4	0.0364

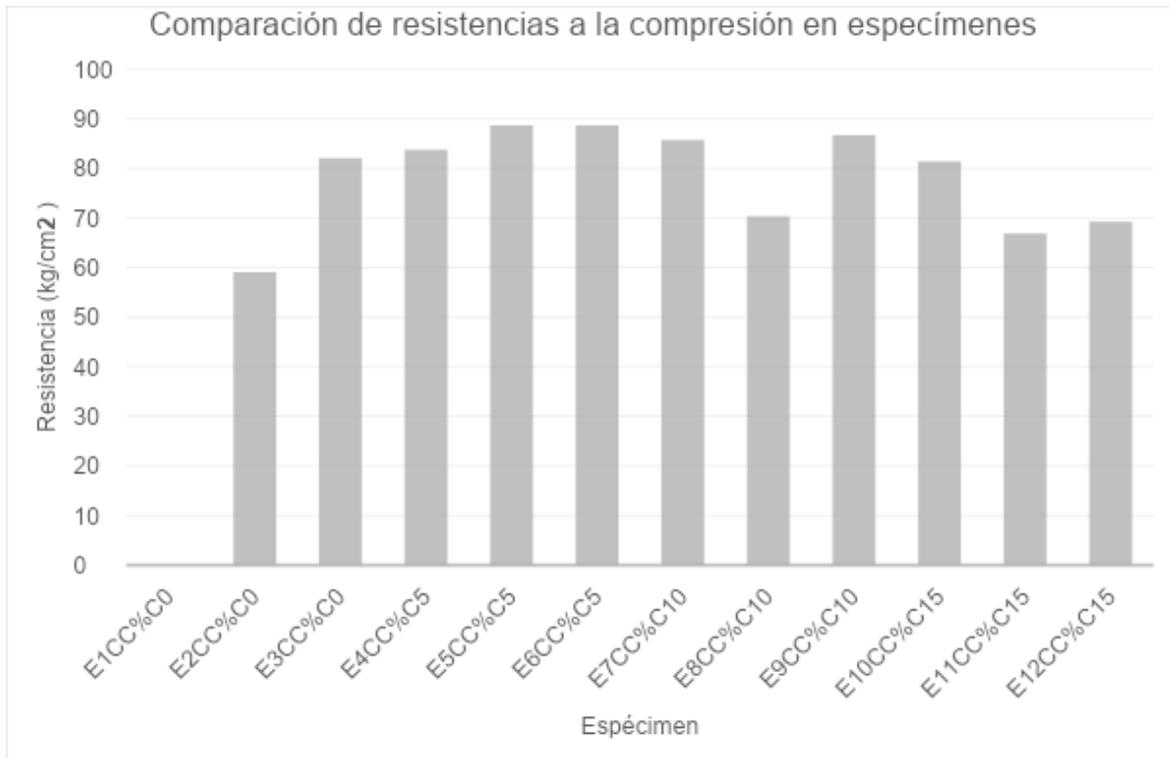
## **4. RESULTADOS**

#### 4.1 Resultados de la resistencia a la compresión

Las pruebas de resistencia a la compresión se realizaron con una prensa de cilindros de concreto marca Controls, modelo 50-C43C04, la determinación de la resistencia a la compresión de todos los especímenes de concreto permeable se realizó de acuerdo con la norma ASTM C39 (2002). Por cada mezcla de concreto se ensayaron tres especímenes. Este método de ensayo consiste en la aplicación de una carga de compresión uniaxial los cilindros moldeados o núcleos a una velocidad de carga especificada ( $0.25 \pm 0.05$  MPa/s). La resistencia a la compresión del espécimen se calculó dividiendo la carga máxima obtenida durante el ensayo entre el área de la sección transversal del espécimen (ASTM C39, 2002). La Figura 4.1 muestra la comparación de la resistencia a la compresión de los especímenes de concreto permeable con 0, 5, 10 y 15% de jal en sustitución del cemento.



**Figura 4.1. Resistencia a la compresión de los especímenes de concreto permeable elaborados con jal como cementante.**



**Figura 4.2 Prueba de permeabilidad en cada cilindro**

De acuerdo con los resultados de los ensayos promedio realizados para los distintos sistemas en estudio, se pudo observar que la adición de jal como cementante en el concreto permeable no redujo sustancialmente la resistencia a la compresión (Tabla 4.1), debido a que la mezcla patrón alcanzó solo un 75% de la resistencia esperada en base al diseño de mezcla propuesto para (100 kg/cm<sup>2</sup>), se observa que hasta un 10% de jal como sustituto de cemento no disminuye la resistencia a la compresión al compararlo con el sistema libre de jal como cementante a los 28 días de edad, para cada uno de los sistemas.

**Tabla 4.1 Parámetros de Resistencia a la Compresión.**

<b><i>Especimen de concreto permeable adicionado con jal como cementante.</i></b>	<b><i>f'c promedio (kg/cm<sup>2</sup>) con edad de 28 días</i></b>
<b>0%</b>	75.1

<b>5%</b>	87.2
<b>10%</b>	84.3
<b>15%</b>	72.8

## 4.2 Resultados de la prueba de permeabilidad.

Una de las características más importantes del concreto permeable es su capacidad para filtrar el agua a través de la matriz. Esta capacidad se conoce también como permeabilidad y se mide en l/min/m<sup>2</sup> (Tabla 4.2).

**Tabla 4.2 Prueba de Permeabilidad Promedio**

Jal	Tiempo	Gasto
(%)	(s)	(l/min/m <sup>2</sup> )
0	2.81	88.967
5	2.56	97.656
10	2.3	108.695
15	2.76	90.579

La permeabilidad en cada mezcla ensayada en este análisis varió. En las muestras con 10% de residuo minero se obtuvo mayor permeabilidad y las de 0% obtuvieron menor permeabilidad. A pesar de esta variación entre los distintos porcentajes de sustitución del jal, los tres resultados (5, 10 y 15%) están dentro de los parámetros esperados (entre 81 a 730 l/min/m<sup>2</sup>) especificados en la norma ACI 522-R (Bravo-Callao, 2021). Estos valores indican que, con la adición del jal como sustituto parcial del cemento, la permeabilidad promedio aumentó 1.8, 2.1 y 9.7%, respectivamente para cada uno de los sistemas en estudio. Los resultados obtenidos en el presente estudio se encuentran dentro del rango anteriormente descrito, por lo cual, se puede afirmar que las muestras de concreto cumplen con los requerimientos de permeabilidad, ya que se observa como el agua fluye rápidamente a través de la matriz (Flores, 2010).

## **5. CONCLUSIONES**

## 5.1 Conclusiones

El concreto permeable, como ya se ha dicho en capítulos anteriores, está formado por cemento, grava, poco o nada de arena, y agua. Es importante señalar, que cuando se utilicen finos en las mezclas, no se deben abusar de ellos, ya que ocasionaría el taponamiento de los poros interconectados en la estructura del concreto.

Los resultados de los estudios realizados a las mezclas de concreto permeables diseñadas con 5% y 10% elaboradas con residuos mineros, permiten concluir que si cumplen con las propiedades mecánicas y de permeabilidad adecuadas para su utilización en pavimentos con tránsito ligero u otras aplicaciones.

Las mezclas con 15% de residuos mineros con un promedio de 68.3 kg/cm<sup>2</sup> en resistencia a compresión, y un promedio de permeabilidad de 90.57 l/min/m<sup>2</sup> se encuentran aún dentro del límite permitido por la normativa; tomando en cuenta que tuvo los valores más bajos de resistencia a la compresión.

La mezcla de concreto permeable se obtuvo utilizando una razón a/c de 0.40, utilizando agregado de 3/8", relación agregado grueso/cemento de 3.8 y sustituyendo el cemento con 5, 10 y 15%. Esta dosificación permite obtener resistencias a la compresión en promedio cercanas a 100 kg/cm<sup>2</sup>.

El curado fue fundamental para obtener un concreto permeable con las condiciones deseadas. Un proceso erróneo de curado en los primeros 7 días puede reducir la durabilidad en un 60% y no producir juntas transversales.

Se necesita una mayor investigación para mejorar la resistencia y durabilidad del concreto permeable para soportar cargas de vehículos pesados y poder obtener resistencias cercanas a las del concreto convencional, lo cual mejoraría su uso en un amplio rango de aplicaciones, además es recomendable emplear aditivos reductores de agua que mantendrán la proporción adecuada de agua-cemento y se obtendrá una mezcla de fácil aplicación.

Como la mayoría de materiales especiales, el concreto permeable tiene muchas ventajas tecnológicas, sin embargo, para impulsar su uso es necesario continuar con investigaciones futuras, con el fin de ampliar sus aplicaciones y no ser limitadas solamente a áreas de estacionamientos de zonas comerciales o urbanas, zonas de tránsito ligero o sólo en caminos peatonales. El futuro del concreto permeable dependerá en gran medida de las investigaciones de laboratorio utilizando nuevos materiales y nuevas tecnologías, de la capacitación en el empleo de este concreto

y en el impulso, seguimiento y desarrollo de normativas de diseño y especificación existentes.

## Referencias

1. Admixtures for Concrete, ACI-212-3R. (1999). In American Concrete Institute.
2. Permeable Concrete, ACI-522R-06. (2006). In American Concrete Institute.
3. Concrete, ACI-116R. (2005). In American Concrete Institute.
4. Guide to curing concrete, ACI-308. (2011). In American Concrete Institute.
5. AlShareedah, O., y Nassiri, S. (2020). Pervious concrete mixture optimization, physical, and mechanical properties and pavement design: A review. *Journal of Cleaner Production*, 288, 125095.
6. ASTM, I. (2007). Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials. ASTM D790-07.
7. ASTM, P. C29/C29M-17a. 2017.". Standard Test Method for Bulk Density (Unit.
8. ASTM, C. (2003). 125 Standard terminology relating to concrete and concrete aggregates. *Annual Book of ASTM Standards*, 4, 23.
9. ASTM C1701. (2003). Standard Test Method for Infiltration Rate of In Place Pervious Concrete, *Annual Book of ASTM Standards*, ASTM International, West Conshohocken, PA.
10. ASTM, C. C31M (2003) Standard practice for making and curing concrete test specimens in the field. West Conshohocken, PA.
11. ASTM, C. (2001). 138. Standard test method for unit weight, yield, and air content.
12. ASTM. (2007). Standard Specification for Portland Cement, ASTM Standard C150-07. West Conshohocken, AL, USA: American Society for Testing and Materials.
13. ASTM, C. (2005). 39/C 39M Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. *Annual book of ASTM standards*, 4.
14. ASTM C 136. (1995). Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates, ASTM C 136-95a. *Annual Book of ASTM Standards*.
15. ASTM. (2010). Standard specification for air-entraining admixtures for concrete. ASTM C 260.
16. ASTM, C. (2004). 494. Standard Specification for Chemical Admixture for Concrete.
17. ASTM International. (2019). ASTM C94/C94M-19a. Standard Specification for Ready-Mixed Concrete.
18. ASTM, A. B. (1999). 88, Especificación estandarizada para tubos de cobre sin costura para agua. In American Society of Testing and Materials.
19. ASTM C618-12a. (2010). Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use. In ASTM.

20. ASTM C143 (2008) Método estándar para la prueba de revenimiento en el concreto de cemento portland
21. ASTM C125 (2013) Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates
22. Bravo Callao, I. L. (2021). Evaluación de las propiedades físicas del concreto poroso para pavimento rígido elaborado con aditivo en Jaén, 2021.
23. Carrera Saavedra, C. E., y Lino Solano, J. L. (2021). Efectos de la ceniza volcánica en la resistencia a la compresión y en el coeficiente de permeabilidad del concreto permeable  $f'c$  210 kg/cm<sup>2</sup>, Lima 2021.
24. Arana, M. A. (2016). El concreto, material fundamental para la infraestructura. *Voz del Experto*, 24-25.
25. Yam, J. L. C., Carcaño, R. S., & Moreno, É. I. (2003). Influencia de los agregados pétreos en las características del concreto. *Ingeniería*, 7(2), 39-46.
26. Li, L., Chan, P., Zollinger, D. G., & Lytton, R. L. (1993). Quantitative analysis of aggregate shape based on fractals. *Materials Journal*, 90(4), 357-365.
27. Concreto Permeable Ecológico Ecocreto – Hidrocreto (2018) Sistema para infiltrar o recuperar el agua pluvial por medio de pisos y pavimentos porosos. Obtenido: <https://docplayer.es/60017949-Concreto-permeable-ecologico-ecocreto-hidrocreto.html>
28. Chinchón-Payá, S., Andrade, C., & Chinchón, S. (2016). Indicator of carbonation front in concrete as substitute to phenolphthalein. *Cement and Concrete Research*, 82, 87-91.
29. Cruz-Palafox, C., Segovia-López, A., González-Sandoval, M., Lizárraga-Mendiola, L., Olguín-Coca, F. J., y Rangel-Martínez, Y. (2014). UAEH. Obtenido de [https://www.uaeh.edu.mx/investigacion/productos/6287/disenio\\_de\\_un\\_concreto\\_permeable\\_para\\_la\\_recuperacion\\_de\\_agua.pdf](https://www.uaeh.edu.mx/investigacion/productos/6287/disenio_de_un_concreto_permeable_para_la_recuperacion_de_agua.pdf)
30. Drake, J. A., Bradford, A., & Marsalek, J. (2013). Review of environmental performance of permeable pavement systems: State of the knowledge. *Water Quality Research Journal of Canada*, 48(3), 203-222.
31. Martínez, E. J. E. (2020). Estudio de superficies urbanas multifuncionales de hormigón poroso (Doctoral dissertation, Universidad de Cantabria).
32. Fassman, E. A., & Blackbourn, S. (2010). Urban runoff mitigation by a permeable pavement system over impermeable soils. *Journal of hydrologic engineering*, 15(6), 475-485.
33. Arrieta, R. F., & Carro, A. N. (2011). Diseño de mezclas para evaluar su resistencia a la compresión uniaxial y su permeabilidad. *Infraestructura vial*, (24), 40-49.
34. Flores Prieto, J. R. (2010). Caracterización del concreto permeable usando el módulo de ruptura y el porcentaje de desgaste.

35. Garcia, N. (2020). Pachuca con el aire más contaminado del País. Acropolis.
36. Ghafoori, N., & Dutta, S. (1995). Development of no-fines concrete pavement applications. *Journal of transportation engineering*, 121(3), 283-288.
37. Green, R. (2011). Pervious concrete... past, present and future. *Concrete Magazine*, 18-20.
38. Guevara Coronel, E. (2020). Diseño de concreto permeable utilizando bagazo de caña para mejorar el proceso de infiltración de las aguas pluviales, Tarapoto. 2020.
39. Hernández-Acosta, E., Mondragón-Romero, E., Cristobal-Acevedo, D., Rubiños-Panta, J. E., & Robledo-Santoyo, E. (2009). Vegetation, mining tailings and potentially toxic elements of a jal from Pachuca, Hidalgo, México. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 15(2), 109-114. Hernández, E., Mondragon, E., Acevedo, D., y Robledo, E. (2009). Vegetation, mining tailings and potentially toxic elements of a jal from Pachuca, Hidalgo, México.
40. Horoshenkov, K. V., Hughes, D. C., & Cwirzen, A. (2003). The sound speed and attenuation in loose and consolidated granular formulations of high alumina cements. *Applied Acoustics*, 64(2), 197-212.
41. Ortiz Nadal, E. (2014). ITESM Obtenido de <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgiraDocs/documentos/hgo/estudios/2014/13HI2014M0011.pdf>
42. Jimenez Pesantes, H. J. (2019). Evaluación del concreto permeable como una alternativa sostenible para el control de las aguas pluviales en la ciudad de Castilla, provincia Piura y departamento de Piura.
43. Kia, A., Delens, J. M., Wong, H. S., & Cheeseman, C. R. (2021). Structural and hydrological design of permeable concrete pavements. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00564.
44. Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., Panarese, W. C., & Tanesi, J. (2004). *Diseño y Control de Mezclas de Concreto*, Portland Cement Association, Skokie, Illinois. EE. UU.
45. Kriech, A. J., & Osborn, L. V. (2022). Review of the impact of stormwater and leaching from pavements on the environment. *Journal of Environmental Management*, 319, 115687.
46. Li, Z. (2011). *Advanced Concrete Technology*; Hoboken John Wiley & Sons. Inc.: Hoboken, NJ, USA.
47. Liu, Y., Ma, H., Zhang, C., & Luo, X. (2022). Watering on porous pavement for improvement of environmental human thermal comfort in an ecological community in arid area: A case study in Lanzhou, China. *Sustainable Cities and Society*, 85, 104081.
48. Lizárraga-Mendiola, L., Bigurra-Alzati, C. A., Paz-Casas, D. F., Montiel-Palma, S., González-Sandoval, M. R., López-León, L. D. y Lagarda-García,

- F. O. (2017). Empleo de jal como cementante en la elaboración de un concreto permeable. *Tópicos de Investigación en Ciencias de la Tierra y Materiales*, 4, 92-101.
49. López Guzmán, A. (1999). *Uso del humo de sílice y aditivos reductores de agua de alto rango (superplastificantes) en el concreto (Doctoral dissertation)*.
  50. Lottermoser, B., & Lottermoser, B. G. (2010). *Sulfidic mine wastes. Mine wastes: Characterization, treatment and environmental impacts*, 43-117.
  51. Maldonado Villanueva, R. (2015). *Caracterización mineralógica de fases minerales metálicas contenidas en muestras de jales del distrito minero El Oro-Tlalpujahuá*.
  52. Vaz, I. C. M., Ghisi, E., & Thives, L. P. (2020). Life cycle energy assessment and economic feasibility of stormwater harvested from pervious pavements. *Water Research*, 170, 115322.
  53. Mehta, P. K., & Monteiro, P. (1998). *Concreto: estructura, propiedades y materiales*. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto.
  54. Montoya, J. (2016). *Polvaredas de residuos tóxicos en Pachuca*. Jornada.
  55. Moreno, E. I. (2006). Determinación del pH de la solución de los poros de concreto después de un proceso acelerado de carbonatación. *Ingeniería*, 10(3), 5-12.
  56. Moss, J. K. (1979). *No-fines building gives energy-conserving homes*. *International Construction*, Surrey.
  57. N·CMT·2·02·001/02. (2002). *CMT. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES*. Calidad del Cemento Pórtland. México.
  58. N·CMT·2·02·002/19. (2019). *Calidad de Agregados Pétreos para Concreto Hidráulico*. México.
  59. N·CMT·2·02·004/04. (2004). *Calidad de Aditivos Químicos para Concreto Hidráulico*. México.
  60. N·CMT·2·02·005/04. (2004). *Calidad del Concreto Hidráulico*. México.
  61. Neduri, P., Golla, S. Y., Sahithi, G., Bojjam, S., & Mamidala, S. (2022). Experimental study on partial replacement of structural fiber in porous pavements. *Materials Today: Proceedings*, 68, 1476-1480.
  62. *Diario Oficial de la Federación, Norma Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003, que establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y post operación de presas de jales (en línea): México, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, publicado el 13 de Septiembre de 2004. 2004..*
  63. *Normas Técnicas Complementarias; CONCRETO, Construcción de Estructuras. Departamento del Distrito Federal. 2004..*

64. Oggu, A., & Madupu, L. S. (2022). Study on properties of porous concrete incorporating aloevera and marble waste powder as a partial cement replacement. *Materials Today: Proceedings*, 52, 1946-1951.
65. Ortega-Villar, R., Lizárraga-Mendiola, L., Coronel-Olivares, C., López-León, L. D., Bigurra-Alzati, C. A., y Vázquez-Rodríguez, G. A. (2019). Effect of photocatalytic Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles on urban runoff pollutant removal by permeable concrete. *Journal of environmental management*, 242, 487-495.
66. Pasquel, E. (1998). *Tópicos de tecnología del concreto en el Perú*. Lima: Colegio de ingenieros del Perú.
67. Patiño, O. (2013). El concreto permeable: uso y estándares. *Mente & Materia*, 4(1), 22-23.
68. Pérez Ramos, D. (2009). Estudio experimental de concretos permeables con agregados andesíticos.
69. Puertas, F., Alonso, M. M., & Palacios, M. (2020). Construcción sostenible. El papel de los materiales..
70. Solano-Cerdas, C. (2009). Análisis de la flexo tracción del concreto permeable.
71. Suriya, S., & Mudgal, B. V. (2012). Impact of urbanization on flooding: The Thirusoolam sub watershed—A case study. *Journal of hydrology*, 412, 210-219.
72. Tan, Y., He, Y., Cui, X., & Liu, L. (2022). Design and performance optimization of alkali-activated waste coal bottom ash/slag porous concrete. *Construction and Building Materials*, 359, 129413.
73. Teymouri, E., Mousavi, S. F., Karami, H., Farzin, S., & Kheirabad, M. H. (2020). Municipal Wastewater pretreatment using porous concrete containing fine-grained mineral adsorbents. *Journal of Water Process Engineering*, 36, 101346.
74. Teymouri, E., Mousavi, S. F., Karami, H., Farzin, S., & Kheirabad, M. H. (2020). Municipal Wastewater pretreatment using porous concrete containing fine-grained mineral adsorbents. *Journal of Water Process Engineering*, 36, 101346.
75. Torres, E. (2010). *Tecnología del concreto permeable o ecológico en la construcción*. México, México.
76. Torres, M. N., Rabideau, A., Ghodsi, S. H., Zhu, Z., & Matott, L. S. (2022). Spatial design strategies and performance of porous pavements for reducing combined sewer overflows. *Journal of Hydrology*, 607, 127465.
77. Tziampou, N., Coupe, S. J., Sañudo-Fontaneda, L. A., Newman, A. P., & Castro-Fresno, D. (2020). Fluid transport within permeable pavement systems: A review of evaporation processes, moisture loss measurement and the current state of knowledge. *Construction and Building Materials*, 243, 118179.

78. Vijayakumar, M., Anusha, G., Athipathy, M., & Krishnakumar, P. (2022). Experimental study on compressive strength of permeable concrete with shredded plastic fiber and plastic pellets. *Materials Today: Proceedings*, 68, 2532-2535.
79. Volpi León, V. (2017). Efecto de corrosión en concreto reforzado elaborado con desecho minero (jal) (Master's thesis, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla).
80. Xie, N., Akin, M., & Shi, X. (2019). Permeable concrete pavements: A review of environmental benefits and durability. *Journal of cleaner production*, 210, 1605-1621.
81. Xu, S., Lu, G., Hong, B., Jiang, X., Peng, G., Wang, D., & Oeser, M. (2020). Experimental investigation on the development of pore clogging in novel porous pavement based on polyurethane. *Construction and Building Materials*, 258, 120378.
82. Yee Armenta, J. C. (2018). Estudio de carbonatación en concreto elaborado con residuo minero.
83. Zhang, X., Li, H., Harvey, J. T., Liang, X., Xie, N., & Jia, M. (2021). Purification effect on runoff pollution of porous concrete with nano-TiO<sub>2</sub> photocatalytic coating. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 101, 103101.