



Evaluación de patologías en el concreto usando microscopía óptica

Pathology Assessment on Concrete using Optical Microscopy

Recibido: 21- 07 - 2016 Aceptado: 06-10-2016

Resumen

Algunos ensayos tradicionales como la resistencia a la compresión, porosidad total, infiltración de agua, entre otros, resultan útiles a la hora de realizar un análisis de patologías en concretos que han sido atacados por agentes agresores, los cuales van en contra de su durabilidad. Sin embargo, estas pruebas clásicas carecen de herramientas para analizar cómo fue el cambio estructural e interno de la muestra después de ser atacada. Lo que evidencia la necesidad de pensar en otras alternativas y tener en cuenta herramientas más directas como la microscopía, la cual permite hacer un análisis completo tanto macro como micro acerca de la mineralogía, estructura y textura, observando en detalle la composición, fracturas, alteraciones, deformaciones y señales particulares de las muestras. Así, en este trabajo se presenta la aplicabilidad de la petrografía mediante microscopía óptica convencional en el estudio de la degradación del concreto producida por el ataque de agentes agresores. Se muestran resultados como el cambio de color en los agregados, distorsión entre contactos de grano, y cambios en la isotropía de la matriz cementante ante el ataque por fuego. Formación de fases secundarias producto del reemplazo de iones en la matriz que generan fracturamiento y expansión en las probetas expuestas a ataques por sulfato. La aparición de nuevas fases entre la matriz y los agregados y en las fracturas para las muestras sometidas a reacción álcali-sílice. Además, se pudo correlacionar todas estas transformaciones petrográficas con las pérdidas de desempeño mecánico de los concretos.

Palabras clave: Análisis de patologías; concretos.

Abstract

Some traditional tests such as compressive strength, total porosity, water infiltration, among others, are useful when an analysis of pathologies is done on concretes that have been tested on by aggressive

Carlos Andrés Bedoya Henao¹

Jorge Iván Tobón²

Juan José Monsalve Valencia³

Catalina Vanegas Palacio⁴

Mateo Valencia Betancur⁵

¹ Estudiante de Ingeniería Geológica. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. cabedoyah@unal.edu.co

² Profesor Titular. Director del Grupo del Cemento y Materiales de Construcción (CEMATCO). Departamento de Materiales y Minerales. Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. jitobon@unal.edu.co

³ Estudiante de Ingeniería de Minas y Metalurgia. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. jjmonsalvev@unal.edu.co

⁴ Estudiante de Ingeniería de Minas y Metalurgia. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. cvanegasp@unal.edu.co

⁵ Estudiante de Ingeniería Civil. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. mavalenciabe@unal.edu.co

agents, which go against their durability. However, these classic tests lack tools to analyze how the structural and internal change of the sample are effected after being attacked. It demonstrates the need to think about other alternatives and consider more direct tools such as microscopy, which allow for a complete analysis of both macro and micro scale of mineralogy, structure and texture, observing in detail the composition, fractures, alterations, deformations and particular details of the samples. Thus, in this work you will find information on the applicability of petrography in the study of concrete degradation caused by the effects of aggressive agents, which are presented through using conventional optical microscopy. Results, such as color change in the aggregates, grain distortion when in contact with other components, and changes in the isotropy of the cementitious matrix when exposed to fire. Formation of secondary phases because of ion replacement in the matrix, which generate fractures and expansion in the specimens exposed to sulfate. The introduction of new phases between the matrix and the aggregates and in the fractures to the samples subjected to alkali-silica. In addition, all these petrographic transformations could be related to loss of mechanical performance of concrete.

Keywords: Pathology tests; concrete.

Introducción

El sector de la construcción en Colombia, se consolida como un referente importante dentro de la economía del país al incrementar su participación en el PIB. Este desarrollo debe estar acompañado de un continuo avance en la ciencia y la tecnología de los materiales usados en esta industria, tales como los agregados pétreos, ladrillos, cemento, concreto, etc, esto con el fin de garantizar su calidad y sostenibilidad. Para alcanzar este avance es indispensable el trabajo interdisciplinario, para poder hacer uso de los diferentes conocimientos, y de esta manera, hacer posible ciertas prácticas que supriman o les den la mano a técnicas tradicionales de evaluación de materiales, como por ejemplo la petrografía óptica (microscopía óptica convencional) que *“es una rama de las ciencias geológicas dedicada a la descripción científica y clasificación sistemática de las rocas, a partir de un análisis en el microscopio, en donde se utiliza la mineralogía óptica que es una aplicación de la física de la luz al estudio de los minerales”*. (Lozano, 2003; Broekmans, 2009).

La microscopía óptica aplicada al estudio del concreto es una herramienta muy poderosa a la hora de analizar y entender el comportamiento estructural de este material, así como su estado, descripción de sus componentes, causas del deterioro, idoneidad respecto a las especificaciones del proyecto y posible comportamiento futuro. En este sentido, autores como Ingham (2009) han utilizado la microscopía óptica para evaluar los daños producidos por el fuego en el concreto, encontrando que a través de la petrografía se puede establecer con precisión la profundidad e intensidad del daño. Algunos investigadores (Zerbino & Glaccio, 2014; Józwiak-Niedźwiedzka, et al., 2015; Lukschová, Průkryl, & Pertold, 2009; Katayama, 2010) han empleado esta técnica de caracterización para evaluar la reacción álcali-agregado en concretos, mostrando que la reacción se puede propiciar con la presencia en la mezcla de agregados de sílice reactiva o de carbonatos; ellos han encontrado que con esta técnica se pueden definir bien las grietas producto de esta reacción, el material que está reaccionando y el producto que se forma de la reacción para cuantificar la extensión del daño. Elsen (2006) muestra cómo esta técnica es importante en el mundo del concreto para caracterizar los agregados, las adiciones minerales, describir la estructura de poros, estudiar la zona interfacial (ITZ por su sigla en inglés), bordes de reacción entre los agregados y la pasta de cemento, entre otros aspectos. Sutter et al. (2006) utilizan la microscopía óptica para reportar la formación del oxocloruro de calcio que es una fase potencialmente destructiva para el concreto y que se forma de la interacción química entre el cloruro de magnesio y la pasta de cemento endurecida.

Este trabajo se enfocó al estudio de tres agentes agresivos que deterioran significativamente el concreto y que van en contra de su durabilidad, como son el ataque por sulfatos, reacción álcali-sílice y daño por fuego. Se presentan de forma individual materiales y diseño de mezcla en las probetas, descripción petrográfica en las muestras sanas y atacadas, resultados obtenidos y su relación con la pérdida de resistencia a compresión.

Ataque por sulfatos

Materiales y métodos

En la elaboración de las probetas se utilizó como árido pétreo dolomita proveniente de la zona de Río Claro, Antioquia, de la empresa Dolomitas de Colombia S.A.S. Este agregado fue triturado con el objetivo de obtener una granulometría para gruesos pasante malla $\frac{1}{2}$ " (tamaños menores a 12,50 mm) y retenidos en la malla # 4 (tamaños superiores a 4,75 mm), y para los finos pasante malla # 8

(Tamaños menores a 2,36 mm) y retenida en la malla # 16 (Tamaños superiores a 1,18 mm) según la Norma Técnica Colombiana (NTC) 174.

El cemento utilizado fue un cemento portland tipo I producido por la empresa Cemento Argos, denominado al interior de la compañía como concretero por ser de bajo contenido de adición mineral y altas resistencias iniciales y finales. Para la fabricación de las probetas se trabajó con una proporción en volumen de agregados gruesos, agregados finos, cemento y agua de 31:30:11:21 con una relación agua cemento de 0,6.

Se fabricaron en total 9 probetas con el mismo diseño de mezcla, 5 de ellas para ser sometidas al ataque por sulfatos, de las cuales 4 se destinaron a ensayos de flexo-tracción y compresión simple y una se destinó a petrografía, las 4 restantes para cumplir el papel de muestras sanas o de control, 3 sometidas a ensayos de flexo-tracción y compresión y una para ser analizada mediante petrografía óptica.

Las probetas, luego del desmolde, fueron curadas 28 días según el procedimiento de la norma ASTM C 192/C 192M – 06. Luego de esto, los especímenes seleccionados fueron sumergidos en una solución de $MgSO_4$ con una concentración del 5% y un pH de 8,1 durante 4 meses acorde con la norma ASTM C1012, teniendo en cuenta que este ensayo se realizó con prismas de concreto mas no con barras de mortero como lo estipula la norma. El control del pH en las muestras se cumplió semanalmente durante los 4 meses con el fin de tener un seguimiento controlado en la evolución de los especímenes.

Finalizados los 4 meses, se procedió al análisis de los datos obtenidos de las pruebas de flexo-tracción y compresión simple en las muestras atacadas, seguido de la fabricación de las secciones delgadas para su análisis petrográfico.

Petrografía

Muestra sana control

Muestra de concreto compuesta por agregados con formas angulares a sub-angulares de esfericidad alta a muy baja con tamaños entre 500 μm hasta 1 cm aproximadamente, compuestos por mármol puro constituido casi en su totalidad por cristales de carbonatos con distribución de tamaños seriada, bimodal y equigranular variando entre 100 μm y 5 mm. La textura en los agregados pétreos no es homogénea teniendo texturas granoblásticas poligonales

con contactos triples y texturas suturadas. La distribución agregados:matriz:vacios es de 65:30:5 (Figura 1). La distribución de vacíos es irregular, se observan zonas con más abundancia de vacíos y de tamaños irregulares.

La muestra presenta 2 tipos de fracturas que se describen a continuación:

- **Fractura Tipo 1:** Irregulares que cortan tanto los agregados como la matriz, de espesor máximo 350 μm , continuas y sin rellenos. Este tipo de fractura se pudo originar durante la fabricación de la sección delgada.
- **Fractura Tipo 2:** Irregulares, que cortan sólo los agregados siguiendo parcialmente los contactos entre los granos, espesor máximo de 50 μm , continuas y rellenas por la matriz cementante (Figura 2).

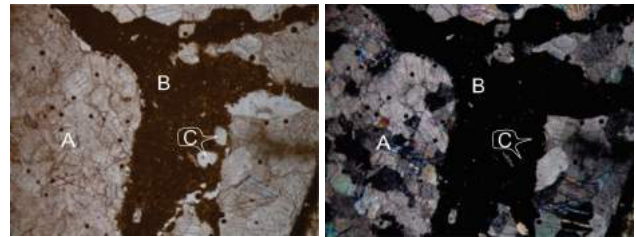


Figura 1. Relación agregados:matriz:vacios representativa. A-Agregado Calcáreo. B-Pasta de Cemento. C-Vacios. (Izquierda nicols paralelos, derecha nicols cruzados, 4X).

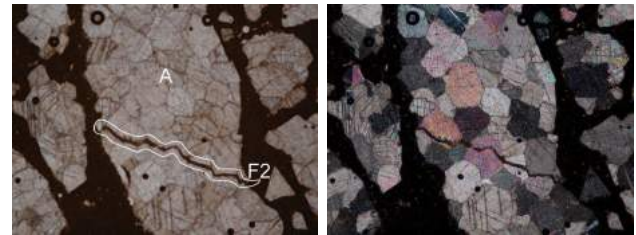


Figura 2. Fractura tipo 2 en agregado. A- Agregado Calcáreo F2- Fractura tipo 2 (Izquierda nicols paralelos, derecha nicols cruzados, 4X)

La matriz de color pardo oscuro, granular, compuesta por fases de baja birrefringencia de aproximadamente 15 μm y fases isotropas. El color homogéneo en la matriz sugiere una buena hidratación en la pasta de cemento, y el contacto con los agregados una buena adherencia entre la pasta y los áridos.

Muestra atacada

Partiendo del hecho de que la composición mineralógica y estructural del concreto es la misma, sólo se hará énfasis en los cambios observados.

El cambio en los agregados producto del ataque es incipiente, aunque se observan algunos granos

carcomidos. Se presenta una fase secundaria producto del reemplazamiento iónico en la matriz cementante, incolora, de relieve bajo, con birrefringencia muy baja, de bordes irregulares, diseminado, y formando estructuras planares rectas sub paralelas a través de la matriz. Asociada a esta se identificó el crecimiento de una segunda fase, incolora, de relieve medio y birrefringencia media (Figura 3).

Se observan en las muestras fracturas en la matriz, formando puentes entre los granos de áridos, poco sinuosa, de espesor máximo de 20 μm , de poca extensión, y algunas rellenas por la fase secundaria descrita anteriormente. Se puede asociar este tipo de fractura con la fase secundaria formada, siendo algunas de las fracturas perpendiculares a las estructuras planares (Figura 4).

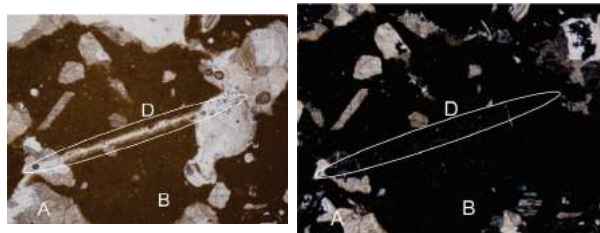


Figura 3. Fases secundarias formadas y leve aumento en fases anisótropas en la matriz. A- Agregado Calcáreo. B- Pasta de Cemento. D- Fase Secundaria reemplazando la matriz. (Izquierda nicols paralelos, derecha nicols cruzados, 10X).

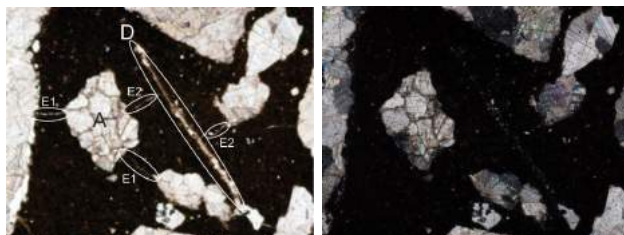


Figura 4. Asociación entre fases y fracturas A- Agregado Calcáreo. D- Fase secundaria. E1- Fracturas entre granos. E2. Fracturas asociadas a la formación de la fase. (Izquierda nicols paralelos, derecha nicols cruzados, 10X).

Análisis y discusión

Las fases secundarias observadas mediante microscopía óptica hacen alusión a la formación de yeso, brucita y sílica gel, como ha sido descrito por autores como Collepardi (2003) el sulfato de magnesio descalcifica al C-S-H de la pasta de cemento para formar las fases encontradas, durante este proceso el concreto presenta una pérdida importante de resistencia mecánica.

La formación del yeso también contribuye a la pérdida de resistencia de la matriz cementante, además de contribuir a la expansión volumétrica de la pasta de

cemento bajo el ataque de sulfato (Santhanam, Cohen, & Olek, 2003), por lo que las microfisuras perpendiculares a las estructuras planares se asocian a la formación de esta fase mineralógica.

El daño registrado en el concreto no es relevante en el tiempo de observación, la homogeneidad de la pasta de cemento se conserva, la adherencia entre agregados y matriz es consistente, las fisuras no tienen un espesor y longitud considerables, y la evolución mineralógica característica del ataque no es avanzada.

Reacción Álcali-Sílice

Materiales y métodos

En la elaboración de las probetas se usó como agregado silíceo reactivo una cuarzo arenita y chert, agregado proveniente de la mina El Roble, ubicada en el departamento del Chocó, en Colombia. Se decidió trabajar con este material debido a su uso en estudios anteriores, por ser de composición silícea y microcristalina o criptocristalina, factor que aumenta la susceptibilidad a reaccionar con la pasta de cemento. Los agregados fueron triturados con el objetivo de obtener una granulometría para gruesos pasante malla $\frac{1}{2}$ " (menores a 12,50 mm) y retenidos en la malla # 4 (superiores a 4,75 mm), para los finos se usó pasante malla # 8 (menores a 2,36 mm) y retenida en la malla # 16 (superiores a 1,18 mm) según la NTC 174. Se trabajó con solo estos dos tamaños en los agregados debido a que el material utilizado no es de uso comercial, por lo que no se contaba con la curva granulométrica especificada en las normas; este factor sumado a que el objetivo de este proyecto no es el de diseñar una mezcla, con granulometría específica, se optó entonces por estos dos tamaños de grano. El cemento utilizado es un cemento portland tipo I con un contenido alcalino de 0,45. Para la fabricación de las probetas se trabajó con una proporción en volumen de agregados gruesos, agregados finos, cemento y agua de 31:33:11:21 con una relación agua cemento de 0,6.

Se fabricaron en total 9 probetas con el mismo diseño de mezcla, 5 de ellas para ser sometidas a la reacción, de las cuales 4 se destinaron a ensayos de flexo tracción y compresión simple y una se destinó a petrografía, las 4 restantes para cumplir el papel de muestras sanas control, 3 sometidas a ensayos de flexo tracción y compresión y una para ser destinada a petrografía.

El procedimiento para someter las muestras a la reacción se basó en la Norma ASTM C1293-08b en la

que, aunque se usa para evaluar la expansión en barras de mortero debido a la reacción álcali-sílice, tiene una correlación con las reacciones entre los álcalis del cemento y los componentes silíceos de los agregados, por lo que sirvió como apoyo para someter al ataque las muestras de concreto usadas en este estudio. Para acelerar la reacción se adicionó NaOH en el agua de mezclado, cantidad que según la norma ASTM C1293-08b equivale a un 1,25% de la masa del cemento. Las probetas luego del desmolde fueron curadas 28 días según el procedimiento de la norma ASTM C 192/C 192M-06 y los especímenes destinados a ser atacados fueron almacenados controlando la temperatura y la humedad del ambiente, según indica la norma, durante 4 meses.

Finalizados los 4 meses, se procedió al análisis de los datos obtenidos de las pruebas de flexo tracción y compresión simple en las muestras atacadas, seguido de la fabricación de las secciones delgadas para su análisis petrográfico.

Petrografía

Muestra sana control

Muestra de concreto compuesta por agregados de cuarzo arenita y algunos granos de chert con formas angulares a sub angulares de esfericidad media a muy baja con tamaños entre 500 μ m hasta 1 cm aproximadamente, constituido casi en su totalidad por cristales de cuarzo y en menor proporción feldespato, moscovita y de matriz parcialmente recristalizada a biotita con distribución de tamaños inequigranular. La textura en los agregados pétreos es homogénea teniendo texturas clásicas con contactos puntuales a planares. La distribución agregados:matriz:vacios es de 75:20:5 (Figura 5). La distribución de vacíos es irregular, se observan zonas con más abundancia de vacíos y de tamaños irregulares.

La muestra presenta un tipo de fractura que afecta solo la matriz. Irregulares, moderadamente sinuosas, de espesor promedio 5 μ m y sin relleno (Figura 6).

La matriz de color pardo grisáceo, granular, compuesta en su mayoría por fases isotropas y en menor proporción por fases de birrefringencia baja y media de aproximadamente 15 μ m. Nuevamente el color homogéneo en la matriz sugiere una buena hidratación en la pasta de cemento, y el contacto con los agregados una buena adherencia entre la pasta y los áridos (Figura 5).

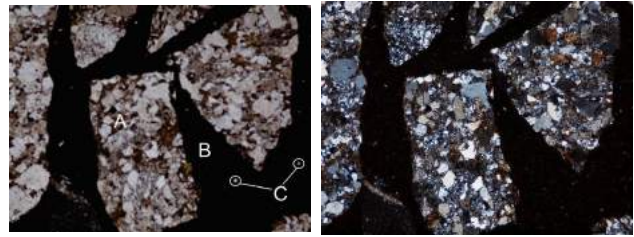


Figura 5. Relación agregados:matriz:vacios representativa. A- Agregado Silíceo. B- Pasta de Cemento. C- Vacíos. (Izquierda nicoles paralelos, derecha nicoles cruzados, 4X).

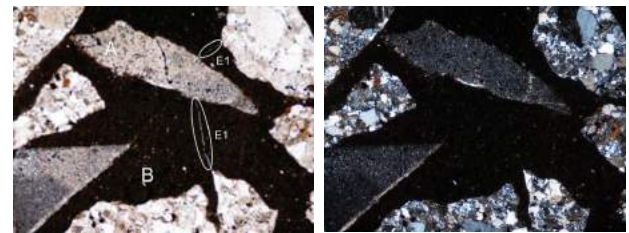


Figura 6. Micro fracturas en la matriz cementante. A- Agregado Silíceo. B- Pasta de Cemento. E1- Micro fracturas entre granos de áridos. (Izquierda nicoles paralelos, derecha nicoles cruzados, 4X).

Muestra atacada

El cambio más significativo está marcado por la aparición de una fase vetiforme incolora, de relieve bajo, birrefringencia baja, formado entre la matriz cementante y el agregado, cortando este en algunos casos (Figura 7). Esta corresponde a la formación de silicatos alcalinos, los cuales son el resultado principal de esta reacción que tiene como particularidad el ser expansivos y solubles en agua por lo cual su formación va en detrimento de las propiedades mecánicas y la durabilidad de los concretos.

Las fracturas observadas son del mismo tipo que las descritas anteriormente en la sección sana.

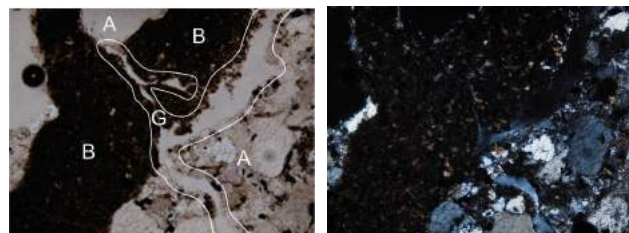


Figura 7. Formación de fase secundaria limitante entre el agregado y la matriz. A- Agregado Silíceo. B- Pasta de Cemento. G- Fase secundaria formada en el límite matriz-agregado (Izquierda nicoles paralelos, derecha nicoles cruzados, 10X).

Análisis y discusión

Manifestaciones de geles de silicatos cálcicos se observaron en tan sólo un 1% de la muestra, la pasta de cemento conservó su homogeneidad, la adherencia entre agregados y pasta de cemento es buena, y sin fracturación relevante, lo que indica el poco efecto de la reacción en este concreto en las condiciones evaluadas.

Ataque por fuego

Materiales y métodos

En la elaboración de las probetas se utilizó como árido pétreo dolomita proveniente de Río Claro, Antioquia, de la empresa Dolomitas de Colombia S.A.S. Gracias a la revisión bibliográfica que se desarrolló, se llegó a la conclusión de que este agregado sería la mejor opción para realizar el ataque debido a que los áridos calcáreos al ser calentados muestran un cambio en la coloración y generalmente se convierte en CaO, afectando así las propiedades mecánicas del concreto (Guise, 1997). El diseño de mezcla utilizado en la fabricación de las probetas fue el mismo que en el ataque por sulfatos.

Se fabricaron 9 probetas, 5 de ellas para ser atacadas y 4 de control. Tres de las muestras control después de haber sido correctamente curadas fueron sometidas cada una a un ensayo de flexo tracción y dos de compresión simple según ASTM C293 y ASTM C109 con el fin de obtener datos de apoyo.

Después de que las 5 muestras dispuestas a ser atacadas fueran curadas correctamente 28 días según el procedimiento de la norma ASTM C 192/C 192M – 06, se procedió a realizar el ataque, este se hizo en un horno de llama directa con el fin de simular un incendio. Las muestras se llevaron a los 400 °C y se mantienen a esta temperatura durante 10 min. Aquí se toman las muestras F400-1 y F400-2. 12 min después el horno alcanza los 800 °C y allí se repite el procedimiento de autorregulado por 10 min y finalmente se sacan las muestras F800-1 y F800-2.

Finalizada la quema, se procedió al análisis de los datos obtenidos de las pruebas de flexo tracción y compresión simple en las muestras atacadas, seguido de la fabricación de las secciones delgadas y debidamente el análisis petrográfico de ellas.

Petrografía

Muestra sana control

Dado que las probetas fabricadas para este ataque poseen las mismas características que las utilizadas en el ataque por sulfato, se remite al análisis de la sección sana control.

Muestra atacada a 400 °C

Muestra de concreto definida por agregados isótropos con formas heterogéneas que varían desde subredondeadas a angulosas predominantemente esbeltas, variando su tamaño desde 650 μ m hasta 17,46 mm. La proporción agregados:matriz:vacios es de 60:30:10. La litología correspondiente a los agregados es homogénea compuesta por dolomita caracterizada por presentar una distribución bimodal en los tamaños de grano con medias de 160 y 400 μ m con una textura granular irregular definida por contactos entre los granos cóncavo-convexos, suturados y localmente poligonal con puntos triples (Figura 8). Ocasionalmente se identifican minerales trazas contaminantes de birrefringencia baja y alto relieve acompañando la dolomita entre los agregados; por otro lado, en los espacios entre los agregados y la matriz se identifica un mineral con forma vetiforme, de aspecto silíceo de baja birrefringencia y relieve bajo.

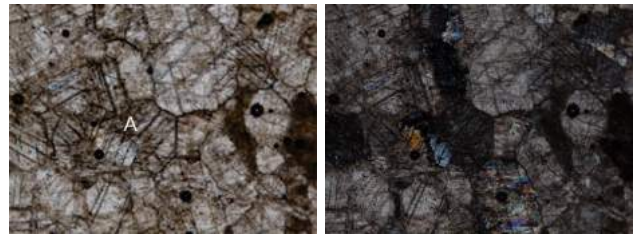


Figura 8. Contacto entre granos en la Dolomita. Zona no afectada. A- Agregado Calcáreo (Izquierda nicóles paralelos, derecha nicóles cruzados, 4X).

La matriz se describe como una pasta de partículas muy finas de coloración parda amarillenta hacia los bordes en contacto con los vacíos y más marrón en el centro de la matriz. La relación entre los agregados y la matriz está definida por contactos discretos tomando una coloración más oscura en la matriz.

El fracturamiento que presenta la muestra se encuentra en la matriz sin afectar los agregados y se caracteriza por estar generalmente sin relleno, sinuosas, y variar su espesor entre 10 y 30 μ m.

Puntualmente en la zona atacada la matriz muestra un cambio de coloración en donde se torna más oscura y se observa una leve distorsión en el contacto de los granos (Figura 9).

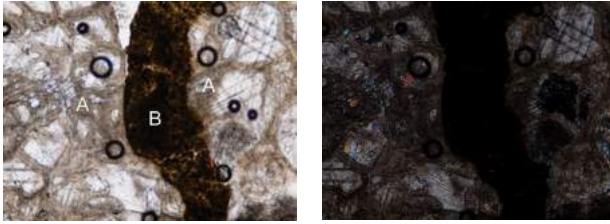


Figura 9. Zona de ataque. A- Agregados calcáreos con contactos de granos distorsionados. B- Pasta de cemento de color heterogéneo, poco uniforme y oscurecido. (Izquierda nicoles paralelos, derecha nicoles cruzados, 10X).

Muestra atacada a 800 °C

Muestra de concreto definida por agregados isotropos con formas heterogéneas que varían desde subredondeadas a angulosas predominantemente esbeltas, variando su tamaño desde 450 mm hasta 13,75 mm. La proporción agregados:matriz:vacios es de 60:25:15. La litología correspondiente a los agregados es homogénea compuesta por dolomita caracterizada por presentar una distribución bimodal en los tamaños de grano con medias de 150 y 450 μm con una textura granular irregular definida por contactos entre los granos cóncavo-convexos, suturados, localmente poligonal con puntos triples y más puntualmente contactos dispersos no muy definidos (Figura 10).

La matriz se describe como una pasta de partículas muy finas, de coloración parda oscura, con motas más marrones oscuras hacia el centro de la matriz. La relación entre los agregados y la matriz está definida por contactos discretos tomando una coloración más oscura en la matriz. El fracturamiento que presenta la muestra se encuentra en la matriz sin afectar los agregados y se caracteriza por estar generalmente sin relleno, sinuosas, y variar su espesor entre 15 y 40 mm (Figura 10).

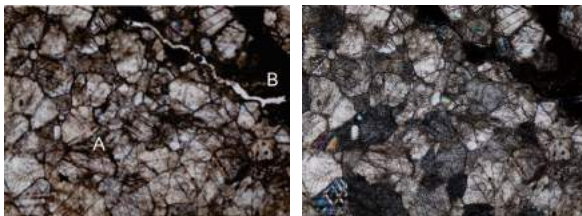


Figura 10. Contacto entre granos en la Dolomita. Zona no afectada. A- Agregado Calcáreo. B- Pasta de Cemento (Izquierda nicoles paralelos, derecha nicoles cruzados, 4X)

Puntalmente en la zona atacada los agregados presentan una coloración mucho más café oscura, con pérdida aparente de la propiedad de extinción, distorsión en el contacto de granos y quemaduras en algunos de estos; la matriz muestra espacios porosos, zonas de desgaste y zonas de coloraciones muy oscuras casi negruzcas (Figura 11).

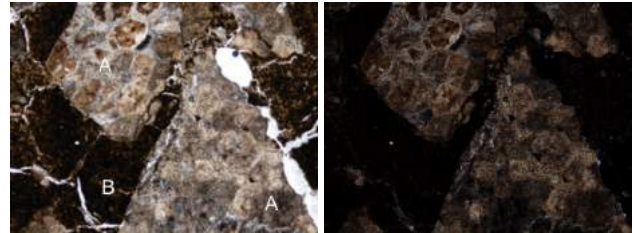


Figura 11. Zona de ataque. Matriz oscura, porosa y agrietada; contacto de granos distorsionados y granos quemados. A- Agregado calcáreo quemado. B- Pasta de Cemento (Izquierda nicoles paralelos, derecha nicoles cruzados, 10X)

Análisis y discusión

El examen petrográfico evidenció un aumento en el fracturamiento de la pasta cementante, intensificando este hacia la periferia de la muestra, debido a un desprendimiento lento que ocurre en forma de fracturas paralelas a la superficie afectada por el fuego, conduciendo a una separación gradual de las capas de concreto (Ingham, 2009). Se observa una pérdida en la adherencia entre los agregados y la pasta de cemento, con fracturamiento y separación entre ellos, dado que los límites grano-matriz actúan como planos de debilidad frente al ataque.

A pesar de haber notado una distorsión entre los contactos de granos y una cuasi calcinación de los agregados a medida que la temperatura aumentó, a comparación de lo visto (Koca et al., 2006), a 800 °C aún se conserva levemente la textura y estructura de la roca, sin embargo, la mineralogía del árido es casi irreconocible a esta temperatura. La distorsión entre contactos de granos puede generar una pérdida significativa en la resistencia del agregado debido a una disminución en el área de contacto, perdiendo estructura y capacidad de carga, lo que puede sugerir una relación entre el tamaño de grano del agregado y la pérdida de resistencia en concretos atacados por fuego.

El color en los agregados varió de un naranja pálido en las probetas de 400 °C a un rojo marrón en las muestras de 800 °C, relacionando el aumento de la temperatura con el desarrollo del color rojizo en los agregados (Ingham, 2009; Short, Purkiss & Guise, 2001).

A 400 °C (Figura 9), la matriz presenta un color poco uniforme y con fases anisótropas, sin embargo, a 800 °C se observa una completa isotropía y un color negro uniforme (Figura 11), esto sucede debido a que después de los 500 °C la matriz de cemento se vuelve completamente anisotrópica (Ingham, 2009).

Comportamiento mecánico

En la Tabla 1 se presentan los valores de resistencias a la flexión y a la compresión, exhibidas tanto por las muestras alteradas como en las inalteradas (no sometidas a ataque). Esto para los 3 ataques descritos anteriormente.

Tabla 1. Resumen de resistencia promedio medidas en MPa.

		Sulfatos	Álcali-sílice	Fuego
Flexión	Inalterada	7,82	7,51	7,63
	Atacada	7,73	6,79	3,62
Compresión	Inalterada	36,72	33,72	35,11
	Atacada	33,86	28,23	10,24

Los resultados indican que el mayor cambio en cuanto a sus propiedades mecánicas fue presentado en las muestras expuestas al ataque por fuego. Su resistencia a la compresión tiene una pérdida del 70,8% con respecto al valor original, hecho que sería fatal para cualquier estructura civil.

En segundo lugar de deterioro se encuentra el concreto sometido a la reacción álcali-sílice donde con sólo un 1% de formación de silicatos alcalinos en la masa total de la muestra, se tiene una pérdida de resistencia a compresión del 16,3%.

El ataque por sulfatos evaluado afectó las propiedades mecánicas del concreto, especialmente la resistencia a compresión, reduciéndola en un 7,8%.

En todas las muestras se resalta el daño visual, se observan desgastes y decoloraciones, características que indican un desperfecto superficial en el concreto. Al llevar esto al contexto de una obra civil, podría verse reflejado en un deterioro del recubrimiento del concreto, y con esto, una mayor falencia frente a los agentes externos.

Conclusiones

En la petrografía se pudo ver que el mayor cambio fue presentado por las muestras expuestas al fuego con el aumento de fracturamiento y de planos que favorecen el fallo del concreto, con cambios en la composición y en las propiedades ópticas de la pasta de cemento y con la distorsión de los contactos entre los granos. Esto se vio muy bien reflejado en sus propiedades mecánicas, en donde prácticamente su resistencia quedó reducida a la tercera parte con solo ser sometido a 800 °C que es una temperatura normal en la mayoría de los incendios, este hecho sería fatal para cualquier estructura civil y se pudo ver en la petrografía.

Se evidenció la formación de yeso, brucita y sílica gel como fases secundarias producto de la reacción del C-S-H con los iones de sulfato, así como su asociación en la expansión del concreto. Sin embargo a corto plazo, el daño en el concreto producto del ataque por sulfato resultó ser el menos agresivo de los tres analizados debido probablemente a la baja concentración del agente agresor en el medio y a la corta duración del ensayo. Aun con la baja cantidad de fases secundarias formadas en el ataque por sulfatos la resistencia a compresión tuvo una pérdida del 7,8% con respecto al concreto que no estuvo sometido al ataque.

La reacción álcali-sílice produjo alrededor de los granos de chert la formación de silicatos alcalinos, esta fase en el tiempo de evaluación llegó a ser apenas el 1% del volumen de pasta, sin embargo, en términos de resistencia a compresión significó una caída del 16,3% con respecto a la muestra control.

A través de técnicas petrográficas se logran evidenciar, diferenciar y caracterizar las patologías presentes en muestras de concreto que han sido atacadas con agentes que van en contra de su durabilidad. De igual modo, se pueden determinar los cambios y comportamientos existentes entre concretos sanos y concretos afectados por estos ataques. Además, se ve que es posible establecer correlaciones entre las alteraciones petrográficas y el desempeño mecánico de estos materiales.

Referencias

ASTM International,(2013) ASTM C192 / C192M - 13a Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory.

- ASTM International, (2013) ASTM C109 / C109M -13e1 "Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens).
- ASTM International, (2010) ASTM C293 / C293M -10 "Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading).
- ASTM International, (2002) ASTM C1012 - 02 Standard Test Method for Length Change of Hydraulic Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution.
- ASTM International, (2008) ASTM C1293 - 08b Standard Test Method for Determination of Length Change of Concrete Due to Alkali Silica Reaction.
- Broekmans, M. A. (2009). Petrography as an essential complementary method in forensic assessment of concrete deterioration: Two case studies. *Materials Characterization*, 644-654.
- Collepardi, M. (2003). A state-of- the-art review on delayed ettringite attack on concrete. *Cement and Concrete Composites*, 401-407.
- Elsen, J. (2006). Microscopy of historic mortars— a review. *Cement and Concrete Research*, 1416–1424.
- Guisse, S. E. (1997). The use of color image analysis for assessment of fire damaged concrete. *PhD thesis Aston University*. Birmingham: Department: Civil Engineering and Mechanical Engineering.
- Ingham, J. (2009). Application of petrographic examination techniques to the assessment of fire-damaged concrete and masonry structures. *Materials Characterization*, 700-709.
- Józwiak-Niedźwiedzka, D., Gibas, K., Brandt, A. M., Glinicki, M. A., Dąbrowski, M., & Denis, P. (2015). Mineral composition of heavy aggregates for nuclear shielding concrete in relation to alkali-silica reaction. *Procedia Engineering*, 162-169.
- Katayama, T. (2010). The so-called alkali-carbonate reaction (ACR) — Its mineralogical and geochemical details, with special reference to ASR. *Cement and Concrete Research*, 643–675.
- Koca, M., Ozden, G., Yavuz, A., Kincal, C., Onargan, T., & Kucuk, K. (2006). Changes in the engineering properties of marble in fire-exposed columns. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 520-530.
- Lozano, J. E. (2003). La petrografía, una herramienta de control de calidad y diagnóstico. Retrieved from Revista Universidad Nacional de Colombia: <http://revistas.unal.edu.co/index.php/email/article/view/1182>
- Lukschová, Š., Průkryl, R., & Pertold, Z. (2009). Petrographic identification of alkali-silica reactive aggregates in concrete from 20th century bridges. *Construction and Building Materials*, 734-741.
- Santhanam, M., Cohen, M., & Olek, J. (2003). Effects of gypsum formation on the performance of cement mortars during external sulfate attack,. *Cement and Research*, 325-332.
- Short, N., Purkiss, J., & Guise, S. (2001). Assessment of fire damaged concrete using colour image analysis. *Construction and Building Materials*, 9-15.
- Sutter, L., Peterson, K., Touton, S., Van Dam, T., & Johnston, D. (2006). Petrographic evidence of calcium oxychloride formation in mortars exposed to magnesium chloride solution. *Cement and Concrete Research*, 1533-1541.
- Zerbino, R., & Glaccio, S. (2014). Evaluation of alkali-silica reaction in concretes with natural rice husk ash using optical microscopy. *Construction and Building Materials*, 132-140.