

# **El microscopio de luz polarizada y sus potencialidades en la investigación de materiales de construcción**

**Sergio Betancourt Rodríguez**

Edición: Liset Ravelo Romero

Corrección: Estrella Pardo Rodríguez

Sergio Betancourt Rodríguez, 2014

Editorial Feijóo, 2014

ISBN: 978-959-250-931-3



Editorial Samuel Feijóo, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Carretera a Camajuaní, km 5 ½, Santa Clara, Villa Clara, Cuba. CP 54830

1. Introducción / 3
2. El microscopio de luz polarizada / 5
  - 2.1. Generalidades / 5
  - 2.2. Constitución del microscopio de luz polarizada / 5
  - 2.3. Recorrido de la luz en el microscopio / 7
  - 2.4. Resolución del microscopio / 8
  - 2.5. Preparación de la muestra para su observación en el microscopio de luz polarizada / 9
3. El trabajo con el microscopio de luz polarizada / 12
  - 3.1. Enfoque / 13
  - 3.2. La luz polarizada / 14
  - 3.3. Índice de refracción / 15
  - 3.4. Línea de Becke / 16
4. Comportamiento óptico de los cristales (Indicatriz óptica) / 17
5. Principales operaciones o determinaciones que pueden realizarse durante la observación de las muestras con el microscopio de luz polarizada / 19
  - 5.1. Estudio del material sin el analizador / 19
  - 5.2. Estudio bajo nicols cruzados y luz paralela (ortoscopia) / 22
  - 5.3. Estudio con nicols cruzados y dispositivo de luz convergente (conoscopia) / 23
  - 5.4. Determinación del sistema de cristalización de las fases a partir de su comportamiento óptico / 24
  - 5.5. Identificación de las fases / 24
6. Algunas aplicaciones del microscopio de luz polarizada en la investigación de materiales de construcción / 25
  - 6.1. La petrografía del hormigón / 25
  - 6.2. Evaluación de la fisuración / 26
  - 6.3. Identificación del tipo de aglomerante usado / 26
  - 6.4. La observación de la estructura / 27
  - 6.5. Configuración del sistema de poros / 28
  - 6.6. Estimación de la relación a/c / 28
  - 6.7. Ordenamiento de las partículas que conforman la estructura (ventaja sobre los R-X) / 28
  - 6.8. Profundidad de penetración de determinadas sustancias / 29

6.9. Reacción álcali-agregado / 29

6.10. Identificación de la composición mineral de los áridos / 29

6.11. Determinación de la profundidad de carbonatación de un hormigón / 30

6.12. Identificación de fases en el clínker de cemento Portland / 30

6.13. La preparación de las muestras de hormigón y mortero. Cuidados especiales / 31

REFERENCIAS / 32

ANEXOS / 33

## **7. Introducción**

El campo de aplicación de los materiales de construcción depende, entre otros factores, de las propiedades de los mismos, mientras que estas últimas están condicionadas por su composición química, tipo de enlace y estructura interna. Recuerde que precisamente la división de los materiales en los tipos fundamentales; metales, cerámicos, poliméricos y mixtos, está hecha en función de dichos factores. O sea, que en el trabajo tanto teórico como práctico es importante el conocimiento de la composición y la estructura de los materiales.

Para el estudio de la composición de los materiales de construcción se utilizan un conjunto de técnicas analíticas, que van desde el método de análisis químico por vía húmeda clásico, hasta técnicas analíticas instrumentales muy novedosas. Por otra parte, para el estudio de la estructura de los materiales también se dispone de un elevado número de técnicas instrumentales, que pueden incluso combinar el estudio de la composición y la estructura, como el caso de la técnica de EDX.

Ni siquiera en la era del maravilloso «Microscopio de Fuerza Atómica» los métodos clásicos de análisis de materiales, tanto naturales como artificiales, han perdido su aplicabilidad en la obtención de valiosa información sobre la composición y rasgos estructurales de las sustancias. Un ejemplo de ello lo constituye el microscopio de luz polarizada o microscopio petrográfico, muy utilizado en varias ramas de la ciencia y la tecnología. En ocasiones este sencillo instrumento resulta más útil que el propio microscopio electrónico u otras técnicas instrumentales de investigación mucho más complejas, sobre todo cuando se trata de la observación o identificación de características estructurales con dimensiones en el intervalo entre unas 50  $\mu\text{m}$  y 500  $\mu\text{m}$ . En el campo de los materiales de construcción son muchos los problemas que pueden resolverse con este nivel de amplificación de la imagen, amén de otras posibilidades que brinda el hecho de emplearse luz polarizada.

No se trata de restarle importancia a técnicas de investigación realmente muy potentes, como el caso de la microscopía electrónica, las técnicas de rayos X, análisis térmico y otras técnicas analíticas modernas. Pero el caso es que ante cada situación debemos tomar en consideración aspectos técnicos, de logística y sobre todo económicos. En este sentido el microscopio de luz polarizada tiene la ventaja de ser un método relativamente barato comparado con otros capaces de determinar fases o de estudiar micro-estructuras de materiales. La preparación de la muestra no es muy complicada, aunque claro que se requiere de un mínimo de accesorios y personal entrenado en su elaboración, pero brinda la ventaja de requerir solamente un pequeño fragmento del material a investigar, pudiéndose hacer la preparación en las direcciones de mayor interés de acuerdo con el objetivo de la investigación en cuestión.

Antes de comenzar el desarrollo del tema propiamente dicho, es conveniente destacar el objetivo y alcance que se pretende con el estudio de esta temática por los ingenieros civiles y arquitectos. Evidentemente que la investigación de los materiales de construcción constituye generalmente un problema de carácter multidisciplinario, en el que están involucradas varias disciplinas. Es necesario entonces el trabajo conjunto de especialistas, donde cada uno aporte sus conocimientos y experiencias en su rama, para lo cual se necesita un acercamiento mutuo que permita el entendimiento y aproximación progresiva a la solución del problema planteado.

No se pretende entonces que el ingeniero o arquitecto sea capaz de utilizar el microscopio y realizar por sí mismo todas las determinaciones, sino que sea capaz de conocer el campo de aplicación de la técnica, y ante un caso concreto, acudir al especialista solicitándole con precisión lo que necesita, trabajar en conjunto e interpretar adecuadamente los resultados que se obtengan del estudio.

## **8. El microscopio de luz polarizada**

### **8.1. Generalidades**

Entre los métodos ópticos para el estudio de los materiales, los más elementales son las lupas de mano y las lupas binoculares o microscopios estereoscópicos de distinto grado de complejidad. No por sencillos dejan de ser útiles en la caracterización de los materiales, ya que en muchas ocasiones los rasgos estructurales al nivel de las fracciones de milímetro son determinantes en el comportamiento físico y mecánico del producto. Con tales instrumentos se logra la amplificación de la imagen, permitiendo el estudio de características no observables macroscópicamente de manera satisfactoria. Se pueden realizar mediciones del tamaño de las partículas del material, fotografiar imágenes, conocer las relaciones entre sus partes componentes, observar la morfología de partes importantes del material, diferenciar tipos de poros o fisuras, etc.

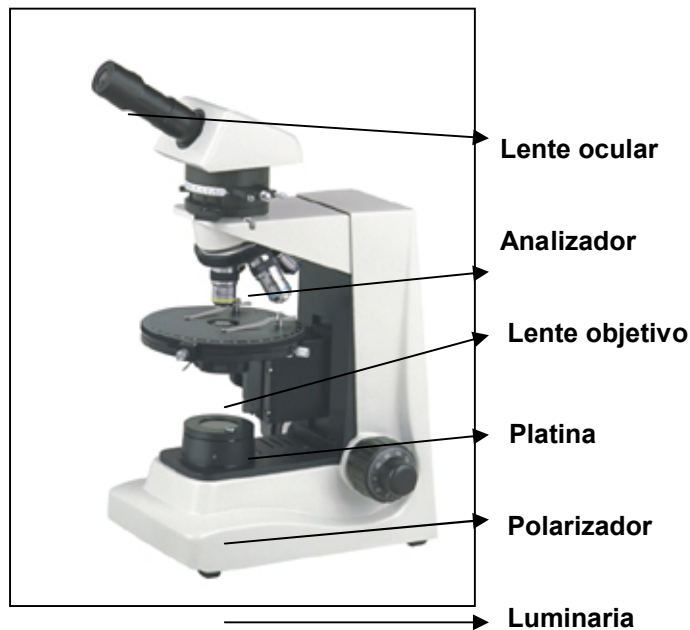
### **8.2. Constitución del microscopio de luz polarizada**

Una técnica de valor inestimable es el microscopio de luz polarizada, el cual es un instrumento relativamente común, muy utilizado para estudios en distintas ramas de la ciencia y la tecnología. Se trata de un microscopio, que además del sistema de lentes ordinario posee, entre otros aditamentos, un polarizador y un analizador. Para el trabajo común, según se describirá posteriormente, frecuentemente deben colocarse perpendicularmente las direcciones de vibración del analizador y del polarizador.

La presencia de una platina giratoria en los microscopios de luz polarizada es otra peculiaridad que permite la realización de importantes operaciones en el estudio de los parámetros ópticos de las fases que se analizan. Esta platina posee un limbo graduado que permite además la medición de ángulos, operación que resulta clave en el análisis del comportamiento óptico de algunos minerales.

Las partes principales que componen un microscopio de luz polarizada (Ver Foto 1), además de la armazón o esqueleto estructural del instrumento con sus mecanismos de

acercamiento y alejamiento para el enfoque, etc., están: los relacionados con el sistema óptico ordinario (lentes), lentes oculares, lentes objetivos (de distinto aumento), platina giratoria, luminaria, etc., y los que posibilitan el trabajo con la luz polarizada; sistema óptico de convergencia, polarizador, analizador, etc.



**Foto 1. Microscopio de luz polarizada modelo NP-400B Standard**

Normalmente los microscopios se comercializan con un grupo de accesorios muy útiles para el trabajo corriente, entre ellos se destacan: ocular micrométrico, objetivo de inmersión, cuña de cuarzo, filtros, compensadores, etc. El cambio de aumento de la observación en el microscopio se logra muy fácilmente cambiando de lente objetivo. De acuerdo con el modelo del microscopio esta operación puede realizarse de distinta manera, en unos casos removiéndolos y fijándolos con una presilla, en otros por un



mecanismo de «revólver», en los que el cambio se realiza simplemente con un giro del conjunto. Estos últimos son los más recomendados, pues en los primeros es frecuente que al colocar los objetivos queden descentrados, requiriéndose entonces una operación de centrado, que es algo incómodo para los principiantes.

Los lentes oculares generalmente son intercambiables también (oculares simples ó micrométricos), lo cual permite además modificar el aumento resultante de acuerdo con las necesidades de lo que se desea observar en la muestra. El aumento es simplemente la relación que existe entre las dimensiones de la imagen que se observa a través del microscopio y las dimensiones del objeto real, que puede calcularse multiplicando el valor del aumento del lente ocular por el del lente objetivo.

### **8.3. Recorrido de la luz en el microscopio**

Normalmente la fuente de luz de los microscopios es una lámpara colocada en la parte inferior del instrumento, que proyecta un haz disperso regulable por medio de un diafragma. El sistema de iluminación, como se verá más adelante, juega un papel muy importante en los microscopios y el mismo puede ser de distinto grado de complejidad de acuerdo con los modelos de los distintos fabricantes. Sin embargo, lo más común es que se use un prisma donde al refractarse la luz se dirija hacia el sistema óptico.

El recorrido de la luz en el sistema óptico difiere en función del tipo de trabajo que se esté realizando, es decir, si se están haciendo operaciones con luz plano polarizada (sin analizador) o con nicols cruzados (con analizador) y también si se trabaja con luz paralela (ortoscopia) ó determinación de parámetros ópticos con luz convergente (conoscopia). De manera preliminar (dejando solo los lentes fundamentales) podemos decir que para el trabajo ordinario con luz polarizada entre nicols cruzados, la luz después de pasar por el polarizador atraviesa la muestra en la sección delgada, luego el analizador y finalmente llega al lente ocular y al ojo.

#### **8.4. Resolución del microscopio**

Luego que la luz atraviesa la muestra, la misma es controlada por el lente objetivo, el cual ya forma una imagen primaria del objeto observado en el plano focal del objetivo. La resolución o poder resolverse de un microscopio es la menor distancia en que dos puntos en el objeto pueden apreciarse separados uno de otro. La resolución de la imagen final está controlada por la abertura numérica del lente, la cual depende a su vez del índice de refracción del medio de inmersión y del ángulo del cono de luz que llega al lente objetivo. Esta relación puede establecerse del modo siguiente:

$$AN = n \sin \theta \quad \text{Donde:}$$

AN.... Abertura numérica del lente

n.....Índice de refracción del medio de inmersión

$\theta$  ..... Medio ángulo del cono de luz que entra al objetivo

Así, si el medio de inmersión es el aire ( $n=1,0$ ) y  $\theta = 30^\circ$ :

Entonces:

$$AN = 1,0 \sin 30^\circ =$$

$AN = 0,5$  para esa configuración del lente objetivo.

En el ejemplo anterior, la resolución puede ser calculada como:

$$d = 0.5\lambda/AN \quad \text{Donde:}$$

d... distancia resuelta entre dos puntos

$\lambda$  ... longitud de onda de la luz en nm ( $\lambda = 550$  nm)

$$d = (0.5 \times 550) / 0.5 = 550 \text{ nm } \text{ ó } 0.55 \text{ } \mu\text{m}$$

O sea, que con este lente objetivo, el microscopio puede apreciar como puntos separados a los que estén ubicados a más de 0,55  $\mu\text{m}$ .

Como puede apreciarse, a medida que aumenta el índice de refracción del medio de inmersión, aumenta la abertura numérica y por tanto también el poder de resolución del objetivo. O sea, es posible observar separados puntos separados a una menor distancia.

Puede decirse que la resolución de los microscopios ópticos está limitada por la difracción que, dependiendo de la apertura numérica (AN) del sistema óptico y la longitud de onda de la luz utilizada ( $\lambda$ ), establece un límite definido ( $d$ ) a la resolución.

Así, considerando que las aberraciones ópticas fueran despreciables, la resolución sería:

$$d = \lambda / (2 \cdot \text{AN})$$

Normalmente, se supone una  $\lambda$  de 550 nm, correspondiente a la luz verde.

Si el medio es el aire, la AN práctica máxima es de 0,95. Esto significa que en el mejor de los casos, el microscopio óptico está limitado a una resolución de unos 0,2 micrómetros.

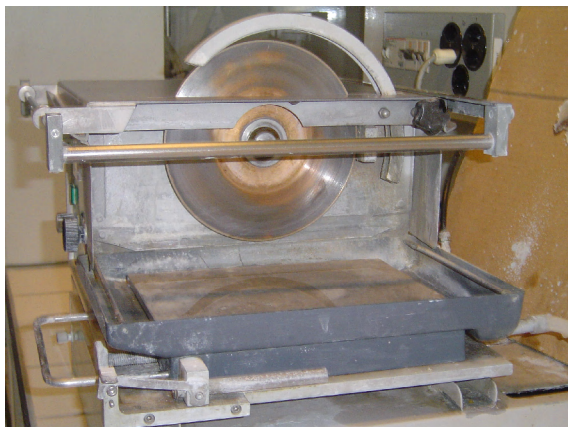
### **8.5. Preparación de la muestra para su observación en el microscopio de luz polarizada**

La muestra del material a estudiar se coloca sobre la platina para su observación, por lo que se infiere que su espesor debe ser lo suficientemente delgado para permitir el paso de la luz que proviene de la parte inferior del equipo. Es decir, que el instrumento trabaja con luz transmitida. Esta preparación especial se denomina *sección delgada* ( $\sim 0,03$  mm de espesor), la cual se realiza comúnmente para fines ordinarios en talleres especializados o puede ser preparada directamente por el investigador para garantizar el logro de objetivos más específicos.

La preparación correcta de las secciones delgadas para su estudio en el microscopio es un proceso clave en el aprovechamiento de las potencialidades de esta técnica, y ello comienza desde la propia selección de la muestra o fragmento de material de donde se pretende obtener la sección delgada, así como de la dirección del corte. O sea, que en

función del objetivo del estudio, deberá escogerse una dirección de corte u otra. Por ejemplo, si queremos analizar el sistema de recubrimiento de un muro de mampostería, lo más conveniente sería obtener un fragmento del mortero y realizar una sección delgada en una dirección perpendicular al muro o paramento, de manera tal que se puedan observar las distintas capas o aplicaciones que se le realizaron, su espesor, tipo de aglomerante, arena empleada, etc.

Después de obtener la porción de material que se considere representativo (por medio de un impacto de martillo, cincel, broca u otro medio) y decidir la dirección en que se desea hacer la preparación, se realiza entonces el corte (con un disco de corte) y de ser necesario se pule la superficie obtenida. Entonces se adhiere la superficie lisa a un portaobjetos de vidrio, utilizando para ello algún tipo de resina. En los estudios mineralógicos ordinarios se acostumbra a usar como pegamento el bálsamo de Canadá, pues es un material cuyos parámetros ópticos son bien conocidos por la comunidad científica de esas disciplinas y sirve normalmente como referencia o patrón de comparación, así por ejemplo, su índice de refracción es de 1,54. (Foto 2)



**Foto 2. Disco de corte para la preparación de las muestras**

Luego de obtenido el conjunto descrito anteriormente, se realiza otro corte a la muestra, en esta oportunidad tratando de que quede solamente una lámina muy delgada pegada al portaobjetos de vidrio. Entonces se desbasta la preparación hasta que se logre un espesor de menos de 0,04 mm. (que permita el paso de la luz) y finalmente se cubre la muestra con un cubreobjetos de acetato.

En ocasiones, el estudio de las muestras de material a investigar puede hacerse tanto con luz reflejada como con luz transmitida, pero en otras, como en el caso de los materiales opacos es posible solamente con luz reflejada. La decisión de usar luz reflejada en el estudio puede también estar condicionada por la posibilidad de usar alguna técnica concreta, tal como se describirá más adelante.

La preparación de las muestras para su estudio bajo el microscopio con luz reflejada es normalmente más sencilla que para su observación o estudio con luz transmitida, pues solamente una de las caras de la preparación se corta y se pule, cubriéndose su superficie con un cubreobjetos de vidrio ó acetato, que se pega con el propio bálsamo de Canadá ó con alguna otra resina. La forma de preparación de las muestras difiere notablemente de acuerdo con las características del material objeto de estudio y con los objetivos de la investigación.

Cuando el material a estudiar tiene la suficiente coherencia o resistencia para resistir los efectos agresivos de las distintas operaciones de preparación de la muestra, se procede a cortar una pieza en forma de bloque de dimensiones convenientes de acuerdo con el estudio a realizar. Luego de seleccionar la superficie objeto de estudio, se pule con el uso de una máquina especializada o en su defecto manualmente. Este procedimiento es apropiado para muchos tipos de materiales metálicos o de carácter pétreo (como el propio hormigón). Dada su importancia, los detalles de este tipo de preparación para el caso de muestras de hormigón se analizarán más adelante. (Foto 3)



**Foto 3. Máquina para el pulido de los especímenes**

Por el contrario, cuando el material a estudiar no tiene la suficiente resistencia, o simplemente cuando su grado de coherencia no permite su preparación de la forma descrita anteriormente sin afectación de los rasgos que van a ser estudiados, se realiza entonces la conformación de un bloque impregnado con resina. Para ello, luego del secado, se somete la muestra a impregnación al vacío, que luego de endurecida se corta y se pule de la misma manera que en el caso anterior.

Para el estudio de materiales a granel, lo cual es muy frecuente en el campo de investigación de los materiales de construcción, puede realizarse la conformación de un bloque aglomerado. Hasta el momento, el aglomerante que más se ha empleado con este propósito es la resina, la cual tiene la ventaja de endurecer rápidamente proporcionando la suficiente resistencia, además de que su color y comportamiento óptico la hacen fácilmente distinguible de las partículas que aglomera. Para la conformación de la preparación del bloque aglomerado se toma un recipiente como molde, donde se deposita la mezcla del material con la resina. Antes de la aglomeración muchas veces es conveniente realizar un secado del material para facilitar la adherencia. Luego de conformado el bloque se procede al pulido de la superficie de estudio de la manera antes descrita.

Otras formas y especificidades en la preparación de las muestras para su estudio se detallarán más adelante, pues dependen en gran medida del objetivo del estudio y de la técnica empleada.

## **9. El trabajo con el microscopio de luz polarizada**

Para su estudio, la sección delgada se coloca sobre la platina giratoria del microscopio, la cual posee un orificio que permite a su través el paso de la luz procedente de la lámpara y conducida hasta ella por el sistema de iluminación. La luz es convenientemente controlada mediante distintos dispositivos ópticos, antes y después de atravesar la muestra, ya que la forma en la cual interactúa ella con el material objeto de estudio puede ser usada para interpretar la imagen resultante. La luz emitida por la lámpara del instrumento es colectada

y dirigida hacia la muestra, después de pasar a través de varios lentes, diafragmas y filtros. Debe destacarse la gran importancia de lograr una buena iluminación como premisa imprescindible para garantizar una adecuada imagen durante la observación con el microscopio.

El trabajo con el microscopio de luz polarizada consiste entonces, en resumen, en dos etapas; en primera instancia se recomienda efectuar una observación de la muestra siguiendo el principio de ir de lo más general a lo más particular, o sea, observando primero los rasgos de mayores proporciones y luego los de menores dimensiones (de esta manera se puede disponer de una imagen fiel de la estructura del material que se analiza), y en segundo lugar, la determinación de una serie de constantes ópticas, que permiten conocer las características del material que se estudia. Puede determinarse el índice de refracción, el signo óptico de la indicatriz, forma de los granos cristalinos, relieve, color propio, etc. Una determinación muy sencilla es por ejemplo, si el material es isótropo o anisótropo. Es así que pueden llegar a identificarse fases o minerales, siempre y cuando el tamaño de sus partículas no sea exageradamente fino como en los casos de algunos materiales como la cal, el cemento, etc., aunque siempre es posible obtener cierta información de valor para la investigación realizada.

### **9.1. Enfoque**

Una operación elemental, pero imprescindible para comenzar la observación con un microscopio, es el «*enfoque*». Se trata simplemente de encontrar una distancia focal que brinde una imagen clara en el campo visual del instrumento, lo cual se realiza con la ayuda de los botones de ajuste (grueso y fino) que permiten el desplazamiento relativo de la platina con respecto a los lentes objetivos. La mayoría de los instrumentos actuales disponen de un mecanismo que permite desplazar (en altura) la posición de la platina hasta encontrar la distancia adecuada para la observación. Esta distancia es variable en función del aumento del lente objetivo que se seleccione para la observación, por lo que debe enfocarse nuevamente cada vez que se cambie de aumento.

No pocos son los principiantes que deterioran la sección delgada en el intento de lograr la observación correcta o enfoque del instrumento, pues llegan a presionar la sección

delgada con el lente objetivo hasta romperla, sin lograr una imagen adecuada. Para evitar esto es recomendable acercar el lente objetivo a la preparación, observando externamente el conjunto (no a través de los oculares) y luego ir separando su distancia mediante el ajuste grueso. Se apreciará entonces un mejoramiento progresivo de la calidad de la imagen, que podrá ajustarse finalmente mediante el botón de ajuste fino del instrumento, aunque con objetivos de muy poco aumento puede ser suficiente con el accionamiento del botón de ajuste grueso.

## **9.2. La luz polarizada**

La luz posee un carácter dual onda-partícula, refiriéndose a su manifestación; y posee una naturaleza electromagnética, refiriéndonos a su esencia <sup>[4]</sup>. La luz ordinaria manifiesta un comportamiento de onda electromagnética, de manera tal que las vibraciones de los vectores eléctrico y magnético ocurren en todas las posiciones perpendiculares a la dirección de propagación del rayo de luz.

Los lentes o dispositivos que son capaces de transformar la luz ordinaria en luz polarizada se denominan «*polarizadores*». Tales dispositivos pueden ser de láminas de vidrio, prismas de Nicol, polaroides (lámina dicróica), etc.

Según la concepción anterior, al pasar la luz ordinaria a través de ellos, todas las vibraciones de la luz emergente estarán orientadas en un solo plano, llamado «plano de polarización» (luz plano polarizada). Si otro lente semejante se coloca entonces con su plano de polarización perpendicular al anterior, no será posible el paso de la luz a través del sistema formado. Es así que entonces ese segundo lente puede servir para comprobar si la luz anterior estaba polarizada o no, simplemente haciéndolo girar 90°. Por eso los lentes que se ubican en tal posición sirven perfectamente como «*analizadores*», denominándoseles así en la literatura técnica.

El microscopio petrográfico puede usarse para la observación, tanto sin analizador, como con luz polarizada entre nicols cruzados (a los polarizadores se les conoce también como prismas de Nicol o nicols). Se dice que los nicols están cruzados cuando las direcciones de vibración de ambos se encuentran ubicadas en posición perpendicular, que es la



manera en que se realizan la mayor parte de las observaciones en el microscopio de luz polarizada.

Al usar el microscopio sin el analizador, cuando la luz pasa a través de la sección delgada, esta se encuentra plano polarizada y en ese estado llega al ojo proporcionando una imagen brillante que frecuentemente brinda el color del mineral.

Cuando la luz atraviesa un cristal de comportamiento anisótropo se refracta, dividiéndose entonces en dos rayos, que resultan paralelos a los ejes cristalográficos del cristal y orientados en una posición mutuamente perpendiculares. Estos dos rayos son denominados clásicamente «ordinario» y «extraordinario», resultando característico el hecho que el segundo posee mayor velocidad que el primero, por lo que en la literatura técnica a veces se le denominan como lento y rápido, respectivamente. Un resultado importante es que cuando dichos rayos emergen de la muestra están en planos perpendiculares y desfasados. De esta manera, al llegar al analizador, solamente los componentes de cada uno de los rayos que son paralelos a las direcciones del plano de vibración pueden atravesarlo, por lo que la luz emergente estará formada por dos rayos que vibran en el mismo plano, pero desfasados. Dichos rayos interfieren entre sí, proporcionando los llamados «colores de interferencia», que serán descritos más adelante.

### **9.3. Índice de refracción**

Una de las propiedades ópticas de los materiales que puede utilizarse como criterio para su diagnóstico, particularmente en las fases o granos independientes, es el índice de refracción. Aunque existen variados métodos mediante los que se puede medir dicho parámetro, constituye una ventaja el hecho de poder utilizar el propio microscopio de luz polarizada para este propósito. La determinación en este caso se basa en el aprovechamiento de un fenómeno conocido como línea de Becke, cuya descripción se brindará seguidamente.

#### **9.4. Línea de Becke**

En la zona de contacto o de transición entre un grano y la sustancia que lo rodea, que puede ser un líquido de inmersión ó simplemente el material utilizado como pegamento (resina o bálsamo de Canadá), cuando sus índices de refracción son diferentes y se observa bajo el microscopio, se puede apreciar un fino halo luminoso alrededor del grano. Dicho halo se conoce con el nombre de línea de Becke, resultando muy útil por el hecho de que cuando se acerca o se aleja el lente objetivo de la preparación, dicha línea se mueve hacia afuera o hacia adentro del grano, en dependencia de si los índices de refracción relativos son mayores o menores. Se puede comprobar que al subir el objetivo (o bajar la platina), la línea de Becke se desplaza hacia el material que posee mayor índice de refracción, ocurriendo lo contrario al realizar la operación inversa, o sea al bajar el objetivo (o subir la platina).

Aprovechando el fenómeno anterior, utilizando líquidos de inmersión de distinto índice de refracción (conocidos), se puede determinar mediante un proceso de tanteo el índice de refracción de la fase o mineral que se estudia. Para ello se recomienda utilizar pequeños granos colocados sobre un portaobjetos de vidrio y depositándole posteriormente una gota del líquido de inmersión. Debe recordarse que las fases anisótropas poseen dos o tres índices de refracción (uniáxicos y biáxicos respectivamente), por lo que la determinación exacta de este parámetro exige de un proceso algo más detallado, pero que se sale de los objetivos del presente material. También, de manera mucho más práctica, se puede aprovechar el fenómeno cuando se realiza la observación de secciones delgadas de materiales poliminerale, en los que algunos de ellos resultan fácilmente identificables y nos sirven de referencia para realizar el diagnóstico de otros, comparando los índices de refracción.

Otro fenómeno relacionado con la diferencia de índice de refracción entre las partes componentes de un material cuando son observadas bajo un microscopio es el denominado «relieve». Así se designa el efecto que se aprecia al observar los granos minerales, en los que se observa una superficie irregular que incluso en algunas partes llega a parecerse a un orificio presente en la muestra. Se puede inferir que mientras mayor sea la diferencia entre los índices de refracción, mayor será el relieve y que cuando están

en contacto sustancias de un mismo índice de refracción, no existirá el relieve. En la práctica se acostumbra a emplear una clasificación cualitativa para la descripción del relieve (débil, mediano, fuerte, etc.). Además, se dice que es positivo cuando el índice de refracción del material observado es mayor que el del bálsamo de Canadá (que es lo más frecuente) y negativo cuando ocurre lo contrario.

## **10. Comportamiento óptico de los cristales (Indicatriz óptica)**

Un diagnóstico más preciso de las fases componentes de los materiales investigados mediante la técnica del microscopio de luz polarizada se puede lograr solamente cuando se realiza un estudio más completo basado en los principios de la cristalografía óptica. Se comprende que para poder aplicar dichos principios en el trabajo práctico de identificación de fases en los materiales, se requiere previamente de un conocimiento profundo de las características mineralógicas de las mismas, siendo conveniente también que se tenga previamente una idea ó hipótesis de los posibles minerales que se pueden encontrar en la muestra estudiada.

Así por ejemplo, al estudiar muestras de clínker de cemento Portland, se debe esperar que las fases principales que componen la muestra sean de: alita, belita- $\beta$ , aluminato tricálcico y ferro-aluminato tetracálcico, por lo que la tarea se simplifica a distinguir dichas fases principales en el conjunto. Por el contrario, de manera excluyente, no sería lógico suponer que pudieran existir granos de cuarzo, plagioclasas, yeso, calcita, etc., que de hecho pueden discriminarse (recuerde que las temperaturas de cocción del clínker de cemento Portland se encuentran alrededor de los 1 450 °C).

El comportamiento óptico de los cristales (además de su composición) está estrechamente relacionado con su grado de simetría, o sea con el sistema cristalino al que pertenezca. Por ejemplo, las fases que están cristalizadas en el sistema cúbico o regular tienen la característica de poseer un solo índice de refracción. Si un rayo de luz atraviesa un cristal de este tipo, si la incidencia es inclinada, se desvía de acuerdo con el valor de su índice de refracción. A tales cristales se les denomina entonces «isótropos» (ópticamente isótropos). Es decir, que en los cristales que pertenecen al sistema cúbico el comportamiento de la luz es independiente de su dirección, es igual en todas las direcciones.

Un efecto diferente se manifiesta si un rayo de luz atraviesa, por ejemplo, a un cristal de calcita (que es un mineral que cristaliza en el sistema hexagonal). En este caso al incidir un rayo de luz, se divide en dos, uno llamado rayo ordinario (que se comporta como si fuera isótropo) y otro llamado extraordinario que se desvía según otras leyes. La luz de ambos rayos se encuentra polarizada en planos perpendiculares entre sí. Mientras que la velocidad del rayo ordinario es constante en todas direcciones (un eje óptico), la del extraordinario es variable dentro de determinados valores. Así, que los cristales de este tipo tienen dos índices de refracción y se denominan «*uniáxicos*». Todos los cristales con este comportamiento pertenecen a los sistemas tetragonal, hexagonal y romboédrico.

Un tercer grupo de cristales se caracteriza por presentar un comportamiento óptico mucho más complejo, pero que puede resumirse de manera muy simplificada en el hecho de que poseen tres índices de refracción (dos ejes ópticos). A este grupo de cristales se les denomina «*biáxicos*». A ellos pertenecen las fases que cristalizan en los sistemas rómbico, monoclinico y triclínico.

Como se ha expuesto, en los cristales uniáxicos y biáxicos existen dos o tres índices de refracción, respectivamente, dados por los rayos ordinario y extraordinario generados en el interior del cristal al incidir un rayo de luz inclinado. De acuerdo con la relación entre dichos índices de refracción, se establece un parámetro distintivo muy útil, que es el denominado «*signo óptico*». En los cristales uniáxicos, se dice que el cristal es positivo cuando el índice de refracción del rayo extraordinario es mayor que el del rayo ordinario. En los cristales biáxicos resulta algo diferente y el signo óptico se asocia al valor del ángulo que existe entre los dos ejes ópticos, siendo positivo cuando el mismo es menor de  $90^\circ$  y negativo cuando es mayor.

Debe destacarse que el estudio de los minerales con el microscopio de luz polarizada constituye una verdadera especialidad «*la microscopía óptica*», utilizada de manera extensiva por los mineralogistas. Como se comprenderá, no debe aspirarse a que el especialista en materiales de construcción lo sea también en mineralogía óptica, pero sí debe ser capaz de comprender el método que se sigue en la identificación, conocer los fundamentos de la microscopía óptica y aplicar los mismos al estudio de los materiales con

que se enfrenta, como los morteros, hormigones, asbesto-cemento, productos cerámicos, etc., los que de manera parcial están compuestos por minerales en mayor o menor proporción.

## **11. Principales operaciones o determinaciones que pueden realizarse durante la observación de las muestras con el microscopio de luz polarizada**

### **11.1. Estudio del material sin el analizador**

#### **Forma de los granos. Medición del tamaño de las partículas**

Un rasgo de gran importancia en el estudio de cualquier material es la forma de los granos o partículas que lo componen, ya que ello influye de una manera u otra en las propiedades o comportamiento del mismo. En el caso de los materiales de construcción, tanto naturales como artificiales, la forma de las partículas puede ser un indicador que revele importantes detalles del proceso de formación de cada una de las partes, como por ejemplo, secuencia de formación, forma de ubicación o deposición, etc.

Particular interés posee el conocimiento de las dimensiones de las partículas, mucho más si tenemos en cuenta que esta característica es de carácter cuantitativo y que puede relacionarse con parámetros cualitativos (tipo de fase, composición, forma de las partículas, etc.). La distribución por tamaños de las partículas resulta decisiva en el comportamiento de materiales de construcción como la arena, gravilla y otros tipos de áridos.

Mucho más interesante que la sola determinación del tamaño de las partículas es la posibilidad que brinda el microscopio óptico de la determinación del área de la sección transversal de los granos en la dirección del corte realizado para la construcción de la sección delgada, lo cual permite sacar conclusiones acerca de la proporción relativa de las distintas partes o fases componentes del material, incluso, la inferencia o estimación de los volúmenes asociados a dichas fases.

Para la determinación del tamaño de las partículas se emplea el ocular micrométrico, el cual posee una escala, cuyo valor de división depende del lente objetivo que se esté utilizando. Para la determinación de la proporción cuantitativa de las distintas partes o fases del material se utiliza entonces un ocular que posee un reticulado (una malla cuadrada) micrométrico.

- **Clivaje**

El clivaje es una propiedad muy conocida que se manifiesta de manera preferencial en algunos tipos de minerales y que por tanto sirve como un rasgo distintivo más de los mismos. Conceptualmente el clivaje se entiende como la propiedad que manifiestan algunos minerales de romperse siguiendo determinados planos paralelos a las caras efectivas o posibles de los cristales. De acuerdo con la forma del clivaje, este puede describirse de distintas maneras; laminar, como en el caso de las micas; romboédrico, como el caso de la calcita, etc. En el estudio de los materiales de construcción es frecuente encontrar ejemplos de materiales con presencia de exfoliación debida a la manera en que se ha realizado su conformación.

Para la observación del clivaje de los minerales se recomienda cerrar el diafragma o bajar el condensador. Debe tenerse muy en cuenta que el clivaje de los minerales se manifiesta según determinadas direcciones, por lo que es posible que un grano de un mineral de clivaje fuerte no manifieste el mismo en la dirección del plano en la que se está haciendo la observación.

- **Índice de refracción**

Aparte del procedimiento para la determinación del índice de refracción de un grano mediante el empleo de líquidos de inmersión, ya descrito antes, un método aproximado muy utilizado al realizarse la observación de secciones delgadas es el basado en el estudio del aspecto que muestra la superficie de los minerales, fenómeno conocido como “*relieve*” y ya descrito antes.

Debe recordarse que otro procedimiento útil para la determinación del índice de refracción relativo de los granos minerales componentes de un material es el que se basa en la línea de Becke, lo cual resulta muy práctico en el proceso de identificación o diagnóstico de fases presentes en una masa donde existen en contacto otras fases fácilmente identificables. Un ejemplo clásico de mineral que puede tomarse como referencia en estos casos es el cuarzo, el cual está presente en una gran cantidad y diversidad de materiales tanto naturales como artificiales.

Particularmente en los materiales de construcción, el cuarzo puede encontrarse como un componente importante de las arenas, gravas, en productos cerámicos, etc.

- **Pleocroismo**

Como muy bien describe V. Zubkov <sup>2</sup>, el color de un mineral juega un importante papel en su determinación: en secciones de un cristal cúbico, el color es constante, pero el color de minerales birrefringentes cambia de acuerdo con la dirección a través de la cual pasa la luz. La capacidad de los minerales de absorber la luz en distinta magnitud para diferentes longitudes de onda cuando ellas están vibrando a lo largo de diferentes direcciones de la indicatriz óptica es denominada “*pleocroismo*”. Resulta obvio que no exista pleocroismo en los cristales que pertenecen al sistema cúbico, pues sus propiedades ópticas no cambian con la dirección, comportamiento que se corresponde con su carácter de material isótropo.

La observación del pleocroismo se recomienda realizar con el polarizador solamente; de esta manera cuando se gira la platina del microscopio se puede apreciar el cambio de tinte. En unos casos la absorción diferencial de la luz causa cambio de color en las diferentes direcciones al girar la platina. En otros, se mantiene el color, pero cambia la intensidad. Por ejemplo, la mica biotita cambia notablemente de color cuando se gira la platina; cuando la vibración del polarizador es paralela a la de clivaje, se observa de color carmelita oscuro, pero cuando son perpendiculares, se aprecia de un color carmelita pálido.

- **Color propio**

Es frecuente que durante el estudio de los especímenes en sección delgada bajo el microscopio, se cambie el tipo de observación. Recuerde que el microscopio petrográfico tiene la posibilidad de colocar o retirar el analizador de acuerdo con el interés de la observación, lo cual permite conocer el comportamiento de un mismo cristal con luz plano-polarizada (sin analizador) y entre nicols cruzados (con analizador).

Muchos minerales absorben parte de las radiaciones de la luz blanca<sup>3</sup>, por lo tanto, resultan coloreados cuando los observamos sin analizador. Dicho color se denomina «*color propio*». Al cruzar el analizador, el color producido será el resultado del efecto combinado del color de interferencia más el color de absorción o color propio. A veces este color es tan intenso que enmascara el color de interferencia. De ser posible, siempre que se estudie el color de interferencia de tales minerales, debe excluirse su color propio.

## **11.2. Estudio bajo nicols cruzados y luz paralela (ortoscopia)**

- **Discriminación de fases isótropas-anisótropas**

Durante la observación con el microscopio, cuando se inserta el analizador, como que el polarizador transmite solamente los rayos que vibran en su sección principal y de la misma manera pero perpendicularmente lo hace el primero, resulta obvio que si no existe ningún elemento intermedio que cambie las características de la luz, pues no será posible el paso de los rayos y el resultado será que el observador no podrá apreciar nada, solamente oscuridad en el campo visual. Así será el comportamiento cuando se hace la observación entre nicols cruzados sin la presencia de muestra sobre la platina.

El comportamiento anterior nos permite inferir que si colocamos una muestra sobre la platina del microscopio, manteniendo los nicols cruzados, y observamos oscuridad total, es que el material de la muestra no modificó el comportamiento de la luz, por lo que se trata entonces de un material isótropo. Recuerde que manifiestan comportamiento ópticamente isótropo las fases que cristalizan en el sistema cúbico ó los materiales de



estructura amorfa (como el vidrio volcánico). Es así que puede efectuarse de manera relativamente sencilla, la discriminación de las fases que son isótropas de las anisótropas.

Otros parámetros que pueden ser aprovechados durante el estudio son: determinación de la doble refracción, medición del ángulo de extinción, observación de características particulares en algunos granos (zonado, presencia de maclas, estructuras típicas, etc.)

### **11.3. Estudio con nicoles cruzados y dispositivo de luz convergente (conoscopia)**

- **Selección de los granos adecuados para el estudio**

Para realizar el estudio de las fases a identificar mediante el microscopio petrográfico, resulta conveniente conocer el sistema de cristalización como elemento de diagnóstico muy certero. Para ello es posible auxiliarse de las denominadas figuras de interferencia que se obtienen con nicoles cruzados y dispositivo de luz convergente.

Un paso previo a la obtención de las figuras de interferencia es la selección de los granos o cristales apropiados para dicho estudio. Deben escogerse partículas claramente definidas como mono-minerales, de las mayores dimensiones posibles, y de ser posible que se encuentren aisladas de otras fases o partículas.

- **Observación de las figuras de interferencia. Distinguir fases uniáxicas y biáxicas**

Las figuras de interferencia constituyen una herramienta útil para llegar a conocer el comportamiento óptico de los granos constituyentes del material objeto de estudio. A partir del comportamiento óptico es entonces que podemos inferir la estructura interna de las fases que se estudian. Los cristales uniáxicos presentan una figura de interferencia muy típica, formada por una cruz característica, mientras que los cristales biáxicos manifiestan una figura de interferencia algo más complicada, pero que resulta un rasgo distintivo muy certero.

#### **11.4. Determinación del sistema de cristalización de las fases a partir de su comportamiento óptico**

Una vez que se ha diferenciado si la fase analizada es uniáxica o biáxica, ya se tiene una orientación más cercana a la identificación del sistema de cristalización del mineral. Si se trata de un mineral isótropo ya sabemos que es amorfo o que cristaliza en el sistema cúbico, quedando solamente distinguir elementos auxiliares que nos permitan decidir en la identificación (contornos poligonales, morfología general, etc.). Si el grano analizado es uniáxico (tienen dos índices de refracción), entonces la fase presente cristaliza en los sistemas tetragonal o hexagonal, quedando diferenciar los mismos mediante otros elementos. Si fuera biáxico el cristal (tres índices de refracción), entonces su sistema de cristalización sería monoclinico, triclínico u ortorrómbico.

#### **11.5. Identificación de las fases**

El diagnóstico de las fases se realiza entonces siguiendo un proceso de discriminación, tal como se hace en el trabajo práctico de identificación preliminar macroscópica de los minerales, o sea, mediante eliminación de campos o grupos que manifiesten un rasgo común (sistema de cristalización, color propio, relieve, índice de refracción, clivaje, etc.).

La identificación de las fases es una tarea bien complicada, y el éxito a lograr depende en gran medida de la experiencia del investigador, debiéndose aplicar no solamente la ciencia, sino en gran medida la lógica científica apoyada en la tecnología de cada uno de los materiales objeto de estudio. Es decir, que debe tenerse muy en cuenta qué fases deben aparecer y cuáles nunca deben estar presentes en el material objeto de estudio.

- **Microscopia de fluorescencia**

Aprovechando que una gran cantidad de materiales pétreos (hormigones, morteros, materiales cerámicos, rocas, etc.) presentan una estructura porosa, es posible impregnar los poros y espacios con resina que ha sido mezclada con una sustancia fluorescente, la cual «fluorece» bajo iluminación ultravioleta. La técnica funciona por la excitación de las moléculas del tinte a través de la absorción de luz de onda corta, usualmente ultravioleta y

entonces mostrando esa fluorescencia. Usualmente se usa una fuente de luz brillante de un quemador de arco de vapor de mercurio, o un láser para producir la luz de excitación con un filtro de excitación, la luz fluorescente producida es entonces filtrada por una barrera o filtro de emisión, la cual aísla la longitud de onda deseada de la luz a obtener.

Según Mayfield<sup>10</sup> la técnica ha sido exitosamente aplicada al estudio de las relaciones a/c originales en especímenes de pasta de cemento (Mayfield, 1990). Un fotodiodo fue usado para medir la luminosidad de especímenes impregnados con un tinte fluorescente disuelto en alcohol, y entonces comparado con muestras de relación a/c conocida. Esto está basado en el principio de la relación que existe entre la relación a/c original, y el grado de porosidad capilar subsecuentemente desarrollada, donde mayores relaciones a/c resultan en mayor grado de porosidad capilar. Si esta técnica es usada, es importante la precisión y cuidado de la preparación de las muestras, para que puedan ser comparadas. Técnicas de fluorescencia pueden ser usadas también para identificar otros rasgos causados por niveles excesivos de agua de mezclado, tales como canales de exudación, micro-grietas, además de varios tipos de poros.

## **12. Algunas aplicaciones del microscopio de luz polarizada en la investigación de materiales de construcción**

### **12.1. La petrografía del hormigón**

Como que el hormigón está compuesto normalmente por minerales, es posible emplear las mismas técnicas que en la investigación petrográfica. Efectivamente, el hormigón es típicamente un aglomerado poli-mineral compuesto por una armazón integrada por la mezcla de áridos (arena y árido grueso), que normalmente se obtienen de la trituración de las rocas o de graveras formadas por la erosión de otras rocas en la corteza terrestre. El material de unión está compuesto por la pasta de cemento endurecida, en la que aparecen distintas fases o minerales formados como consecuencia de la hidratación del cemento.

En secciones delgadas, las fracciones de áridos normalmente aparecen como granos poli-minerales cuyas dimensiones varían desde fracciones de milímetros hasta dos o tres centímetros. Puede apreciarse una matriz oscura formada por la pasta de cemento

endurecida, compuesta principalmente de una masa amorfa de hidrosilicatos de calcio (CSH) y otros productos micro-cristalinos.

## **12.2. Evaluación de la fisuración**

Un aspecto muy importante en el comportamiento de los materiales pétreos, tales como los morteros y hormigones, es la fisuración, la cual tiene una gran repercusión en el comportamiento durable de los mismos. Para su estudio y caracterización resulta clave la determinación de las causas que las provocan, para lo cual conviene analizar sus dimensiones, configuración y posición relativa dentro de la estructura del aglomerado. En este sentido la técnica del microscopio petrográfico resulta ideal, pues es posible observar dichas fisuras con distinto grado de amplificación, posibilitando detectar los puntos donde aparecen y la configuración, aspectos clave para diagnosticar su origen. (Foto 4 y 5).

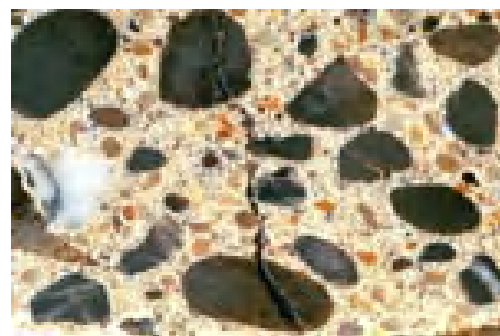
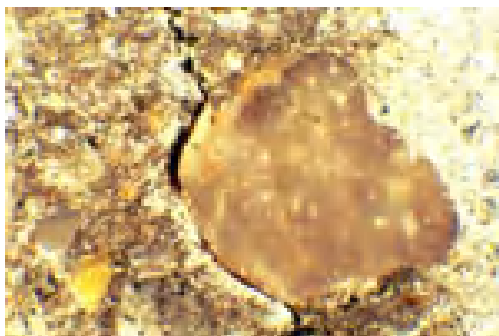
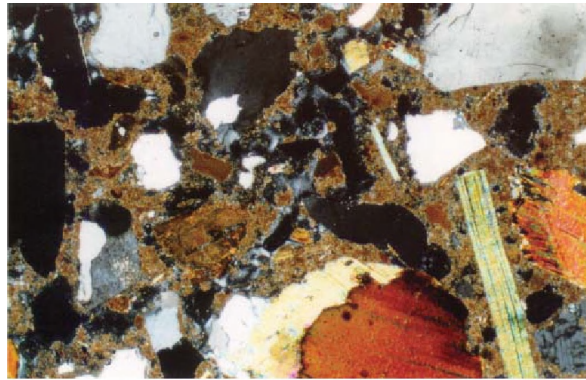


Foto 4. Fisuras por retracción (izquierda) y Foto 5. Fisura a través de agregados en un hormigón de poliéster. Fuente; [http://www.mactec.com/Services/Technical\\_Resources/default.aspx](http://www.mactec.com/Services/Technical_Resources/default.aspx).

## **12.3. Identificación del tipo de aglomerante usado**

En muchos casos un problema frecuente, sobre todo en los trabajos de restauración, es la identificación del material aglomerante utilizado en los materiales, sean pastas, morteros u hormigones. La distinción entre los aglomerantes principales; yeso, cal, cemento Portland, es posible efectuarla con el estudio de secciones delgadas bajo el microscopio de luz polarizada. (Foto 6)



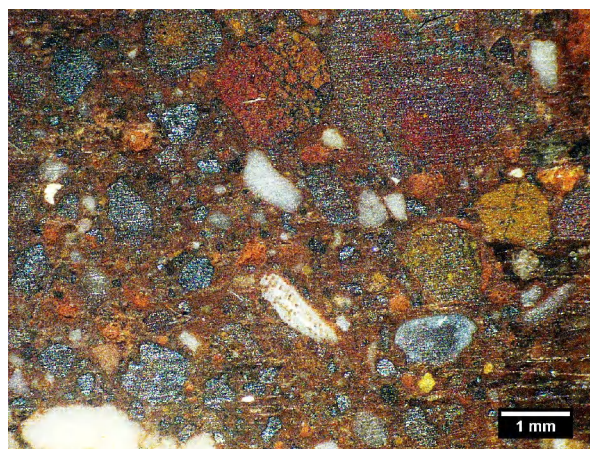
**Foto 6. Mortero de cal bajo el microscopio óptico**

Fuente: Guarás, Blanca. Petrología de morteros en Arqueología.  
Catedral de Santa María de Vitoria-Gasteiz.

#### **12.4. La observación de la estructura**

El estudio de los materiales bajo el microscopio de luz polarizada permite de manera muy simple estudiar la micro-estructura de los mismos. En el caso de los morteros y hormigones de cemento Portland, muchos rasgos particulares pueden ser analizados, tales como la forma y dimensiones de las distintas partículas componentes del material (ver Foto No. 7), la presencia de fisuras, alteraciones, etc.

En hormigones antiguos, es posible inferir la granulometría de los áridos utilizados en su fabricación, así como la proporción de material cementante (en volumen).



**Foto 7. Mortero de albañilería. Puede observarse la forma de las partículas de arena, así como sus relaciones con el material aglomerante**

### **12.5. Configuración del sistema de poros**

Una parte muy importante de la micro-estructura de los morteros y hormigones lo constituye el sistema de poros presente en los mismos. Como se sabe, la forma, dimensiones, y sobre todo el grado de comunicación, tienen una gran influencia en el comportamiento físico, mecánico y químico de dichos aglomerados. La técnica del microscopio de luz polarizada permite el estudio de la mayor parte de los poros presentes en el hormigón, al menos los que tienen más incidencia en la resistencia y durabilidad. Aunque los poros del gel no es posible estudiarlos mediante esta técnica, ello no constituye en este sentido un gran inconveniente, pues debe recordarse que en la práctica estos poros influyen muy poco en la permeabilidad.

### **12.6. Estimación de la relación a/c**

Un problema frecuente que debe enfrentarse en los trabajos de investigación donde se tiene como objeto a morteros y hormigones de cierta edad (o simplemente ya elaborados), es la determinación de la relación a/c que se usó en su preparación. Mediante la técnica de microscopia de luz polarizada esto puede determinarse con cierto grado de aproximación.

### **12.7. Ordenamiento de las partículas que conforman la estructura (ventaja sobre los R-X)**

Una gran ventaja del estudio de materiales mediante el microscopio petrográfico es el hecho de que se puede apreciar con relativa facilidad el ordenamiento o disposición de las partículas componentes de un determinado material, lo cual es muy importante para el esclarecimiento del comportamiento del mismo. En este sentido la técnica analizada presenta una gran ventaja sobre otras, por ejemplo con respecto a las técnicas de rayos X, que aunque son muy efectivas para la determinación de la composición de fases, no permiten el estudio de la micro-estructura del material.

Consideración particular merece el hecho de que durante el estudio de una sección delgada bajo el microscopio es posible establecer una relación área-volumen, lo cual es un

elemento que facilita las interpretaciones de análisis cuantitativo de la presencia de un determinado mineral, roca, producto aglomerado, etc.

### **12.8. Profundidad de penetración de determinadas sustancias**

En muchas oportunidades se requiere la determinación de la profundidad de penetración de determinadas sustancias dentro de un cierto material de construcción, por ejemplo en morteros, hormigones, piezas cerámicas, etc. La técnica de microscopía óptica es sin lugar a dudas una herramienta muy práctica para estos fines, teniendo la gran ventaja de que es posible observar la forma de penetración, la morfología de los canalículos por los que ingresan las sustancias, etc.

### **12.9. Reacción álcali-agregado**

Un fenómeno de especial importancia práctica relacionado con los materiales aglomerados donde se emplea el cemento Portland es la reacción álcali-agregado, fenómeno provocado por cierto tipo de reacción deletérea que ocurre entre los álcalis normalmente procedentes del cemento y cierto tipo de agregados “reactivos”. Los áridos reactivos generalmente están compuestos por distintas variedades de sílice en estado amorfo (como el ópalo, calcedonia, vidrio volcánico, etc.).

El estudio de secciones delgadas de los aglomerados afectados por dicha patología permite precisar las variedades litológicas responsables de tal fenómeno, así como aclarar la envergadura y morfología de la fisuración provocada por el mismo.

### **12.10. Identificación de la composición mineral de los áridos**

Como ya se ha descrito antes, un importante campo de aplicación de la técnica del microscopio óptico de luz polarizada es la identificación de fases. Como se sabe, los áridos componentes de morteros, hormigones y otros aglomerados son generalmente obtenidos a partir de distintos tipos de rocas, los que pueden ser identificados con relativa facilidad y precisión mediante esta técnica. De esta manera es posible conocer la procedencia de un



cierto tipo de gravilla o arena, vinculándose a las fuentes de suministro (canteras, areneras o graveras) posibles de la región o país donde se encuentren.

#### **12.11. Determinación de la profundidad de carbonatación de un hormigón**

Un problema frecuente al que se enfrenta el investigador en el campo de los materiales de construcción es la determinación de la profundidad de carbonatación de un mortero u hormigón de cemento Portland, dada la importancia que tiene la misma en el comportamiento durable de las armaduras de refuerzo embebidas en el material. La carbonatación es, en esencia, la formación de  $\text{CaCO}_3$  provocada por la reacción entre el hidróxido de calcio (portlandita) procedente de la hidratación del cemento y el  $\text{CO}_2$  presente en la atmósfera. De esta manera, el problema se reduce a la determinación de la profundidad hasta la cual se ha formado calcita como consecuencia de la carbonatación.

Aunque el problema de determinación de la profundidad de carbonatación puede resolverse muy fácilmente con el auxilio de un indicador de pH, como la fenolftaleína, la técnica de microscopía de luz polarizada permite adicionalmente observar la configuración del frente e inferir la ruta de acceso de la carbonatación (fisuras, poros, coqueras, etc.)

#### **12.12. Identificación de fases en el clínker de cemento Portland**

El clínker de cemento Portland es un material pétreo de origen artificial, formado por un conglomerado de minerales (la mayoría de estructura cristalina), que pueden ser identificados con relativa facilidad y precisión con la ayuda del microscopio petrográfico. Las principales fases componentes del clínker de cemento Portland; alita, belita, aluminato tricálcico y ferro-aluminato tetracálcico pueden identificarse a partir de la determinación de sus constantes ópticas y otros parámetros característicos, tal como puede apreciarse en la Tabla No. 1 del ANEXO.



### **12.13. La preparación de las muestras de hormigón y mortero. Cuidados especiales**

Aunque de manera general para los estudios más frecuentes de la petrografía del hormigón es posible la preparación de las muestras sin requerimientos específicos, no debe descuidarse que para algunos estudios particulares sí es necesario efectuar la preparación de las secciones delgadas siguiendo cuidados especiales.

En primer lugar, como en todos los casos, deben tomarse muestras que sean representativas del material (o de la parte del material) que se desea estudiar. En el caso de los morteros de revestimiento, que normalmente están formados por un conjunto de capas superpuestas, debe tenerse mucho cuidado en hacer la toma de muestras en los lugares que sean representativos (según el objetivo del estudio). En segundo lugar, debe tenerse precaución en la manera de realizar el corte, pues si se utiliza agua para el enfriamiento del disco de corte esto puede afectar el grado de hidratación del material cementante, particularmente cuando se trata de cemento hidráulico o de otro aglomerante que reaccione con el agua. Otro aspecto a considerar es el método de conservación y preparación de las muestras cuando se pretende tener en cuenta el grado de carbonatación.

Desde luego que son solamente los aspectos expuestos los que deben tenerse en cuenta a la hora de tomar las muestras y realizar la preparación de las secciones delgadas para el estudio. El tema es realmente muy complejo y extenso, por lo que se sale del objetivo del presente documento. Para profundizar en el tema le recomendamos al lector que estudie el artículo «Preparing specimens for microscopy» de Rachel J. Detwiler *et al*<sup>9</sup>. publicado en la revista Concrete International de noviembre de 2001.

## REFERENCIAS

1. Kart Riedel, Joachim Bergnes and Manfred Neupert. «Fluorescence microscopy for the analysis of concrete». Zeiss Information No. 3, 93. Jena, Germany.
2. Zubkov, V. "General Petrography. A Short Course". MIR Publishers, Moscow, 1972.
3. Segura Soto, Rafael. «Cristalóptica Teórico-Práctica». Editorial Científico-Técnica. La Habana, 1978.
4. León Ramírez y Raúl Díaz. «Óptica Ondulatoria». Editorial Pueblo y Educación, La Habana, 1987.
5. Shuqiang Zhang and Minhong Zhang. «Application of petrography for determining the quality of concrete cured in tropical environment». Cement and Concrete Research 35 (2005). Pp 1377-1384. (Elsevier [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com))
6. Ramachandran, V. S. and James J. Beaudoin. «Handbook of Analytical Techniques in Concrete and Technology». Noyes Publications. New Jersey, USA. 2001.
7. Alvarez, Osmel. El Microscopio. <http://www.monografias.com/trabajos91/el-microscopio/el-microscopio.shtml>, 2013.
8. Guarás, Blanca. Petrología de morteros en Arqueología. Catedral de Santa María de Vitoria-Gasteiz. <http://www.scribd.com/doc/78426747/Guaras-B-Petrologia-morteros-en-arqueologia-2003>.
9. Detwiler, Rachel J. et al. «Preparing specimens for microscopy» Concrete International, November 2001.
10. Concrete Petrography Handbook. <http://www.tfhr.gov/pavement/pccp/petro/index.htm>

### **Bibliografía recomendada**

- St. John, D. A., Poole, A. W., and Sims, I. "Concrete Petrography: A Handbook of Investigative Techniques". Published by Arnold, London, 1998.

## ANEXOS

**Tabla 1. Identificación de las principales componentes del cemento Portland**

Característica	Clinker	Escoria	Yeso			Calcáreo
Morfología	Agregados equidimensionales, pluriminerálicos raramente monominerálicos	Granos angulosos, macizos raramente elongados (bastones), con eventuales inclusiones gaseosas o sólidas	Placoide, prismático, fibroso compacto/	Compacto fibroso	Compacto fibroso	Agregados romboédricos a veces monocristalino
Color	Ceniza a castaño	Incoloro	Blanco a incoloro	Blanco a incoloro	Blanco a incoloro	Blanco a incoloro/
Transparencia	Translúcido	Transparente	Transparente a Translúcido	Transparente a Translúcido	Transparente a Translúcido	Transparente
Grado de Cristalinización	Cristalizado	Vítreo, con eventuales inclusiones cristalinas	Cristalizado	Cristalizado	Cristalizado	Cristalizado
Anisotropía	Anisótropo	Isótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo
Índice de Refracción	Variable/Variado (>1,70)	$\approx 1,65$	1,52 a 1,53	1,55 a 1,59	1,56 a 1,62	1,49 a 1,66 (calcita) 1,50 a 1,68 (dolomita)
Birrefringencia	-----	Cero/Zero	0,01	0,044	0,028	0,172 a 0,190
Clivaje	Presente eventualmente	Ausente	Presente	Presente	Presente	Presente (romboédrica)
Fractura	Irregular	Concoidal	Irregular	Irregular	Irregular	Rara

Tomada de: <http://www.construir.com/Econsult/M/MERCOSUR/DOCUMENT/cemport.htm>