Importancia de la microscopía del clínker*

Prof. Dr. J. CALLEJA

1. INTRODUCCION

La organización por parte del Instituto de estos Cursos como el que hoy comienza no es nueva. Data nada menos que de 1951, en los albores del Centro, fecha en que se desarrolló el Primer Curso para Auxiliares de Laboratorio y Control en la Industria del Cemento, de eficacia tal que hubo de ser repetido, previa su actualización, en 1955. Han seguido después otros de iniciación y adiestramiento en los ensayos del Nuevo Pliego de Conglomerantes en 1961 y en 1964, de Auxiliares de Obra, sobre Fluorescencia y Difracción de Rayos X, sobre Suelo-cemento, sobre Análisis por Fotometría de Llama y Absorción Atómica, aparte de los organizados para graduados hispanoamericanos.

Es éste, uno más dentro de la línea; y si siempre ha podido ser oportuno, ahora presenta un interés de actualidad.

Se me ha encargado de la apertura técnica de este Curso haciendo una exposición, a la que he decidido dar el carácter de observaciones y consideraciones, sobre la importancia del tema director del mismo: LA MICROSCOPIA DEL CLINKER.

Hablar de la importancia de algo siempre es fácil, pero no me voy a aprovechar de ello. Quiero sinceramente tratar de justificar ante Vds. lo que puede dar de sí la Microscopía del Clínker, cuando se pretende sacar de ella todo el partido que permite. Tal vez ello suponga hacer un resumen panorámico muy rápido de cuanto van Vds. a escuchar, ver y practicar a lo largo del Curso. Con ello me conformo, si lo logro, y creo cumplir así con el encargo de dar comienzo a estas jornadas que les esperan.

2. ANTECEDENTES HISTORICOS

La Microscopía es, en general, una técnica de base física que a lo largo del tiempo se ha ido aplicando simultáneamente o sucesivamente al estudio e investigación en los más variados campos: La Medicina y la Biología, la Metalografía y la Metalurgia, y la Mineralogía y la Petrografía, entre los principales.

La Microscopía Mineralógica y Petrográfica, que es la que nos interesa para nuestro tema, data de mediados del siglo XVII; la técnica de las secciones delgadas se empezó a desarrollar a mediados del XIX; y las secciones pulidas usadas primero en Metalografía y después en Petrografía, se emplearon por primera vez a finales del pasado siglo.

* Conferencia pronunciada en la sesión de apertura del Curso de Microscopía del Clínker, dado en la sede del I.E.T.c.c., en los días 14 al 18 de febrero de 1972.

Ambas técnicas: la de las secciones delgadas genuinamente petrográfica en origen (observación por transparencia), y la de las secciones pulidas, de arranque metalográfico (observación por reflexión), junto con la técnica de observación con luz polarizada, se han aplicado también al clinker de cemento. Y así, en 1882 LE CHATELIER observó y describió el silicato tricálcico, y en 1897 TORNEBOHM detallaba el cuadro casi completo de la estructura del clinker, describiendo las cuatro fases microscópicas principales: ALITA, BELITA, CELITA y FELITA, en su conjunto. En 1908 STERN describió las fases aisladas, observadas por reflexión. Hacia 1938 INSLEY y McMURDIE volvieron la vista a la técnica por transparencia, y nuevamente en el decenio 1940-1950 TAVASCI trabajó intensa y fructuosamente por reflexión. Sin embargo, el éxito notorio de TAVASCI no destruyó la técnica de transparencia, de nuevo resucitada por GILLE en 1952. Todo esto ha dado lugar a la feliz idea de una recopilación de lo más saliente logrado hasta nuestros días con ambas técnicas, aplicadas a la observación del clinker, y que por iniciativa de PLASSMANN ha cristalizado en un ATLAS, que con el título de “Microscopía del Clinker de Cemento” (MIKROSCOPIE DES ZEMENT^{TK}LINKERS)* publicó en 1965 la Agrupación de Fábricas Alemanas de Cemento, (VEREIN DEUTSCHER ZEMENTWERKE), por medio de la Editorial del Hormigón (BETON-VERLAG GmbH), en Düsseldorf.

3. ESENCIA Y OBJETO DE LA MICROSCOPIA DEL CLINKER

Como antes he indicado, la Microscopía del Clinker debe ser considerada como una técnica física, auxiliar y colaboradora de otras técnicas de igual o de distinta naturaleza, aplicable principalmente a la investigación. Pero, eso sí, aplicada también, y cada vez más, a la vigilancia y al control de los procesos de fabricación, y muy especialmente a la detección de anomalías en dichos procesos. Esto sin contar, naturalmente, con su aplicación al estudio de la hidratación —fraguado y endurecimiento— del cemento, es decir, al campo de la utilización de este material, aspecto importante, pero que queda fuera del propósito de este Curso.

Orientada hacia la observación del clinker, la Microscopía presenta dos aspectos: uno cualitativo y otro cuantitativo. El primero se refiere a la clase, formación y reparto de fases; el segundo a la medida y recuento de las mismas. La observación cualitativa comienza —debe comenzar— ya en la toma y preparación de las muestras para el estudio, apreciando a simple vista, o con ayuda de lupas monoculares o binoculares de pocos aumentos, determinados caracteres organolépticos y macroscópicos del material; después se procede a la verdadera y minuciosa observación microscópica en toda su extensión. Con todo ello se consigue casi siempre una idea de la calidad y características del material, así como de las condiciones del proceso que ha dado lugar a él.

Esto adquiere una importancia particular en el caso de las instalaciones de molienda de clinker, que reciben este material de muy diversas procedencias, y por lo tanto con características y propiedades muy distintas. En tal circunstancia, el control microscópico —a poco costo— del clinker es eficaz y recomendable.

4. ESTRUCTURA DEL CLINKER

La estructura del clinker depende de su composición y de las condiciones de crecimiento, tamaño y reparto de las especies o fases que lo constituyen. Todo esto, a su vez, depende

* Este ATLAS se ha tenido muy en cuenta para la preparación de esta exposición.

de la “historia” previa del material de partida: las materias primas y el crudo; esto es, de la química de la preparación del crudo y del curso de los procesos de cocción y enfriamiento del clinker.

4.1. Aspectos macroscópicos

4.1.1. Forma

En estos aspectos, la observación visual o con lupa del clinker permite apreciar si se trata de un material formado por gránulos aislados, o arracimados, o si de un clinker en grandes bloques, o parcialmente fundido, o constituido por agregados irregulares.

Se pueden obtener deducciones a partir de su forma, la cual depende en gran parte del tipo de horno. Así, un granulado regular y uniforme denota un horno de tipo LEPOL, y un granulado irregular y heterogéneo indica otro tipo cualquiera de horno de vía seca o húmeda; un clinker en bloque y/o fundido señala hacia un horno vertical.

4.1.2. Estado superficial

En cuanto a la superficie del clinker, lisa y suave, o rugosa y áspera, puede ser indicio de una estructura más o menos porosa, cuya confirmación queda aplazada hasta la observación microscópica verdadera.

4.1.3. Color

En lo relativo al color del clinker, el cual se pone de manifiesto por tratamiento con agua, o mejor aún con butanodiol, se pueden obtener indicios acerca de las condiciones de cocción. La secuencia de colores, de menor a mayor grado de cocción, es la siguiente: pardo-terroso, amarillo-pardo claro, pardo intenso, pardo oscuro, y negruzco con tonos pardo-verdosos. Sobre esta base se pueden detectar cocciones débiles, correctas, o incluso excesivas (clinker pasado de fuego).

También el color puede dar indicaciones acerca de la composición, partiendo de la base de que los compuestos más coloreados, y por lo tanto los más colorantes del clinker, son los ferritos. El ferrito ordinario en estado puro tiene un color pardo intenso con una tonalidad rojiza ligera; si el clinker contiene magnesia, esta coloración del ferrito se desplaza hacia un verde pardusco, que es el típico color de pizarra del clinker técnico, precisamente por contener éste casi siempre magnesia. En presencia de iones ferrosos, es decir, en condiciones de cocción reductora, el color verde pardusco vuelve a desplazarse hacia el pardo-rojizo, como cuando no hay magnesia. Si en lugar de hierro ferroso existe manganeso, el clinker toma un tono gris oscuro con tinte rojizo; y si además contiene magnesia, entonces su color es pardo-rojizo.

En resumen, las diferencias o heterogeneidades de color indican siempre variaciones de composición química o de condiciones de cocción.

4.1.4. Porosidad

Los huecos y poros macroscópicos, según su forma y distribución, generalmente irregular (por ejemplo, en capas concéntricas situadas hacia la superficie de los gránulos), pueden denotar, junto con otras apreciaciones microscópicas, incorporación de cenizas del combustible.

4.2. Aspectos microscópicos

4.2.1. Porosidad

La porosidad desde el punto de vista microscópico permite sacar conclusiones relativas sólo al clinker de un mismo tipo de horno o, mejor aún, al clinker de una misma fábrica y horno, lo cual no deja de tener un estimable valor práctico. El reparto de la porosidad depende de la temperatura de cocción, de la composición del clinker, de la granulometría del crudo y, como queda indicado, del tipo de horno.

La idea de considerar los poros como una fase gaseosa del clinker es incorrecta, por cuanto que es una fase inerte, a través de la cual no es posible la difusión ni el contacto de componentes. En efecto, la belita y la cal libre separadas por poros no tienen posibilidad de reaccionar, y no lo hacen; mientras que si estuvieran en contacto darían lugar, en condiciones adecuadas, a la alita.

Respecto de la porosidad —o compacidad— del clinker, el peso del litro, como parámetro indicador del grado de cocción, no permite una apreciación más fina, puesto que se trata de una medida comparativa y grosera del contenido total de poros de una cierta fracción granulométrica de un determinado clinker. En consecuencia, no sirve para comparar clinker de distintos sistemas de hornos, pues no se trata tan sólo de medir, aunque sea groseramente, el contenido total de poros, sino de establecer su forma y distribución, para lo cual es necesaria la observación microscópica.

4.2.2. Homogeneidad

En cuanto a la homogeneidad en general, cabe decir que en un clinker teóricamente homogéneo el reparto de poros y sólidos debe ser estadístico, así como también el reparto de fases en la parte sólida. Esto responde, naturalmente, a una concepción ideal que nunca se da en la práctica. El grado de homogeneidad así definida depende ante todo de la preparación del crudo (molienda y homogeneización), de la cual es índice.

En un aspecto más particular, la heterogeneidad de composición del clinker puede variar temporal y/o localmente, respecto de un valor obligado. Se debe a variaciones de la composición del crudo a la entrada del horno y a segregaciones. Es arriesgado hacer deducciones; por ejemplo, si una cal libre abundante presenta una distribución regular, se puede pensar en un crudo —y en un clinker— con excesiva saturación, pero se puede tratar también de una oscilación temporal de la composición del crudo. Para dilucidar cuál de los dos motivos es el verdadero, habría que prolongar la observación durante un tiempo suficiente. Por otra parte, en este aspecto nada puede ayudar el análisis químico ordinario.

Otro aspecto de la heterogeneidad del clinker es el de la localización de fases en agrupaciones arracimadas por zonas, lo cual se debe a un enriquecimiento local de algunos componentes aislados que no reaccionan por completo. Esto da a veces lugar a “nidos” de determinadas fases, como por ejemplo la belita y la cal libre, los cuales obedecen a diversas causas. Una de ellas es un grado de cocción deficiente, bien por falta de temperatura, o bien por falta de tiempo de cocción. Generalmente estos nidos van acompañados de una gran porosidad, y en las fases que rodean los poros aparecen bordes de reacción, los cuales muestran diversas profundidades o penetraciones de la misma. Otra

causa puede ser la propia falta de homogeneidad; se comprueba si es ésta la verdadera causa viendo si la composición global del clinker es la correcta, en cuyo caso nada tiene que ver la homogeneidad. Un exceso de cal libre, o de belita, denotan entonces un exceso o un defecto de caliza en el crudo, respectivamente.

Los nidos o localizaciones arracimadas de gránulos gruesos indican falta de finura (que debe ser inferior a 0,1 mm). Si la localización es de belita, responde a zonas del crudo pobres en cal, bien por acumulación local de cuarzo, si el crudo lo contiene, o bien de cenizas, si se cuece con carbón. Si el agrupamiento de la belita tiene lugar alrededor de un poro grande, ello suele ser indicio de que el poro estaba ocupado antes por un gránulo de cuarzo que ha desaparecido por reacción, dada su movilidad, dejando el hueco. Estos agrupamientos suelen ir acompañados en tales condiciones de poca masa intersticial alrededor de las zonas belíticas. Por el contrario, si rodea a la belita abundante fase intersticial, ello indica que ha habido incorporación de cenizas.

Los nidos de cal libre pueden ser también, y son generalmente, indicio de caliza poco molida en el crudo.

Del mismo modo, la periclase arracimada denota la presencia en el crudo de caliza o margas dolomíticas insuficientemente finas.

Como colofón general de la homogeneidad cabe decir que debe ser tanto mayor cuanto mayor sea el grado de saturación que se desee alcanzar, y cuanto menor sea el contenido de cal libre que en tales condiciones se quiera tener.

Heterogeneidades de otro tipo, con análogos efectos, son las que se producen por segregación debida a la formación de polvo en el arrastre y transporte de los materiales, o las producidas en la caída de éstos a los silos, o incluso en el propio horno. Estas segregaciones se aprecian en hornos cuyo polvo es pobre en cal, y dan lugar a coronas de belita en la parte externa de los gránulos, como cuando a éstos se incorporan cenizas de carbón. Suele suceder en hornos de tipo LEPOL, y es frecuente observar entre estas coronas y la periferia de los gránulos una capa de composición normal, procedente de pegaduras y contactos de unos gránulos con otros.

Con gran frecuencia la segregación que se aprecia afecta los fundentes o fases intersticiales, los cuales tienden a acumularse en la periferia de los gránulos, como personalmente se ha tenido ocasión de observar, así como de apreciar en qué medida y condiciones sucede esto.

La segregación que sitúa preferentemente a la cal libre en el núcleo o corazón de los gránulos de clinker es lógica, tanto por el natural gradiente de temperatura, descendente hacia el interior de los mismos, como por la menor presencia de fundentes en estas zonas internas. Esto es tanto más notorio cuanto mayor es el diámetro de los gránulos.

Otra clase de heterogeneidad es la relativa al tamaño de los cristales. La cristalización depende de la composición química del sistema, de la temperatura y del tiempo, o por mejor decir, del curso de la temperatura con el tiempo. A altas temperaturas y con tiempos largos se obtienen cristales grandes de alita, que son mayores cuando se hallan junto a los de belita, es decir, en zonas pobres en cal.

Los bordes de reacción en las fases que contornean los poros presentan zonas belíticas y de cal libre. Si la fase presente es belita, la explicación es la antes dada: el poro era anteriormente un grano de sílice que ha desaparecido por reacción; pero si la fase es

cal libre, a veces ello es indicio de cocción reductora, con reducción y volatilización de la sílice, y por lo tanto, con intervención de la fase gaseosa. En atmósfera oxidante esto no sucede de ningún modo.

Lo expuesto hasta aquí se ha referido, en el aspecto químico de la microscopía, principalmente a los silicatos. En cuanto a la estructura de la masa intersticial, de ésta, que a la temperatura de sinterización es líquida y homogénea, se separan por su orden los cristales de las distintas especies: C_3A , C_4AF , C_2S , C_3S , CaO y MgO (periclasa). Si disponen de tiempo suficiente en su cristalización, se separan fenocristales idiomorfos, es decir, cristales grandes y bien formados, con bordes netos. En general, no sucede así, ya que el tamaño de los cristales depende, no sólo de la composición de la fase líquida, y en particular del módulo de fundentes y del contenido de álcalis, sino también de la velocidad de enfriamiento. El enfriamiento del clínker técnico es más rápido que el que corresponde a la cristalización total en condiciones de equilibrio, y más lento que el preciso para congelar el equilibrio del sistema a la temperatura de clinkerización.

Se puede juzgar también sobre la velocidad de enfriamiento a partir de la existencia sistemática de belita rodeando a la alita, o bien de alita con bordes corroídos, o también de la presencia de componentes de origen secundario, como por ejemplo la propia belita, la cal libre y la periclasa, los cuales denotan sin lugar a dudas un enfriamiento lento.

5. DIAGNOSIS SOBRE EL PROCESO DE FABRICACION Y SOBRE LA CALIDAD DEL CLINKER

En resumen, como cuadro de datos para la diagnosis dentro del proceso de fabricación del clínker, y constituyendo en parte lo que por semejanza con la formación de rocas se suele llamar paragénesis, se pueden aportar, por vía de ejemplo, entre otros, los siguientes hechos comprobados:

- A) Zonas abundantes de cal libre, periclasa o belita, son indicio de granos gruesos de caliza, o de dolomía, o de cuarzo, y, por lo tanto, denotan falta de finura de molido;
- B) Zonas de cal libre junto a zonas belíticas y con abundancia de poros pequeños indican un escaso grado de cocción;
- C) La descomposición de la alita por los bordes y la existencia de belita pseudomórfica estriada como consecuencia de dicha descomposición (que es catalizada por la presencia de álcalis y/o de iones ferrosos), unida a veces a la presencia de fases en estado reducido, indican una cocción en condiciones reductoras, con exceso de combustible o falta de aire para la combustión. La falta de aire en la zona de clinkerización se acusa también por la existencia de inclusiones de belita laminar en los cristales de alita; estas inclusiones a veces constituyen granos más gruesos. Si la alita que contiene iones ferrosos incluidos sobrepasa el límite de descomposición en condiciones oxidantes, los iones ferrosos pasan a férricos, y como aquéllos sustituían iones cálcicos, ahora falta cal, por lo que dentro de la alita se separa belita laminar caracterizada por contener estrías paralelas entre sí, que se cruzan en tres direcciones. Esto indica condiciones reductoras en la zona de sinterización, con oxidación posterior del clínker a la salida del horno;
- D) La simple corrosión de los cristales de alita (por resorción) por sus bordes, con formación de rosarios de belita alrededor, indican ataque por parte de la fase líquida, más pobre en cal, y posible sólo durante un enfriamiento lento o relativamente lento del clínker;

- E) La formación y existencia de alita con hábito distinto del laminar hexagonal usual, y que a veces aparece en forma de cristales estrechos y muy alargados, generalmente en zonas ricas en masa intersticial (con frecuencia eminentemente ferrítica), es indicio de abundante fase líquida (fundentes) y/o de una temperatura de clinkerización demasiado alta. Esto da lugar a una mayor presencia de sílice en dicha fase líquida. Este tipo de alita se puede observar en clínkeres de laboratorio totalmente fundidos. En clínkeres técnicos pueden existir ambos hábitos cristalinos de la alita;
- F) Los cristales de alita con estructura zonar indican diferencias de composición en las distintas zonas, las cuales son atribuibles a la inclusión de iones extraños. Esta inclusión es debida a la presencia de tales iones, así como a oscilaciones en las condiciones de cocción durante el crecimiento de los cristales de alita;
- G) La belita cuyos cristales no muestran una determinada estructura, es decir, las formas no rayadas, indican que los cristales no han sufrido transformación durante el enfriamiento. Sólo se suelen observar en clínkeres enfriados muy bruscamente (de laboratorio). Estas formas tienden a agrietarse y rajarse debido a tensiones, lo cual es otro índice de un enfriamiento muy rápido;
- H) La belita con estrías cruzadas denota presencia de álcalis ($KC_{23}S_{12}$); y la belita jironada, en la que unas estrías crecen a expensas de otras para formar bandas, indica enfriamiento lento del clínker, puesto que tal crecimiento requiere tiempo;
- I) La belita γ se distingue de las otras variedades de belita con gran facilidad; tiene menor poder reflector que ellas y que las otras fases. La transformación $\beta \rightarrow \gamma$, exclusiva de la belita primaria (no de la secundaria), es normalmente lenta o está bloqueada, pero se acelera por la presencia de iones ferrosos. Así pues, la existencia de belita γ puede ser también un índice de cocción en condiciones reductoras;
- J) La belita dendrítica secundaria (llamada también “ameboide” o de “dedos de guante”) contiene álcalis y denota materias primas feldespáticas ricas en ellos. Generalmente presenta una estructura fina y lisa (sin estrías). Casi el único indicio de la belita alcalina ($KC_{23}S_{12}$) en un clínker de cocción normal es la presencia de cal libre al lado de ella, ya que la transformación $C_2S + C \rightarrow C_3S$ no reza con la belita potásica;
- K) La existencia de coronas de belita en la superficie y parte externa de los gránulos es indicio de incorporación de cenizas de carbón, cuando se quema este combustible;
- L) La presencia en la fase intersticial de aluminato (o de ferrito) bien cristalizados, junto con una mezcla de ambos unidos en una cristalización fina conjunta, en la que se intercalan mutuamente los cristales respectivos, se da cuando se parte de crudos con módulos de fundentes superiores (o inferiores) a 1,5. Para $A/F > 1,5$ se separa primero el aluminato en cristales idiomorfos, enriqueciéndose el resto de fase líquida en hierro hasta $A/F = 1,5$. Para $A/F < 1,5$ se separa primero el ferrito idiomorfo enriqueciéndose en alúmina la fase líquida restante, hasta $A/F = 1,5$. Para $A/F = 1,5$ se separan conjuntamente aluminato y ferrito. Estas condiciones de equilibrio raramente se dan en el clínker técnico, en el que en general se subenfía el fundido, (por enfriamiento rápido) separándose ferrito desde el primer momento, aun para valores A/F superiores a 1,5.
- M) El aluminato tricálcico de un clínker pobre en cal es, en general, xenomorfo (sin caras propias), adaptándose a los huecos (intersticial “oscuro”). El de estructura zonar es muy raro y suele coincidir con alita corroída. El aluminato sódico NC_8A_3 es, en

cambio, idiomorfo, laminar en placas, y no prismático, como erróneamente suele calificársele. Su presencia junto con alita corroída que contiene inclusiones de belita, y con belita jironada en la fase intersticial denota un enfriamiento lento;

- N) El brillo blanco-azulado del ferrito aumenta con el contenido de hierro y disminuye con las condiciones reductoras del horno;
- O) El vidrio aparece cuando el enfriamiento es muy rápido, sobre todo en clínkeres de elevado módulo de fundentes, pues los ferritos tienden a cristalizar con facilidad, aún en tales condiciones;
- P) El desarrollo de la belita, junto con el estado de la masa intersticial, permiten sacar conclusiones acerca de la velocidad de enfriamiento del clínker y, por lo tanto, sobre la eficacia y rendimiento del sistema enfriador;
- Q) La periclase aparece si el clínker contiene magnesia en proporción superior al 2 %. Si se encuentra corroída y dentro de cristales de alita con estructura zonar, ello prueba que las condiciones de cocción del clínker han sido muy variables y poco controladas.

Respecto de otras posibles fases presentes en el clínker, que la microscopía óptica puede contemplar, y que enumeradas sin afán exhaustivo pueden ser las siguientes:

a) álcalis en forma de sulfatos;

b) fases reducidas:

hierro ferroso,
óxido ferroso (wüstita),
hierro metálico,
sulfuro cálcico,
sulfuros de hierro y de hierro y potasio;

c) fases normalmente ajenas al clínker como:

grafito y cok,
carburo de titanio,
carbonitruro de titanio;

d) fases pobres en cal;

e) fases “desconocidas” o de composición no precisada:

sólo se presentan si las condiciones del proceso de fabricación son poco usuales.

Cabe decir que son raras y de ellas se puede deducir lo siguiente:

- R) Los álcalis en forma de sulfatos indican azufre en las materias primas (sulfatos), lo cual es raro, o en los combustibles, lo cual es mucho más frecuente. Indican también que las materias primas contienen álcalis (las arcillas), y que la eliminación de éstos con los gases de la combustión no es completa, o que en parte se reincorporan al circuito de cocción;
- S) Las fases reducidas pueden ser ferrosas, hierro metálico, sulfuros y carbón, e indican falta de aire en la cocción. El hierro ferroso cataliza la descomposición del silicato tricálcico y la transformación $\beta \rightarrow \gamma$ del bicálcico, por lo que suele coincidir con abundante belita secundaria y belita γ . Se suele acusar porque la fase intersticial fe-

rrítica ("clara"), total o parcialmente, brilla y refleja menos de lo usual. El óxido ferroso —wüstita— es una fase dendrítica y suele coincidir generalmente con hierro metálico, cal libre y gran cantidad de ferrito de escasa reflectividad. Se forma en clínkeres con mucho hierro y sometidos a un enfriamiento muy rápido, pues en un enfriamiento lento desaparecería por la reacción:

El hierro metálico se aprecia en clínkeres blancos o gris claros, exentos o escasos de Fe_2O_3 , incluso no atacados. El sulfuro cálcico se confunde a veces por reflexión con el ferrito, pero es más redondeado y dendrítico, mientras que el C_4AF es idiomorfo o xenomorfo, según las circunstancias. Los sulfuros de hierro, o de hierro y potasio, son más reflectantes que el ferrito y presentan pleocroismo;

- T) En cuanto al cok y al grafito, se encuentran si la falta de aire para la combustión es grande, y a su alrededor aparecen siempre zonas fuertemente reducidas. Son típicos de clínker de horno vertical y suelen coincidir con la presencia de hierro metálico y falta o escasez de ferritos. Presentan pleocroismo. Los carburos y carbonitruros de titanio son fases muy raras en el clínker. Aparecen a veces, presentando pleocroismo por el alto contenido de titanio, junto a esferulitas de grafito en el clínker de horno vertical;
- U) Entre las fases pobres en cal figura el vidrio de gehlenita, que se forma a causa de heterogeneidad del crudo y falta de cal, y aparece entre la belita. Figura también la melilita, junto con la belita dendrítica, cuando tiene lugar una incorporación de cenizas ácidas al crudo;
- V) Entre las fases de composición desconocida o no precisa figuran los componentes higroscópicos del clínker que se forman preferentemente en atmósfera reductora. Son difíciles o imposibles de ver, si no se toman precauciones, por su gran alterabilidad al aire;
- W) Dentro del cemento como material de observación, la microscopía permite detectar la presencia y determinar la cuantía de adiciones hechas al clínker;
- X) Asimismo permite dictaminar, utilizando las fracciones más gruesas del cemento, acerca del clínker originario del mismo, utilizando técnicas de imbibición en materiales idóneos;
- Y) La técnica por transparencia permite medir y determinar las constantes ópticas de los cristales y, por lo tanto, su identificación en sus diversas variedades;
- Z) Tanto la técnica por transparencia como por reflexión, hacen posible el recuento cuantitativo de especies mineralógicas y el cálculo de la composición real (observada) del clínker.

Lo que precede compendia los ejemplos más típicos entre otros, y por lo tanto los más justificativos, de la importancia que puede tener la aplicación de la microscopía del clínker para el control de la calidad del mismo, así como de la marcha del proceso de clínkerización.

Intencionadamente se ha puesto énfasis en aquellas especies o fases más raras o escasas, así como en la interpretación que brinda su presencia en el clínker, precisamente por no ser frecuente su descripción en los tratados y artículos sobre la especialidad.

Es de apreciar que, intencionadamente también, no se ha querido entrar en detalles acerca de la preparación de las muestras de clínker o de cemento para la observación microscópica de los mismos, en lo que se refiere a aspectos tan importantes como son los siguientes:

- 1) la toma de muestras y la representatividad de las muestras tomadas;
- 2) la obtención de las probetas para la observación microscópica, por impregnación o aglomeración con materiales adecuados;
- 3) el corte y pulimento de las probetas;
- 4) el ataque de las mismas para destacar su estructura, en función del agente atacante, de su concentración, de la temperatura y del tiempo de ataque.

Asimismo tampoco se ha tratado con detalle sobre efectos ópticos anómalos y deficiencias de las preparaciones, que pueden inducir a errores de interpretación, ni se ha entrado en disquisiciones sobre el tamaño de los cristales, el idiomorfismo, el xenomorfismo, el estado de los bordes cristalinos, las inclusiones en los cristales, las maclas polisintéticas, las estructuras zonares, así como tampoco sobre la birrefringencia y los ángulos de los ejes ópticos en el caso de la técnica por transparencia, ni sobre los colores de reflexión y el pleocroísmo, en el caso de la técnica por reflexión.

Todo esto, o buena parte de ello, será objeto de exposición, comentario y observación durante el desarrollo del curso y, naturalmente no se puede agotar el tema en una exposición que sólo pretende servir de introducción al mismo.

Sólo habrá que añadir dos observaciones: una es que la clave del estudio microscópico del clínker, como de cualquier otro material pétreo, metálico o incluso biológico, reside, por lo que al aspecto cualitativo se refiere, en la anisotropía de las preparaciones, y en definitiva de los materiales, frente a un ataque diferencial por parte de los reactivos normalmente empleados. La otra observación, relativa al aspecto cuantitativo de la microscopía, estriba en el hecho de que se deben cumplir ciertas reglas o requisitos para que sean válidos los recuentos planimétricos de especies mineralógicas, es decir, para que se cumpla estadísticamente la correlación entre composición en masa o volumen, composición planar, que es la que se observa, y composición lineal o puntual que es la que se mide. Cuando se cumplen estas reglas que se darán a conocer en las sucesivas exposiciones, la microscopía del clínker es fidedigna y eficaz; cuando no, puede inducir a error por mal uso de ella.

En este sentido, la mayor dificultad de la microscopía petrográfica, aplicada al clínker en el aspecto cuantitativo, reside en el pequeño tamaño de los cristales, en su irregular y heterogénea distribución, en la gran diferencia de magnitud existente entre los cristales más grandes (como son los de alita) y los más pequeños (como son los de las fases intersticiales), y en la necesidad de observar y recontar áreas relativamente grandes para obtener valores representativos del material que se estudia.

Si con esta breve y rápida exposición, que ha pretendido ser panorámica, se ha conseguido llevar al ánimo de todos que la MICROSCOPIA DEL CLINKER es.—puede ser— importante, se considera que se ha alcanzado la finalidad propuesta.