



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Evaluación de la durabilidad del
concreto endurecido y calidad
petrográfica de los agregados**

INFORME DE ACTIVIDADES PROFESIONALES

Que para obtener el título de

Ingeniero Geólogo

P R E S E N T A

Eduardo García Morales

ASESOR DE INFORME

Ing. Javier Mancera Alejándrez



Ciudad Universitaria, CD. MX., 2021

Temario

1. Objetivos	1
2. Introducción	1
<u>Metodologías empleadas</u>	3
3. Marco Teórico	4
<u>Agregados</u>	5
<u>Pasta</u>	7
4. Principales patologías y durabilidad del concreto endurecido	9
5. Revisión de la calidad petrográfica y durabilidad de concreto endurecido y agregados	15
<u>Caso práctico</u>	16
<u>Petrografía</u>	21
a. <i>Evaluación de la calidad petrográfica de los agregados para su uso en concreto</i>	21
b. <i>Evaluación de la calidad petrográfica y análisis de Ingeniería Forense para concreto endurecido</i>	27
<u>Durabilidad</u>	35
a. <i>Determinación de la Resistividad Eléctrica del concreto endurecido</i>	35

b. <i>Determinación de la Permeabilidad Rápida del Ion Cloruro en concreto endurecido</i>	38
c. <i>Determinación de la absorción de agua por capilaridad en el concreto endurecido</i>	42
d. <i>Determinación del porcentaje de masa perdida por la interacción con una solución ácida</i>	46
e. <i>Determinación de la profundidad de penetración de agua bajo presión al concreto endurecido</i>	48
f. <i>Determinación del coeficiente de permeabilidad</i>	52
g. <i>Determinación de la conductividad eléctrica del concreto endurecido mediante el coeficiente de migración de cloruros</i>	54
6. Conclusiones	59
7. Glosario	61
8. Referencias	62

1. Objetivo

Describir las actividades profesionales que realicé durante el periodo laboral de abril 2018 a septiembre del 2019 en los Laboratorios de Petrografía y Durabilidad en el Centro de Tecnología en Cemento y Concreto de la Empresa (CTCC).

2. Introducción

Las actividades que realicé durante el periodo mencionado comprenden temas de Ingeniería Geológica aplicada a la Ingeniería Civil, principalmente en temas inherentes al concreto y su funcionamiento en las especialidades de Petrografía y Durabilidad del concreto endurecido dentro del CTCC. En el diagrama 1 se ilustra la ubicación de dicho laboratorio en el organigrama del CTCC.

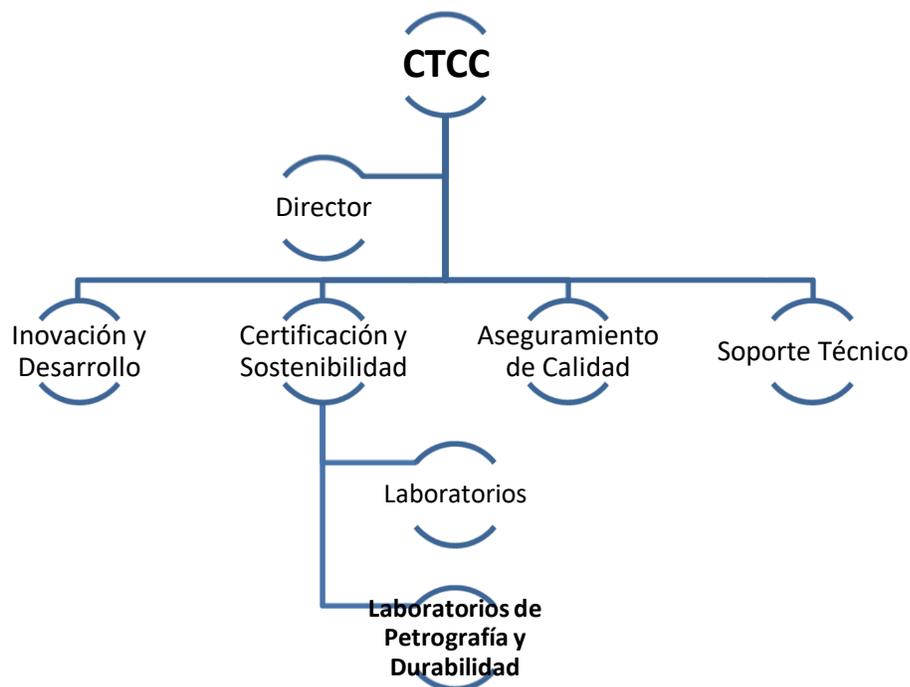


Diagrama 1 Organigrama generalizado de Centro de Tecnología en Cemento y Concreto

Los materiales de construcción utilizados en los proyectos que participaba la empresa requieren de rigurosas especificaciones técnicas. Los laboratorios que

integran el CTCC forman parte del proceso que evalúa la calidad y caracteriza las propiedades de los materiales de construcción. Por lo tanto, en cada proyecto, el CTCC tiene la responsabilidad de validar que dichos materiales cumplan con las especificaciones técnicas requeridas. Dichos materiales son sometidos a las pruebas pertinentes, según corresponda a cada laboratorio. Los laboratorios de Petrografía y Durabilidad se encargan de ejecutar las pruebas relacionadas con la caracterización de los parámetros fisicoquímicos inherentes a las características petrográficas de los agregados y del concreto endurecido, así como, las características del concreto durable.

Las técnicas petrográficas empleadas me permitieron evaluar la calidad de los agregados para su uso en el concreto, con base en el análisis y descripción de sus componentes minerales, forma, redondez, contaminantes y componentes que puedan ser perjudiciales para su uso en el concreto. Por otra parte, los conocimientos geológicos permiten que el petrógrafo evalúe las características del concreto endurecido como si fuese una roca artificial, e identifique deficiencias mediante el análisis de sus componentes, texturas, y composiciones, y de cómo éstos se relacionan entre sí, pudiendo identificar el causante de la deficiencia (Ingeniería Forense).

En cuanto a la durabilidad del concreto endurecido, las principales actividades que ejecuté comprenden pruebas de laboratorio que me permitieron evaluar el comportamiento del concreto endurecido frente a diferentes agentes físicos o químicos, y así definir un valor o parámetro que proporcione información acerca de la durabilidad del concreto analizado.

Metodologías empleadas

Petrografía:

- ASTM C 856 “Standard Practice for Petrographic Examination of Hardened Concrete”:
- ASTM C295 “Standard Guide for Petrographic Examination of Aggregates for Concrete”

Durabilidad:

- NMX C 514 ONNCCE “Resistividad Eléctrica del Concreto Hidráulico, Especificaciones y Métodos de Ensayo”
- ASTM C1202 “Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete’s Ability to Resist Chloride Ion Penetration”
- ASTM C 1403 “Standard Test Method for Rate of Water Absorption of Masonry Mortars“
- Metodología de la Prueba de Ataque Químico
- UNE-EN 12390-8 Parte 8: “Profundidad de Penetración de Agua Bajo Presión”
- Simple Method for Measuring Water Permeability of Concrete ACI Materials Journal Title 86 M38
- NT Build 492 “Concrete, Mortar and Cement-Based Repair Materials: Chloride Coefficient from Non-Steady-State Migration Experiments”

3. Marco Teórico

La industria de la construcción es un sector sumamente relevante para el crecimiento económico de un país en vías de desarrollo. En el 1er trimestre del 2019, en México, la industria del concreto aportaba el 7.6% al PIB mexicano, representando un total de \$1,409,961,880,000 MXN ^{11}

La importancia de la industria fomenta la innovación y el correcto uso de los materiales utilizados para las obras civiles, de tal manera que existen empresas especializadas en proveer a la industria materiales de alta calidad.

El concreto es uno de los materiales más utilizados por esta industria; consiste en una mezcla heterogénea compuesta principalmente por pasta y agregados. La pasta es la mezcla de dos compuestos: Agua y cemento. En cuanto a los agregados son partículas de roca que conforman gran parte de volumen del concreto y se subdividen en agregados gruesos y finos.

Cada uno de los componentes del concreto tienen diversas funciones, por ejemplo, la pasta, además de otorgar propiedades mecánicas, es el aglomerante que facilitará la cohesión entre sí misma y los agregados, mientras que los agregados optimizan la dosificación de los demás componentes y también otorgarán propiedades mecánicas al concreto endurecido. ^{13}

La correcta dosificación de los agregados (finos y gruesos), la correcta relación agua-cemento (a/c), entre muchas otras especificaciones, generarán sinergia entre los componentes de la mezcla obteniendo como resultado un concreto con propiedades óptimas. Sin embargo, no existe una receta para el diseño del

concreto, ya que depende de los requerimientos operativos, lo cuales pueden considerar factores ambientales, costos, localización de los bancos de agregados, plantas de cemento viables, requisitos estructurales, etc.

Por lo tanto, el diseño de una mezcla eficiente para la edificación de una obra es de suma importancia para aumentar la durabilidad y optimizar los costos operativos.

A continuación, se describirán las características y propiedades más importantes de los componentes del concreto convencional, con la finalidad de comprender la importancia de cada uno de ellos y como la sinergia entre cada uno de ellos permite obtener mezclas que cubran los requerimientos de la obra en cuestión.

Agregados

La correcta elección de los agregados usados en el diseño de una mezcla de concreto es de vital importancia debido a que ocupan la mayor parte de su volumen (60%-75% dependiendo del diseño) por lo tanto, la influencia de los agregados en el comportamiento del concreto afecta directamente a sus propiedades físicas y químicas.^{11} La evaluación petrográfica y descripción de las características de los agregados, permite identificar cuáles agregados funcionan y cuáles no funcionan dentro de una mezcla. ^{13}

La elección de los agregados gruesos y finos que se pretenden emplear para una mezcla de concreto dependerá de los siguientes factores petrográficos, según la norma ASTM C295: ^{4}

- *Forma y redondez de los agregados:* la forma se basa en la geometría de los agregados y se clasifican en laminares, tabulares, equidimensionales y prismáticos, mientras que la redondez hace referencia a la angulosidad de las aristas y bordes del agregado; ambos afectan el estado endurecido y fresco del concreto, por ejemplo, en la trabajabilidad, las formas tabulares y laminares, angulosas y subangulosas, afectarán la fluidez del concreto en estado fresco, obligando al aumento del volumen de agua en la mezcla; por otro lado, los agregados equidimensionales, redondeados y subredondeados, permitirán una correcta trabajabilidad y evitarán su segregación.
- *Granulometría y tamaño máximo de agregado:* la granulometría en el concreto se refiere a la distribución de las partículas de diferentes tamaños que se pretenden utilizar en una mezcla de concreto. Dichos tamaños son medidos mediante el análisis granulométrico de la muestra de agregados con tamices de diferentes tamaños. Los tamices normalizados para agregados fino van desde la malla N.100 hasta la malla N. 4, para el caso de los agregados gruesos va desde la malla N. 4 hasta la malla 1"1/2, para concreto convencional.
- *Litología:* los agregados más comúnmente utilizados en el concreto convencional proceden de la trituración de rocas químicamente inocuas o de bancos de agregados con granulometrías gradadas como el meandro de un río, sin embargo no todas las composiciones son óptimas para su uso en concreto ya que las reacciones químicas presentes durante el fraguado y en contacto con los agentes químicos de la intemperie, pueden reaccionar con los agregados ocasionando afectaciones en el comportamiento mecánico y químico del concreto,

por lo tanto existen litologías definidas que por su mineralogía que se consideran potencialmente deletéreas o deletéreas, con base en la norma ASTM C294. ^{3}

Pasta

La pasta es una mezcla homogénea del cemento y agua, similar a un lodo con propiedades aglomerantes. Ésta mezcla será la responsable de la consolidación de los agregados generando una masa similar a una roca. Por lo tanto, la correcta dosificación de agua y cemento será un punto clave para lograr una mezcla óptima. La cantidad de agua y cemento que se utiliza para una mezcla de concreto se calcula con la función a/c , donde a significa la masa de agua y c la masa de los materiales cementantes que se utilizan para la mezcla de concreto, denominada Ley de Abrams.

Mientras menos agua se utilice en la mezcla, la calidad del concreto será mayor, siempre y cuando el cemento utilizado permita su consolidación. ^{13}

El cemento Portland es el tipo de cemento más utilizado por la industria de los materiales para construcción, está compuesto principalmente por roca caliza, la cual sufre un proceso de trituración y molienda hasta alcanzar la finura deseable para su posterior calcinación a temperaturas de hasta 1350°C - 1450°C. Dicho proceso permite obtener el Clinker que son partículas menores a 15 micrómetros compuestas principalmente por silicatos tricálcicos y bicálcicos, aluminatos tricálcicos y ferritoaluminato tetracálcico. Para la etapa final de la producción del cemento se agrega yeso y otros elementos para poder regular el fraguado rápido

del concreto ya que reacciona con el aluminato tricálcico para formar sales expansivas. {13}

Existen una gran cantidad de cementos, cada uno cumple con la función de ser el aglomerante del concreto, sin embargo, existen cementos con propiedades que los hacen únicos, a continuación, se mostrará una tabla (Tabla 1) con algunos tipos de cemento y para qué se utilizan.

Cementos Especiales	Aplicaciones
Cemento Portland Blanco	Concreto blanco o colorado, mampostería, mortero, yeso, estuco y lechada.
Cementos Blanco de Mampostería	Mortero blanco entre unidades de mampostería
Cementos de Mortero	Mortero blanco entre unidades de mampostería, yeso y estuco
Cementos Plásticos	Yeso y estuco
Cementos Expansivos	Concreto de contracción compensada
Cementos para Pozos Petroleros	Estabilidad de pozos petroleros
Cementos Repelentes al agua	Estabilidad de baldosas, pinturas y acabados con estuco
Conjunto de Cementos Regulados	Rápida resistencia y reparaciones
Cementos con Adiciones Funcionales	Construcciones generales de concreto con requerimientos operativos especiales como reductores de agua, retardantes, aire incluido, aceleradores, etc.
Cementos Ultrafinos	Estabilidad Geotécnica
Cementos Aluminato Cálcico	Reparaciones, exposiciones a altas temperaturas y resistencia química
Cementos de Fosfato Magnésico	Reparaciones y resistencia química
Cementos de Geopolímero	Construcción en general, reparaciones y estabilidad de desechos
Cementos de Etringita	Estabilidad de desechos
Cementos de Sulfuro	Reparación y resistencia química.
Cementos Hidráulicos de Fraguado Rápido	Pavimentados donde se requiere un rápido fraguado
Cemento Natural	Restauración de edificaciones históricas con morteros naturales.

Tabla 1. Tipos de cementos. (Kostmahka, 2011)

4. Principales patologías y durabilidad en el concreto endurecido.

La construcción de un edificio de concreto requiere de estrictas especificaciones que permitirán garantizar la durabilidad y costos operativos sin necesidad de que se generen costos inesperados antes del tiempo de vida pronosticado. Este tiempo puede variar según el diseño de la obra, proceso constructivo y la calidad de los materiales utilizados, sin embargo, al finalizar este tiempo no significa que el edificio será demolido, pero sí, que requiere una evaluación para saber si será rentable su mantenimiento o su demolición.

A lo largo de este tiempo, algunas propiedades químicas y físicas del concreto serán afectadas, pudiendo deteriorar estructural o estéticamente al concreto de la edificación; esto se debe en gran medida, a los agentes externos del medio con el cual interactúa el concreto o en el peor de los casos, las deficiencias del proceso constructivo y/o la deficiente calidad de los materiales utilizados. ^{8}

La Durabilidad del concreto se define como: “la habilidad del concreto a resistir a la acción del ambiente, ataque químico y abrasión, manteniendo sus propiedades ingenieriles” (Kotsmaka *et all*, 2004).

La Patología del concreto es el estudio sistemático de los procesos, características, causas, consecuencias y soluciones del deterioro o “enfermedades” que sufre el concreto a lo largo del tiempo.^{8} Algunas de las patologías más frecuentes en el concreto son:

- Fracturas: más que una patología, son el resultado de un conjunto de deficiencias en el concreto y puede ser causada por distintas razones, sin embargo,

son las evidencias más comunes de que el concreto sufre una patología.

(Ilustración 1)

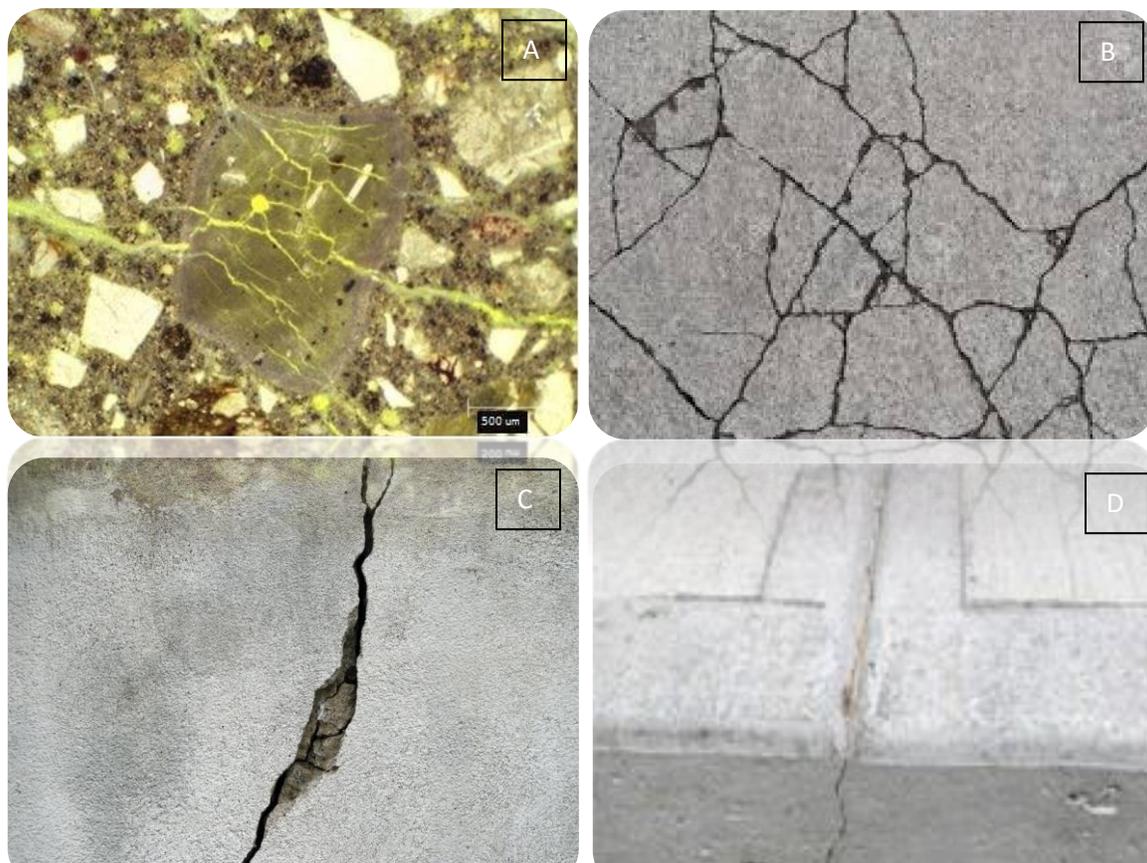


Ilustración 1 Imágenes de fracturas provocadas por distintas deficiencias en el concreto. A) Microfotografía agregado dolomítico con fractura provocada por RAC. B) Concreto con resquebrajamiento por contracción de la capa superficial. C) Muro de concreto con falla estructural D) Fractura inducida, principalmente en pisos. Ayuda a disminuir deficiencias por contracción en pisos de concreto. {10}

- **Blistering:** es una patología presente principalmente en pisos, provocada por el aire excesivo contenido en el concreto. Dos de las técnicas más utilizadas durante el colado de una losa de concreto son el alisado y el vibrado. Una de las consecuencias del alisado es que disminuye la porosidad de la capa superficial de la losa. En cuanto al vibrado, si se realiza incorrectamente, el colado contendrá un exceso de aire, por lo tanto, si sabemos que la capa superficial endurece más rápido por estar en contacto con el medio y nuestro colado presentó deficiencias en el

proceso de vibrado, tendremos una gran cantidad de aire y agua que progresivamente ascenderá a la superficie debido a su diferencia de densidad con los demás componentes del colado, sin embargo, cuando el exceso de fluidos llegué a la superficie, la capa superficial se encontrará en un estado más sólido que el concreto subyacente, de tal forma que al acumularse el aire debajo de la capa superficial, será tal el volumen que la romperá. ^{8} (Ilustración 2)



Ilustración 2 Suelo de concreto con Blistering

- Ciclos de congelamiento y deshielo: es una patología provocada por el congelamiento del agua incluida en el concreto, por acción del medio ambiente, lo cual provoca el aumento de tensión en la pasta y agregados provocando el fracturamiento del concreto endurecido. Claro ejemplo de la meteorización física del concreto^{13} (Ilustración 3)



Ilustración 3 Comparación de cilindros de concreto sometidos a 150 ciclos de congelamiento y deshielo. El aire incluido permite que disminuyan las afectaciones provocadas por los cambios volumétricos del concreto.

- Delaminación: es un proceso muy similar al blistering sin embargo, en la delaminación la capa superficial alisada y el colado subyacente tienen una tasa de fraguado muy diferente. Ésto se debe a un temprano alisado de la capa superficial del concreto provocando que el aire acumulado “despegue” la capa superficial.^{15}

(Ilustración 4)

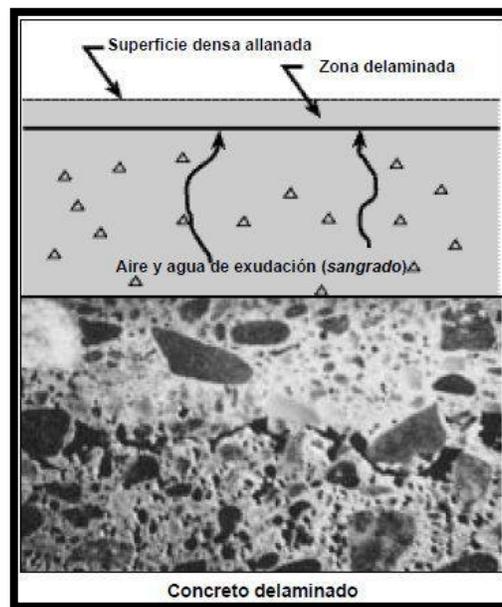


Ilustración 4 Esquema con fotografía estereoscópica de concreto con delaminación.

- Eflorescencias: es una de las patologías más comunes y que muchas veces los costos operativos las permiten, sin embargo, en edificaciones con diseños arquitectónicos son un gran problema. Las eflorescencias son sales de sulfato cristalizadas, provocadas por las condiciones de humedad dentro y fuera del concreto, donde el agua que fluye a través y sobre él, se va enriqueciendo en álcalis y cuando llega a una zona donde la concentración aumenta drásticamente o el fluido por el cual se transportan se evapora, las sales se depositan cristalizando principalmente en las superficies, provocando manchones blanquecinos estéticamente deficientes.^{13} (Ilustración 5)



Ilustración 5 Eflorescencia emergiendo de una fractura en un pavimento.

- Reacción Alkali-Agregado: se presenta cuando los constituyentes minerales de los agregados, el agua y los hidróxidos de sodio presentes en la pasta del concreto reaccionan, generando un gel expansivo el cual provoca estrés mecánico en los agregados, que a su vez generan planos de debilidad a lo largo del espécimen. A pesar de que esta reacción sucede frecuentemente, no siempre es perjudicial, esto dependerá en gran medida de la *inocuidad* de los agregados y el

contenido de álcalis en el cemento. La reacción se subdivide en dos tipos, Reacción Álcali-Sílice (RAS) y Reacción Álcali-Carbonato (RAC), su presencia dependerá del tipo de agregado que se utiliza; para el primer caso será potencialmente *deletéreo*, cuando la cantidad de sílice amorfo (vidrio) sea muy grande, lo cual se presenta más cotidianamente en agregados de origen ígneo extrusivo. La RAC sucederá en gran medida cuando el agregado que se utilizó sea un agregado de origen carbonatado con alto contenido en magnesio, como la dolomita.^[9] (Ilustración 6)

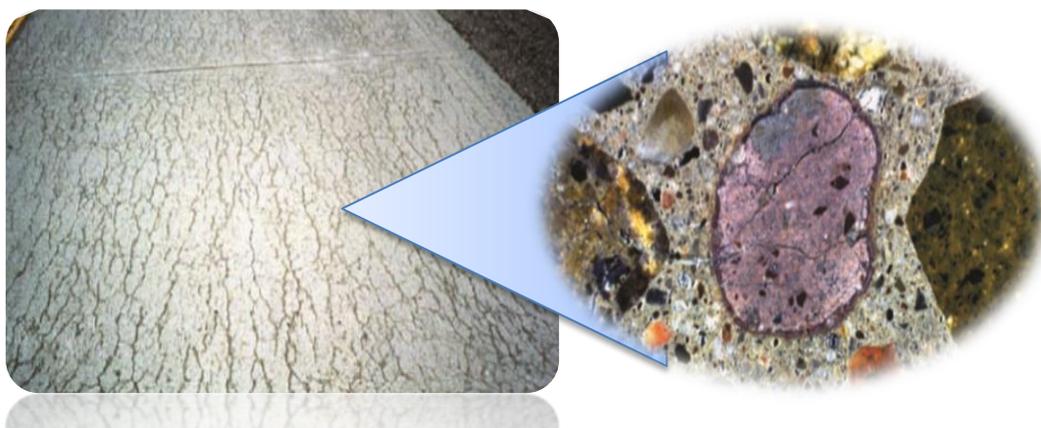


Ilustración 6 A) Fotografía estereoscópica de agregado con alto contenido de Sílice amorfo, fracturado internamente debido a la RAS. Nótese que la fractura interna se extiende a lo largo de la pasta en la dirección y sentido inicial. B) Imagen macroscópica de pavimento de concreto donde se observa la patología sumamente desarrollada.

- Otro aspecto sumamente importante que no es inherente a la patología del concreto, pero si a su durabilidad, es la resistencia los cloruros. Los iones cloruro tienen la capacidad de viajar mediante un fluido a través de la porosidad interconectada en la pasta del concreto, cuando éstos se topan con el acero del concreto, comienzan a corroerlo. En términos generales el acero dentro del concreto permite darle soporte estructural a la edificación, por lo tanto, si de alguna forma el acero llega a tener alguna deficiencia, la calidad estructural de la edificación se verá mermada.

5. Revisión de la calidad petrográfica y durabilidad de concreto endurecido y agregados (Pruebas de laboratorio ejecutadas)

La edificación de una obra y el óptimo desempeño del proceso constructivo dependen en gran medida de las especificaciones de los materiales a utilizar. Con el objetivo de asegurar dichas especificaciones, durante la edificación se realizan muestreos para evaluar la calidad del concreto y sus componentes. Estos ensayos permiten identificar deficiencias o alteraciones en las propiedades del concreto recién colado y así poder ajustarlas o tomar decisiones sobre el proceso constructivo.

Cuando se explora un nuevo banco de agregados potencialmente explotable para su uso en concreto, se realiza un procedimiento similar, donde se muestrean los materiales pétreos, con el objetivo de dilucidar si las propiedades de los agregados satisfacen las especificaciones operativas.

En la empresa donde laboré, los muestreos descritos, se envían al CTCC. Ahí los recibí y almacené con el objetivo de que posteriormente ejecutará las pruebas pertinentes, ya sean petrográficas o de durabilidad, y poder definir las propiedades del concreto y sus agregados. Para este caso, describiré un caso práctico de un proyecto desempeñado durante mi estancia laboral en la empresa, donde se evidencia la aplicación del conocimiento geológico para la resolución del mismo y, posteriormente, describiré las pruebas que elaboré durante el periodo de abril 2018 a septiembre 2019 en los Laboratorios de Durabilidad y Petrografía.

Caso práctico

Evaluación petrográfica de la calidad de un espécimen de concreto endurecido, procedimiento basado en la norma ASTM C856-18.

1. Antecedentes

Se obtuvo una muestra representativa de la mezcla de concreto proporcionada para la edificación, con un *código de concreto* que comprendía:

- Resistencia de 450 kg/cm³
- Tamaño máximo de grava 3/8 pulgada
- Edad de curado 28 días
- Agregado de granito triturado, entre otras especificaciones.

Se elaboraron especímenes de concreto de 60 cm x 20 cm y se sometieron a las pruebas de rutina ejecutadas por los laboratorios del CTCC y se obtuvieron valores de resistencia más bajos a los pronosticados en el diseño de mezcla.

Se mandaron los especímenes a los Laboratorios de Petrografía y Durabilidad para identificar la causa de las deficiencias relacionadas con la resistencia del concreto endurecido.

2. Método de estudio

El procedimiento comenzó con la recopilación de la información inherente al diseño de mezcla y las pruebas que se le ejecutaron, comenzando por identificar los componentes pronosticados en el código del diseño de mezcla.

Posteriormente se efectuó un corte transversal al eje mayor del espécimen y uno longitudinal a una de las mitades restantes del corte anterior, con el objetivo de poder visualizar la parte interna del espécimen de concreto. Se procedió a la examinación macroscópica, comenzando por identificar al agregado grueso y su tamaño máximo. Se comprobó que era un granito de biotita con tamaño máximo de 3/8 de pulgada y el agregado fino procedía de la trituración del agregado grueso, por lo tanto, estaba compuesto de cuarzo, plagioclasa, feldespatos alcalinos y biotita, principalmente.

Se realizó el conteo de vacíos, identificación de fracturas prominentes, adherencia de la pasta a los agregados, se observó una coloración homogénea a lo largo del espécimen, distribución de los agregados e hidratación de la pasta a nivel macroscópico, y no se identificaron rasgos prominentes que pudiesen causar una deficiencia en el desempeño del concreto.

Al no encontrar un rasgo definitivo de las causas de la baja resistencia, se procedió a elaborar láminas delgadas de la muestra de concreto con un espesor de 30µm.

Se confirmaron las litologías de los agregados finos y gruesos, se descartó la existencia de un porcentaje importante de granos de cemento deshidratados que desencadenaran un problema de resistencia en el concreto. Tampoco se encontraron microfracturas dentro de los agregados y su adherencia se comprobó con capas de gel de hidróxido de calcio uniforme a lo largo de los bordes de los agregados. Los productos de hidratación del cemento, observables en la pasta presentaban las propiedades ópticas esperadas, por ejemplo, con luz transmitida

una coloración grisácea pardusca y con nícoles cruzados, gris oscuro. No se encontraron segregaciones prominentes de las partículas de cemento, ni productos de meteorización o contaminantes que afectaran el rendimiento.

Por último, se efectuó una prueba de microdureza, la cual consiste en generar una punción a la pasta del concreto con una punta de diamante con una fuerza de 50 gr/cm³. Al realizar dicha punción se quedó impregnada la figura negativa de la punta de diamante, como se observa en la *ilustración 7*, y se midieron las aristas horizontal y vertical. Dicho procedimiento se realizó 10 veces en diferentes secciones de la pasta, con el objetivo de generar un promedio de las longitudes y poder resolver la ecuación del cálculo de la dureza de Vickers y así obtener el valor real de la resistencia de la pasta del concreto.^{12} Una vez resuelta la ecuación de Vickers, se demostró que la resistencia de la pasta del concreto endurecido es la pronosticada, 450 kg/cm³. Por lo tanto, si se efectuó una prueba que validaba que la resistencia de la pasta era la pronosticada, eso significó que el componente que está afectando el rendimiento del concreto es otro menos la pasta. Ya que el contenido de vacíos comprendía características eficientes para una mezcla de concreto y se había evaluado su forma, distribución y porcentaje, se descartó que el componente perjudicial eran los vacíos. De tal forma que el único componente que podría estar relacionado con la deficiencia en el concreto, era los agregados.

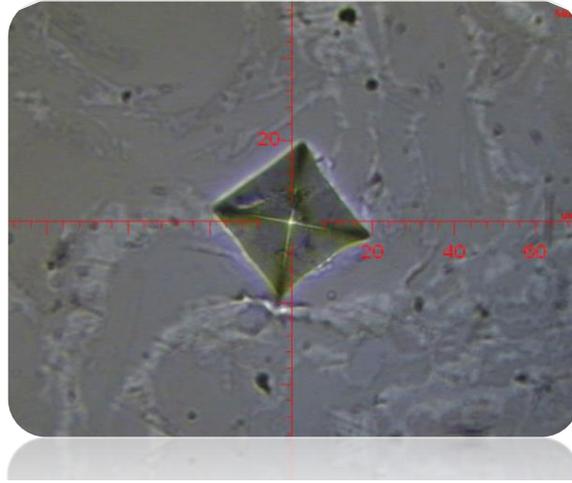


Ilustración 7 Figura negativa impregnada en material cementante, se puede observar el eje horizontal y el vertical.

Debido a que en las exámenes macroscópicas y microscópicas no se encontraron componentes deletéreos, se procedió a evaluar la resistencia del concreto endurecido con los agregados por separado, esto quiere decir, se mezclaron nuevos especímenes, uno de mortero que contenía únicamente al agregado fino y un espécimen que contenía únicamente al agregado grueso. Se les aplicaron pruebas uniaxiales y los resultados que arrojaron las pruebas demostraban valores menores a la resistencia pronosticada en los morteros, mientras que los especímenes que contenían agregado grueso presentaron valores según lo pronosticado en el diseño de mezcla. Por lo tanto, se pudo relacionar la causa de la deficiencia específicamente en el agregado fino. Se generó una nueva examinación macroscópica de los agregados finos y se encontró que su contenido mineral (cuarzo, biotita, feldespato alcalino y plagioclasa) eran químicamente inocuos. El contenido mineral de la muestra de agregado fino comprendía 57% Qz, 37% Plg y 6% FA como minerales esenciales. Utilizando el diagrama QAPF para rocas plutónicas, se pudo identificar que los minerales pertenecían a una

granodiorita, sin embargo, al ingresar a la Bt a los porcentajes de composición mineral, nos percatamos que la biotita ocupaba un 35% del total de la muestra.

3. Resultados

Los resultados de las pruebas uniaxiales aplicadas a los especímenes de concreto demuestran que el diseño de mezcla inicial no alcanza la resistencia pronosticada. Al efectuar las examinaciones petrográficas, mediante la prueba de microdureza de Vickers, se demuestra que la pasta por sí sola, alcanza la resistencia pronosticada. Al evaluar el contenido de vacíos y estado físico del concreto, se determina que no hay componente deletéreo que afecte el rendimiento. Por lo tanto, la afectación provenía de los agregados, para determinar si era de los finos o de los gruesos, se diseñó un experimento que evaluaba la resistencia de un espécimen de concreto, un mortero diseñado solo con agregados finos y un concreto con solo agregado grueso, se determinó que la resistencia del concreto se acercaba a la pronosticada, sin embargo, para el caso del mortero no se llegó a la resistencia; determinando así que la falla se encontraba en el agregado fino. Se examinó petrográficamente el agregado fino y se obtuvo que químicamente era inocuo para su uso en el concreto y los porcentajes minerales del agregado fino eran 42% Qz, 35% Bt, 20% Plg y 3% de FA.

4. Conclusiones

Con base en los resultados obtenidos se identificó que el contenido de biotita fue el causante de las bajas resistencia del concreto. Cuando la biotita se encontraba como mineral de la granodiorita en el agregado grueso, pertenecía a la masa de la

misma roca, sin embargo, cuando el agregado grueso se trituraba para obtener el fino, la biotita se desprendía de la roca y actuaban con sus propiedades minerales por sí solas y no como una roca, tal y como pasaba con todos los minerales componentes de la granodiorita. También, la biotita al ser un filosilicato con sistema cristalino monoclinico cristaliza en micas o láminas muy delgadas y cuando se observan cristales de biotita, normalmente se observan cúmulos de ellos, difícilmente un solo cristal de biotita. Por lo tanto, cuando se ejecutó la prueba uniaxial por separado al agregado grueso y al fino, la del agregado grueso no salió afectada ya que no contenía estas micas sueltas, por el contrario, el mortero con solo el agregado fino se vio afectado por las micas. Para comprender como sucede este fenómeno imaginemos que se aísla un cúmulo de cristales de biotita y se le aplica una prueba uniaxial, los valores que arrojará la prueba dependerá de la posición del cristal y el punto en el que se le está aplicando la fuerza, ya que el valor de resistencia será menor si la fuerza aplicada se ejerce sobre el plano que contiene al espesor del cristal, que sobre la cara del cristal, ya que la resistencia en el primer caso, dependerá de la fuerza con la que las láminas de biotita se encuentren unidas entre sí, y debido a que este plano representa una discontinuidad, será menos resistente que si se ejerce la fuerza a la cara de la biotita.

Petrografía

a. *Evaluación petrográfica de la calidad de los agregados para su uso en concreto, procedimiento basado en la norma ASTM C295-18: “Standard Guide for Petrographic Examination of Aggregates for Concrete”^{4}*

- Objetivo

Evaluación petrográfica de la calidad agregados para su uso en el concreto.

- Materiales y equipo de laboratorio
 - Microscopio Estereoscópico
 - Cajas Petri
 - Ácido Clorhídrico al 10%
 - Microscopio Petrográfico
 - Rayador de acero e imán
 - Contador

- Metodología

Las muestras provenientes del banco de agregados incluyen información inherente a su distribución granulométrica, la cual se ve reflejada en la curva granulométrica, dicha gráfica permite identificar la distribución de tamaños y porcentajes del material mediante un análisis por tamizado.

Una vez registrada la información procedente de la curva, se realiza el conteo de mínimo 350 partículas de cada una de las mallas, con el objetivo de describir los parámetros petrográficos y propiedades físicas que permitirán definir la calidad de los agregados para su uso en el concreto.

Por lo tanto, la clave para definir la calidad petrográfica de los agregados proviene de la correcta descripción de las propiedades físicas, a continuación, se profundizará en los elementos a describir de cada una de estas propiedades (Diagrama 2):

- Forma y redondez: La forma es la relación existente entre los ejes de un agregado basado en un modelo triaxial. Se clasifican en laminar, prismático, equidimensional y tabular. En cuanto a la redondez es el índice que define la

suavidad de los bordes del agregado y se clasifican en una escala que va de un clasto anguloso a uno redondeado. El proceso de trituración de los agregados tiene la fuerza para modificar la forma y redondez de los agregados.

- Textura: por definición una roca es un agregado de minerales y el arreglo de sus minerales y disposición en el espacio, conforman la textura de una roca. Debido a que cada tipo de roca tiene sus propias texturas, su amplia descripción permitirá identificar la composición litológica del agregado y en algunos casos, propiedades mecánicas.

- Color y alteraciones: la interacción del ambiente con las rocas detona su meteorización progresiva, provocando cambios químicos y texturales que cambian la apariencia de la roca, por lo tanto, la descripción de los colores del agregado permite conocer la existencia de alteraciones perjudiciales para el concreto.

- Porosidad: la porosidad de un material se define como la relación existente entre el volumen de vacíos y su volumen total. Durante el proceso de formación de una roca, el crecimiento de cristales o la diagénesis, dan lugar a la porosidad primaria que tiene lugar en el intergrano. Cuando la roca sufre procesos de meteorización o estructurales, existe la pérdida progresiva de materia originando la porosidad secundaria. Ya que los agregados representan más de tres cuartas partes del volumen del concreto la porosidad que tienen, sobre todo la que tiene contacto con la pasta, es de gran importancia para definir la durabilidad de concreto.

- Tamaño de grano: el registro de la información de la curva granulométrica fundamenta la categoría de tamaño del agregado, esta información, petrográficamente, sirve para definir si el agregado a analizar es una arena o una grava y así, direccionar el análisis tomando como premisa su granulometría

- Mineralogía: conjunto de minerales que componen al agregado. Esta descripción es uno de los pasos más importantes de la metodología y su correcta ejecución se vuelve fundamental para definir la litología del agregado, de igual forma permite identificar agentes minerales que pueden ser perjudiciales para el concreto. Por ejemplo, aquellos con gran cantidad de sílice amorfo como un agregado riolítico u obsidianas, sumamente reactivos con los álcalis del cemento
- Inocuidad: el término inocuidad, en aspectos químicos, hace referencia a la capacidad de un material para no reaccionar con otros componentes de una mezcla. Las rocas tienen diversas composiciones químicas de las cuales muchas pueden ser potencialmente deletéreas cuando se encuentran en gran medida o en una forma inestable.

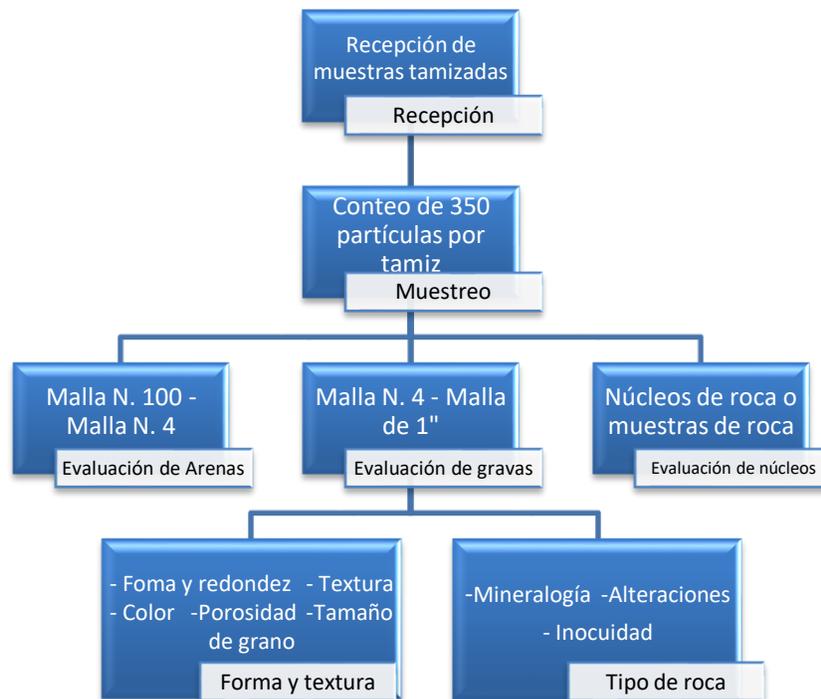


Diagrama 2 Metodología para la evaluación de la calidad de los agregados para concreto

- Cálculos o Resultados

La norma ASTM C294 estipula los criterios petrográficos de las rocas y minerales más comunes utilizados en concreto, proporcionando las bases para comprender como las diferentes litologías se comportan física y químicamente de manera general. En conjunto con la norma ASTM C295 se define la metodología completa para evaluar petrográficamente a las rocas como agregados, ya sea finos o gruesos.

Una vez definidos los parámetros texturales, de forma y composición de los agregados, se definen constituyentes con base en su litología y condiciones con base en su calidad física, para calcular el porcentaje encontrado en las 350 partículas de cada malla, registrando los datos en la siguiente tabla:

Cálculo de los Resultados del Conteo de Partículas								
Porcentaje Retenido en la malla	19.0 mm (3/4 in)		12.5 mm (1/2 in)		9.5 mm (3/8 in)		4.75 mm (No. 4)	
	17.4		32.6		29.5		20.5	
Constituyentes	Número de partículas	%						
A1	250	50	200	40	150	30	50	10
A2	50	10	100	20	125	25	100	20
A3	10	2	50	10	75	15	100	20
B1	107	21.4	70	14	62	12.4	32	6.4
B2	76	15.2	53	10.6	19	3.8	87	17.4
B3	0	0	20	4	43	8.6	96	19.2
C1	5	1	5	1	20	4	20	4
C2	2	0.4	2	0.4	6	1.2	10	2
C3	0	0	0	0	0	0	5	1
Totales	500		500		500		500	

Tabla 2 Cálculo de los resultados del conteo de partículas

A partir de la tabla anterior se calculan los “Porcentajes Ponderados de los Constituyentes de cada Malla” (*Tabla 3*) multiplicando el porcentaje de cada constituyente por el porcentaje retenido en la malla a la que pertenece, con el objetivo de calcular la “Composición y Condiciones de la Muestra de Agregados” (*Tabla 4*) donde se podrá observar el porcentaje de cada litología y sus condiciones por malla, así como en el total de la muestra.

Porcentajes Ponderados de los Constituyentes de Cada Malla							
Constituyentes	19.0 mm (3/4 in)	12.5 mm (1/2 in)	9.5 mm (3/8 in)	4.75 mm (No. 4)	Composición ponderada de la muestra		
A1	8.7	13.0	8.9	2.1	32.6	64.5	Total A
A2	1.7	6.5	7.4	4.1	19.7		
A3	0.3	3.3	4.4	4.1	12.1		
B1	3.7	4.6	3.7	1.3	13.3	31.8	Total B
B2	2.6	3.5	1.1	3.6	10.8		
B3	0.0	1.3	2.5	3.9	7.8		
C1	0.2	0.3	1.2	0.8	2.5	3.7	Total C
C2	0.1	0.1	0.4	0.4	1.0		
C3	0.0	0.0	0.0	0.2	0.2		
Porcentaje retenido en la malla	17.4	32.6	29.5	20.5			
Porcentaje de la condición 1 en la muestra						48.4	
Porcentaje de la condición 2 en la muestra						31.5	
Porcentaje de la condición 3 en la muestra						20.1	

Tabla 3 Porcentajes ponderados de los constituyentes de cada malla

Composición y Condiciones de la Muestra de Agregados								
Constituyentes	En fracciones retenidas de cada malla				Total de la muestra			
	19.0 mm (3/4 in)	12.5 mm (1/2 in)	9.5 mm (3/8 in)	4.75 mm (No. 4)	Condición 1	Condición 2	Condición 3	Total
A	62	70	70	50	33	20	12	65
B	37	29	25	43	13	11	8	32
C	1	1	5	7	3	1	0	4
Total	100	100	100	100	48	31	20	100
Promedio ponderado								

Tabla 4 Composición y condiciones de la muestra de agregados

El objetivo final de las tablas se enfoca en poder identificar los porcentajes de cada litología y sus condiciones en el total de la muestra, ya que, en caso de que exista alguna litología con condiciones físicas o químicas desfavorables, se pueda cuantificar su existencia en la muestra. Por ende, se convierte en un factor de suma importancia la definición de las condiciones de las litologías, manteniendo la nomenclatura numeral para condiciones equivalentes. En caso de tener condiciones desfavorables dentro de una misma litología, se recomienda asignar una nueva nomenclatura ajena a la litología perteneciente, con la finalidad de destacar su presencia en la muestra.

Por último, el entregable se diseña a partir de la descripción esencial de los agregados con base en su potencial fisicoquímico para su uso en el concreto, cuando existe algún agregado potencialmente deletéreo o físicamente desfavorable, se describe ampliamente en términos cualitativos y cuantitativos dejando claro el porcentaje contenido en la muestra, las consecuencias y recomendaciones que el uso del agregado conllevará, para que los ingenieros de campo validen los límites percentiles que se pueden utilizar en una muestra con agregados desfavorables y lo adapten a las condiciones operativas y el diseño de mezcla.

b) Evaluación de la calidad petrográfica y análisis de Ingeniería Forense para concreto endurecido, procedimiento basado en la norma ASTM C856-18: "Standard Practice for Petrographic Examination for Hardened Concrete" ^{5}

- Objetivo

Determinación de las condiciones físicas y posibles causas que provocan bajo rendimiento del concreto endurecido.

- Materiales y equipo de laboratorio
 - Cortadora Diamante
 - Microdurímetro
 - Materiales Abrasivos (Lijas)
 - Rayador de acero e imán
 - Microscopio Estereoscópico
 - Pica, mazo y cincel
 - Microscopio Petrográfico
 - Gotero con HCL al 10%
- Metodología

Los procedimientos específicos para la examinación de las muestras de concreto dependerán en gran medida del propósito del análisis y la naturaleza de la muestra. Por ejemplo, si el propósito es identificar las causas que provocan baja resistencia en una columna de concreto o identificar el origen de las diferentes tonalidades de un pigmento que se presentan a lo largo de un muro procedente del mismo colado. Sin embargo, de manera general, la norma ASTM C856 plantea los aspectos básicos a analizar y la metodología que se puede llevar a cabo para realizar un análisis integral de las muestras.

Los especímenes de concreto a examinar tendrán que cubrir ciertas especificaciones para proceder con su análisis, comenzando por las dimensiones, deben de ser al menos un núcleo orientado obtenido por barrenación diamante con un diámetro mínimo de 6" y 1 ft de largo, tendrá que ser correctamente etiquetado con una extensa descripción de la estructura de donde se obtuvo y sus deficiencias,

en caso de existir, diseño de mezcla del concreto, métodos de construcción de la estructura, edad, condiciones de exposición y la información de otras pruebas realizadas a la estructura que se relacionen con el objetivo de estudio. Cabe mencionar que la calidad del muestreo de los núcleos optimizará el nivel de detalle del análisis permitiendo esquematizar la estructura y sus deterioros a través de los núcleos obtenidos

Una vez obtenida la información se procede a realizar una examinación visual de la muestra:

- Examinación estereoscópica

Comienza por la observación visual simple de los especímenes con el objetivo de categorizar y formar grupos de núcleos con base en las condiciones físicas aparentes y patologías del concreto fácilmente detectables; esto permitirá comparar las muestras y dilucidar si existe alguna gradación entre las muestras respecto al bajo desempeño del concreto, favoreciendo el detalle del estudio en complemento con la examinación petrográfica.

En algunos casos las superficies de los núcleos serán insuficientes para poder describir sus componentes, de modo que el corte de los núcleos y su pulido serán vitales para poder observar fracturas internas y el estado natural de sus componentes. No obstante, existe una gran alerta al ejecutar la tarea del corte de muestras; en términos generales, el corte de muestras se lleva a cabo mediante la abrasión de un material con dureza mayor a los componentes del núcleo, de tal forma que la fricción de dichos materiales pueden alterar la muestra, por lo tanto,

dichos cortes tendrán que ser completamente planificados y ejecutados en zonas donde no afecte el rendimiento del análisis, o en su defecto, optar por algún método de percusión que no altere la muestra.

Los componentes por analizar en la examinación estereoscópica son cinco, y cada uno de ellos se describen basándose en la siguiente tabla:

Examinación Estereoscópica del Concreto				
Agregado Grueso	Agregado Fino	Matriz	Aire	Componentes embebidos
Composición: Dimensión máxima		Color con base en el <i>Marco de Colores de Rocas del Consejo de Exploración Nacional (1963)</i> Distribución del color: 1.- Moteado 2.- Uniforme 3.- Gradado	Diferencias de color entre pasta y vacíos Procentaje de vacíos Relleno	Composición
Tipo: 1.- Grava 2.- Roca triturada 3.- Otra 4.- Mezcla de los anteriores	Tipo: 1.- Arenas naturales 2.- Arena manufacturada 3.- Otra 4.- Mezcla			Tipo Tamaño
Litología				
Porcentajes Calidad física y química				
Fábrica				
*Forma *Distribución *Empaque *Gradación *Paralelismo con los ejes del núcleo	Distribución Forma Gradación Orientación preferencial	Distribución	Formas *Esféricas *No esféricas Distribución *Paralelismo con ejes del núcleo o agregados *Segregación o camas de vacíos Gradación	Vacíos debajo de la horizontal o reforzamiento de bajo ángulo.

Tabla 5 Examinación estereoscópica del concreto

Uno de los aspectos más importantes al llevar a cabo la examinación estereoscópica es tomar en cuenta la orientación y localización del núcleo analizado dentro de la estructura de concreto, con el objetivo de identificar los componentes deteriorados y definir zonas con distintos niveles de daños, lo cual permitirá dilucidar gradaciones de las zonas que el agente afecto en la estructura

o, en su caso, diseñar hipótesis de como el concreto se deteriora progresivamente y el porqué.

También es importante ser coherente con la escala de la examinación, las cuales van de 2x hasta 80x para los microscopios habituales, y hasta de 150x para algunos más completos; esto quiere decir que, si en la inspección visual se observan caracteres de alerta, por ejemplo, alguna fractura o bordes recristalizados; el detalle de la escala nos permitirá seguir el rastro de éstos. De tal forma que la examinación estereoscópica es el paso clave para poder direccionar el análisis a alguna patología en concreto y no divagar en el análisis. No obstante, existen casos donde las afectaciones desencadenan más de una patología en el concreto, es por eso que los esfuerzos por describir detalladamente los componentes definidos en la *tabla 5*, no deben menguar.

- Examinación petrográfica

Para llevar a cabo la examinación petrográfica se requiere de una lámina delgada con un grosor de 20 μ m - 30 μ m de espesor, obtenidas de la o las zonas de los núcleos donde se quiere puntualizar el análisis. Dicha sección tendrá que preservar los componentes principales de la mezcla de concreto (agregado, vacío y pasta), sin alteraciones que fueran consecuencia del método de laminación, además de contener las patologías que se encontraron en la examinación estereoscópica. Debido a que el detalle de la examinación petrográfica cae en niveles muy altos de detalle, la certidumbre del estudio dependerá en gran medida de un buen diseño de la metodología a emplear, esto quiere decir que la elección de las zonas del

núcleo que se pretenden laminar tendrán que ser detalladamente seleccionadas y manejando una lámina control donde se pueda observar las características de la zona con menor o nulos daños, con el objetivo de comparar las láminas y poder seleccionar rasgos que definen a la patología.

Para el caso de esta examinación los componentes a analizar se engloban en 3 categorías generales, los cuales son:

- Agregados finos y gruesos
- Granos de cemento deshidratados y productos de la hidratación
- Pasta cementante

Cada uno de los componentes se comienza a describir de manera individual para después analizar si existe sinergia entre los demás componentes, o en caso contrario, detectar si la relación entre alguno de los componentes carece de ella.

Examinación Petrográfica del Concreto		
Agregados gruesos y finos	Granos de cemento sin hidratar y Productos de la hidratación	Características de la Pasta del Cemento
Mineralogía, textura, fábrica, distribución	El concreto curado normalmente, a lo largo de dos años, solo puede presentar partículas con composiciones de belita o alita, que no se han hidratado debido a su gran tamaño. Las cuales se encontrarán bordeados de una o dos capas de geles con diferentes índices de refracción o una capa de hidróxido de calcio; dichos granos mantendrán una birrefringencia de primer orden. Otro producto de deshidratación es la aluminoferrita intersticial que se presentará como cristales pleocróicos hexagonales de café a verde o café rojizo e índices de refracción altos. Por último, es importante detectar diferentes fuentes de materiales cementantes los cuales se detectarán mediante la variación de los colores de la aluminoferrita y de los silicatos cálcicos con colores verde pálido o amarillo blanquecino	El color característico de la pasta en luz transmitida es una matriz bronceada pálida de tonos marrones con algunos granos de cemento deshidratados. Sin embargo, cuando los métodos de curado no fueron eficientes, la cantidad y tamaño de los granos deshidratados son muy frecuentes y variados.
Gradado: exceso o deficiencia de tamaños de arenas debe de ser juzgado después del análisis de varias secciones delgadas. Tamaño de grano y naturaleza de los límites internos en el agregado. Clasificación del agregado fino y grueso.		Con nícoles cruzados la pasta es de color negro o gris moteado con cristales dispersos con texturas poikilíticas y/o segregaciones de hidróxido de calcio. El tamaño de los cristales de hidróxido son clave para poder idealizar la relación agua cemento; cuando se presentan cristales tan grandes como los granos de cemento deshidratados ~ 100 micras, entonces la relación a/c es alta, por el contrario, cuando son muy pequeños, la a/c será baja, principalmente en agregados silíceos
Agregados natural o triturado, natural o manufacturado		
Adherencia, fracturas periféricas e internas, microfracturas		
Debido a la relación agua cemento y la composición del agregado, los cristales de hidróxido de calcio nuclearán en las discontinuidades formadas entre el agregado y la pasta. Teniendo cristales más grandes en agregados silíceos		
Reacción álcalis carbonato: bordes libres de hidróxido de calcio por reacción deletérea con la pasta en rocas carbonatadas, principalmente dolomita		
Reacción álcalis sílice: agregados potencialmente deletéreos, fracturas internas a lo largo de la periferia del agregado,	Pastas expuestas a lixiviación ácida carecerá de cristales de hidróxido de calcio, que después desencadenará eflorescencias en la superficie de la estructura	
	Después de 2 o 3 años en concretos convencionales, se espera tener depósitos de etringita acicular en los vacíos, sin embargo, si existe etringita en la pasta, será señal de ataque por sulfatos.	

Tabla 6 Parámetros a describir en la examinación petrográfica del concreto endurecido

Cabe recalcar que la examinación petrográfica se realizará según la profundidad o necesidades del análisis, esto quiere decir, que en algunos casos la detección de las patologías de concreto será concluyentes desde la examinación estereoscópica, lo cual facilitará la definición de las causas del bajo rendimiento de las muestras de concreto analizadas.

- Cálculos o resultados

El reporte de resultados de la examinación realizada a las muestras de concreto deberá incluir:

- La historia de los métodos de construcción del concreto analizado, con toda la información recibida de los ingenieros en obra.
- Locación y orientación de la estructura y del núcleo de donde se obtuvo la muestra.
- Descripción de los componentes con base en la metodología propuesta anteriormente con el objetivo de desenmascarar las patologías presentes en el concreto
- Interpretación de la naturaleza de los materiales y los eventos físicoquímicos que detonaron las deficiencias en el concreto
- Definición causas probables de las deficiencias de las muestras del concreto
- Recomendaciones

Durabilidad

a) *Determinación de la Resistividad Eléctrica del concreto endurecido basado en la norma NMX C 514 ONNCCE-2016: “Resistividad Eléctrica del Concreto Hidráulico” {16}*

- **Objetivos**

Determinar la resistividad eléctrica del concreto endurecido

Estimar cualitativamente la probabilidad de corrosión del acero de refuerzo con base en la resistividad del concreto endurecido

- **Materiales y equipo de laboratorio**
 - Gel conductorio
 - Esponjas de Contacto
 - Placas de acero inoxidable y dispositivo de sostenimiento de cilindros
 - Dispositivo calibrador
 - Resistivímetro
- **Metodología**

El principio de este método se basa en la capacidad del concreto a oponerse al paso de una corriente eléctrica según sus dimensiones, permitiendo dilucidar si el concreto es capaz de transportar agentes agresivos a través de su porosidad interconectada.

Para la ejecución del método se requieren cilindros libres de acero de 10cm x 20cm, sin discontinuidades, ni carbonatación, deberán tener 28 días de curado como

mínimo, y deberán de estar saturados al momento de ejecutar el método. Para asegurar la inexistencia de carbonatación, se recomienda rociar con fenolftaleína en espray cada uno de los cilindros, si se observan tinciones rojizas, se deberá de descartar el núcleo ya que esto indica la presencia de carbonatación.

También será indispensable calibrar el resistímetro mediante el uso del dispositivo calibrador, conectándolo a cada uno de los puertos del dispositivo y a su vez validando que la impedancia eléctrica que el resistímetro marque, sea la que el puerto tiene rotulado en el dispositivo calibrador.

Una vez que se cubren los requerimientos anteriores se medirá la longitud del cilindro y diámetro de la base, después se humedecen completamente las esponjas de contacto con el gel conductor. Se colocan en las caras circulares y se ponen encima las placas de acero inoxidable, teniendo cuidado de mantenerlo en forma vertical con el engrase en la parte superior y con las placas completamente horizontales y paralelas una de otra.

Posteriormente, se sostienen mediante el dispositivo de sostenimiento y se conecta cada una de las placas de acero al resistímetro. Para poder comenzar a operar el resistímetro, se cerciora que la frecuencia del dispositivo marcada sea de 1KHz.

Se tomarán al menos 3 lecturas de resistividad por cada cilindro y se registrarán los datos para poder sacar un promedio.

- Cálculos y resultados

La resistividad eléctrica se basa en el cálculo de la oposición de un material al flujo de una corriente eléctrica, sin embargo, a esto se le conoce como resistencia eléctrica, para convertirlo a resistividad, se debe de tomar en cuenta el factor de forma del objeto donde circula esta corriente.

$$\rho = R_e \left(\frac{A}{L} \right)$$

Donde:

ρ = Resistividad eléctrica

R_e = Resistencia eléctrica

A = Área de la base del espécimen medido

L = Longitud del espécimen medido

Cabe mencionar que el resistivímetro automáticamente calcula la resistividad del espécimen, ya que el software tiene la función para ingresar sus dimensiones. Sin embargo, si se tienen especímenes con dimensiones especiales, calculando el factor de forma, se podrá calcular la ρ con los valores de resistencia que arroja el resistivímetro.

Una vez registrados los resultados de resistividad del espécimen se cotejan con la siguiente tabla para definir la probabilidad de corrosión con base en su resistividad.

Resistividad (kΩcm)	Probabilidad de corrosión
> 100 - 200	El concreto es muy denso, por lo que su porosidad interconectada es extremadamente baja, al igual que el transporte de agentes agresivos hacia el acero de refuerzo. Las velocidades de corrosión del mismo acero son muy bajas, independientemente del contenido de cloruros o del nivel de carbonatación. No existe distinción entre acero en estado activo o pasivo
50 a 100	El concreto tiene una porosidad interconectada baja, dificultando el transporte de agentes agresivos al acero de refuerzo. Las velocidades de corrosión del mismo acero son bajas.
10 a 50	El concreto tiene una porosidad interconectada considerable, permitiendo que el transporte de agentes agresivos hacia el acero de refuerzo sea rápido. Las velocidades de corrosión del mismo acero son moderadas o altas en concretos carbonatados o con cloruros.
<10	El concreto tiene una porosidad interconectada excesiva, permitiendo que el transporte de agentes agresivos hacia el acero de refuerzo sea extremadamente rápido. Las velocidades de corrosión del mismo acero son muy altas en concretos carbonatados o con cloruros. La resistividad no es el parámetro que controla el proceso de corrosión. El valor de la velocidad de corrosión obtenido con la NMX-C-501-ONNCCE refleja la cota superior de la velocidad de corrosión en ese concreto para un determinado contenido de cloruros o nivel de carbonatación.

Tabla 7 Criterio de evaluación de resistividad eléctrica real en especímenes de concreto, NMX C 5414

b) *Determinación Rápida de la resistencia del concreto a la penetración del ion cloruro en concreto endurecido basado en el método ASTM C1202-19: “Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete’s Ability to Resist Chloride Ion Penetration”* {6}

- Objetivo

Determinar rápidamente la resistencia del concreto a la penetración del ion cloruro.

- Materiales y equipo de laboratorio

Materiales y equipo de laboratorio RCPT	
Equipo de laboratorio	Sustancias
Desecador con doble tubería	Cloruro de Sodio 3%
Bomba para vacío	
Sierra corte diamante refrigerada	Hidróxido de Sodio 0.3 N
Manómetro	
Lija y cepillo de acero	Agua destilada
Fuente de poder	
Empaques de sellado para pastillas de concreto de 10cm de diámetro	Resina epóxica
Celdas para prueba RCPT	
Termómetro	

Tabla 8 Materiales RCPT

- Metodología

Este método de evaluación permite determinar rápidamente la permeabilidad del concreto endurecido al ion cloruro, con base en la conductancia eléctrica de una muestra de concreto.

Para la ejecución de la prueba se requiere de al menos dos cilindros (testigo 1 y testigo 2) los cuales se cortan con una cortadora de diamante refrigerada por agua, 5 centímetros a partir del enrase.

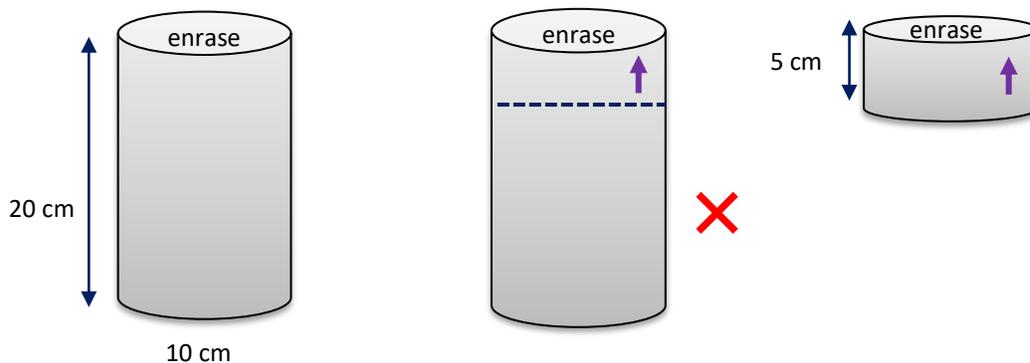


Ilustración 8 Preparación de pastilla de concreto

Una vez obtenida la pastilla de concreto deseada se pule con lija con la finalidad de tener superficies planas y bordes suaves. Después, se recubre la superficie lateral de la pastilla con resina epóxica, dejando completamente libre de resina las caras de la pastilla de concreto, por último, se deja secar al aire hasta que la resina halla endurecido.

Se depositan las pastillas de concreto con ambas caras expuestas, dentro del desecador conectado a la bomba de vacío a una presión de 50 mm Hg durante 3 horas. Posteriormente, se utiliza la otra tubería del desecador para verter el agua destilada, suficiente para que los especímenes queden completamente sumergidos, teniendo cuidado de mantener la presión de 50 mm Hg y de no permitir la entrada de aire al desecador. Una vez que haya transcurrido una hora, se abre la llave de la tubería para que el aire interactúe con las pastillas saturadas en agua destilada, durante 18 horas.

Posteriormente, se sacan las muestras saturadas del desecador y se limpia el exceso de agua para poderlas montar a las celdas, orientadas con la parte que señala el engrase hacia el depósito de la celda que contendrá el NaCl, también asegurando que los empaques sellen perfectamente la periferia de las bases de la pastilla de concreto y sean completamente herméticas.

Una vez ensambladas las celdas con los empaques y las pastillas de concreto, los depósitos se llenan con agua destilada, con el objetivo de asegurar la hermeticidad de las celdas.

Posteriormente se llenan los depósitos de la celda con las soluciones electrolíticas, recordando que la parte superior de la pastilla estará en contacto con el depósito de la solución de NaCl al 3% y la parte inferior con el depósito que contiene la solución de NaOH al 0.3N.

Después de llenar los depósitos, se procede a conectar la fuente de poder con un voltaje constante de 60V; el lado negativo al depósito con la solución de NaCl y el positivo al depósito con la solución de NaOH. Una vez conectados se debe tener cuidado de mantener la temperatura de la celda entre los 20°-25°C.

Para encender la fuente de poder debemos de asegurarnos que el voltaje aplicado sea de 60V constantes para cada celda conectada a sus terminales, durante 6 horas. Para asegurarnos que las celdas se encuentran correctamente montadas, normalmente, los softwares de RCPT marcan una predicción de la conductancia eléctrica de la pastilla de concreto, la cual se registrará; en caso de que marque algún valor mayor a 500mA se debe apagar la terminal y cerciorar la hermeticidad de la celda o en su defecto, la muestra de concreto es altamente permeable y no podrá ser evaluada debido a su excesiva permeabilidad.

- Cálculos y resultados

El cálculo de la conductancia del concreto se basa en la integración del área bajo la curva que se forma graficando la corriente en amperes contra intervalos de tiempo, a lo largo de las 6 horas de la prueba. No obstante, la mayoría de los Softwares realizan este cálculo de manera automática, determinando los intervalos

de tiempo de medición óptimos mediante la primera predicción de conductancia que se arroja el sistema.

Transcurridas las 6 horas se debe de verificar los resultados obtenidos en pantalla, validando que el voltaje haya sido constante a lo largo de la prueba. Se registrarán los Coulombs registrados por el Software para poder validar el dato con la siguiente tabla:

Resistencia al Ion Cloruro	
Carga pasada	Permeabilidad al Ion Cloruro
> 4000	Alta
2000 - 4000	Moderada
1000 - 2000	Baja
100 - 1000	Muy Baja
< 100	Despreciable

Tabla 9 Resultados de Resistencia al Ion Cloruro con base en la Carga Pasada (Coulombs)

c) *Determinación de la absorción de agua por capilaridad en el concreto endurecido con base en la norma ASTM C 1403: “Standard Test Method for Rate of Absorption of Masonry Mortar Water” {7}*

- Objetivo

Determinar la absorción de agua por capilaridad relativa en el concreto endurecido.

- Materiales y equipo de laboratorio
 - Balanza
 - Cronómetro
 - Cortadora
 - Contenedor hermético
 - Horno
 - diamante
 - Vernier
 - Agua

- Metodología

El método se basa en el cálculo de la capilaridad relativa del agua a partir del cambio de masa que sufre una pastilla de concreto al absorber agua a través de su porosidad capilar interconectada.

Para ejecutar la prueba se requieren de al menos tres testigos (testigo 1, testigo 2 y testigo 3) los cuales serán cilindros de 10cm x 20cm con una edad mínima de 28 días; haber obtenido una pastilla de 5cm de altura mediante el corte con una sierra de diamante refrigerada con agua, 5 cm a partir del enrase (Ilustración 8).

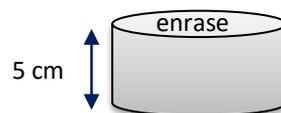


Ilustración 9 Pastilla de concreto para Absorción Capilar

Una vez obtenida la pastilla se mide su masa y se registra el peso resultante, después se somete a un proceso de secado mediante un horno a una temperatura de 110°C durante 24 horas, posteriormente, se toma y registra de nuevo la masa de la pastilla una vez secada, con el objetivo de verificar si la pérdida de masa no supera el 0.2%, por último, se deja enfriar el espécimen por 24 horas más. En caso de superar una pérdida mayor, repetir el paso anterior con otro espécimen.

El siguiente paso es medir el área de la base y altura de la pastilla de concreto, a partir del promedio de tres mediciones del diámetro, en diferentes secciones de la pastilla.

Antes de sumergir las pastillas se debe de tomar la masa, la cual se identificará como la masa inicial. Se prepara el contenedor hermético con agua a temperatura

ambiente (24°C), asegurando que el nivel del agua sea uniforme y no exceda ni disminuya de los 3 mm de altura, por otra parte, el contenedor deberá tener soportes menores a 1 cm² de superficie y 2mm de altura, los cuales servirán para colocar las pastillas de concreto orientadas con la base contraria al enrase en contacto con estos soportes.

Se colocan las pastillas con el cuidado de no salpicar las demás, manteniendo cerrado el contenedor y monitoreando durante toda la prueba el nivel de agua. Posteriormente se mide la masa de las pastillas al t_{0.25h}, t_{1h}, t_{4h}, t_{24h}. Al día de haber comenzado la prueba (t_{24h}) se llena el recipiente con agua, asegurando que los especímenes queden completamente sumergidos y se deja un día más para después medir su masa (t_{24hsaturado}).

Cabe recalcar que cada vez que se mida la masa de las pastillas se debe de secar con un trapo húmedo el exceso de agua y la medición no debe de superar el minuto después de haber sacado la pastilla del contenedor, para evitar la pérdida de humedad dentro de la pastilla, pero eliminar el exceso que no está dentro de ella.

- Cálculos y resultados

La absorción por capilaridad del concreto se obtiene midiendo los cambios de masa que el concreto endurecido sufre a través del tiempo, cuando se encuentra en contacto con el agua, asumiendo que la densidad del igual es aproximadamente

$$100 \text{ kg}/\text{m}^3$$

Con los datos obtenidos de masa medidos en $t_{0.25h}$, t_{1h} , t_{4h} , t_{24h} y $t_{24hsaturado}$, se calcula el índice de la absorción de agua en $gr/100cm^2$ para cada periodo sin saturar, para cada pastilla, con la siguiente ecuación:

$$A_T = \frac{(W_T - W_0)10,000}{A_1}$$

Donde:

W_T = La masa del espécimen en el tiempo T en gramos

W_0 = La masa de espécimen en el T_0

A_1 = El promedio de área de la base de la pastilla de concreto

Después, se calcula el índice de la absorción de agua al momento de la saturación de la siguiente manera:

$$A_s = \frac{(W_s - W_0)10,000}{A_1}$$

Donde:

W_s = Es la masa del espécimen después de las 24 horas de haber saturado la pastilla ($t_{24hsaturado}$)

Por último, se obtiene el porcentaje de la absorción relativa de agua con la siguiente ecuación:

$$\%A_T = A_T - A_s * 100$$

Con los cálculos anteriores se obtiene la siguiente tabla, la cual nos permite observar el aumento de masa de las pastillas de concreto en función del tiempo que interacciona con el agua, la masa de las pastillas cuando estas se saturan y el porcentaje de absorción de agua relativo.

Absorción de Agua por Capilaridad								
Muestra	Índice de absorción capilar AT				Índice de absorción de agua saturado	Promedio	Porcentaje de absorción de agua relativo	Promedio
	t= 0.25h	t= 1h	t= 4h	t= 24h				
Testigo 1								
Testigo 2								
Testigo 3								

Tabla 10 Absorción de Agua Capilar

d) *Determinación del porcentaje de masa perdida por la interacción con una solución ácida. Metodología de la Prueba de Ataque Químico*

- **Objetivos**

Determinar la pérdida de masa que sufre un espécimen de concreto por el ataque químico de sustancias ácidas.

- **Materiales y equipo de laboratorio**

- Ácido clorhídrico al 99.5%
- Recipientes de plástico cilíndricos resistentes a soluciones ácidas de 15cm x 30 cm con tapadera
- Báscula con precisión de 0.1g
- Agua destilada

- **Metodología**

El principio del método se basa en la capacidad corrosiva de una solución ácida. El concreto está formado por compuestos minerales que se diluyen en soluciones con ph bajo, por lo tanto, si sometemos a un ataque químico con soluciones ácidas un

especimen de concreto con características conocidas, podremos cuantificar la pérdida de masa que sufre la muestra y, por ende, su resistencia al ataque químico.

Para la ejecución de la prueba se requieren cilindros de concreto endurecido de 10cm x 20cm, teniendo como mínimo un testigo por cada mezcla a evaluar. La edad mínima del concreto endurecido deberá de ser 28 días.

La prueba comienza con la elaboración de las soluciones ácidas, el pH de éstas deberá de ser definido por el solicitante, tomando en cuenta que la escala de acidez para la prueba va de 1 – 5. Por lo tanto, los volúmenes de agua y de ácido clorhídrico dependerán del valor de pH que defina el solicitante.

Una vez elaboradas las soluciones, se saturan los especímenes de concreto por 48 horas hasta llegar a su estado de *saturación superficialmente seco (S.S.S)*, se mide la masa de cada espécimen y se registra junto con la fecha y hora de medición.

Después de la S.S.S, la prueba consiste en la ejecución de los siguientes pasos durante 7 ciclos de 84 horas cada uno, siempre registrando los datos de masa obtenidos:

- Colocar los especímenes de concreto, con el enrasedado hacia arriba, dentro de los recipientes de plástico.
- Llenar con la solución ácida rebasando el espécimen hasta por 3 cm.
- Cerrar los recipientes para evitar la evaporación.
- Dejar actuar la solución por 84 horas
- Sacar especímenes de los recipientes, enjuagar con agua destilada y limpiar exceso de agua.

- Medir y registrar la masa de cada espécimen.
- Cálculos y resultados

La resistencia al ataque químico se obtiene calculando la pérdida de masa que ha sufrido una muestra de concreto endurecido, por la interacción con una solución de pH ácido a lo largo de 7 ciclos de 84 horas.

Con los datos de masa obtenidos a lo largo de los 7 ciclos se calcula el porcentaje de masa perdido con la siguiente fórmula:

$$\%W_L = \left(1 - \left(\frac{W_c}{W_i} \right) \right) * 100$$

Donde:

W_c = La masa del espécimen en el Ciclo C, en gramos

W_i = La masa del espécimen inicial

$\%W_L$ = Porcentaje de masa perdido por ataque químico

La fórmula anterior nos permite visualizar la pérdida progresiva de masa, cuando $C=7$ en W_c , se obtendrá el porcentaje total de masa perdida.

ID	Pérdida de masa al cabo del ciclo (%)						
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4	Ciclo 5	Ciclo 6	Ciclo 7
Testigo 1							
Testigo 2							

Tabla 11 Resultados de ataque químico por pérdida de masa

e) *Determinación de la profundidad de penetración de agua bajo presión al concreto endurecido, con base en la norma UNE-EN 12390-8: “Profundidad de penetración de agua bajo presión” {19}*

- Objetivo

Determinar la profundidad de penetración máxima en una muestra de concreto endurecido.

- Materiales y equipo de laboratorio
- Equipo de permeabilidad con bomba de presión (mínimo 0.5MPa)
- Hojas milimétricas y papel albanene
- Marcadores permanentes
- Vernier
- Balanza analítica
- Cepillo con cerdas de alambre
- Cortadora a diamante refrigerada con agua
- Prensa hidráulica
- Metodología

Para ejecutar la prueba se requiere de al menos 2 testigos por cada mezcla de concreto a analizar. Las dimensiones de los cilindros serán de 15cm x 30cm con una edad mínima de curado de 28 días. Los cilindros deberán de ser cortados con la cortadora diamante a la mitad y se deberá rescatar la parte que contenga al enrase, por último, se deberá tallar al enrase con el cepillo de alambre, ya que esta parte será la que estará en contacto con el flujo de agua a presión.

Una vez preparados los especímenes se procede a colocarlos en las celdas del equipo de permeabilidad con el enrase en contacto con el flujo de agua, asegurando que sea completamente hermético y no existan fugas de agua (se puede utilizar neopreno o silicón, según convenga).

El equipo de permeabilidad cuenta con manómetros que permiten detectar la presión en cada circuito de celdas. Una vez abierto el flujo de agua para todas las celdas, se deberá de prender la bomba del equipo y se verificar que la presión para cada circuito sea de 0.5 MPa. Durante 72 horas se mantendrán estas condiciones, siempre asegurando que el depósito de agua contenga la suficiente para abastecer al equipo de permeabilidad, así como, la inexistencia de fugas en cada celda.

Después de haber transcurrido las 72 horas se deberá de detener el flujo de agua y apagar el equipo de permeabilidad para poder desmontar las celdas que contienen a los especímenes de concreto. Cabe remarcar que los especímenes contienen un volumen de agua proveniente del agua inyectada, al ser detenido el flujo, el volumen de agua estará a expensas de las condiciones de humedad y temperatura del ambiente donde se encuentren, por lo tanto, su evaporación será inminente. De tal forma, la ejecución del siguiente paso es crucial y deberá hacerse con precaución y rápidamente para evitar dicha evaporación. El paso consiste en provocar una fractura longitudinal en el espécimen, manteniendo el cuidado de no quebrarlo por completo y obtener únicamente dos piezas por cada muestra, donde se podrá observar el perfil del volumen de agua que ha penetrado al espécimen de concreto, sin olvidar la rapidez de ejecución, se deberá de marcar cuidadosamente el perfil observado, en ambas mitades, y medir la profundidad máxima de penetración a partir de la cara del espécimen que estuvo en contacto con la inyección de agua.

Posteriormente se mide en una hoja milimétrica un área conocida en donde pueda caber perfectamente el perfil a lo largo y a su ancho, se pesa en la balanza analítica

y se registra el resultado. Después se calca y recorta el perfil del espécimen, sobre la hoja milimétrica y se procede a pesarla nuevamente. Este procedimiento se efectúa para ambas mitades del espécimen, por lo tanto, por cada muestra se tendrán dos reproducciones fieles de los perfiles de penetración de agua.

- Cálculos y resultados

La penetración de profundidad máxima se obtiene mediante una medición directa de la cota mayor del perfil de agua medido en la mitad del espécimen, no obstante, es importante definir la penetración media, al ser un valor más consistente. La interpretación del resultado dependerá del objetivo del análisis.

Para obtener la penetración media se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$P_m = \frac{A_{perfil}}{d}$$

Donde:

P_m = penetración media en mm

A_{perfil} = área debajo del perfil marcado en mm²

d = diámetro de la base inyectada con agua en mm

Para calcular A_{perfil} se resuelve la siguiente ecuación:

$$A_{perfil} = \left(\frac{AP_i * MP_{perfil}}{MP_i} \right)$$

Donde:

A_{perfil} = área del perfil

AP_i = área conocida del papel milimétrico en mm²

MP_i = Masa del papel con el área conocida en g

MP_{perfil} = masa del papel recortada con el perfil en g

f) *Determinación del coeficiente de permeabilidad basado en: "Simple Method for Measuring Water Permeability of Concrete ACI Materials Journal Title 86 M38"*

{9}

- Objetivo

Determinar el valor de permeabilidad al agua de una muestra de concreto endurecido.

- Materiales y equipo de laboratorio

- Celdas de acrílico
- Pipeta graduada de 10ml
- Jeringa
- Resina epóxica
- Silicón

- Metodología

Para ejecutar la prueba se requiere de al menos 2 testigos por cada mezcla de concreto a analizar. Las dimensiones de los cilindros serán de 10cm x 20cm y se cortarán 2 pastillas de 3cm de espesor cada una, midiendo a partir del enrase. La primera de ellas, que contendrá al enrase, se desechará; y la segunda se utilizará para la prueba.

Se resanan los bordes laterales de cada pastilla con resina epóxica, después de su secado, se colocarán dentro de las celdas de acrílico y ser armarán, asegurando

su hermeticidad con silicón. Una vez seco el silicón, se debe de cerciorar que no exista ninguna fuga añadiendo agua destilada, en caso contrario pegarla con más silicón hasta lograr su completa hermeticidad.

Posteriormente, se rellena la celda con agua destilada, colocando la pipeta de 10ml en el orificio de llenado y se procederá a llenar los 10 ml de la pipeta con sumo cuidado, observando que la concavidad de la superficie del agua contenida en la pipeta sea tangente a la última graduación. Para evitar la evaporación del agua, se debe de sellar la boquilla de la pipeta con plástico.

Por último, se medirá y registrará el nivel del agua en la pipeta cada 24 horas, siempre rellenando la pipeta hasta su última marca de graduación y sellando la boquilla. Los registros y mediciones de la prueba cesarán hasta tener 5 lecturas iguales consecutivas.

- Cálculos y resultados

El cálculo de la permeabilidad para el concreto endurecido se obtiene mediante la medición del volumen de agua que pasa a través del concreto, considerado como un medio poroso.

De tal forma que el coeficiente de permeabilidad se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$A_p = Q * \frac{I}{h * A}$$

Donde:

A_p = es el agua permeada en m

Q = es el agua permeada durante el tiempo de prueba en m^3

l = es el espesor de la muestra en m

h = es la cabeza hidráulica de la celda en m

A = es el área de la muestra en m^2

Con los resultados de la fórmula anterior se diseña una gráfica de A_p sobre tiempo y se calcula la pendiente para poder determinar el coeficiente de permeabilidad de la muestra.

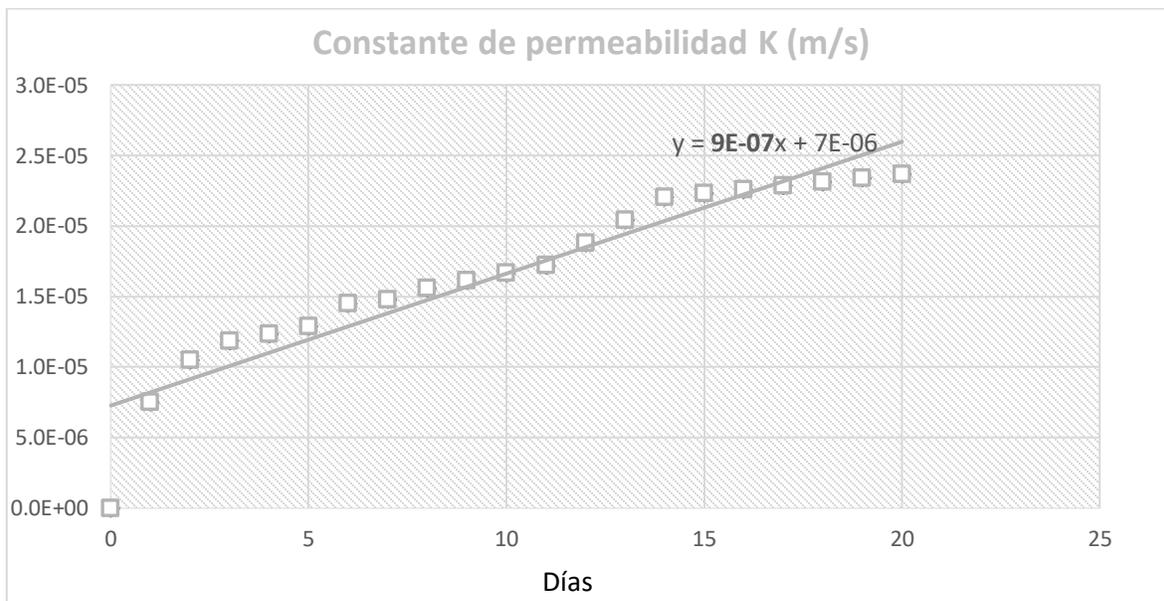


Ilustración 10 Gráfica de la constante de permeabilidad del concreto endurecido. Nótese en negritas la pendiente, la cual define el valor de k .

g) *Determinación de la conductividad eléctrica del concreto endurecido mediante el coeficiente de migración de cloruros, basado en: “NT Build 492 Concrete mortar and cement based repair materials: Chloride Migration Coefficient from non-steady-state migration experiments”^{17}*

- Objetivo

Determinar el coeficiente de migración de cloruros en el concreto.

- Materiales y equipo de laboratorio

Materiales y equipo de laboratorio RCPT	
Equipo de laboratorio	Sustancias
Desecador con doble tubería	Cloruro de Sodio 10%
Bomba para vacío	
Sierra corte diamante refrigerada	Hidróxido de Sodio 0.3 N
Manómetro	
Lija y cepillo de acero	Hidróxido de Calcio 1.5%
Fuente de poder	
Empaques de sellado para pastillas de concreto de 10cm de diámetro	Agua destilada
Celdas para prueba RCPT	
Vernier	Nitrato de plata 0.1 M
Termómetro	

Tabla 12 Materiales y sustancias para la prueba de Migración de Cloruros

- Metodología

Este método permite determinar el coeficiente de migración de cloruros de una muestra de concreto endurecido, con base en su conductancia eléctrica en un circuito con dos soluciones electrolíticas, una aniónica y otra catiónica.

Para la ejecución de la prueba se requiere de al menos tres testigos por cada muestra de concreto a evaluar, los cuales se cortan 10 centímetros a partir del enrase, después se realiza otro corte 5 centímetros por debajo del enrase y se ocupa la sección inferior que también tendrá una altura de 5 centímetros, asegurándose de marcar con una flecha la dirección del enrase (Ilustración 10). Una vez obtenida la pastilla de concreto deseada, se pule con lija con la finalidad de tener superficies planas y bordes suaves.

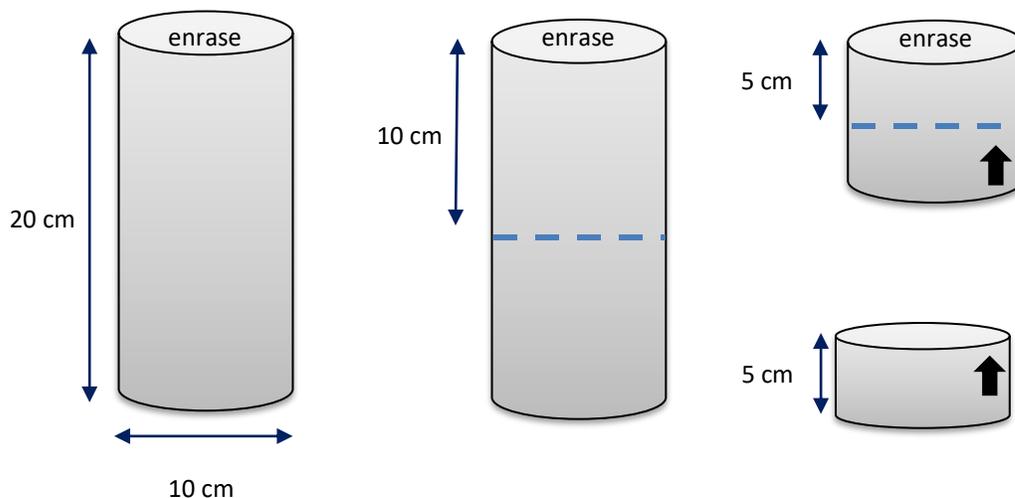


Ilustración 11 Procedimiento de corte para espécimen de Migración de Cloruros

Posteriormente se meten los especímenes al desecador, teniendo cuidado de no obstruir las bases de las pastillas y de mantener una temperatura de 20°C durante todo el procedimiento. Se prende la bomba de vacío a una presión de 5000Pa y se mantiene durante 3 horas, una vez transcurridas, se llena el desecador con Hidróxido de Calcio hasta que las pastillas queden completamente sumergidas y se permite a la bomba generar el vacío de 5000Pa por una hora más. Por último, se permite la entrada de aire al desecador y se apaga la bomba de vacío por 18 horas.

Una vez saturadas las muestras con Hidróxido de Calcio, se remueve el exceso de humedad e inmediatamente se ensamblan con las celdas de Migración de Cloruros, teniendo sumo cuidado que la base de la pastilla más cercana al enrase sea la que esté en contacto con el depósito de la solución de Cloruro de Sodio.

El armado de las celdas con las pastillas de concreto deberá de asegurar su hermeticidad, de tal forma que, los depósitos de las soluciones se llenarán con agua destilada para asegurar que no existan fugas. Una vez que se asegure la

hermeticidad de cada celda, se procede al llenado de los depósitos con las soluciones electrolíticas (hidróxido de sodio y cloruro de sodio, según corresponda)

Después de llenar los depósitos de las celdas, se procede a conectarlas a la fuente de poder y aplicar un voltaje inicial de 30V a cada una, inmediatamente se registrará la lectura de amperaje inicial que el software arroje y se apagará la fuente de poder. Según el amperaje inicial arrojado por cada celda, se asignará un nuevo voltaje el cual se aplicará el resto de la prueba, como la siguiente tabla lo indica:

Corriente Inicial $I = 30V$ en mA)	Voltaje aplicado U (Después del ajuste)	Duración de la prueba en h
$I < 5$	60.0	96.0
$5 \leq I < 10$	60.0	48.0
$10 \leq I < 15$	60.0	24.0
$15 \leq I < 20$	50.0	24.0
$20 \leq I < 30$	40.0	24.0
$30 \leq I < 40$	35.0	24.0
$40 \leq I < 60$	30.0	24.0
$60 \leq I < 90$	25.0	24.0
$90 \leq I < 120$	20.0	24.0
$120 \leq I < 180$	15.0	24.0
$180 \leq I < 360$	10.0	24.0
$I \geq 360$	10.0	6.0

Tabla 13 Voltaje y tiempos de duración de la prueba según el Amperaje inicial

Cabe remarcar que la temperatura de la prueba se debe de mantener entre 20°C y 25°C, también se debe de asegurar que los depósitos de las soluciones electrolíticas se encuentren siempre llenos.

Al finalizar el tiempo de prueba de cada pastilla, se procede a registrar el amperaje final y los coulombs finales que el software arroja. Se desensambla la celda y se enjuaga la pastilla de concreto. Posteriormente se mete a una prensa hidráulica con

el objetivo de generar una fractura uniaxial sobre el eje que contiene ambas bases de la pastilla, teniendo sumo cuidado de solo generar una fractura. Ambas mitades se rocían con Nitrato de Plata y se dejan reposar por 15 minutos.

Por último, se gradúa cada 10mm una línea contenida en el plano de fractura que sea paralela a la base de la pastilla, con el objetivo de medir con vernier cada 10mm, la profundidad de penetración de los cloruros sobre el plano de fractura de la pastilla de concreto, la cual será visible como un perfil grisáceo. Cabe mencionar que, si el perfil se encuentra obstruido por algún agregado o vacío, se debe de omitir la medición y pasar a la siguiente marca de graduación, o en su defecto, medir la profundidad al sector más cercano donde no exista una obstrucción.

- Cálculos y resultados

En la prueba se obtienen dos resultados, las profundidades de penetración de los cloruros y el coeficiente de migración de cloruros en una mezcla de concreto. Para el primero basta con cumplir la metodología propuesta, sin embargo, para el cálculo del coeficiente de migración de cloruros no estacionario se requiere de las siguientes fórmulas:

$$D_{nssm} = \frac{RT}{ZFE} = \frac{Xd - \alpha \sqrt{Xd}}{t}$$

Donde:

$$E = \frac{U - 2}{L}$$

$$\alpha = 2 \sqrt{\frac{RT}{ZFE} * \operatorname{erf}^{-1}\left(1 - \frac{2Cd}{Co}\right)}$$

D_{nssm} = Coeficiente de migración en estado no estacionario en m^2/s

Z = Valor absoluto de la valencia para el cloruro $z = |-1|$

F = Constante de Faraday, $F = 9.648 \times 10^4 \text{ J/Vmol}$

U = Valor absoluto de voltaje aplicado en V

R = Constante de los gases, $R = 8.314 \text{ J/Kmol}$

T = Valor promedio de la temperatura inicial y final en las soluciones en K

L = espesor del espécimen en m

X_d = valor promedio de la profundidad de penetración en m

t = duración de la prueba en segundos

erf^{-1} = función inversa de error

C_d = concentración de cloruro en la que el color cambia $C_d \approx 0.07 \text{ N Concreto CPO}$

C_o = concentración de cloruro en la solución catódica $C_o \approx 1 \text{ N}$

6. Conclusiones

El concreto es una de las materias primas más importantes para la industria de la construcción. Al ser un material que en lo general se considera una roca artificial, sus propiedades y comportamiento deben de ser analizados por un experto en la materia. Como geólogo las actividades que desempeñé a lo largo de mi trayectoria laboral en la empresa fueron cruciales para poder garantizar los estándares de calidad de la empresa para producir el cemento y concreto utilizado la edificación de construcciones. En los Laboratorios de Durabilidad y Petrografía realicé metodologías que me permitieron llevar a la práctica el conocimiento adquirido durante la Universidad; desde conceptos básicos requerido en la ingeniería hasta

implementar técnicas y disciplinas geológicas como la petrografía de rocas aplicadas a los agregados para concreto.

El CTCC es uno de los mejores centros en México donde se desarrollan nuevas tecnologías para el cemento y concreto, sus altos estándares de calidad y el apego a las certificaciones emitidas por la Entidad Mexicana de Acreditación; me permitieron desarrollar las habilidades necesarias para cumplir con la disciplina en ejecución de la empresa.

La variedad litológica, mineralógica y textural de las rocas en México es diversa, por lo tanto, las propiedades fisicoquímicas de los agregados son igual de diversos, aun perteneciendo a una misma litología. En la empresa, la nomenclatura utilizada para agregados es básica e íntimamente relacionada con el banco de su procedencia, absteniéndose de identificarlos con la litología, texturas y composición correctos de la roca, en algunos casos. Como área de oportunidad desde un punto de vista geológico, considero que es importante que la nomenclatura sea revisada con el objetivo de que se amplíe y se caractericen una gamma de agregados más variada y, sobre todo, más precisa. Una vez caracterizadas las rocas con la litología, texturas y composición adecuados, se podrán identificar características especiales relacionadas con sus parámetros petrográficos y no con el banco de proveniencia, como por ejemplo un basalto de "San Juan", cuando realmente es un basalto de olivino vesicular.

7. Glosario

Adherencia: propiedad de la pasta del concreto para adherirse al acero de refuerzo o los agregados. Facilitando su aglomeración y optimizando las propiedades mecánicas del concreto endurecido.

Alisado de concreto: técnica utilizada para obtener una superficie lisa, principalmente en una losa de concreto.

Colado de concreto: Fabricación insitu de una losa de concreto.

Código de concreto/ código de mezcla de concreto: Código de una mezcla de concreto que contiene información de los componentes, normas y procesos con los que se elaboró el concreto.

Curva granulométrica: la curva granulométrica de los agregados para concreto convencional, consiste en una gráfica que define los límites granulométricos para agregados finos y gruesos, con base en el porcentaje del volumen de una muestra retenida en un set de mallas de diferentes tamaños según la NMX-C-111.

Deletéreo: hace referencia a la capacidad de un material para reaccionar químicamente y a su vez perjudicar el rendimiento del concreto.

Inocuo: Incapaz o menos probable de reaccionar químicamente.

Saturado superficialmente seco (S.S.S.): condición en la cual los poros permeables del cilindro de concreto son llenados con agua a través de una prolongada inmersión en agua, sin embargo, en la superficie del cilindro no existe humedad.

Trabajabilidad. Concepto que abarca la facilidad con la que un concreto en estado fresco es emplazado, consolidado, así como el grado con el cual resiste a la segregación.

Vibrado del concreto: proceso aplicado al concreto fresco donde se aplican vibraciones de alta frecuencia con el objetivo de mejorar su rendimiento.

8. Referencias

{1} ASTM C33-03 “Historical Standard: Normalized Specification for Concrete Aggregates” ASTM International. West Conshohocken, PA. 2002.

{2} ASTM C150-02 “Standard Specification for Portland Cement” ASTM International, West Conshohocken, PA. 2002.

{3} ASTM C294-98 “Standard Descriptive Nomenclature for Constituents of Concrete Aggregates” ASTM International. West Conshohocken, PA. 1998.

{4} ASTM C295/C295M-18a “Standard Guide for Petrographic Examination of Aggregates for Concrete” ASTM International. West Conshohocken, PA. 2018.

{5} ASTM C856-18a “Standard Practice for Petrographic Examination of Hardened Concrete” ASTM International. West Conshohocken, PA. 2018.

{6} ASTM C1202-19 “Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete’s Ability to Resist Chloride” ASTM International. West Conshohocken, PA. 2019.

{7} ASTM C1403-15 “Standard Test Method for Rate of Water Absorption of Masonry Mortars” ASTM International. West Conshohocken, PA. 2015.

{8} Del Rosal J. A. (2017) Durabilidad y Patología del Concreto. *Construcción y Tecnología en Concreto*. Vol. 6 (1). Recuperado desde: <http://www.imcyc.com/revistacyt/MARZO%202017/MARZO17.pdf>

{9} Francis Y. J, Berger R. L. y Ludirdja D. (1989) Simple Method for Measuring Water Permeability of Concrete. *ACI Materials Journal* No. 86-M38. USA.American Concrete Institute.

{9} Farny J. A and Kerkhoff B. (2007) Diagnosis and Control of Alkali-Aggregate Reaction in Concrete. USA. Portland Cement Association

{10} Giatec Scientific Inc. (2019) Evaluating Cracking in Concrete: Procedures. Education Giatec Scientific Inc. Recuperado desde: <https://www.giatecscientific.com/education/cracking-in-concrete-procedures/#>

{11} INEGI (2019) Producto Interno Bruto de México durante el primer trimestre del 2019. *Comunicado de Prensa*. Num 292/19. Recuperado desde: https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2019/pib_pconst/pib_pconst2019_05.pdf

{12} Igarashi S., *Et. All* (1996) Microhardness testing of cementitious materials. *Advanced Cement Based Materials*. Vol 4 Issue 2 pp.48-57.

{13} Kostmahka, S.H. y Wilson, M. L.(15th Ed.) (2011) Design and control of concrete mixtures. Illinoise, USA. Portland Cement Association.

{14} León P. y Ramírez F. (2010) Caracterización morfológica de agregados para concreto mediante el análisis de imágenes. Revista Ingeniería de Construcción. Vol. 25 N. 2. pp: 215-240. Bogotá, Colombia.

{15} National Ready Mixed Concrete Association (2020) CIP-20 Delaminación de las Superficies de concreto terminadas con llana. NRMCA. Maryland, EUA.

{16} NMX C514 ONNCCE “Resistividad Eléctrica del Concreto Hidráulico” Norma Mexicana, Diario Oficial de la Federación. México. 2016.

{17} NT Build 492 “Concrete, Mortar and Cement-based Repair Materials: Chloride Migration Coefficient from Non-Steady-State Migration Experiments” Nordest Method. Finland. 1999.

{18} Solís-Carcaño R. y Moreno E. (2006). Análisis de la Porosidad del Concreto con Agregado Calizo. Revista de la Facultad de Ingeniería de la U.C.V, 21, 12.

{19} UNE-EN-12390-8 “Ensayos de hormigón endurecido Parte 8: Profundidad de penetración de agua bajo presión” Norma Española, Asociación Española de Normalización y Certificación. España. 2000.