



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE  
HIDALGO

---

---

INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

“ESTUDIO DE CARBONATACIÓN EN CONCRETO  
ELABORADO CON RESIDUO MINERO”

T E S I S

PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL

PRESENTA

JUAN CARLOS YEE ARMENTA

DIRECTOR

DR. LUIS DAIMIR LÓPEZ LEÓN

CO-DIRECTOR

DR. IVÁN ERICK CASTAÑEDA ROBLES



CIUDAD DEL CONOCIMIENTO

MARZO 2018



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO**  
**Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería**  
*Institute of Basic Sciences and Engineering*  
**Dirección**  
*Dean*

Biblioteca

Mineral de la Reforma, Hgo., a 25 de abril de 2018

Número de control: ICBI-D/298/2018

Asunto: Autorización de impresión de trabajo recepcional.

**M. EN A. JULIO CÉSAR LEINES MEDÉCIGO**  
**DIRECTOR DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR**  
**DE LA UAEH**

Por este medio le comunico que después de la revisión por parte de los sinodales del trabajo: **“Estudio de Carbonatación en concreto elaborado con residuo minero”**, realizado por el pasante de Licenciatura en Ingeniería Civil, **Juan Carlos Yee Armenta**, se ha decidido autorizar la impresión del mismo.

A continuación firman de conformidad los integrantes del jurado:

- PRESIDENTE: Dra. Liliana Guadalupe Lizárraga Mendiola
- PRIMER VOCAL: Dr. Luis Daimir López León
- SEGUNDO VOCAL: Dr. Iván Erick Castañeda Robles
- TERCER VOCAL: Mtra. Valeria Volpi León
- SECRETARIO: Dr. Francisco Javier Olguín Coca
- PRIMER SUPLENTE: Dra. María del Refugio González Sandoval
- SEGUNDO SUPLENTE: Dr. Azdrubal Lobo Guerrero

UAEH  
BIBLIOTECA

Sin otro particular, reitero a usted la seguridad de mi atenta consideración.

Atentamente  
 “Amor, Orden y Progreso”  
  
 Dr. Óscar Rodolfo Suárez Castillo  
 Director del ICBI



ORSC/YCC



Ciudad del Conocimiento  
 Carretera Pachuca - Tulancingo km. 4.5  
 Colonia Carboneras  
 Mineral de la Reforma, Hidalgo, México, C.P. 42184  
 Tel. +52 771 7172000 exts 2231, Fax 2109  
 direccion\_icbi@uaeh.edu.mx

www.uaeh.edu.mx

*Con amor, cariño y respeto a:*

*Mis padres, mis hermanos, mi hermana y a mi Nonna*

## **Agradecimientos**

*Quiero agradecer a todas las personas que de una u otra forma me han apoyado en la realización de este trabajo.*

*En primer lugar, agradezco a mi familia, por ser el apoyo en mi vida, por su esfuerzo, sus consejos y entrega. Especialmente a mis padres, por haberme forjado como la persona que soy y por enseñarme que nunca hay que darse por vencido.*

*De manera especial agradezco a mi director de tesis, el Dr. Luis Daimir López León, por su apoyo, disposición y paciencia para la realización de este trabajo, por compartir su conocimiento y por su valiosa amistad brindada.*

*Asimismo, agradezco a mis asesores de tesis, por tomar el compromiso de apoyarme y confiar en mí. Gracias por su paciencia, el tiempo concedido y las contribuciones vertidas en esta investigación.*

*A Nadia, por haberme brindado todo su amor, cariño, comprensión, por motivarme a seguir adelante y por estar a mi lado en cada momento.*

*Al Laboratorio de Materiales JP y MS S.A. de C.V., en especial al ingeniero Julio César García y al ingeniero Pascual Romero por sus enseñanzas y atenciones.*

*A mis queridos amigos de la universidad, por escalar juntos este peldaño y por su gran apoyo para la realización del proceso experimental de esta investigación.*

*A mis queridos amigos fuera de la universidad, por permitirme aprender más de la vida a su lado.*

*A todos ustedes, gracias.*

## Índice

### Contenido

Agradecimientos	ii
Índice	iii
Índice de Tablas	v
Índice de Figuras	vii
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Introducción	2
1.2. Antecedentes	3
1.3. Planteamiento del problema	6
1.4. Justificación	7
1.5. Hipótesis	7
1.6. Objetivo general	7
1.7. Objetivos específicos	7
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	9
2.1. Conceptos básicos.	10
2.2. El concreto.	10
2.2.1 Agregados	11
2.2.2. El cemento	12
2.3. Características del concreto	16
2.4. Tipos de concreto.	19
2.5. Resistencia del concreto	21
2.6. Métodos de curado del concreto.	22
2.7. Aditivos minerales del concreto.	24

2.7.1. Jal	29
2.8. Carbonatación.	33
2.8.1. El pH.	36
2.8.2. Evaluación de la carbonatación.	37
2.8.3. Fenolftaleína.	37
2.8.4. Reparación y prevención de la carbonatación.	39
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA	43
3.1. Diseño de mezcla.	44
3.2. Elaboración de especímenes	55
3.2.1. Curado de especímenes	57
3.3. Prueba de la resistencia a la compresión	57
3.4. Pruebas de carbonatación	59
3.4.1. Fenolftaleína	61
3.4.2. pH	62
CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	64
4.1. Prueba de la Fenolftaleína en la carbonatación en el concreto	65
4.2. Medición del pH	68
4.3. Resistencia a la compresión para los distintos sistemas con jal	69
CONCLUSIONES	71
Recomendaciones para la continuación de esta línea de investigación	72
Bibliografía	73

## Índice de Tablas

Tabla 2.1. Principales componentes del cemento. Fuente: (Metha y Monteiro, 1998). .....	13
Tabla 2.2. Clasificación del concreto de acuerdo a su densidad.....	18
Tabla 2.3. Tipos de concreto en el mercado. Fuente: (Holcim, 2018). ....	20
Tabla 2.4. Clasificación del concreto de acuerdo con su resistencia a la compresión. Fuente: (Li, 2011). ....	21
Tabla 2.5. Tipos de curado de aplicación continua o frecuente de agua. Fuente: (Sika, 2009). ....	23
Tabla 2.6. Tipos de curado con materiales sellantes. Fuente: (Sika, 2009). ....	24
Tabla 2.7. Efectos de los aditivos en el concreto. Fuente: (Li, 2011). ....	26
Tabla 2.8. Composición química típica del humo de sílice. Fuente: (Li, 2011). ....	28
Tabla 2.9. Investigaciones realizadas utilizando residuos mineros. ....	32
Tabla 2.10. Composición química, Escombrera Presa Sur. Fuente: (Volpi, 2016). ....	32
Tabla 2.11. Efectos de la humedad relativa (HR) durante el proceso de carbonatación del concreto. Fuente: (Campos, Fajardo, y Mendoza, 2016). ....	36
Tabla 3.1. Características de los recipientes empleados para obtener el peso volumétrico de los materiales. ....	45
Tabla 3.2. Peso volumétrico de los agregados y el jal. ....	46
Tabla 3.3. Pesos conseguidos durante el proceso para la obtención del peso específico del agregado fino.....	48
Tabla 3.4. Peso específico y porcentaje de absorción del agregado fino.....	48
Tabla 3.5. Pesos conseguidos durante el proceso para la obtención del peso específico del agregado grueso. ....	50
Tabla 3.6. Peso específico y porcentaje de absorción del agregado grueso. ....	50
Tabla 3.7. Peso específico y porcentaje de absorción del jal. ....	51

Tabla 3.8. Contenido de humedad de los agregados pétreos.....	51
Tabla 3.9. Obtención del módulo de finura.....	52
Tabla 3.10. Valores utilizados para el diseño de la mezcla de concreto (ACI, 2002). .....	53
Tabla 3.11. Dosificación de materiales para la elaboración de la mezcla de concreto con 0% de jal.....	54
Tabla 3.12. Dosificación de materiales para la elaboración de la mezcla de concreto con 5% de jal.....	54
Tabla 3.13. Dosificación de materiales para la elaboración de la mezcla de concreto con 10% de jal.....	54
Tabla 3.14. Dosificación de materiales para la elaboración de la mezcla de concreto con 15% de jal.....	55
Tabla 4.1. Perfil de carbonatación para las distintas dosificaciones de jal como cementante.....	66

## Índice de Figuras

Figura 2.1. Corte en un espécimen de concreto donde se muestra la composición de los agregados pétreos cubiertos por la pasta cementante. ....	10
Figura 2.2. Clínker, producto obtenido de la calcinación de calizas, arcillas y arenas. Fuente: (McMathis, 2015).....	14
Figura 2.3. Cemento portland. Fuente: (ASTM, 2014). <b>¡Error! Marcador no definido.</b>	
Figura 2.4. Prueba de revenimiento. Fuente: (ACI, 2014).....	17
Figura 2.5. Ejemplo de la aplicación del concreto lanzado. Fuente: (IMCYC, 2014). ....	19
Figura 2.6. Ejemplo de aditivos minerales, de izquierda a derecha: humo de sílice, escoria, ceniza volante y metacaolín. Fuente: (Li, 2011). ....	26
Figura 2.7. Escombrera Presa Sur localizada en Pachuca de Soto, Hidalgo. En la figura (a) se observa la parte superior de la presa y en la figura (b) se observa la vía de acceso y talud de la presa.....	30
Figura 2.8. Localización de la Escombrera Presa Sur, Distrito Pachuca – Real del Monte. Fuente: (Google Maps).....	31
Figura 2.9. Proceso de carbonatación en el concreto reforzado. Fuente: (Linked, 2018). ....	34
Figura 2.10. Detección de la carbonatación en el concreto usando la fenolftaleína como indicador de pH. ....	38
Figura 2.11. Elemento de concreto reforzado donde se muestra el alcance de la carbonatación. Fuente: (Ride, 2015). ....	39
Figura 2.12. Aplicación de un producto inhibidor de corrosión sobre el acero de refuerzo de un elemento de concreto. Fuente: (Pérsico, 2014).....	41
Figura 3.1. Obtención del peso volumétrico de los agregados y del jal.....	45
Figura 3.2. Obtención del peso específico del agregado fino.....	47

Figura 3.3. Procedimiento para obtener el peso específico del agregado grueso.	49
Figura 3.4. Proceso de tamizado por medios mecánicos para la obtención del módulo de finura.....	52
Figura 3.5. Elaboración de especímenes de concreto. ....	56
Figura 3.6. Especímenes de concreto después de 24 horas de fraguado en el molde cilíndrico. ....	57
Figura 3.7. Cabeceo de los especímenes de concreto con mortero azufre. ....	58
Figura 3.8. Prueba de la resistencia a la compresión de los especímenes de concreto.....	59
Figura 3.9. Cámara de carbonatación acelerada .....	60
Figura 3.10. Especímenes expuestos al CO <sub>2</sub> dentro de la cámara de carbonatación acelerada.....	61
Figura 3.11. Medición del área carbonatada con ayuda de un Vernier. ....	62
Figura 3.12. Perforación de los cilindros y medición de la perforación.....	63
Figura 4.1. Prueba de fenolftaleína en la penetración de CO <sub>2</sub> para los sistemas con f'c= 150kg/cm <sup>2</sup> y jal como cementante. ....	67
Figura 4.2. Prueba de pH en la penetración de CO <sub>2</sub> para los sistemas con f'c=100 kg/cm <sup>2</sup> y jal como cementante.....	68
Figura 4.3. Resistencia a la compresión para los distintos sistemas con jal como cementante expuestos a la cámara de carbonatación. ....	70

# **CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN**

## 1.1. Introducción

Actualmente la necesidad de generar nuevos materiales que sean amigables con el medio ambiente, que presenten un bajo costo en su producción y que cumplan con las normas de calidad se ha vuelto un tema de gran relevancia en el ámbito de la construcción.

Uno de estos temas es la incorporación de residuos industriales que puedan ser considerados como aditivos minerales para la generación de mezclas de concreto convencional que garanticen las mismas propiedades mecánicas y que permitan la mitigación de productos contaminantes como el caso del jal (residuo minero), material que tiene su origen en la acumulación de lodos provenientes del proceso de extracción de metales valiosos. Esta acción permitiría la utilización de residuos que implican una problemática en su estado actual, contemplando en todo momento la composición química de este tipo de residuos. Este material de residuo, por sus características físicas y químicas, no ha tenido gran utilidad, por el contrario, al ser susceptible a ser transportado por la acción del viento y el agua hacia la atmósfera, al suelo y a los mantos freáticos únicamente ha generado contaminación y ha dificultado el desarrollo de nuevas obras de infraestructura (Volpi, 2016).

El uso del concreto en la industria de la construcción se ha incrementado con el paso del tiempo transformándose en un subproducto de alta importancia en la obra civil. El concreto hidráulico es el resultado de la mezcla de materiales granulares finos y gruesos (gravas, rocas trituradas y arenas), unidos por un elemento aglutinante (McCormac y Brown, 2011). El concreto puede ser usado en masa o reforzado con armaduras de acero (concreto armado), siendo esta última su aplicación más importante, ya que se trata del material más extensamente utilizado en la construcción debido a sus ventajas como versatilidad, resistencia y durabilidad comparado con otros materiales (Galán, 2011). Aunque el concreto hidráulico es un material que presenta una gran ventaja en cuanto a resistencia y rigidez, no se encuentra a salvo de evitar el ingreso de agentes ambientales como el oxígeno, el

agua, el dióxido de carbono y los cloruros que dañen sus propiedades físicas y químicas, comprometiendo la durabilidad de la estructura.

La durabilidad de las estructuras de concreto armado se consigue gracias a la acción protectora, de doble naturaleza, que el concreto ejerce sobre el acero. Por una parte, el recubrimiento de concreto supone una barrera física que dificulta el contacto con los agentes agresivos exteriores y, por otra, la elevada alcalinidad del concreto desarrolla sobre el acero una capa pasiva que lo mantiene inalterado mientras permanecen estas condiciones (Galán 2011).

En el caso del dióxido de carbono y los cloruros, uno de los parámetros para evaluar la capacidad del concreto ante estos agentes agresivos está dado por el valor del pH del agua del poro. A mayor pH se requiere mayor cantidad de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) para carbonatar el concreto, en el caso de la carbonatación (Moreno, 2006). La carbonatación en el concreto es la pérdida de pH que ocurre cuando el dióxido de carbono atmosférico reacciona con la humedad dentro de los poros del concreto y convierte el hidróxido de calcio con alto pH a carbonato de calcio, que tiene un pH más neutral (por debajo de 9.5) (Montani, 2000). Como resultado de esta reacción, el pH de la solución del poro puede descender de  $>12.5$  a  $\sim 8$  unidades. Bajo estas condiciones, el acero de refuerzo pierde su estado pasivo, provisto por la alcalinidad del concreto que lo rodea y se desarrolla la corrosión del acero (Moreno, 2006).

## **1.2. Antecedentes**

A lo largo del tiempo se han realizado varias modificaciones al concreto de manera que hoy en día se considera un material ideal para la construcción. Los primeros registros que se tienen acerca del concreto datan de la época de los romanos, de acuerdo con sus estructuras, aún existentes, realizadas con concretos pobres (Leandro, 2010). El concreto utilizado consistía de arenas, gravas y cenizas volcánicas como material cementante, al cual llamaron *puzzolana* debido a la región de origen "Puzzuoli" que se encuentra en las faldas del monte Vesubio. Durante el

siglo XVIII se encontraron depósitos de cemento natural al cual se le dio el nombre de cemento romano. La elaboración de este cemento consistía en rocas de margas arcillosas que se sometían a una calcinación para posteriormente pulverizar. Los concretos elaborados con este material como cementante presentaron características muy parecidas a los concretos elaborados con cenizas volcánicas.

En 1824, Joseph Aspdin de origen británico, obtuvo la patente para un cemento hecho de arcilla y piedra caliza, las cuales quemó en la estufa de su cocina y posteriormente pulverizó hasta obtener un polvo muy fino al que nombró cemento Portland, debido al gran parecido con el color gris verdoso oscuro de las rocas que se localizan en la isla Portland ubicada en Reino Unido (McCormac y Brown, 2011).

Los primeros usos del concreto reforzado son algo ambiguos. Algunos de los trabajos iniciales fueron realizados por el francés Joseph Lambot, quien alrededor de 1850 construyó una embarcación hecha de concreto reforzado con una red de alambres y barras paralelas (McCormac y Brown, 2011). En 1867 se le acredita la invención y se le otorga la patente del concreto reforzado al francés Joseph Monier por la construcción de contenedores hechos de concreto reforzado con una malla de hierro obteniendo un bajo peso en la estructura sin perjudicar la resistencia (McCormac y Brown, 2011). Por mucho tiempo se consideró que el concreto tenía una vida útil prácticamente ilimitada gracias a antiguas construcciones que siguen de pie. No fue hasta hace algunos años, dado a la experiencia y a las investigaciones llevadas a cabo, que se empezaron a tomar en cuenta las agresiones de tipo físico, químico o mecánico causantes del deterioro en el concreto y que dan lugar a que aparezcan todo tipo de problemas que exponen la integridad y que condicionan la durabilidad de las estructuras (Flores, 2014).

Uno de los temas que ha causado preocupación dentro de la comunidad científica es la carbonatación, ya que es uno de los principales factores de corrosión en el concreto reforzado generando fracturas en las estructuras y dejando expuesto al acero de refuerzo.

El primer investigador en considerar los efectos del dióxido de carbono sobre el cemento fue Lea P. M. en 1960, quien señala que la fase última de cualquier producto de cemento conservado al aire es carbonato de calcio, sílice hidratada, alúmina y óxido férrico, compuestos que se forman por acción del dióxido de carbono (Gaspar Tebar y Muñoz Plaza , 1998).

Posteriormente, los primeros en realizar un estudio amplio sobre la carbonatación en el cemento fueron Venuat y Alexandre en 1968, destacando la influencia de la humedad relativa, de la naturaleza del cemento, de la finura del mismo, de la adición de componentes secundarios activos (cenizas volantes y escorias) y de la relación agua/cemento. Según dichos autores, la carbonatación es nula en una atmósfera seca o saturada de humedad, siendo máxima cuando la humedad relativa se encuentra en el entorno del 50 % (Gaspar Tebar y Muñoz Plaza , 1998). La carbonatación se efectúa en exposición al medio ambiente o en una cámara de carbonatación acelerada diseñada para la obtención de información anticipada, controlando las variables ambientales que mayor efecto puedan tener en el proceso como lo son la temperatura, humedad relativa y concentración de CO<sub>2</sub> (Chávez, Pérez, Reyes, Corvo, y Osorno, 2010).

Después de esta investigación surgieron más inquietudes sobre la carbonatación en el cemento. Gaspar-Tébar, del Olmo-Rodríguez y Vázquez-Moreno en 1971 pusieron de manifiesto que las reacciones de carbonatación del cemento anhidro producen una alteración de los sulfatos, aluminatos y silicatos, especialmente del óxido de calcio y óxido de silicio, presentes en el cemento; formándose fundamentalmente silicatos y aluminatos carbonatados y carbonato de calcio (amorfo y/o cristalizado), hecho que produce una modificación de las propiedades físicas y fisicomecánicas del cemento. Incluso investigadores como Hornain y Pihlajavaara (1976), entre otros, han constatado que las resistencias mecánicas aumentaban con la carbonatación (Gaspar Tebar y Muñoz Plaza , 1998).

En 1976, Alexandre en su informe general del Simposio Internacional RILEM sobre "Carbonatación del concreto" llevado a cabo en Inglaterra, hace un estudio

sobre la velocidad de carbonatación, señalando que un factor que afecta seriamente a la cinética de la carbonatación es el grado de hidratación y el contenido en agua del material (Gaspar Tebar y Muñoz Plaza , 1998).

Rick Montani (2000), expresa la importancia del pH en el concreto, puesto que es altamente alcalino, protege y resguarda al acero de refuerzo ante la corrosión, creando una capa de óxido sobre el acero que permanece estable dentro del concreto. Cuando la carbonatación se presenta en el concreto, esta capa se desestabiliza haciendo que ese mismo óxido de la capa empiece a corroer el acero que esta protege. Aunque el proceso es lento, cuando ese efecto o el avance ya es alto, es muy riesgoso para la estructura (Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C., 2000).

### **1.3. Planteamiento del problema**

La acumulación de los residuos provenientes de la extracción de minerales (jales), han quedado atrapados dentro de la mancha urbana en la ciudad de Pachuca de Soto, en el estado de Hidalgo, lo que ha generado un potencial riesgo ambiental desde el subsuelo hasta la atmosfera, debido a sus elementos y compuestos químicos presentes y la facilidad que tiene el residuo de ser transportado por medio de viento, agua, acciones antropogénicas, entre otros. La importancia de la búsqueda de soluciones para el problema de estos residuos mineros ha dado lugar a la generación de trabajos en los cuales se buscan nuevos materiales. Una alternativa, es la que se propone en este trabajo, al utilizar ese jal como aditivo mineral para el diseño de mezclas de concreto convencional que cumplan con las propiedades de resistencia y durabilidad, bajo normativa nacional e internacional. Así como la evaluación en ambientes que comprometan las propiedades mencionadas.

#### **1.4. Justificación**

El uso de jales contaminantes, producto de la minería, para el desarrollo de nuevos materiales, sin comprometer las propiedades necesarias para su aplicación, tiene una gran relevancia en estos tiempos al disminuir la existencia de estos residuos expuestos al aire libre y que pueden ser perjudiciales para la salud de los seres humanos. Se ha encontrado que los elementos químicos presentes en los residuos mineros son similares a los de algunos aditivos minerales (como el humo de sílice, la ceniza volante, el metacaolín, entre otros) utilizados para la reducción de uso de cementante en mezclas de concreto.

#### **1.5. Hipótesis**

La incorporación del jal como sustituto parcial de cementante en mezclas de concreto convencional permitirá la utilización de éste desecho minero, accediendo a la reducción en el consumo del cemento, adicionando el jal en un porcentaje específico a dichas mezclas, lo cual mejorará el comportamiento del concreto bajo el criterio de durabilidad, al afectarse por el fenómeno de la carbonatación.

#### **1.6. Objetivo general**

Determinar el efecto de la carbonatación en los sistemas de concreto con incorporación de residuo minero (jal) como sustituto cementante en 5%, 10% y 15%, buscando que prevalezca la resistencia del concreto comparado con uno convencional.

#### **1.7. Objetivos específicos**

- Realizar un diseño de mezcla para un concreto con una resistencia a la compresión  $f'c = 150 \text{ kg/cm}^2$ .

- Elaborar especímenes de concreto con diferentes porcentajes de residuo minero como reemplazo de cemento en la mezcla con base en las normas ACI 211.1-91.
- Determinar el perfil de carbonatación de los distintos sistemas de concreto elaborado con jal.
- Comparar los perfiles de carbonatación mediante la prueba de fenolftaleína y de pH de los diferentes especímenes con residuo minero y de un concreto convencional.
- Realizar pruebas de resistencia a la compresión como parámetro de verificación del efecto del jal sobre la calidad resultante del concreto.

## **CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO**

## 2.1. Conceptos básicos.

El desarrollo del siguiente capítulo permitirá delimitar el área de estudio de la presente investigación, al mismo tiempo que dará paso a conocer los conceptos y definiciones de los materiales y herramientas que se utilizan para llevar a cabo el proceso experimental.

## 2.2. El concreto.

El concreto es un material semejante a una roca que se obtiene de la mezcla de partículas de diversos tamaños llamados agregados pétreos, como grava y arena, que son unidos por una pasta formada por agua y cemento (Chan, Solís y Moreno, 2003). El cemento al contacto con el agua reacciona químicamente y, después de cierto tiempo de fraguado junto con los agregados pétreos, se endurece y forma una masa sólida.

La calidad del concreto depende de la calidad de la pasta y del agregado y de la unión entre los dos. En un concreto adecuadamente confeccionado, cada partícula de agregado es completamente cubierta por la pasta y todos los espacios entre las partículas de agregados se llenan totalmente con pasta, como se muestra en la Figura 2.1 (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, y Tanesi, 2004).



**Figura 2.1. Corte en un espécimen de concreto donde se muestra la composición de los agregados pétreos cubiertos por la pasta cementante.**

Las propiedades del concreto varían en relación con la dosificación y calidad de sus componentes, así como de su proceso de elaboración y mantenimiento, en el cual también influyen las condiciones climáticas a las que se encuentra expuesto (Volpi, 2016). Tanto las propiedades del concreto fresco como del concreto endurecido se pueden cambiar con la adición al concreto de aditivos durante la dosificación (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

### **2.2.1 Agregados**

Los agregados son materiales sólidos granulares inertes provenientes de la trituración de rocas, que se emplean para conformar el concreto. Generalmente se cree que estos materiales son el “esqueleto” del concreto debido al porcentaje que ocupan dentro del mismo. Comúnmente, los agregados que se usan en el concreto ocupan aproximadamente tres cuartas partes del volumen del concreto. Como son menos caros que el cemento, es deseable usar la mayor cantidad de ellos que sea posible (McCormac y Brown, 2011). Estos deben componerse de partículas con resistencia mecánica adecuada y con resistencia a las condiciones de exposición; no deben contener materiales que puedan causar deterioración del concreto (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, y Tanesi, 2004).

Los agregados generalmente se dividen en agregados gruesos y finos. El agregado fino es arena natural seleccionada u obtenida mediante trituración y cribado, con partículas de tamaño comprendido entre 75 micrómetros (malla N°200) y 4.75 milímetros (malla N°4). El 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, generalmente comprendido entre 19 milímetros (3/4”) y 75 milímetros (3”) (N·CMT·2·02·002/02, 2002).

### **2.2.2. El cemento**

El cemento Portland es un polvo grisáceo, finamente pulverizado, que junto con el agua forman el elemento activo del concreto. El cemento constituye del 10 al 20 por ciento del volumen total del concreto. El cemento Portland desarrolla la propiedad de ser un conglomerante al momento de agregarle agua, debido a la reacción química que se efectúa entre los minerales del cemento al momento de la hidratación. Otra propiedad que presenta el cemento es la de fraguar tanto en el aire como en el agua y formar una masa endurecida, ya sea sólo o mezclado con otros materiales como arena y grava.

El cemento Portland se produce por la pulverización del clínker, el cual consiste principalmente en silicatos de calcio hidratados. El clínker también contiene algunos aluminatos de calcio y ferroaluminatos de calcio y una o más formas de sulfato de calcio (yeso) que se muele juntamente con el clínker para la fabricación del producto final (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, y Tanesi, 2004). Cuatro de estos compuestos se consideran los principales y constituyen el 90 por ciento en peso del cemento. El 10 por ciento restante del peso del cemento lo forman otros constituyentes como el yeso que se agrega al clínker durante la molienda final (Metha y Monteiro, 1998).

En la Tabla 2.1 se muestran los cuatro compuestos del cemento y las características que brindan al cemento Portland. De igual manera, se muestran las fórmulas químicas de cada compuesto y la nomenclatura común que se utiliza dentro de la industria cementera.

Los materiales usados para la producción del cemento Portland deben contener cantidades apropiadas de los compuestos de calcio, sílice, alúmina y hierro. Durante la fabricación, se hace un análisis químico frecuente de todos los materiales para garantizarse una calidad alta y uniforme del cemento (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, y Tanesi, 2004).

Tabla 2.1. Principales componentes del cemento. Fuente: (Metha y Monteiro, 1998).

Compuesto del cemento	Fórmula química	Nomenclatura común	Características
Silicato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$	Responsable de la resistencia a primeras edades. Hasta los 28 días aproximadamente.
Silicato dicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$	Responsable de las resistencias a edades avanzadas. De 28 días en adelante
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$	Genera mucho más calor que una cantidad igual de los otros componentes. Es responsable de la variación de volumen, formando grietas y ataque a los sulfatos
Ferroaluminato tetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$	Poca influencia en la resistencia.

El proceso de fabricación del cemento Portland inicia con la extracción de la materia prima que es la caliza, los materiales arcillosos como barro o pizarra, arena y mineral de hierro. Estos materiales son transportados a trituradoras, en las cuales se reduce el tamaño de las rocas hasta 125 mm (5 pulg.) y después a un tamaño de 20 mm (3/4 pulg.). Se muelen las materias primas por separado, hasta que se convierten en polvo para posteriormente pasar a un molino en donde se realiza la homogeneización de todos los materiales. El producto que se obtiene de este proceso se conoce como “mezcla cruda”.

Después del mezclado sigue la calcinación, proceso en donde la mezcla cruda pasa a lo largo de un horno con temperaturas que oscilan entre 1400° C a 1550° C, en donde la mezcla cambia químicamente, lo que da origen a un material de color verdoso, en estado pastoso cuya forma se aproxima a la esférica, como se muestra en la Figura 2.2.



**Figura 2.2. Clínker, producto obtenido de la calcinación de calizas, arcillas y arenas. Fuente: (McMathis, 2015).**

Este producto, que incluye los cuatro compuestos principales del cemento Portland, se denomina “clínker”, que al salir de los hornos se debe dejar enfriar para posteriormente almacenarlo. El clínker pasa del almacenamiento a los molinos de acabado. En los molinos se dosifica la cantidad correcta de clínker junto con una cantidad de sulfato de calcio (yeso) que aproximadamente corresponde al 5 por ciento. Los materiales se muelen hasta obtener un tamaño promedio de la partícula de 45 micrómetros ( $\mu\text{m}$ ), dando como resultado el cemento Portland (Figura 2.3). El proceso final en la producción del cemento es la conducción a los silos de almacenamiento y finalmente su envasado.



**Figura 2.3. Cemento portland. Fuente: (ASTM, 2014).**

La norma mexicana NMX-C-414-ONNCCE-2017 “Industria de la Construcción – Cementantes Hidráulicos – Especificaciones y Métodos de Ensayo” establece los diversos tipos de cemento hidráulico de fabricación nacional o extranjera que se comercializan en territorio nacional, cemento que se clasifica, según sus componentes, en (NMX-C-414-ONNCCE-2017, 2018):

1. CPO: Cemento Portland Ordinario.
2. CPP: Cemento Portland Puzolánico.
3. CPEG: Cemento Portland con Escoria Granulada de Alto Horno.
4. CPC: Cemento Portland Compuesto.
5. CPS: Cemento Portland con Humo de Sílice.
6. CEG: Cemento con Escoria Granulada de Alto Horno.

Los tipos de cementos pueden presentar las siguientes características especiales:

- RS: resistencia a los sulfatos.
- BRA: baja reactividad álcali agregado.
- BCH: bajo calor de hidratación.
- B: blanco.

Los tipos de resistencia o clase resistente de los cementos son: 20, 30, 30R, 40 40R (resistencias que corresponden a 200, 300 y 400 kg/cm<sup>2</sup>). La letra R indica que debe de cumplir con una resistencia inicial específica a la edad de 3 días.

La norma ASTM C 150 (ASTM, 2007) designa ocho tipos de cementos Portland, para satisfacer varios requisitos físicos y químicos para aplicaciones específicas, usando números romanos, como son:

1. Tipo I: normal.
2. Tipo IA: normal con inclusión de aire.
3. Tipo II: de moderada resistencia a los sulfatos.
4. Tipo IIA: de moderada resistencia a los sulfatos con aire incluido.
5. Tipo III: de alta resistencia inicial.
6. Tipo IIIA: de alta resistencia inicial con aire incluido.
7. Tipo IV: bajo calor de hidratación.
8. Tipo V: alta resistencia a los sulfatos.

### **2.3. Características del concreto**

El concreto se presenta en tres estados; fresco, fraguado y endurecido, y en cada uno de estos estados se presentan características diferentes. El estado fresco se presenta en el concreto recién mezclado, donde debe ser plástico y parecido a una masa que sea capaz de ser moldeada a mano. Las principales propiedades en este estado son la trabajabilidad y la cohesividad. La trabajabilidad permite el fácil manejo de la mezcla para poder ser transportada, colocada y consolidada en el molde de encofrado sin comprometer su homogeneidad. Los factores que influyen en la trabajabilidad del concreto son el método y la duración del transporte, cantidad y características de los materiales cementantes, consistencia del concreto (asentamiento en cono Abrams o revenimiento), tamaño, forma y textura de los agregados finos y gruesos, aire incluido, cantidad de agua, la temperatura del concreto, del aire y los aditivos (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, y Tanesi, 2004).

La forma más eficiente de revisar la trabajabilidad del concreto es mediante la prueba de revenimiento, como se muestra en la Figura 2.4, la cual se utiliza como medida de la consistencia y humedad del concreto.



**Figura 2.4. Prueba de revenimiento. Fuente: (ACI, 2014).**

La cohesividad es la propiedad que tiene el concreto en estado fresco que evita la segregación de las partículas de los agregados con la pasta cementante al momento de la fabricación y durante su colocación, la cual depende de la calidad de los materiales.

Después de la compactación y durante el acabado del concreto, este empieza a ponerse rígido, pierde plasticidad y se vuelve difícil de manejar, tal estado se conoce como fraguado inicial del concreto. Este proceso inicia entre 45 a 60 minutos después del amasado del concreto. A medida que se va produciendo el endurecimiento en la mezcla y que la consistencia alcanza un valor apreciable de resistencia, se presenta un nuevo estado que se conoce como fraguado final del concreto, el cual se estima en 10 horas aproximadamente. En el estado endurecido el concreto debe presentar dos propiedades significativas para su buen desempeño como la durabilidad y la resistencia (ver 2.1.4.).

La durabilidad es la habilidad del concreto en resistir a la acción del ambiente, al ataque químico y a la abrasión, manteniendo sus propiedades de diseño. Los componentes del concreto, la proporción de éstos, la interacción entre los mismos y los métodos de colocación determinan la durabilidad final y la vida útil del concreto (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

Otra clasificación del concreto es de acuerdo con su densidad, ya que se divide en tres categorías como se muestra en la Tabla 2.2. La densidad del concreto se ve comprometida por el tamaño y cantidad de las partículas de los agregados, la cantidad de aire atrapado y las cantidades de agua y cemento.

**Tabla 2.2. Clasificación del concreto de acuerdo a su densidad.**

<b>Tipo de concreto</b>	<b>Densidad (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Uso</b>
Concreto de baja densidad	Menos de 1,800	Losas de entripiso, muros divisorios, acabados exteriores, entre otros.
Concreto común	De 2,350 a 2,400	Cimentaciones, columnas, losas, muros, pisos, caminos, entre otros.
Concreto pesado	Mayor a 3,200	Pisos industriales, contenedores para desechos radiactivos, bóvedas y cajas fuertes.

## 2.4. Tipos de concreto.

En la construcción se encuentran diversos tipos de concreto debido a que cada obra presenta características y complejidades diferentes. Los concretos están diseñados para satisfacer las necesidades de cada obra. En la Figura 2.5, se muestra un ejemplo de la aplicación del concreto lanzado.



Figura 2.5. Ejemplo de la aplicación del concreto lanzado. Fuente: (IMCYC, 2014).

Las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto mencionan cinco tipos de concreto: convencional, concreto prefabricado, concreto de alta resistencia, concreto ligero y concreto simple (NTC, 2004). En el mercado se encuentra una gran variedad de concretos prefabricados que brindan características particulares a cada obra. En la Tabla 2.3, se muestran los tipos de concretos que se encuentran en el mercado.

Tabla 2.3. Tipos de concreto en el mercado. Fuente: (Holcim, 2018).

Tipo de concreto	Características principales	Aplicaciones
Concreto convencional	De uso general. Para todo tipo de construcciones que no requieran características especiales.	Zapatas, losas, trabes, columnas, firmes, entre otros.
Concreto ultra rápido	Diseñado para alcanzar la resistencia especificada a las 24, 48 ó 72 horas posteriores al colado.	Sistemas tilt-up, construcción de casas modulares, en descimbrado rápido, reparaciones rápidas.
Fluido estructural	Facilita la colocación y disminuye las necesidades de vibrado.	Para colados en elementos de difícil acceso.
Relleno fluido	Auto-nivelable, diseñado para relleno de cavidades, zanjas y como sustitución de suelos granulares.	Relleno en zanjas, control en erosión de taludes y sustituto de agregados granulares en rellenos compactados.
Concreto ligero	Reducir el peso de las estructuras, cuando se requiere aislamiento térmico y acústico.	Cines, auditorios, teatros, losas, muros, entre otros.
Concreto lanzado	Para recubrimiento, estabilización de taludes, construcción de túneles.	Revestimiento de túneles y taludes.
Concreto autocompactable	Facilidad para fluir sin vibrado, aún entre acero. Sin sangrado ni segregación	Muros y columnas de gran altura y/o secciones reducidas.
Concreto de alta resistencia	Para altas solicitaciones en resistencias estructurales.	Edificios de gran altura, puentes y viaductos; elementos pretensados o pos-tensados
Concreto estructural	De alta calidad para zonas sísmicas.	Edificios, puentes, hospitales, escuelas, entre otros.
Concreto fluido	Facilita la colocación y disminuye el vibrado. Excelente compactación y acabado superficial.	Colados rápidos, acabados aparentes de alta calidad.

## 2.5. Resistencia del concreto

La resistencia es una medida de la cantidad de esfuerzo requerido para hacer fallar un material. Puesto que la resistencia del concreto es una función del proceso de hidratación, que es relativamente lento, tradicionalmente las especificaciones y las pruebas para la resistencia del concreto se basan en muestras curadas bajo condiciones estándar de temperatura y humedad, por un periodo de 28 días (Metha y Monteiro, 1998).

De acuerdo con la resistencia a la compresión, el concreto se puede clasificar en cuatro categorías, como se muestra en la Tabla 2.4. El concreto de baja resistencia se usa principalmente para construir estructuras de concreto simplemente en masa. Los concretos de resistencia moderada son los concretos usados comúnmente en edificios, puentes y estructuras similares. Los concretos de alta resistencia se pueden usar para construir altas columnas, columnas de puentes y muros con cargas cortantes. Los concretos de ultra alta resistencia no han sido utilizados ampliamente en construcciones estructurales, sólo en algunos segmentos estructurales tales como vigas (Li, 2011).

**Tabla 2.4. Clasificación del concreto de acuerdo con su resistencia a la compresión. Fuente: (Li, 2011).**

<b>Tipo de concreto</b>	<b>Resistencia a la compresión (kg/cm<sup>2</sup>)</b>
Concreto de baja resistencia	Menos de 204
Concreto de resistencia moderada	De 204 a 510
Concreto de alta resistencia	De 510 a 1530
Concreto de ultra alta resistencia	Más de 1530

## **2.6. Métodos de curado del concreto.**

El curado se define como la medida para cuidar el concreto fresco inmediatamente después del vertido. Es una etapa muy importante para el desarrollo de la resistencia del concreto y el control de los cambios tempranos del volumen (Li, 2011).

Las condiciones de curado son vitales para el desarrollo de la resistencia del concreto. Dado que las reacciones de hidratación del cemento sólo ocurren en presencia de una cantidad adecuada de agua, se debe mantener la humedad en el concreto durante el periodo de curado (Merritt, Loftin, y Ricketts, 2008). El objetivo principal que tiene el curado es el de mantener un aceptable contenido de humedad y temperatura en el concreto. La unión (adhesión) de las partículas del cemento es ocasionada por la reacción química que se produce entre el cemento y el agua, proceso conocido como hidratación. La hidratación es uno de los procesos más importantes, ya que las propiedades del concreto en estado fresco, fraguado y endurecido son los resultados directos de dicho proceso. Al mantener húmedo el concreto, se hace más fuerte la adherencia entre la pasta y los agregados. El concreto no se endurece apropiadamente si se le deja secar (IMCyC, 2005).

Las propiedades del concreto endurecido (resistencia, permeabilidad, durabilidad, resistencia al hielo-deshielo, entre otras), tanto en el interior como en la superficie, son fuertemente influenciadas por el porcentaje en que el proceso de hidratación se lleve a cabo con eficacia. Cuando las condiciones no son las adecuadas para la evolución de la hidratación, ésta primero se ralentiza y después se interrumpe (Fernández Luco, 2010).

Existen diversos materiales, métodos y procedimientos para el curado del concreto, de los cuales dos de estos sistemas de curado permiten mantener cierto nivel de humedad en el concreto:

- Aplicación continua o frecuente de agua.
- Uso de materiales sellantes o de compuestos curadores líquidos para evitar la evaporación.

Dentro del sistema de aplicación continua o frecuente de agua existen varios procedimientos, los cuales se muestran en la Tabla 2.5.

**Tabla 2.5. Tipos de curado de aplicación continua o frecuente de agua. Fuente: (Sika, 2009).**

<b>Tipo de curado</b>	<b>Características</b>
Por inmersión.	Método con mejores resultados de curado, pero con inconvenientes prácticos como inundar o sumergir el elemento de concreto.
Rociado de niebla o aspersión.	Método con buenos resultados y fácil de ejecutar.
Costales, carpetas de algodón y alfombras.	Mantiene la humedad en superficies tanto verticales como horizontales. Presenta problemas de absorción del agua útil del concreto.
Curado con tierra, arena o aserrín.	Se emplea con éxito mediante el cubrimiento del concreto con los materiales mencionados. Problemas en manchar o deteriorar el concreto.

Dentro de los materiales selladores se encuentran las hojas o membranas que se colocan sobre el concreto para reducir la pérdida de agua por evaporación. En la Tabla 2.6 se encuentran los métodos de curado con dichos materiales.

**Tabla 2.6. Tipos de curado con materiales sellantes. Fuente: (Sika, 2009).**

<b>Tipo de curado</b>	<b>Características</b>
Película de plástico.	Plásticos blancos, transparentes y negros. Son livianas y se extienden fácilmente, cubriendo todas las partes expuestas del concreto.
Papel impermeable	Uso similar a la película de plástico
Compuestos líquidos.	Consiste en ceras, resinas naturales o sintéticas y solventes de volatilidad elevada. Diseñados para formar un sello tiempo después de haber sido aplicado.

## **2.7. Aditivos minerales del concreto.**

Los aditivos son aquellos que se utilizan como un ingrediente extra en el concreto y que se agregan en la mezcla durante el amasado. Los aditivos ofrecen características específicas al concreto tanto en estado fresco, como en estado endurecido.

La norma ASTM C 125 define un aditivo como un material distinto del agua, los agregados y los cementos hidráulicos; utilizado como un ingrediente del concreto o del mortero y que se agrega a la mezcla inmediatamente antes o durante el mezclado (Metha y Monteiro, 1998).

Los aditivos se pueden dividir en los siguientes grupos:

- a) Aditivos inclusores de aire: estos aditivos se usan para mejorar la resistencia al congelamiento del concreto.
- b) Aditivos químicos: los aditivos químicos mejoran las propiedades del concreto en estado fresco o endurecido.
- c) Aditivos minerales: este tipo de aditivos se componen de sólidos finamente divididos que sirven para mejorar la trabajabilidad, durabilidad y resistencia del concreto.

- d) Varios aditivos: incluye a todos aquellos materiales que no entran en las categorías anteriores como látex, inhibidores de corrosión y aditivos expansivos (Li, 2011).

En la Tabla 2.7, se muestran los beneficios de los aditivos en el concreto. Hoy en día, casi todos los concretos contienen uno o más aditivos. Por lo tanto, es importante estar familiarizados con los aditivos utilizados comúnmente (Li, 2011).

Los aditivos minerales son materiales finamente pulverizados que se agregan al concreto, estos materiales pueden ser de origen natural, como las puzolanas, o subproductos de otros procesos industriales como el humo de sílice, la ceniza volante y la escoria, aditivos minerales que más se utilizan, Figura 2.6. Estos aditivos se utilizan para optimizar o transformar algunas de las propiedades del concreto, como mejorar la trabajabilidad, la plasticidad, resistencia al agrietamiento térmico y evitar los ataques de los sulfatos.

Los materiales naturales son aquellos que han sido procesados para el solo propósito de producir una puzolana. El procesamiento generalmente involucra el triturado, molido y separación de tamaños. Los materiales de subproductos son aquellos que no son los productos primarios de la industria que los produce. Los subproductos industriales pueden o no requerir un procesamiento (como secado o pulverizado), antes de usarse como aditivos minerales. Algunos aditivos minerales son puzolánicos (como la ceniza volante de bajo contenido de calcio), algunos son cementantes (como la escoria granulada de alto horno), mientras que otros son tanto cementantes como puzolánicos (como la ceniza volante de alto contenido de calcio) (Metha y Monteiro, 1998). Las puzolanas y las escorias se pueden clasificar como materiales cementantes suplementarios o como aditivos minerales. Los materiales cementantes suplementarios se los puede utilizar como adición o sustitución parcial del cemento Portland, dependiendo de las propiedades de los materiales y de los efectos esperados en el concreto (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, y Tanesi, 2004).

Tabla 2.7. Efectos de los aditivos en el concreto. Fuente: (Li, 2011).

Propiedad del concreto	Tipo de aditivo	Categoría del aditivo
Trabajabilidad	Reductor de agua Agentes inclusores de aire Polvo mineral inerte Puzolanas Polímeros de látex	Químico Inclisor de aire Mineral Mineral Varios
Estabilizadores	Acelerantes Retardantes	Químico Químico
Resistencia	Puzolanas Polímeros de látex	Mineral Varios
Durabilidad	Agentes inclusores de aire Puzolanas Reductores de agua Inhibidores de corrosión Reductores de encogimiento	Inclisor de aire Mineral Químico Varios Varios
Concretos especiales	Polímeros de látex Humo de sílice Aditivos expansivos Pigmentos de color Formación de gases	Varios Mineral Varios Varios Varios

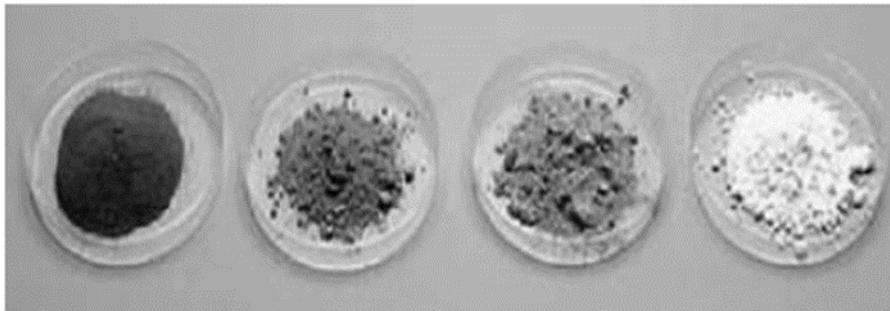


Figura 2.6. Ejemplo de aditivos minerales, de izquierda a derecha: humo de sílice, escoria, ceniza volante y metacaolín. Fuente: (Li, 2011).

Todos los aditivos minerales proporcionan características particulares al concreto debido a su composición química y a las reacciones que ocurren al entrar en contacto con los componentes químicos del cemento más la reacción que ocurre con el agua. Sin embargo, en el presente trabajo sólo 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 ferrosilicio. La reducción del cuarzo a un silicio a temperaturas de hasta 2000° C producen vapores de SiO<sub>2</sub>, que se oxidan y condensan en la zona de baja temperatura en pequeñísimas partículas esféricas consistentes de sílice no cristalino. La distribución del tamaño típico del humo de sílice está proporcionado por un 20% por debajo de 0.05 µm, 70% por 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 del 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 2.8. Se puede observar que el sílice domina (>92%) en el material (Li, 2011).

El humo de sílice se suministra de dos formas, en polvo y en lodo. El lodo de humo de sílice se adoptó para evitar posibles problemas de salud causados por la inhalación de las partículas cuando las personas trabajan con el material. El humo de sílice se ha aplicado en la producción de concreto desde el decenio de 1980 y ahora se ha convertido 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). Introducido en el concreto como reemplazo del cemento, el humo de sílice actúa de dos formas principales (López, 1999):

- Como filler (relleno), consigue una gran capacidad de adherencia entre los materiales y por consiguiente se obtienen mayores resistencias mecánicas.
- Como puzolana, combinándose con la cal libre (como subproducto de la hidratación del cemento) formándose así los silicatos hidratados muy

similares a los producidos por el cemento Portland, por lo que disminuye la porosidad y aumentan sus resistencias físicas y químicas.

Se emplea donde sea necesario un alto grado de impermeabilidad y alta resistencia del concreto. Puede contribuir para la cohesión de la mezcla y es muy efectivo en la reducción del sangrado y la segregación y, como resultado, se pueden utilizar concretos con revenimiento mayor. Sin embargo, debido a su bajo sangrado, el concreto con humo de sílice puede presentar un aumento de la fisuración por contracción plástica (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, y Tanesi, 2004).

**Tabla 2.8. Composición química típica del humo de sílice. Fuente: (Li, 2011).**

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

En comparación con el cemento Portland normal y con las cenizas volantes típicas, la distribución en el tamaño de las partículas del humo de sílice origina que, por una parte, el material sea altamente puzolánico, pero por otra parte crea problemas de manejo, e incrementa considerablemente el requerimiento de agua en el concreto (Metha y Monteiro, 1998).

### **2.7.1. Jal**

La NOM-141-SEMARNAT-2003 define al jal como, residuos sólidos generados en las operaciones primarias de separación y concentración de minerales (NOM-141-SEMARNAT-2003, 2004).

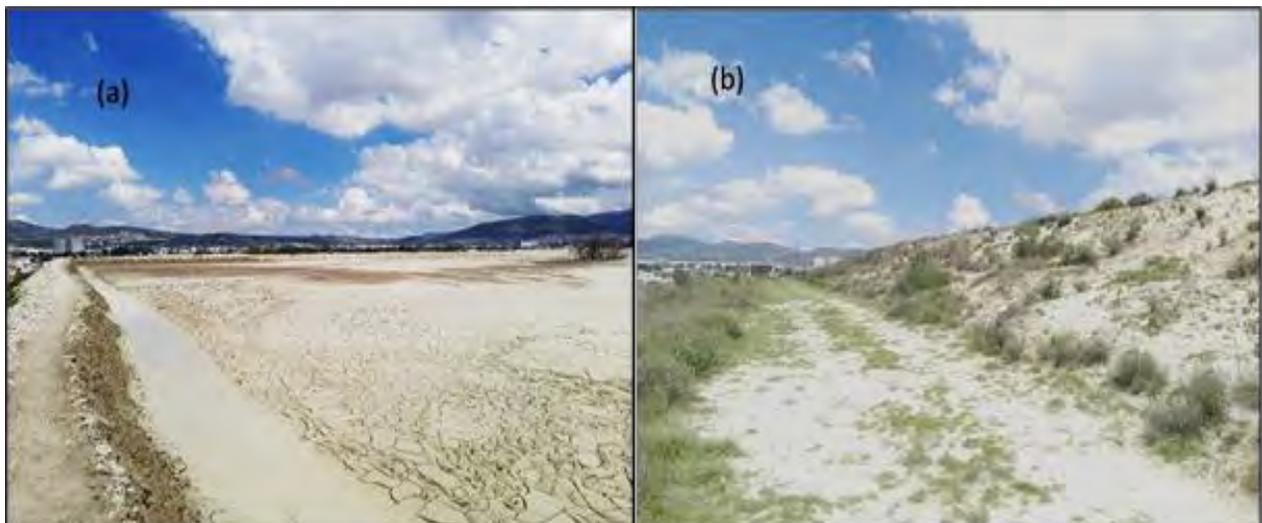
Un jal puede definirse como todo aquel desecho minero que resulta del procesamiento (trituración, molienda y separación) al que se somete un determinado material rocoso para remover y recuperar metales o minerales económicos. Los jales representan el residuo de extracción minera con mayor volumen sobre la superficie terrestre. En consecuencia, se han diagnosticado numerosos problemas de tipo ambiental, relacionados a su generación, acumulación y evolución durante los procesos de extracción de los metales (Maldonado, 2008). La disposición final de los jales se lleva a cabo comúnmente en presas construidas especialmente para dicho fin, las cuales son similares en su construcción a las presas hidráulicas.

Los jales normalmente se producen por la suspensión de partículas, es decir, suspensión en agua de sedimento de grano 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).

Las características físicas y químicas de los jales varían considerablemente dependiendo de la mineralogía del yacimiento y de los procesos físico-químicos llevados a cabo para extraer el producto económico. Entre las principales variaciones se pueden mencionar las siguientes: composición mineralógica y

geoquímica, peso específico de las partículas, granulometría, permeabilidad, densidad, plasticidad, consolidación, composición química del agua de poro, entre otras (Lottermoser, 2010). La dimensión de las partículas de un jal, depende del tamaño de liberación de los minerales del proceso de trituración y molienda (Maldonado, 2008).

En Pachuca de Soto, perteneciente al estado de Hidalgo, como resultado de la actividad minera, se acumularon grandes cantidades de residuos mineros a cielo abierto, quedando atrapados dentro de la mancha urbana debido al crecimiento de la mancha urbana. Dentro de la ciudad existen 286 hectáreas de terreno con jales, lo correspondiente a 95 millones de toneladas. En el caso de la Escombrera Presa Sur, de la cual se extrajo el jal utilizado para la realización de los especímenes de concreto, han sido depositadas 176.70 hectáreas de residuos mineros, desde 1934 a la fecha (Volpi, 2016). En la Figura 2.7, se puede apreciar la Escombrera Presa Sur (caso de estudio en este trabajo). Esta presa se ubica en el Distrito Pachuca – Real del Monte, ubicada entre la Antigua carretera La Paz y Boulevard Nuevo Hidalgo, con una latitud de  $20^{\circ}05'01.5''N$  y una longitud de  $98^{\circ}45'51.4''O$  (Figura 2.8).



**Figura 2.7. Escombrera Presa Sur localizada en Pachuca de Soto, Hidalgo. En la figura (a) se observa la parte superior de la presa y en la figura (b) se observa la vía de acceso y talud de la presa.**



**Figura 2.8. Localización de la Escombrera Presa Sur, Distrito Pachuca – Real del Monte. Fuente: (Google Maps).**

Se han realizado algunas investigaciones acerca de la caracterización y posible reutilización del residuo minero provenientes de las presas ubicadas dentro del Distrito Minero Pachuca- Real del Monte. En la Tabla 2.9 se muestran algunos trabajos realizados con éste material.

Volpi (2016), en su trabajo “Efecto de corrosión en concreto reforzado elaborado con desecho minero (jal)” realizó la cuantificación de elementos contenidos en el material de estudio mediante Espectrofotometría de Absorción Atómica, proceso en donde se preparó el material de 74 a 53  $\mu\text{m}$  y con el cual se obtuvo la composición química del jal (Tabla 2.10) (Volpi, 2016).

La utilización de jal como aditivo en el concreto se debe a la caracterización química, que muestra como compuestos mayoritarios: sílice, alúmina y el óxido de hierro y a la similitud en la cantidad de compuestos químicos entre el jal (Tabla 2.10) y el humo de sílice (Tabla 2.8).

**Tabla 2.9. Investigaciones realizadas utilizando residuos mineros.**

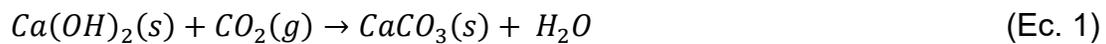
<b>Autor</b>	<b>Título del trabajo de investigación</b>	<b>Aplicación</b>
Patiño, Hernández, y Flores. (2004)	“Caracterización de las escombreras de Distrito minero Real del Monte – Pachuca y sus usos industriales alternos.”	Desarrollaron block, tejas, ladrillos, piso cerámico y vidrio ámbar para envase, con la inclusión de sílice procedente de los jales.
Juárez, Vela, Cruz, Chimal, Acevedo y Rivera. (2011).	“Características de sustratos e identificación de plantas micorrizadas en presas de jales del distrito minero de Pachuca.”	Determinaron que las presas presentan textura franco-arenosa y franco-limosa, predominando las arenas (65%), que poseen un pH cercano a la neutralidad, que predominan en su caracterización química el SiO <sub>2</sub> , entre otros.
Rangel, Prieto, Acevedo, Gordillo y González, (2009).	“Procesos unitarios de recuperación de residuos de construcción, demolición y jales de minería: Desarrollo de agregados pétreos.”	Creación de block mediante la reutilización de residuos de construcción y demolición (RCD) principalmente de viviendas y jales.

**Tabla 2.10. Composición química, Escombrera Presa Sur. Fuente: (Volpi, 2016).**

<b>Elemento</b>	<b>%</b>	<b>Elemento</b>	<b>%</b>
SiO <sub>2</sub>	70.01	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.08
TiO <sub>2</sub>	0.30	K <sub>2</sub> O	3.98
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.82	CaO	3.34
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.80	Na <sub>2</sub> O	2.50
MnO	0.70	Ag	38 g Ag/Ton
MgO	1.01	Au	0.25 g Au/Ton

## 2.8. Carbonatación.

El proceso de la carbonatación se considera como un fenómeno natural que aqueja a la mayoría de las estructuras alrededor del mundo, ya sean de concreto reforzado con varillas de acero o simplemente de concreto. Esto se debe a que el dióxido de carbono se considera como uno de los gases del efecto invernadero con mayor incremento a partir del siglo XX, producto de la respiración de seres vivos y actividades industriales, principalmente. En dicho proceso, el dióxido de carbono penetra en los poros capilares del concreto donde se disuelve con el agua atrapada en los poros del concreto creando ácido carbónico ( $H_2CO_3$ ), producto que reacciona con los hidróxidos del cemento, formando carbonatos. Esta reacción se describe de forma simplificada de la siguiente manera (ecuación 1):

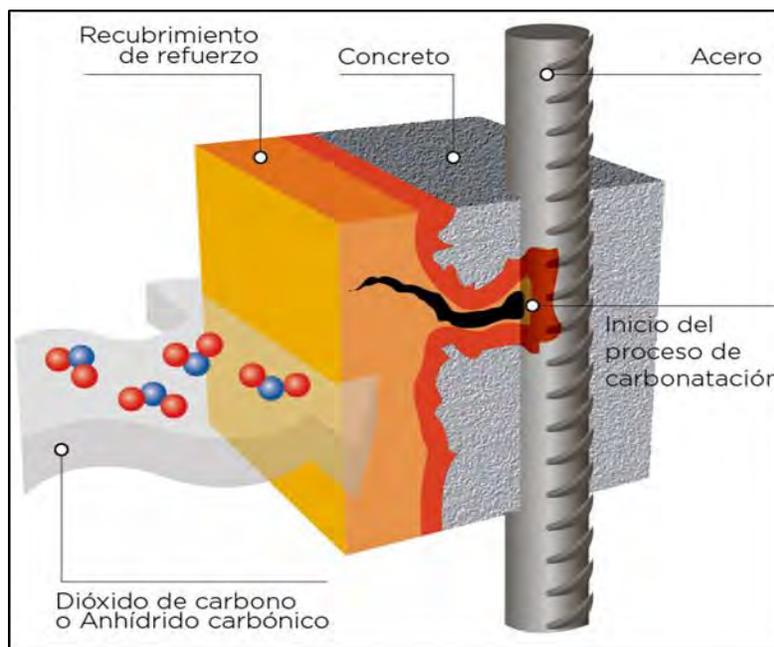


De acuerdo con el *American Concrete Institute*, la carbonatación es la reacción entre el dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y un hidróxido o un óxido para formar un carbonato, especialmente en una pasta de cemento, mortero o concreto; la reacción con los compuestos de calcio produce carbonato de calcio (ACI 116R-00, 2005).

En otras palabras, la carbonatación es una reacción química en la cual el dióxido de carbono en el aire o en el agua reacciona con los compuestos de la pasta de cemento endurecido para formar carbonatos, principalmente carbonatos de calcio. La reacción comienza inmediatamente después de la exposición del concreto en el aire (Campbell, Sturm, y Kosmatka, 1991).

El deterioro del concreto puede ocurrir debido a la carbonatación, que puede suceder en todos los ambientes, pero principalmente en ciudades de urbanización densa donde la contaminación y ciertas condiciones climáticas favorecen dicho proceso. Esta reacción reduce el pH de la solución del poro del concreto, lo que lleva a la formación de grietas en el concreto que, al final, da como resultado una disminución en la vida útil de la estructura (Do Lago y Castro, 2009).

Las propiedades de durabilidad del concreto armado se consiguen gracias a la acción protectora que el concreto ejerce sobre el acero. Además de suponer una barrera física que dificulta la entrada de agentes agresivos, la elevada alcalinidad del concreto desarrolla sobre el acero una capa pasiva que lo mantiene inalterado mientras no se modifiquen esas condiciones. La alta alcalinidad del concreto es debida principalmente a los hidróxidos de calcio, sodio, y potasio, formados durante la hidratación del cemento. La reacción de estas fases disueltas con el  $\text{CO}_2$  atmosférico, denominada carbonatación, produce una disminución del pH, la cual, si llega a alcanzar la armadura, puede dar lugar a la destrucción de la capa pasiva del acero y a la corrosión generalizada del mismo (Figura 2.9) (Galán, 2011).



**Figura 2.9. Proceso de carbonatación en el concreto reforzado. Fuente: (Linked, 2018).**

La tasa de carbonatación es en gran parte una función de la permeabilidad de la pasta de cemento, la temperatura, la humedad relativa y la concentración de dióxido de carbono en el aire. La permeabilidad de la pasta se controla mediante la relación agua-cemento, la calidad de humedad en el curado y el grado de "densificación" de la superficie expuesta del concreto (Campbell, Sturm, y Kosmatka, 1991).

El dióxido de carbono presente en la atmosfera no es el único responsable de la carbonatación en el concreto. Existen factores que originan que el proceso de la carbonatación sea mucho más rápido y a temprana edad; provienen desde el momento de la elaboración y colocación del concreto durante la etapa constructiva.

A continuación se muestran los principales factores en la elaboración del concreto que propician una carbonatación temprana (Do Lago y Castro, 2009):

- Porosidad
- Calidad y cantidad de cemento
- Relación agua-cemento
- Nivel de compactación del concreto (vibrado)
- Tipo y tiempo de curado

Durante la etapa de fraguado, en donde el concreto sufre cambios volumétricos considerables, se pueden generar grietas y oquedades en la superficie del concreto, lo que conlleva a la generación de rutas hacia el acero de refuerzo y lo que permite que el dióxido de carbono penetre con más facilidad, acelerando el proceso de carbonatación. Sin embargo, la mayor influencia en la tasa de carbonatación del concreto la tiene la proporción agua-cemento (Do Lago y Castro, 2009). Dicha proporción determina la porosidad de la pasta de cemento endurecida junto con el grado de compactación, debido al mayor volumen de poros que quedan atrapados en la pasta al evaporarse el agua cuando el concreto cambia de estado plástico a estado endurecido.

Debido a la porosidad del concreto y a las condiciones de humedad relativa (HR) en el medio ambiente de exposición, los poros pueden estar en diferentes condiciones de llenado. En el caso de saturación del poro, el transporte de CO<sub>2</sub> ocurre por difusión, siendo muy lento el avance sin que represente un riesgo para el deterioro del concreto por carbonatación. Cuando la humedad relativa es muy baja, la cantidad de agua retenida en los poros no es suficiente para que la carbonatación ocurra. La condición más favorable para el avance de la

carbonatación se presenta cuando la humedad relativa del medio se encuentra en el intervalo de 50 a 70% (Chávez, Pérez, Reyes, Corvo, y Osorno, 2010).

En la Tabla 2.11, se muestran los efectos del contenido de humedad relativa (HR) durante el proceso de carbonatación.

**Tabla 2.11. Efectos de la humedad relativa (HR) durante el proceso de carbonatación del concreto. Fuente: (Campos, Fajardo, y Mendoza, 2016).**

<b>Humedad Relativa en % (HR)</b>	<b>Proceso de carbonatación</b>
HR > 70	Evita el ingreso de CO <sub>2</sub>
50 < HR < 70	Avanza rápidamente
HR < 50	No existe suficiente agua en el poro para la disolución del CO <sub>2</sub>

### **2.8.1. El pH.**

La durabilidad de las estructuras de concreto reforzado estriba en la capacidad que tiene el material tanto para evitar el ingreso de agentes agresivos como el agua, el oxígeno, el dióxido de carbono, y los cloruros, como para soportar ciertas concentraciones sin ver comprometida su integridad. En el caso del dióxido de carbono y los cloruros, uno de los parámetros para evaluar dicha capacidad está dado por el valor del pH del agua del poro del concreto (Moreno, 2006).

Los productos de hidratación del cemento Portland (Ca(OH)<sub>2</sub>) y los hidróxidos de sodio y potasio proporcionan un pH de aproximadamente 12.5. Sin embargo, la influencia de diferentes factores, principalmente CO<sub>2</sub> atmosférico y SO<sub>2</sub> pueden causar la desaparición de estos hidróxidos y, por lo tanto, una disminución en el pH. Se cree que debajo de un pH de 9.5, la armadura puede verse afectada por los procesos de corrosión (Chinchón y Andrade, 2016).

### **2.8.2. Evaluación de la carbonatación.**

Se han utilizado diversas técnicas para la detección y evaluación de la carbonatación en el concreto. Las pruebas de evaluación van desde el empleo de un indicador de pH, como la fenolftaleína, hasta el uso de técnicas más avanzadas, como la difracción de neutrones.

A continuación se enlistan las técnicas con mayor uso para la detección de la carbonatación en el concreto (Galán, 2011):

- Medida del pH
- Análisis Termogravimétrico (TGA)
- Análisis Térmico Diferencial (DTA)
- Difracción de rayos X (XRD)
- Espectroscopia de Infrarrojo
- Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)
- Cromatografía de gases
- Espectroscopia de foto electrones de rayos X
- Gammadensimetría
- Difracción de neutrones

### **2.8.3. Fenolftaleína.**

La fenolftaleína es un compuesto orgánico de fórmula  $C_{20}H_{14}O_4$  ampliamente utilizado como indicador de pH. Un indicador de pH es una sustancia que cambia de color según el pH de la solución en la que se encuentra (Chinchón y Andrade, 2016).

El método más utilizado para la medida de la carbonatación, en su relación con la prevención de la corrosión, es el empleo de un indicador de pH obtenido a partir de una disolución al 1% de fenolftaleína en alcohol etílico. Al pulverizar la disolución sobre el concreto, según el color que adquiera, se puede identificar si el pH en esa zona está por encima de 9, es decir, manteniendo la pasividad del acero o si, por el

contrario, el pH se encuentra por debajo de 8 poniendo en riesgo al acero (Galán, 2011).

Sin embargo, esta técnica sólo indica un valor aproximado de pH, ya que la fenolftaleína presenta un rango de viraje de pH de 8.2 a 10.0, siendo incolora por debajo de 8.2 y presentando un color rosado fuerte (fucsia) por encima de 10. Por lo tanto, la prueba de la fenolftaleína sólo nos indica cuando el concreto tiene un pH menor de 8.2 o mayor de 10.0 (Moreno, 2006).

La manera más fácil de detectar la carbonatación en una estructura es romper un pedazo de concreto (preferentemente cerca de un borde) en donde se sospeche que hay carbonatación. Después de soplar todo el polvo residual del espécimen o del substrato, se pulveriza una solución de fenolftaleína en alcohol sobre el concreto (Montani, 2000). En la Figura 2.10, se muestra la carbonatación en el concreto, usando la fenolftaleína como indicador de pH.



**Figura 2.10. Detección de la carbonatación en el concreto usando la fenolftaleína como indicador de pH.**

#### **2.8.4. Reparación y prevención de la carbonatación.**

La protección y reparación de las estructuras de concreto es un punto que no se debe de dejar atrás desde el momento del diseño y ejecución de la obra a emplear. Analizar a detalle los efectos de la carbonatación en el concreto y saber distinguir cuando éste se encuentra bajo el ataque de agentes externos, como la carbonatación y corrosión, puede reducir, de manera significativa, el costo del mantenimiento de la estructura, y sobretodo, salvaguardar la durabilidad del concreto.

Actualmente, existen diversos métodos de protección y reparación de las estructuras de concreto contra la carbonatación, aunque la utilización de estos dependerá principalmente del porcentaje de carbonatación en el concreto.

Como ya se mencionó, los principales efectos de la carbonatación en el concreto son agrietamientos, desprendimiento parcial o total de la estructura. En la Figura 2.11, se puede observar el desprendimiento parcial en un elemento de concreto debido a la acción que ejerce la carbonatación.



**Figura 2.11. Elemento de concreto reforzado donde se muestra el alcance de la carbonatación. Fuente: (Ride, 2015).**

Entre estos métodos se encuentra el diseño de recubrimientos específicos, pinturas de protección, métodos adecuados de compactación de concretos, entre otros. La conservación de las estructuras de concreto empieza desde la planificación, escogiendo las mejores técnicas, luego la construcción, que se basa en utilizar las herramientas adecuadas y por último la preservación, que trata de hacer los mantenimientos adecuados para que no decaiga la estructura y se deteriore a través del tiempo (Calvo, R. y Sierra, M. 2015).

A continuación, se enlistan los métodos comúnmente utilizados para la reparación y prevención de la carbonatación:

- Recubrimientos anticarbonatación
- Protección catódica
- Realcalinización
- Inhibidores de corrosión

Los recubrimientos anticarbonatación están específicamente diseñados para detener el ingreso del dióxido de carbono. Un recubrimiento anticarbonatación de alta calidad puede agregar protección a la varilla de refuerzo en una cantidad igual a muchos centímetros de recubrimiento de concreto (Montani, 2000).

Los principales productos anticarbonatación que dan recubrimiento a las estructuras de concreto son las pinturas orgánicas, de las cuales se derivan otros productos con características singulares que se utilizan dependiendo del entorno en donde se encuentra la estructura. A continuación se enlistan los productos que se ocupan como pinturas para dar recubrimiento anticarbonatación en el concreto:

- Goma clorada
- Vinílicos
- Uretanos
- Epóxicas
- Acrílicas

- Pinturas bituminosas
- Selladores

Los inhibidores de corrosión son aplicados usualmente cuando la corrosión presente en el concreto es identificada gracias a un análisis minucioso. En el mayor de los casos, aunque se aplique un recubrimiento anticarbonatación en el concreto, solo ayudará a reducir el paso de la carbonatación, sin embargo, la corrosión seguirá desarrollándose debido a la humedad atrapada dentro del concreto (Montani, 2000).

El método de aplicación dependerá del material al cual se desea proteger. Puede ser de manera puntual, en una sola aplicación, o graduales y controladas (espray o rodillos en la superficie del concreto). Así mismo, su uso está restringido a un sistema cerrado o semi-cerrado (Godínez, Meas, Ortega-Borges, y Corona, 2003).

Para lograr una mayor efectividad ante la carbonatación, se puede agregar el recubrimiento anticarbonatación después de la aplicación del inhibidor. En la Figura 2.12, se ejemplifica el uso de un producto inhibidor de corrosión en un elemento de concreto que ya ha sido carbonatado, y por tanto, ha sufrido desprendimiento local, dejando al acero de refuerzo expuesto a la intemperie.



**Figura 2.12. Aplicación de un producto inhibidor de corrosión sobre el acero de refuerzo de un elemento de concreto. Fuente: (Pérsico, 2014).**

La protección catódica (PC) se aplica cuando el concreto tiene daños severos de corrosión debido a la carbonatación y a una mal estrategia de protección en los primeros años de vida de la estructura.

El fundamento de la protección catódica es situar el potencial electroquímico de una estructura por debajo de su potencial normal de reducción, en condiciones donde la velocidad de corrosión es baja. Esto se consigue aportando una determinada cantidad de corriente de protección a la estructura, la que proviene de una fuente externa de corriente continua, en la que el polo negativo se conecta al metal a proteger y el polo positivo a un ánodo auxiliar inerte, cerrándose el circuito a través de un electrólito (Ojeda, 2016).

Esta es una opción costosa y requiere la continuidad eléctrica del refuerzo, así como también costos sustanciales para el mantenimiento progresivo (Montani, 2000).

## **CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA**

En este capítulo se detalla el procedimiento desarrollado para la elaboración de especímenes de concreto, utilizando el jal en proporciones de 5, 10 y 15% como sustituto del cemento.

Inicialmente se realizaron 12 especímenes cilíndricos de concreto de 15 cm de diámetro por 30 cm de alto con una resistencia a la compresión  $f'c = 150 \text{ kg/cm}^2$ , de acuerdo con la norma ASTM C31. Se desarrollaron 4 tipos de mezclas, la primera sin ninguna sustitución de cemento y las otras 3 sustituyendo el material cementante por jal en las diferentes proporciones propuestas. El curado de los especímenes se realizó bajo el método por inmersión en agua durante 28 días, de acuerdo con la norma ASTM C31: “Práctica Normalizada para Preparación y Curado de Especímenes de Ensayo de Concreto en la Obra” (ASTM, 2008).

### **3.1. Diseño de mezcla.**

El diseño de la mezcla se elaboró mediante el procedimiento descrito por el *American Concrete Institute* “Práctica Estándar para Seleccionar el Proporcionamiento de Concreto de Peso Normal, Pesado y Masivo”, por el método de volúmenes absolutos, cuyo objetivo principal es el de conocer las características de los materiales para encontrar las proporciones adecuadas de los mismos para lograr los resultados deseados en el concreto (ACI, 2002).

#### **Peso volumétrico (peso unitario).**

De acuerdo con la norma ASTM C29-07, se utilizó un recipiente para peso volumétrico de dimensiones conocidas y una balanza analítica, para obtener los pesos unitarios de los agregados y del jal (ASTM, 2007). Para cada uno de los materiales se utilizaron recipientes de diferentes medidas. En la Tabla 3.1 se muestran las características de los tres recipientes que se utilizaron.

Tabla 3.1. Características de los recipientes empleados para obtener el peso volumétrico de los materiales.

Material	Diámetro (m)	Altura (m)	Peso (gr)	Volumen (m <sup>3</sup> )
Grava	0.169	0.22	3263	0.0049
Arena	0.190	0.20	3672	0.0057
Jal	0.160	0.14	2637	0.0028

Se llenó cada uno de los recipientes con los materiales correspondientes y se obtuvo el peso del recipiente más el peso del material, como se muestra en la Figura 3.1.

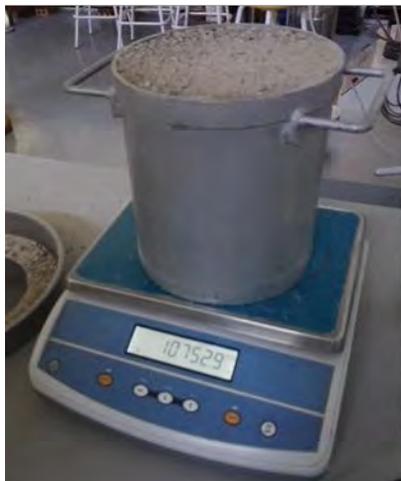


Figura 3.1. Obtención del peso volumétrico de los agregados y del jal.

Para la obtención del peso volumétrico se utilizó la siguiente ecuación 2:

$$P.V.S.S. = \frac{W_m}{V_r} \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

- P.V.S.S, es el Peso Volumétrico Seco Suelto, en kg/m<sup>3</sup>
- W<sub>m</sub>, es el peso del material (peso de recipiente con material – peso de recipiente), en kg.
- V<sub>r</sub>, es el volumen de recipiente, en m<sup>3</sup>

En la Tabla 3.2, se muestran los pesos volumétricos de los materiales.

**Tabla 3.2. Peso volumétrico de los agregados y el jal.**

<b>Material</b>	<b>Peso de material (kg)</b>	<b>Volumen de recipiente (m<sup>3</sup>)</b>	<b>P.V.S.S. (kg/m<sup>3</sup>)</b>
Grava	6.08	0.0049	1240.8
Arena	7.08	0.0057	1242.1
Jal	3.53	0.0028	1260.7

### **Peso específico del agregado fino**

Siguiendo la norma ASTM C128-04a, se obtuvo el peso específico de la arena (ASTM, 2004). Se introdujo una cantidad de arena al horno y se dejó durante 24 ± 5 horas a 110° C. Posteriormente se saturó la muestra durante 24 ± 5 horas. Después de transcurrido el tiempo de saturación, se decantó la muestra para eliminar los finos asentados en el recipiente mientras se retiraba el agua de la muestra. Consecutivamente, se colocó el recipiente con la muestra sobre una parrilla eléctrica a una cierta temperatura hasta que se obtuvo el agregado fino saturado superficialmente seco (S.S.S.), corroborando dicho estado con la prueba del cono pisón.

Una vez obteniendo el agregado fino (S.S.S.) se introdujo con ayuda de un embudo, una muestra de 200 gramos en un matraz aforado para posteriormente agregar agua con una temperatura de  $23 \pm 3^\circ \text{C}$  hasta la marca de aforo del matraz. A través de medios manuales se agitó el matraz durante 20 minutos, eliminando el aire atrapado dentro del agregado fino. Se volvió a agregar agua al matraz hasta la marca y se obtuvo el peso (ASTM, 2004). En la Figura 3.2, se observa el peso del matraz con agua y el peso del matraz con agua y el material.



**Figura 3.2. Obtención del peso específico del agregado fino.**

Inmediatamente después de obtener el peso de la muestra, se vació en un recipiente y se introdujo al horno a una temperatura de  $110 \pm 5^\circ \text{C}$  durante 24 horas para posteriormente obtener el peso de la muestra seca. En la Tabla 3.3, se muestran los pesos conseguidos durante el proceso para la obtención del peso específico del agregado fino.

**Tabla 3.3. Pesos conseguidos durante el proceso para la obtención del peso específico del agregado fino.**

<b>Matraz + agua (gr)</b>	<b>Matraz + agua + arena (gr)</b>	<b>Muestra S.S.S. (gr)</b>	<b>Muestra seca al horno (gr)</b>
Wmw	Wmwa	Wmsss	Ws
694	788	200	195

Las siguientes expresiones matemáticas se utilizaron para obtener los valores del peso específico del agregado fino (ecuaciones 3 y 4):

$$\text{Peso específico aparente} = \frac{W_{msss}}{W_{mw} + W_{msss} - W_{mwa}} \quad (\text{Ec. 3})$$

$$\text{Porcentaje de absorción} = \frac{W_{msss} - W_s}{W_s} * 100 \quad (\text{Ec. 4})$$

En la Tabla 3.4, se muestra el peso específico del agregado fino y el porcentaje de absorción.

**Tabla 3.4. Peso específico y porcentaje de absorción del agregado fino.**

	<b>Resultado</b>
<b>Peso específico aparente (S.S.S.) (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	1.89
<b>Absorción (%)</b>	2.41

### **Peso específico del agregado grueso**

Esta prueba se realizó bajo la normativa ASTM C127-04 “Método de Ensayo Normalizado para Determinar la Densidad, la Densidad Relativa (Gravedad Específica), y la Absorción de Agregados Grueso” (ASTM, 2009).

Se inició con el cuarteo del material, con el fin de obtener una cantidad de agregado heterogéneo, para después depositarlo en un recipiente y agregar agua para saturarlo durante  $24 \pm 5$  horas. Una vez terminado este proceso, el agregado

se depositó en una tela para eliminar el agua contenida en la superficie del material, con el objetivo de obtener el peso del agregado saturado superficialmente seco ( $W_{sss}$ ). Posteriormente, se colocó la muestra en una canastilla de peso conocido y se sumergió en un recipiente con agua a  $23 \pm 2^\circ \text{C}$ ; así se obtuvo el valor de peso aparente sumergido en agua ( $W_{sum}$ ). Después, se metió el material al horno a una temperatura de  $110 \pm 5^\circ \text{C}$  durante  $24 \pm 5$  horas para obtener el peso seco de la muestra ( $W_s$ ). En la Figura 3.3, se muestra el proceso mediante el cual se obtuvo el peso específico del agregado grueso. En la Tabla 3.5, se muestran los pesos obtenidos del agregado grueso en las diferentes condiciones en las que se sometió.



**Figura 3.3. Procedimiento para obtener el peso específico del agregado grueso.**

**Tabla 3.5. Pesos conseguidos durante el proceso para la obtención del peso específico del agregado grueso.**

<b>Peso de muestra S.S.S. (gr)</b>	<b>Peso aparente sumergido en agua (menos canastilla) (gr)</b>	<b>Peso de muestra seca al horno (gr)</b>
W <sub>sss</sub>	W <sub>sum</sub>	W <sub>s</sub>
2006	1240	1984

Las siguientes expresiones matemáticas se utilizaron para obtener los valores del peso específico del agregado grueso (ecuaciones 5 y 6):

$$\text{Peso específico de la grava} = \frac{W_s}{W_{sss} - W_{sum}} \quad (\text{Ec. 5})$$

$$\text{Porcentaje de absorción} = \frac{W_{sss} - W_s}{W_s} * 100 \quad (\text{Ec. 6})$$

En la Tabla 3.6, se muestra el peso específico de la grava y el porcentaje de absorción.

**Tabla 3.6. Peso específico y porcentaje de absorción del agregado grueso.**

	<b>Resultado</b>
<b>Peso específico (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	2.60
<b>Absorción (%)</b>	1.07

### **Peso específico del jal**

Para obtener el peso específico del jal se realizó el mismo procedimiento que se utilizó para el agregado fino, siguiendo la norma ASTM C128-04a. En la Tabla 3.7, se muestran los resultados correspondientes al peso específico del jal.

**Tabla 3.7. Peso específico y porcentaje de absorción del jal.**

	<b>Resultado</b>
<b>Peso específico</b> (gr/cm <sup>3</sup> )	2.40
<b>Absorción</b> (%)	1.14

### **Contenido de humedad**

Para obtener el contenido de humedad de los agregados pétreos se tomó una muestra de cada material en humedad natural; después se realizó el cuarteo para posteriormente pesar una cantidad específica de los materiales ( $W_{ss}$ ). Una vez obtenida la cantidad de material deseada se introdujo al horno a  $110 \pm 5^\circ \text{C}$  durante 4 horas. Una vez retirado el material del horno se dejó enfriar a temperatura ambiente y se obtuvo el peso seco de la muestra ( $W_s$ ). Con la siguiente expresión matemática se obtuvo el contenido de humedad de cada material (ecuación 7):

$$\text{Contenido de humedad (\%)} = \frac{W_{ss} - W_s}{W_s} * 100 \quad (\text{Ec. 7})$$

En la Tabla 3.8, se muestran los resultados obtenidos del contenido de humedad de los agregados pétreos.

**Tabla 3.8. Contenido de humedad de los agregados pétreos.**

<b>Agregado</b>	<b>Contenido de humedad</b> (%)
Grueso	2.09
Fino	3.26

### **Módulo de finura**

De acuerdo con la norma ASTM C136-05, se realizó la prueba del módulo de finura, la cual consiste en tamizar 500 gramos de agregado fino en humedad natural (Figura 3.4). Una vez obtenidos los pesos retenidos en cada tamiz, se realizan las operaciones para obtener los porcentajes de material retenido acumulado.



**Figura 3.4. Proceso de tamizado por medios mecánicos para la obtención del módulo de finura.**

El módulo de finura se obtiene de la sumatoria de los porcentajes de retenido acumulado dividido entre 100. En la Tabla 3.9, se muestran los resultados obtenidos del proceso de tamizado.

**Tabla 3.9. Obtención del módulo de finura.**

<b>Malla no.</b>	<b>Peso retenido</b>	<b>% retenido</b>	<b>% pasa</b>	<b>% retenido acumulado</b>
3/8"	0.0	0.00	100.00	0.00
4	65.5	6.50	93.50	6.50
8	188.9	18.89	74.61	25.39
16	177.0	17.70	56.91	43.09
30	145.9	14.59	42.32	57.68
50	152.4	15.24	27.08	72.42
100	125.4	12.64	14.54	85.46
200	100.3	10.03	4.51	95.49
Charola	45.7	4.57	0.06	100.06
			$\Sigma(3/8-100)=$	290.54
<b>Módulo de finura</b>				<b>2.91</b>

Una vez obtenidos los parámetros necesarios de los agregados pétreos, tomando en cuenta una resistencia a la compresión del concreto  $f'_c=150 \text{ kg/cm}^2$ , y un revenimiento máximo de 100 mm, se realizó el diseño de la mezcla. En la Tabla 3.10, se muestran valores utilizados para el diseño de la mezcla de concreto.

**Tabla 3.10. Valores utilizados para el diseño de la mezcla de concreto (ACI, 2002).**

<b>Datos para diseño de mezcla</b>	
Revenimiento (mm)	Máximo 100 y mínimo 25
Tamaño máximo del agregado (mm)	19
Resistencia a la compresión ( $\text{kg/cm}^2$ )	150
Relación agua-cemento de acuerdo a la resistencia a la compresión	0.79
Peso específico del cemento ( $\text{gr/cm}^3$ )	3.15
Peso volumétrico del agregado grueso ( $\text{gr/cm}^3$ )	1.24
Peso volumétrico del agregado fino ( $\text{gr/cm}^3$ )	1.24
Peso volumétrico del jal ( $\text{gr/cm}^3$ )	1.26
Peso específico de agregado grueso ( $\text{gr/cm}^3$ )	2.60
Peso específico de agregado fino ( $\text{gr/cm}^3$ )	1.89
Peso específico del jal ( $\text{gr/cm}^3$ )	2.40
Módulo de finura	2.91
Porcentaje de absorción del agregado grueso (%)	1.07
Porcentaje de absorción del agregado fino (%)	2.41
Porcentaje de absorción del jal (%)	1.14
Contenido de humedad del agregado grueso (%)	2.09
Contenido de humedad del agregado fino (%)	3.26

De acuerdo con las dimensiones de los especímenes de concreto que se elaboraron con medidas de 15 cm de diámetro por 30 cm de altura, se obtuvieron las siguientes dosificaciones de material para la elaboración de las 4 mezclas, utilizando el jal en 5%, 10% y 15% como sustituto del cemento Portland ordinario. En la Tabla 3.11 se muestran la dosificación de materiales para la elaboración del concreto sin adición de jal (0%) y en las Tablas 3.12, 3.13 y 3.14 se muestran las dosificaciones para la elaboración de las mezclas sustituyendo el cemento por el jal en los respectivos porcentajes.

**Tabla 3.11. Dosificación de materiales para la elaboración de la mezcla de concreto con 0% de jal.**

Relación agua-cemento	Agua (kg/m <sup>3</sup> )	Agregado grueso (kg/m <sup>3</sup> )	Agregado fino (kg/m <sup>3</sup> )	Cemento (kg/m <sup>3</sup> )	Jal (kg/m <sup>3</sup> )
0.79	190.98	727.01	792.59	259.49	0.00

**Tabla 3.12. Dosificación de materiales para la elaboración de la mezcla de concreto con 5% de jal.**

Relación agua-cemento	Agua (kg/m <sup>3</sup> )	Agregado grueso (kg/m <sup>3</sup> )	Agregado fino (kg/m <sup>3</sup> )	Cemento (kg/m <sup>3</sup> )	Jal (kg/m <sup>3</sup> )
0.79	190.98	727.01	792.59	246.52	12.97

**Tabla 3.13. Dosificación de materiales para la elaboración de la mezcla de concreto con 10% de jal.**

Relación agua-cemento	Agua (kg/m <sup>3</sup> )	Agregado grueso (kg/m <sup>3</sup> )	Agregado fino (kg/m <sup>3</sup> )	Cemento (kg/m <sup>3</sup> )	Jal (kg/m <sup>3</sup> )
0.79	190.98	727.01	792.59	233.54	25.95

**Tabla 3.14. Dosificación de materiales para la elaboración de la mezcla de concreto con 15% de jal.**

Relación agua-cemento	Agua (kg/m <sup>3</sup> )	Agregado grueso (kg/m <sup>3</sup> )	Agregado fino (kg/m <sup>3</sup> )	Cemento (kg/m <sup>3</sup> )	Jal (kg/m <sup>3</sup> )
0.79	190.98	727.01	792.59	220.57	38.92

### **3.2. Elaboración de especímenes**

Para la elaboración de los especímenes de concreto, primero se cribó el jal, obteniendo las cantidades indicadas en las dosificaciones de la mezcla. En el cribado se utilizó la malla No. 200 (0.074 mm) para poder ser utilizado como material cementante y sustituirlo por cemento Portland. Se pesaron todos los materiales a utilizar en la mezcla de acuerdo con el volumen requerido por el molde cilíndrico, el cual tiene las dimensiones de 15 cm de diámetro por 30 cm de altura.

Una vez obtenidos todos los materiales, se humedeció una superficie limpia para evitar pérdida de humedad al momento de la realización de la mezcla. Después, se vertieron los agregados pétreos y se continuó con el cuarteo del material para obtener un material heterogéneo. Posteriormente, se acomodaron los materiales a manera de un montículo con forma de cráter de volcán para poder agregar, en el centro, el cemento y el jal para después agregar un 50% del agua establecida en el diseño de la mezcla.

Se continuó con el paleo de afuera hacía adentro y se le fue agregando el agua restante, hasta lograr una mezcla homogénea. Para corroborar la trabajabilidad de la mezcla, se realizó la prueba de revenimiento con ayuda de una placa, un cono de "Abrams" y una varilla punta de bala. Se vertió la mezcla a un tercio del cono y se introdujo la varilla punta de bala en la mezcla por 25 veces repetidas para eliminar el aire atrapado dentro de la mezcla. Este procedimiento se repitió dos ocasiones más hasta que el cono se llenó de mezcla. Una vez lleno, se retiró el cono y se

colocó a un lado de la mezcla y la varilla punta de bala se puso en la parte más alta del cono y, con ayuda de un flexómetro, se midió la distancia entre la parte superior de la mezcla hasta la varilla. Una vez verificado el revenimiento, se continuó con introducir el material dentro de los moldes cilíndricos de la misma manera que en cono Abrams, utilizando el mismo método para eliminar el aire atrapado dentro de la mezcla.

Este procedimiento se realizó para las 4 mezclas con diferentes dosificaciones de material cementante. En la Figura 3.5, se muestra el procedimiento realizado en la elaboración de los especímenes de concreto.



**Figura 3.5. Elaboración de especímenes de concreto.**



Los especímenes fueron trasladados al laboratorio “Laboratorio de Materiales JP y MS S.A. de C.V” en donde se realizó la prueba a la compresión. Primero se pesaron y se obtuvieron las dimensiones exactas de los especímenes y después se realizó el cabeceo de cada uno, utilizando mortero azufre, conforme a la norma NMX-C-109-ONNCCE-2012 “Industria de la Construcción – Concreto – Cabeceo de Especímenes”. El cabeceo consistió en calentar el mortero azufre a una temperatura de  $140^{\circ} \pm 10^{\circ} \text{ C}$ , después se lubricó la placa cabeceadora y se vertió el mortero azufre fundido sobre la misma. Posteriormente, se colocó la parte superior del espécimen de concreto sobre el material, dejando que se enfríe el mortero azufre durante 5 minutos. Una vez solidificado el mortero azufre, se realizó el mismo procedimiento para la parte inferior del espécimen. Dicho proceso se realizó para 4 especímenes, cada uno con una dosificación diferente. En la Figura 3.7, se muestra el cabeceo de los cilindros de concreto.



**Figura 3.7. Cabeceo de los especímenes de concreto con mortero azufre.**

Una vez terminado el proceso de cabeceo de los especímenes, se colocó cada uno de los mismos sobre la placa inferior de la máquina de ensaye y se bajó la placa superior hasta lograr un ligero contacto con el espécimen.

Después se le aplicó una velocidad constante al espécimen de  $200 \text{ kf/cm}^2/\text{min}$  hasta alcanzar la carga máxima del concreto. En la Figura 3.8, se muestra el ensaye a la compresión de los especímenes.



**Figura 3.8. Prueba de la resistencia a la compresión de los especímenes de concreto.**

### **3.4. Pruebas de carbonatación**

La cámara de carbonatación acelerada que se utilizó para esta investigación cuenta con las siguientes dimensiones: 1.78 m de largo por 0.96 m de alto por 1.20 m de ancho. A un costado de la cámara de carbonatación se instaló un tanque con capacidad de 25 kg de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), el cual tiene como finalidad acelerar la presencia de dióxido de carbono en el ambiente en el que se expusieron

los especímenes. En la Figura 3.9, se muestra la cámara de carbonatación acelerada utilizada en la presente investigación.



**Figura 3.9. Cámara de carbonatación acelerada**

Se introdujeron 4 especímenes a la cámara de carbonatación acelerada, cada uno de diferente dosificación durante 30 horas de exposición, con una humedad relativa de 60 a 70%. Después de concluido el tiempo de carbonatación, se retiraron los especímenes.

Posteriormente, se introdujeron 4 especímenes más con las mismas características que los anteriores, dejando estos últimos por 36 horas de exposición y al concluir, se retiraron los cilindros de concreto. Éstos fueron trasladados nuevamente al laboratorio “Laboratorio de Materiales JP y MS S.A. de C.V”, donde se realizó la prueba para obtener la resistencia a la compresión de los especímenes después del proceso de carbonatación. El procedimiento para obtener la resistencia de los especímenes fue el mismo proceso realizado en el apartado “3.3. Prueba de la resistencia a la compresión”. En la Figura 3.10, se muestran los especímenes de concreto dentro de la cámara de carbonatación acelerada.



**Figura 3.10. Especímenes expuestos al CO<sub>2</sub> dentro de la cámara de carbonatación acelerada.**

### **3.4.1. Fenolftaleína**

Para aplicar la prueba de la fenolftaleína (indicador de pH), primero se preparó la solución, la cual consistió en disolver 10 gramos de fenolftaleína en polvo en 1 litro de alcohol etílico.

Una vez preparado el indicador de pH, se realizó un corte vertical, en aproximadamente 1/3 de la altura, en los especímenes de concreto previamente expuestos al CO<sub>2</sub> durante 30 y 36 horas. Después, con ayuda de un atomizador se roció la fenolftaleína en el corte realizado en cada cilindro de concreto, marcándose de color fucsia el área sana e incolora el área carbonatada. Una vez finalizado este proceso, se continuó con la medición del área carbonatada con ayuda de un vernier, como se muestra en la Figura 3.11.



**Figura 3.11. Medición del área carbonatada con ayuda de un Vernier.**

### **3.4.2. pH**

Este método fue llevado a cabo con el fin de identificar el nivel de acidez del concreto dependiendo del tiempo en que estuvo expuesto cada cilindro en la cámara al dióxido de carbono.

Con la ayuda de un taladro y tres brocas de distintos tamaños se realizaron perforaciones de 2, 4 y 6 centímetros, dichas medidas fueron tomadas con la ayuda de un vernier; de los cuales el diámetro iba siendo más pequeño gradualmente. En cada perforación se extraía el concreto pulverizado, registrando la muestra de acuerdo con la medida de la perforación y al tiempo en que estuvo expuesto el cilindro, como se muestra en la Figura 3.12.

Una vez tomadas las muestras se midió el grado de acidez de cada una con la ayuda de un potenciómetro, para ello la muestra se mezcló con una solución buffer de fosfato la cual posee un pH neutro, la cual sirve de referencia para conocer el pH

del concreto tras haber sido expuesto al CO<sub>2</sub>. Posteriormente se hizo un registro del pH de las muestras arrojado por el potenciómetro para evaluar el comportamiento de la exposición al CO<sub>2</sub>. Cabe mencionar que para la medición del pH se realizó para especímenes diseñados para 100 kg/cm<sup>2</sup> ya que se deseaba tener mayor penetración de CO<sub>2</sub>.



**Figura 3.12. Perforación de los cilindros y medición de la perforación.**

# **CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

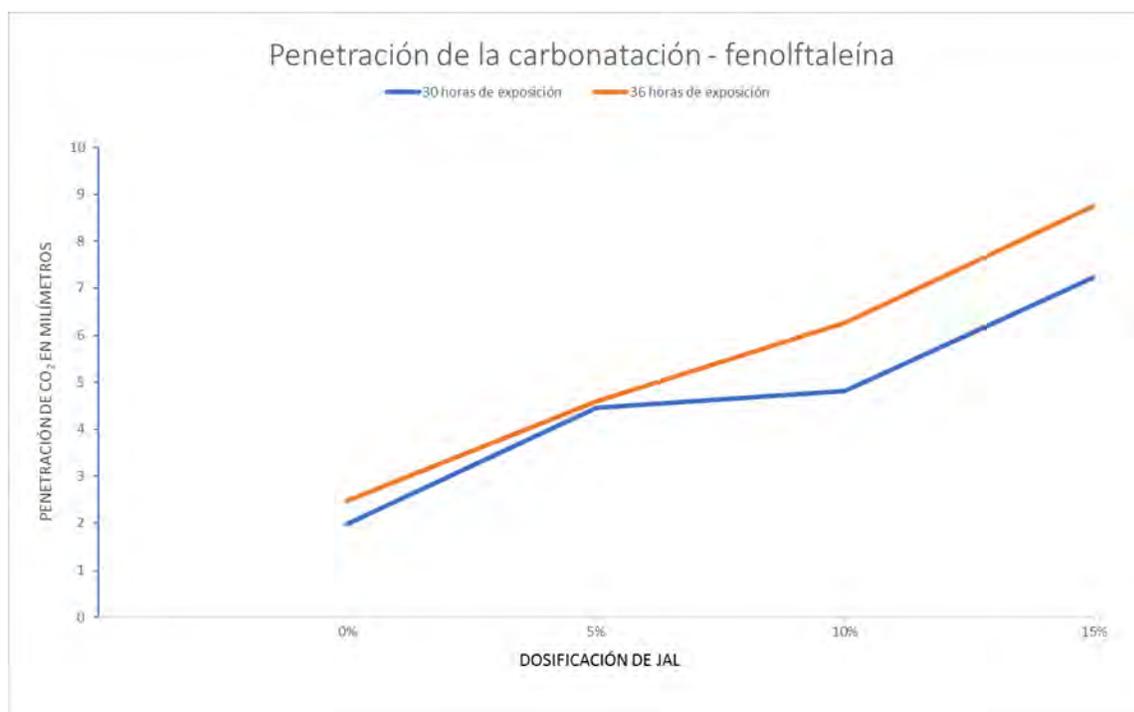
#### **4.1. Prueba de la Fenolftaleína en la carbonatación en el concreto**

El método más común para determinar la profundidad de carbonatación en concreto es usando un indicador ácido-base de color (solución de fenolftaleína), la cual se aplica en la superficie del corte en el concreto que se pretende analizar. Sin embargo, esta técnica sólo indica un valor aproximado de pH, ya que la fenolftaleína presenta un rango de viraje de pH de 8.2 a 10.0, siendo incolora por debajo de 8.2 y presentando un color rosado fuerte (fucsia) por encima de 10. Por lo tanto, la prueba de la fenolftaleína sólo nos indica cuando el concreto tiene un pH menor de 8.2 o mayor de 10.0 (Moreno, 2006). Para medir el perfil de carbonatación dentro de la cámara, se realizaron monitoreos de 30 y 36 horas de exposición y se hizo la medición de la profundidad de concreto carbonatado (Tabla 4.1).

Tabla 4.1. Perfil de carbonatación para las distintas dosificaciones de jal como cementante.

	0% de jal	5% de jal	10% de jal	15% de jal
30 horas de exposición				
36 horas de exposición				

La Figura 4.1 muestra cómo el perfil de carbonatación (penetración en milímetros) aumenta en función del tiempo de exposición de los especímenes dentro la cámara de carbonatación para sistemas diseñados con un  $f'c= 150 \text{ kg/cm}^2$ . El proceso de carbonatación muestra un comportamiento lineal en la penetración del  $\text{CO}_2$ , aumentando 2 mm aproximadamente al incrementar la dosificación del jal como cementante en función del tiempo de exposición, lo cual indica que la velocidad de carbonatación es constante en estas condiciones de funcionamiento (temperatura, gasto de  $\text{CO}_2$  y humedad). Al mostrar esta linealidad de los especímenes con jal como cementante, se puede realizar una proyección del perfil de carbonatación al estar expuestos a un mayor tiempo, además que dicha linealidad da mayor validez a los resultados obtenidos porque ningún parámetro se obtiene de los valores de pH esperados (valores entre 7 y 11 de pH). Se ha reportado en la literatura que especímenes expuestos a condiciones como el 70% de humedad, temperatura ambiente y con concentración de  $\text{CO}_2$  tienden a tener mayor resistencia a la compresión a edades de exposición hasta los 28 días (Carvajal, Silva, Valiente y Venegas, 2007).



**Figura 4.1. Prueba de fenolftaleína en la penetración de  $\text{CO}_2$  para los sistemas con  $f'c= 150\text{kg/cm}^2$  y jal como cementante.**

## 4.2. Medición del pH

Para la medición del pH, se realizaron muestreos a distintas profundidades 2, 4 y 6 cm en función del tiempo de exposición de los especímenes dentro de la cámara de carbonatación. En la Figura 4.2 se observa que el pH disminuye en forma constante conforme el tiempo de exposición aumenta. El pH disminuye 1 a 2 valores de magnitud comenzando con un pH cercano a 10.5 después de 6 horas de exposición para especímenes con un  $f'c=100 \text{ kg/cm}^2$ . Se observa que los especímenes con 15% de jal como cementante muestran un cambio significativo al disminuir el pH en comparación a los demás sistemas en estudio. Esto corrobora los resultados obtenidos con fenolftaleína indicando que hasta una dosificación de 10% de jal como aditivo mineral muestran un comportamiento muy similar a especímenes convencionales.

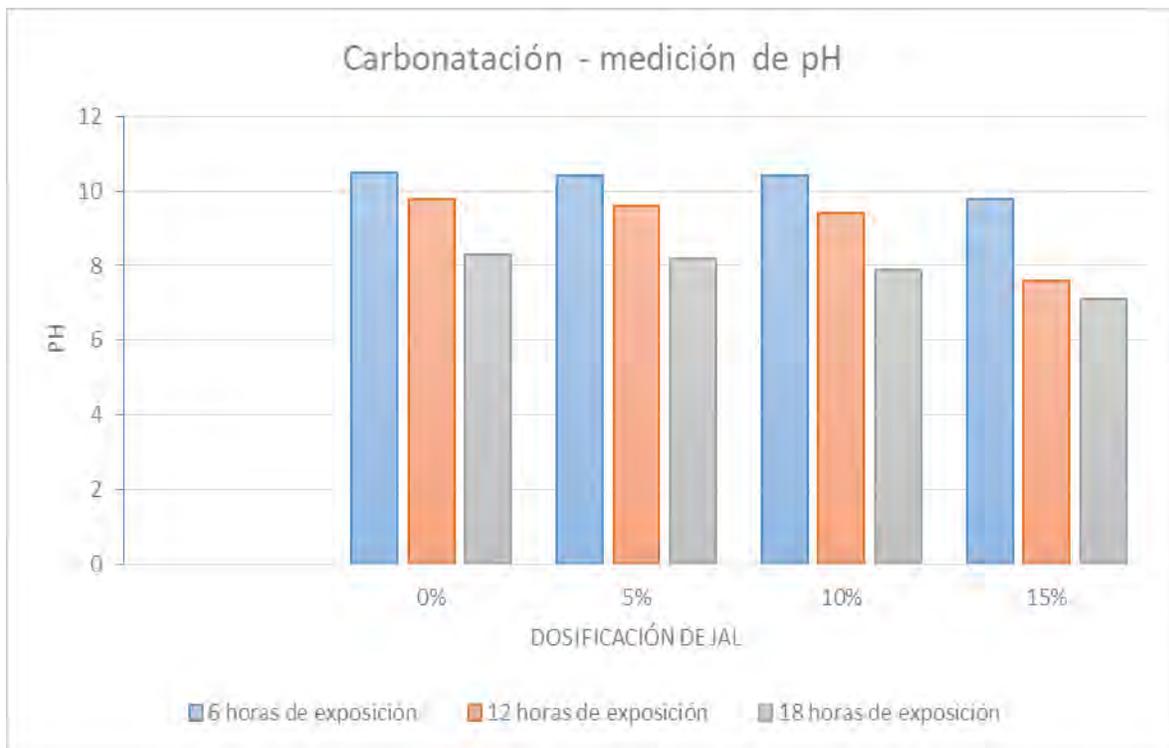
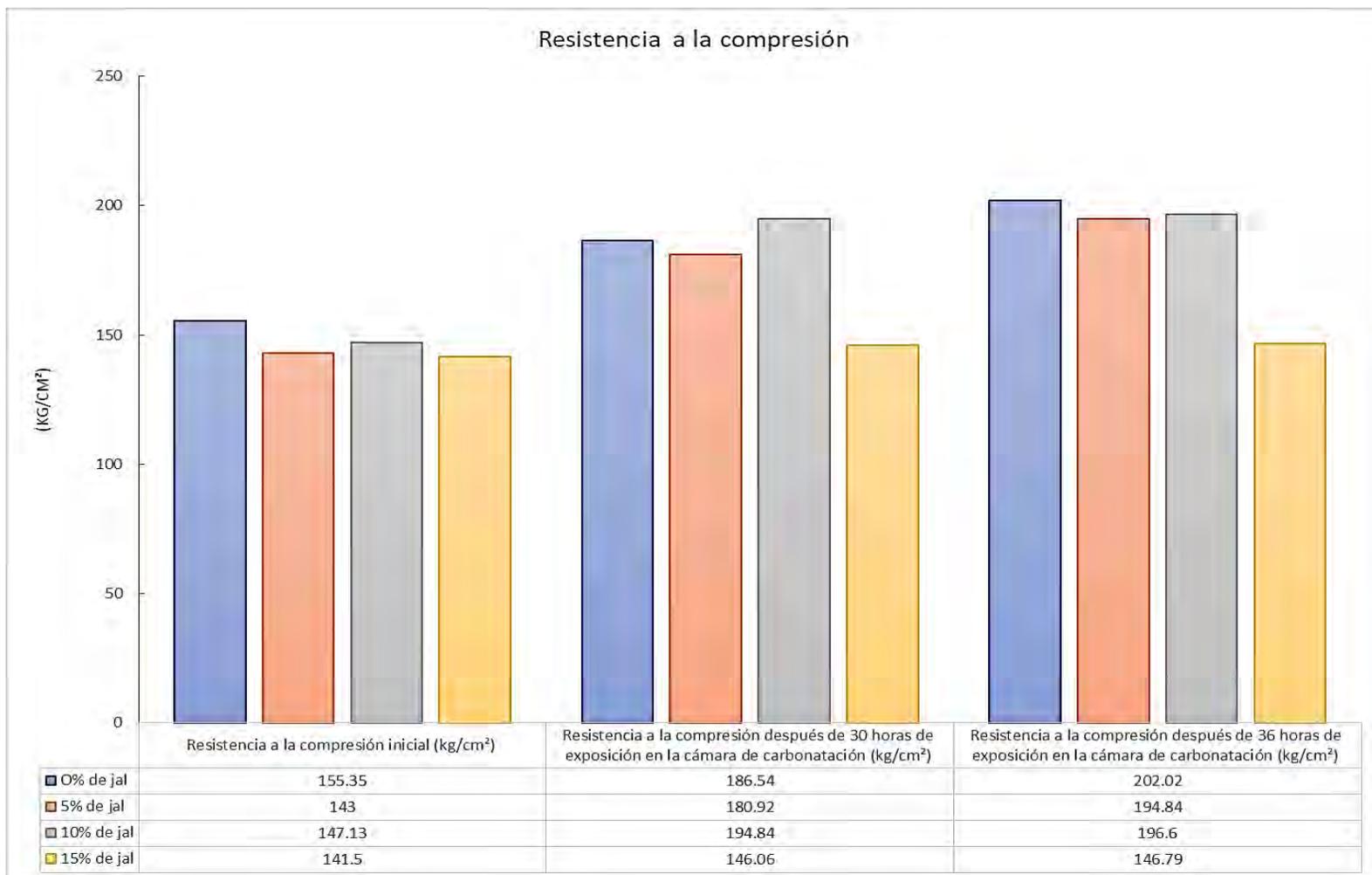


Figura 4.2. Prueba de pH en la penetración de  $\text{CO}_2$  para los sistemas con  $f'c=100 \text{ kg/cm}^2$  y jal como cementante.

Se ha reportado en la literatura que el uso de aditivos minerales, como en el caso del humo de sílice (Li, 2011), mejoran la resistencia a la compresión de los especímenes dosificados hasta con un 15% de aditivo mineral como cementante. En este estudio se reporta que la mejor relación o dosificación de jal es hasta un 10% como sustituto del material cementante. Cabe señalar que el jal se comporta según lo esperado como un aditivo mineral parecido al humo de sílice de acuerdo a su alta concentración de  $\text{SiO}_2$ .

#### **4.3. Resistencia a la compresión para los distintos sistemas con jal**

La Figura 4.3 muestra los diferentes ensayos de resistencia a la compresión, con base en la norma NMX-C-083-ONNCCE-2014 de los sistemas en estudio diseñados para un  $f'c = 150 \text{ kg/cm}^2$ . Las resistencias a la compresión de los diferentes sistemas con jal como cementante y al estar expuestos en la cámara de carbonatación muestran un aumento significativo hasta una dosificación de 10% de jal ya que para la dosificación más alta en estudio (15% de jal como aditivo mineral) el aumento es prácticamente nulo.



**Figura 4.3. Resistencia a la compresión para los distintos sistemas con jal como cementante expuestos a la cámara de carbonatación.**

## CONCLUSIONES

Se establecieron las condiciones necesarias para reproducir un ambiente con la humedad y concentración de CO<sub>2</sub> en una cámara de carbonatación acelerada de manera que se obtuvo reproducibilidad, repetibilidad y confiabilidad en los resultados obtenidos.

La interacción del CO<sub>2</sub> aumentó al usar 15% en la dosificación de jal como cementante, modificando considerablemente la resistencia a la compresión del concreto comparado con un concreto sin aditivo mineral (jal).

El concreto elaborado con residuo minero como cementante tiene un comportamiento mecánico similar a un concreto convencional hasta una dosificación de 10%.

El estudio de carbonatación indica que hasta una dosificación de 10% de jal como cementante en la mezcla de concreto, muestra que los parámetros de carbonatación (fenolftaleína y pH) no sufren un cambio significativo, comparados con un concreto convencional.

Los resultados de pH obtenidos para los diferentes sistemas en estudio corroboran que la penetración de CO<sub>2</sub> es constante conforme el tiempo de exposición de los especímenes dentro de la cámara de carbonatación, indicando que los especímenes con 15% de jal como aditivo mineral aumentan el daño por carbonatación.

## **Recomendaciones para la continuación de esta línea de investigación**

- Realizar el estudio comparativo de un aditivo minero comercial y el aditivo propuesto (jal).
- Realizar más pruebas mecánicas del concreto elaborado con jal.
- Estudiar el efecto electroquímico de la combinación de otro aditivo en la mezcla de concreto elaborado con jal.
- Hacer un análisis de costos al reutilizar el residuo minero.
- Realizar un estudio con distintos diseños de mezclas y hacer una comparativa de parámetros de corrosión.

## **Bibliografía**

ACI 211.1-91. (2002). *Práctica Estandar para Seleccionar el Proporcionamiento de Concreto de Peso Normal, Pesado y Masivo.*

ACI 116R-00. (2005). *Cement and Concrete Terminology.*

ACI. (2014). *Certificación internacional (ACI).* [Figura]. Recuperado el 2 de febrero de 2018, de <http://www.acimexico-snem.org/online/certificacion-internacional-aci-para-tecnicos-en-pruebas-al-concreto-grado-i/>.

ASTM C128-04a. (2004). *Método de Ensayo Normalizado para Determinar la Densidad, la Densidad Relativa (Gravedad Específica), y la Absorción de Agregados Finos.* ASTM International, West Conshohocken, PA. Recuperado de <https://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/C128-04a-SP.htm>

ASTM C136. (2005). *Método de Ensayo Normalizado para la Determinación Granulométrica de Agregados Finos y Gruesos.* ASTM International, West Conshohocken, PA. Recuperado de <https://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/C136C136M-05-SP.htm>

ASTM C29. (2007). *Método de ensaye estandar para determinar la densidad en masa (peso unitario) e índice de huecos en los agregados.* ASTM International, West Conshohocken, PA. Recuperado de <https://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/C29C29M-07-SP.htm>

ASTM-C150. (2007). *Historical Standar. Especificación Normalizada para Cemento Portland.* ASTM International, West Conshohocken, PA. Recuperado de <https://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/C150-07-SP.htm>

- ASTM C31. (2008). *Práctica Normalizada para Preparación y Curado de Especímenes de Ensayo de Concreto en la Obra*. ASTM International, West Conshohocken, PA. Recuperado de <https://www.astm.org/Standards/C31C31M-SP.htm>
- ASTM C127. (2009). *Método de Ensayo Normalizado para Determinar la Densidad, la Densidad Relativa (Gravedad Específica), y la Absorción de Agregados Gruesos*. ASTM International, West Conshohocken, PA. Recuperado de <http://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/C127-04-SP.htm>
- ASTM. (2014). *Medición del tamaño de partículas de materiales en polvo*. [Figura]. Recuperado el 10 de enero de 2018, de [https://www.astm.org/SNEWS/SPANISH/SPJA14/e2902\\_spja14.html](https://www.astm.org/SNEWS/SPANISH/SPJA14/e2902_spja14.html).
- Calvo, R., y Sierra, M. (2015). *Proceso de carbonatación de los concretos hidráulicos para pavimento rígido*. (Monografía para obtener el título de especialista en vías terrestres). Universidad de Cartagena. Cartagena de Indias D. T. y C.
- Campbell, D., Sturm, R., y Kosmatka, S. (1991). Detecting Carbonation. *Concrete Technology Today*. Portland Cement Association.
- Campos, A., Fajardo, G., y Mendoza, J. (2016). Estudio del comportamiento del avance de la carbonatación del concreto reforzado en ambiente natural y acelerado. *Concreto y cemento. Investigación y desarrollo*, 8(1), 14-34. Recuperado el 05 de enero de 2018, de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-30112016000200014&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-30112016000200014&lng=es&tlng=es).

- Carvajal, A., Silva, C., Valiente, A. y Venegas, A. (2007). Efectos de la carbonatación acelerada en distintos tipos de cementos y hormigones. *Revista de la Construcción*, 6(1), 88-97. Recuperado el 5 de abril de 2018, de <http://www.registrocdt.cl/registrocdt/www/admin/uploads/docTec/04261039181484517390A17.pdf>.
- Chan, J., Solís, R., y Moreno, E. (2003). Influencia de los agregados pétreos en las características del concreto. *Ingeniería*, 7(2), 39-46. Recuperado el 28 de enero de 2018, de <http://www.redalyc.org/html/467/46770203/>.
- Chávez, E., Pérez, T., Reyes, J., Corvo, F., y Osorno, J. (2010). Carbonatación de concreto en atmósfera y cámara de carbonatación acelerada. *Revista CENIC Ciencias Químicas*, 41(4). Recuperado el 29 de noviembre de 2017, de <http://revista.cnic.edu.cu/revistaCQ/articulos/>.
- Chinchón, S., y Andrade, C. (2016). Indicator of carbonation front in concrete as substitute to phenolphthalein. *Cement and Concrete Research*, 82, 87-91. Recuperado el 9 de marzo de 2018, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S000888461500304X>.
- Do Lago, P., y Castro, P. (2009). A novel method to predict concrete carbonation. *Concreto y cemento. Investigación y desarrollo*, 1(1), 25-35. Recuperado el 15 de febrero de 2018, de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-30112009000100002&lng=es&tlng=en](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-30112009000100002&lng=es&tlng=en).
- Fernández Luco, L. (2010). Propuesta de indicadores de la eficacia del curado en obra. *Concreto y cemento. Investigación y desarrollo*, 1(2), 17-29. Recuperado en 05 de diciembre de 2017, de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-30112010000200002&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-30112010000200002&lng=es&tlng=es).

- Flores, J. (2014). *Efecto de la ceniza volante en las propiedades mecánicas y de durabilidad de morteros de reparación expuestos a ambiente industrial y a condiciones controladas de laboratorio*. (Tesis para obtener el título de maestría). Universidad Autónoma de Nuevo León. Nuevo León.
- Galán, I. (2011). *Carbonatación del hormigón: combinación de CO<sub>2</sub> con las fases hidratadas del cemento y frente de cambio pH*. (Tesis doctoral). Universidad Complutense de Madrid. Madrid.
- Gaspar Tebar , D., y Muñoz Plaza , M. (1998). Acción del CO<sub>2</sub> sobre un cemento portland. *Materiales de construcción*, (165), 37-54. Recuperado el 18 de febrero de 2018, de <http://materconstrucc.revistas.csic.es>.
- Godínez, L., Meas, Y., Ortega-Borges, R., & Corona, A. (2003). Los inhibidores de corrosión. *Revista de metalurgia*, 39(2), 140-158. Recuperado el 12 de marzo de 2018, de <http://revistademetalurgia.revistas.csic.es/index.php/revistademetalurgia/article/view/325>.
- Holcim. (2018). *Concreto*. [Tabla]. Recuperado el 5 de febrero de 2018, de <https://www.holcim.com.mx/concreto>.
- IMCYC. (2005). *Curado del concreto*. *Construcción y Tecnología*, 44-46.
- IMCYC. (2014). *Concreto lanzado*. [Figura]. Recuperado el 4 de marzo de 2018, de <http://imcyc.com/images/CONCRETO%20LANZADO/>.
- Juárez, L., Vela Correa, G., Cruz Chávez, E., Chimal Hernández, A., Acevedo Sandoval, O., y Rivera Becerril, F. (2011). Características de sustratos e identificación de plantas micorrizadas establecidas en presas de jales del distrito minero Pachuca. *Sociedades Rurales, Producción y Medio Ambiente*, 11(21), 97-112.

- Kosmatka, S., Kerkhoff, B., Panarese, W., y Tanesi, J. (2004). *Diseño y Control de Mezclas de Concreto*. Illinois: Portland Cement Association. ISBN: 0-89312-233-5.
- Leandro, J. (2010). *Evaluación del uso de la diatomita como adición mineral en el concreto de alta resistencia*. (Tesis para obtener el título de ingeniero civil). Universidad Ricardo Palma. Lima.
- Li, Z. (2011). *Advanced Concrete Technology*. New Jersey: Jhon Wiley & Sons, Inc. ISBN: 978-0-470-43743-8.
- López, A. (1999). *Uso del humo de sílice y aditivos reductores de agua de alto rango (superplastificantes) en el concreto*. (Tesis para obtener el grado de maestro en ciencias). Universidad Autónoma de Querétaro. Santiago de Querétaro.
- Lottermoser, B. (2010). *Mine Wastes. Characterization, Treatment and Environment Impacts*. Australia: Springer. ISBN: 978-3-642-12418-1.
- Maldonado, R. (2008). *Caracterización mineralógica de fases minerales metálicas en muestras de jales del distrito minero El Oro-Tlalpujahuá*. (Tesis para obtener el grado de ingeniero geólogo). Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México.
- McCormac, J., y Brown, R. (2011). *Diseño de concreto reforzado*. New Jersey: Alfaomega Grupo Editor. ISBN: 978-607-707-231-7.
- McMathis, J. (2015). Stressed brittle, and reactive. [Figura]. Recuperado el 21 de enero de 2018, de <http://ceramics.org/ceramic-tech-today/stressed-brittle-and-reactive-crushing-clinker-at-its-hottest-provides-energy-and-emissions-savings>.
- Merritt, F., Loftin, K., y Ricketts, J. (2008). *Manual del Ingeniero Civil*. McGraw-Hill.

- Metha, K., y Monteiro, P. (1998). *Concreto. Estructura, propiedades y materiales*. México, D.F., México: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C.
- Montani, R. (2000). La carbonatación, enemigo olvidado del concreto. *Construcción y Tecnología*, 39-43. Recuperado el 18 de enero de 2018, de <http://www.imcyc.com/revista/2000/dic2000/carbonatacion.htm>.
- Moreno, E. (2006). Determinación del pH de la solución de los poros de concreto después de un proceso acelerado de carbonatación. *Ingeniería*, 10(3), 5-12. Recuperado el 24 de febrero de 2018, de <http://www.revista.ingenieria.uady.mx/volumen10/determinacion.pdf>.
- N-CMT-2-02-002/02. (2002). *Calidad de agregados pétreos para concreto hidráulico*. Secretaría de Comunicaciones y Transportes.
- NMX-C-160-ONNCCE-2004. (2004). *Industria de la construcción – Concreto – Elaboración y curado en obra de especímenes de concreto*. México. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 27 de julio de 2004.
- NMX-C-148-ONNCCE-2010. (2010). *Industria de la construcción – Concreto – Gabinetes, cuartos húmedos y tanques de almacenamiento para las pruebas de cementantes y concretos hidráulicos – Especificaciones*. México. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 25 de octubre de 2010.
- NMX-C-109-ONNCCE-2012. (2013). *Industria de la construcción – Concreto – Cabeceo de especímenes*. México. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 21 de marzo de 2013.
- NMX-C-083-ONNCCE-2014. (2015). *Industria de la construcción – Concreto – Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes – Método de Ensayo*. México. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 06 de abril de 2015.

- NMX-C-414-ONNCCE-2017. (2018). *Industria de la construcción – Cementantes Hidráulicos – Especificaciones y Método de Ensayo*. México. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 04 de enero de 2018.
- NOM-141-SEMARNAT-2003. (2004). *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 postoperación de presas de jales*. México. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 13 de septiembre de 2004.
- NTC. (2004). *Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto*. Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal. Gaceta Oficial del Departamento del Distrito Federal, México.
- Ojeda, V. (2016). *Avances en la medida de la protección catódica de estructuras metálicas enterradas mediante métodos de desconexión cíclica*. (Tesis doctoral). Universidad Nacional de Educación a Distancia. Madrid.
- Patiño, F., Hernández, J., y Flores, J. (2004). Caracterización de las escombreras de Distrito minero Real del Monte – Pacucha y sus usos industriales alternos.
- Pérsico, J. (2014). *Aditivos inhibidores de corrosión*. [Figura]. Recuperado el 15 de marzo de 2018, de <http://www.revistacyt.com.mx/index.php/contenido/posibilidades-del-concreto/194-aditivos-inhibidores-de-corrosion>.
- Rangel, Y., Prieto, F., Acevedo, O., Gordillo, A., y González, C. (2009). Procesos unitarios de recuperación de residuos de construcción, demolición y jales de la minería: Desarrollos de agregados pétreos. *Estudios Ambientales*, 197-205.

- Ride. (2015). *La carbonatación, enemigo olvidado del concreto*. [Figura]. Recuperado el 15 de marzo de 2018, de <http://www.riderrestauracion.com/plan-estatal-de-fomento-de-rehabilitacion-regeneracion-viviendas/>.
- Sika. (2009). *Curado del concreto. Sika informaciones técnicas*. [Tabla]. Recuperado el 27 de febrero de 2018. ISSN-0122-0594.
- Volpi, V. (2016). *Efecto de corrosión en concreto reforzado elaborado con desecho minero (jal)*. (Tesis de maestría). Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Puebla.