

562.05: 656.94.03 =
611 - 56

carbones pobres problemas de los anillos

**conferencia pronunciada en el Instituto Técnico de la
Construcción y del Cemento el día 30 de Abril de 1959, por**

P. DUSSOSSOY
Ingeniero de Minas

Entre las dificultades que se encuentran en la conducción de los hornos rotativos, la más grave es probablemente la formación de anillos.

Estos perturban el horno, trastornan el avance regular de la materia.

Esta por un momento se detiene, para caer luego en verdadera avalancha.

En muchos casos, el fenómeno está limitado, el anillo se forma y se destruye regularmente, ocasionando irregularidades en el horno; pero a veces es mucho más grave, porque el anillo aumenta hasta obstruir casi completamente el horno: se conocen fábricas donde el horno se obstruye completamente cada 3 días.

Es inútil insistir sobre la influencia desastrosa de este fenómeno sobre la marcha de la Empresa: su producción disminuye notablemente; la multiplicación de las paradas de horno ocasiona la destrucción rápida de los refractarios; la fabricación de clínker es de mala calidad, y también ocasiona gran cansancio al personal.

¿En qué consiste el problema de los anillos?

¿Qué explicaciones se pueden dar a este fenómeno?

Nos encontramos ante un fenómeno muy complejo, lo que explica la multiplicidad de las teorías expuestas, y, hay que reconocerlo, los resultados son a menudo decepcionantes.

Existen varios tipos de anillos, que, según los casos, y con frecuencia equivocadamente, se llaman: anillos de sulfatos, anillos de cenizas, anillos de polvo, anillos de clínker, anillos de carbón.

Aquí estudiaremos preferentemente los anillos formados en la entrada de la zona de clinkerización.

¿Cómo se forma un anillo?

Parece que los anillos tienen origen cuando aparece un porcentaje importante de líquido en un punto del horno, donde, al mismo tiempo, existe una causa de enfriamiento que facilita la solidificación brusca en masa de la materia aglomerada por la liquefacción.

Se ven en seguida las causas variadas que esta definición muy general puede englobar, y al mismo tiempo nos aclara un poco sobre el mecanismo de la lucha contra este fenómeno.

Ahora vamos a pasar revista a un cierto número de estas causas:

1 — La heterogeneidad de la materia prima es un primer factor de formación.

Imaginemos granos de marga molidos groseramente. Estos granos pueden empezar a fundir hacia los 1.100°C, gracias a los álcalis que contienen; éstos tenderán a adherirse a la pared, y las partículas calcáreas cuya liquefacción no ha comenzado seguirán su trayecto.

Hemos visto obstruirse el horno en algunas horas al pasar una cantidad de materia que, por error, era de bajo porcentaje de carbonatos.

Las fábricas que han hecho ensayos de molienda tosca de las materias primas arcillosas han observado un fenómeno idéntico.

No nos extenderemos aquí sobre esta causa, ya que, si se quiere mejorar la marcha de un horno, es indispensable, ante todo, obtener una buena homogeneidad de la materia primera y, en segundo lugar, tener una molienda de la materia suficientemente lograda.

2 — Supongamos, pues, que la homogeneización está realizada perfectamente.

En el horno, aparecen numerosos factores de heterogeneidad.

En las cadenas, la materia sufre primeramente un «recyclage» que puede llegar a alcanzar casi la producción normal del horno, escapando una parte más o menos importante de este polvo. Generalmente, las partes arcillosas más finas son las que tienden a escaparse, de manera que esta salida de polvo provoca más bien un aumento del porcentaje en carbonato cálcico de la materia prima.

Más hacia abajo, en la zona de descarbonatación, se efectúa también una salida importante de polvo.

A todo lo largo de su trayecto la materia recibe cenizas, parte de las cuales atraviesan las cadenas y se escapan con el polvo.

Se concibe que, cuanto más baje la materia en el horno, más nos alejamos de esta perfecta homogeneidad realizada a la entrada.

Esta mezcla compleja que desciende a lo largo del horno, está en condiciones de sufrir toda clase de transformaciones cuyo resultado final es el clínker; el cual no es más que un conjunto de partículas elementales, cada una de las cuales ha sufrido transformaciones físicas y químicas diferentes.

Después del secado, que tiende a aglomerar la materia en gránulos más o menos gruesos, hasta 800°C ningún fenómeno importante afecta al crudo; éste permanece sólido, con excepción posiblemente de una capa infinitesimal alrededor de cada gránulo y que se puede despreciar.

A esta temperatura se produce la descarbonatación que, debido a las numerosas calorías que absorbe, se extiende en una longitud relativamente grande. Es en esta zona donde se acentúa la heterogeneidad de temperatura entre las diversas partículas que se pueden encontrar en una misma sección.

Consideremos, en efecto, un gránulo de materia suficientemente grueso.

La distribución de las temperaturas en esta esfera puede ser la siguiente:

En la superficie, una capa muy delgada a una temperatura relativamente elevada. Ej.: 1.300°C donde termina la clinkerización; luego una capa de temperatura, $t_{o,i}$ más baja, por ejemplo, variando de 1.200°C a 900°C donde se prosiguen las reacciones de clinkerización. Estas temperaturas, $t_{o,i}$ se reparten de una manera bastante compleja escapando al cálculo.

Más al interior, se puede entonces, si el gránulo es bastante grueso, llegar hasta una zona que está todavía en plena descarbonatación y en donde la temperatura se mantiene a 800°; esta zona progresa hacia el centro gracias a las calorías recibidas del exterior y desprendidas por la clinkerización de las capas periféricas, pudiéndose encontrar el núcleo del gránulo a una temperatura un poco inferior a 700°C donde comienza la descarbonatación.

Lo que acabamos de exponer para un grueso gránulo, se aplicaría de la misma manera a una masa de materia más o menos aglomerada de cualquier forma, siendo muy reducido el movimiento del material en el horno.

La formación normal del clínker supone la aparición progresiva de líquido que aglomera entre ellas las partículas que, debido a la rotación del horno, aumentan cada vez más; si el horno llega a estar muy caliente, y la clinkerización ha comenzado muy arriba, se hacen bolas cada vez más grandes y se destruye la formación de corteza por fusión, al no estar ya alimentada ésta por la materia pulverulenta o muy fina.

Supongamos ahora que esta formación de líquido, en lugar de ser progresiva, sea brutal, entonces el talud de materia se transformará en una masa compacta de aspecto pegajoso, la cual avanza difícilmente en el horno, el talud de materia va

aumentando y puede de esta manera subir muy alto; esto lo hemos visto frecuentemente en un horno de 3,5 m de diámetro llegar hasta el eje del horno, cuando sólo había un principio de formación de anillo de 0,4 metros de alto como máximo.

Según un mecanismo que es difícil de explicar, pero que se puede concebir, el anillo en esta zona comienza a aumentar: aumenta lentamente si la marcha del horno es muy regular. Pero es suficiente que se produzca el menor incidente para que el horno se obstruya completamente en algunas horas: esto ocurre notablemente si se para algunos minutos el horno, aunque no sea más que para observar el anillo.

Las paradas son las que dan anillos de formas muy asimétricas, de abertura cuadrada, por ejemplo.

El estudio de la formación de los anillos se reduce así al estudio de los factores susceptibles de provocar una producción brutal de líquido en el talud del material, mientras que en la misma zona existen causas de enfriamiento susceptibles de fijar esta materia haciéndola adherirse a la pared.

Análisis de algunos casos posibles de formación de anillos:

a) *Formación de líquidos eutécticos a baja temperatura en una zona en que el horno está todavía relativamente frío.* Es el caso de la aparición alrededor de los 850°C de un líquido eutéctico compuesto de una mezcla de $S\text{Ca}$ y SO_4Ca .

A esta temperatura la descarbonatación acaba de empezar, de manera que la materia se enfría fácilmente para consolidar el anillo que podría formarse así.

Generalmente, a este anillo se le da el nombre de anillo de sulfatos. Debería formarse, sobre todo, con combustibles ricos en S y sería favorecido por llamas particularmente reductoras.

b) *Aparición a baja temperatura de líquidos eutécticos ricos en álcalis.* Estos álcalis pueden provenir del crudo o de cenizas de combustibles procedentes de la tobera o previamente mezcladas al crudo.

Estos eutécticos aparecen a temperaturas muy bajas, del orden de 750°C (ver anexo), y son, principalmente, combinaciones con sílice.

Ej.: $\text{K}_2\text{O}, 0,4\text{SiO}_2$ y $\text{K}_2\text{O}, 0,2\text{SiO}_2$ a 742°C

Estas combinaciones con la sílice podrían complicar el papel nefasto atribuido a veces a los sílex contenidos en la creta. Pero a decir verdad, nunca hemos podido atribuir al sílex, con seguridad, la formación de nuestros anillos.

Nosotros no hemos encontrado ningún anillo que sea netamente de este tipo. Debe ser raro que la proporción de álcalis sea suficiente para provocar ella sola este fenómeno.

c) *Formación brusca de líquido, debido a una combinación de las cenizas y del clínker.* El eutéctico así formado funde a una temperatura inferior a la de los 2 componentes; es, debido a esto, como un clínker que funde a 1.385°C y unas cenizas que funden a 1.400°C pueden dar un eutéctico que funde a 1.250°C.

Más adelante volveremos a referirnos a esto, a propósito del diagrama. Vemos que solamente intervienen las cenizas que se posan en la parte de arriba del horno, bien sea de las que están introducidas en la pasta como materia primera o bien de las que provengan de las partes más finamente molidas del combustible puesto en la tobera.

Factores que actúan sobre la formación del anillo de cenizas:

De lo dicho anteriormente son fáciles de imaginar.

La finura del combustible. Una molienda tosca debe facilitar el depósito de una parte importante de las cenizas en la zona de cocción.

La fusibilidad de las cenizas o más bien su composición. En realidad lo que importa no es la fusibilidad de las cenizas puras, sino la aptitud de las cenizas para dar con el clínker combinaciones que fundan a baja temperatura, como se verá sobre el diagrama ternario.

El índice de hinchamiento de las cenizas. Las cenizas muy porosas son arrastradas muy lejos y se combinan mejor con la materia debido a su porosidad, facilitando, por consiguiente, la formación de anillos.

La velocidad de la corriente gaseosa. Si se activa el horno, las cenizas son arrastradas más lejos y la tendencia a la formación de anillos es mayor.

Estudio del diagrama $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaO}$

En el diagrama $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{Fe}_2\text{O}_3$ se puede admitir que los anillos estudiados están todos en el triángulo $\text{C}_3\text{A} - \text{CaO} - \text{C}_4\text{AF}$; por tanto, limitaremos nuestro estudio al diagrama $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaO}$.

Les recordaré rápidamente algunas nociones relativas a estos diagramas.

Consideremos una mezcla representada por un punto, M, en el triángulo $\text{C}_2\text{S} - \text{C}_3\text{S} - \text{C}_3\text{A}$ y en la zona de depósito del C_2S .

Este punto M se halla sobre la isoterma 1.800°C . Esto quiere decir que la mezcla estará completamente líquida a 1.800°C . Si se hace enfriar entonces la mezcla se depositará un sólido, en este caso el C_2S , puesto que estamos en la zona de depósito de este producto. El punto L, representativo del líquido restante, se desplazará entonces sobre la recta $\text{C}_2\text{S} - \text{M}$; y el porcentaje de líquido en un momento dado será:

$$\frac{\text{C}_2\text{S} - \text{M}}{\text{C}_2\text{S} - \text{L}}$$

Siendo, por tanto, el porcentaje de sólido:

$$\frac{\text{M} - \text{L}}{\text{C}_2\text{S} - \text{L}}$$

Cuando el punto L alcanza en N la curva límite de la zona de depósito de C_2S , aparece un nuevo sólido que es del C_3S . El punto representativo de la mezcla sólida depositada es, en este caso, el punto m entre C_3S y C_2S sobre el lado del triángulo.

La recta m M encuentra en L_1 la curva límite de las 2 zonas. El punto L representa un líquido eutéctico cuya composición varía a medida que se va depositando C_3S .

Cuando el punto L alcanza el punto, E, a 1.455°C , se deposita un nuevo sólido, el C_3A , la composición del líquido permanece entonces constante así como su temperatura: C_3A , C_3S y C_2S se depositan entonces

conjuntamente, desplazándose el punto representativo de la mezcla sólida sobre m E hasta encontrarse con el punto M. En este punto todo el líquido se solidifica.

Si el punto M, siempre en el mismo triángulo $\text{C}_3\text{S} - \text{C}_2\text{S} - \text{C}_3\text{A}$, se encontrase, por el contrario, en la zona de depósito, de CaO , la fusión de la mezcla se haría de una manera no congruente. Es decir, que C_3S se descompone antes de fundir en CaO y líquido.

Inversamente, cuando se enfría el líquido es la cal la que se deposita primero, hasta que el punto representativo del líquido, que se desplaza sobre la recta $\text{CaO} - \text{M}$, alcance la curva de separación de las 2 fases CaO y C_3S . Entonces éste se deposita y el punto representativo del líquido se desplaza sobre esta curva hasta el punto F donde aparece el C_3A . Este punto F no es un punto eutéctico, porque no es la temperatura de fusión mínima sobre las 3 curvas límites de las que es un punto común. Es un punto quintuple invariante. Para que la cristalización sea completa en este punto sería necesario que el punto M se encontrase en el triángulo $\text{CaO} - \text{C}_3\text{S} - \text{C}_3\text{A}$. Si este punto M se encuentra en el triángulo $\text{C}_3\text{S} - \text{C}_2\text{S} - \text{C}_3\text{A}$, la cristalización completa no podrá realizarse más que en el punto E. En este punto el líquido está saturado en C_3S , y el C_2S se deposita, permaneciendo la temperatura constante hasta la solidificación total.

Si ahora el punto M se encontrase por encima de la recta $\text{C}_2\text{S} - \text{C}_3\text{A}$, la solidificación no estaría terminada en E a 1.455°C , sino que continuaría hasta el punto G donde aparece el C_6A_3 , que no es hidrúlico.

Debido a la heterogeneidad de la materia, la aplicación del diagrama al proceso de la clinkerización es más delicada.

Consideremos lo que ocurre durante el calentamiento de la materia en el horno.

Cada volumen elemental de materia va a comportarse individualmente según su composición.

Frecuentemente, en un volumen elemental se hallará la presencia, después de la descarbonatación de la caliza, de la cal libre, y compuestos arcillosos, mezclas más o menos íntimas de sílice y de alúmina.

A baja temperatura, es decir, hacia 800°C ó 900°C, se formarán por reacción entre fases sólidas el CA, el CS y el CF, a medida que se vaya efectuando la liberación de la cal libre.

Se tendrá principio de liquefacción al seguir aumentando la temperatura; según la composición de los volúmenes elementales considerados, estos primeros líquidos aparecerán a unas temperaturas más o menos elevadas. La observación del diagrama nos da una idea de estas temperaturas en el caso teórico en que se tuviese presente únicamente S, A y C. A menudo las fases sólidas contenidas en un volumen elemental no podrán estar en equilibrio y entrarán en reacción hasta que los nuevos compuestos formados puedan permanecer en equilibrio.

El examen del diagrama nos muestra la complejidad de estas reacciones que conducen al compuesto final, el clínker, mezcla compuesta sobre todo de C_2S , C_3S , C_3A , C_1AF y CaO .

Representemos ahora sobre el diagrama algunas mezclas de crudo. Estas se sitúan en una zona muy restringida. Hemos representado por los puntos A_{-5} , A_0 y A_5 y puntos de Δbc :

$$-5, 0 \text{ y } +5$$

Se observará que los puntos A_3 y A_0 se encuentran en el interior del triángulo $CaO - C_3S - C_3A$ en las inmediaciones de la recta $C_3S - C_3A$.

A_{+5} se hallan ligeramente por encima de esta recta en el triángulo $C_3S - C_2S - C_3A$.

Para fijar el punto representativo de las cenizas, surge una dificultad importante. Es que es imposible determinar bajo que forma el hierro se combina a la alúmina o al sílice. Y, por otra parte, no se puede precisar si el hierro se halla en el estado de Fe_2O_3 o de FeO . La presencia de carbono residual en la ceniza nos deja suponer que se puede hallar un porcentaje bastante elevado de hierro bajo forma de FeO .

Si se hace referencia a los análisis adjuntos de cenizas de combustibles que acusan una proporción de CaO poco importante, del orden de 4 %, se puede concebir una zona próxima a la recta $SiO_2 - Al_2O_3$ donde se encontrarían los puntos representativos de las cenizas. Esta zona se encontraría en la zona de depósito de A_3S_2 .

Entre estas cenizas y el crudo van a formarse combinaciones intermedias. Se verá aparecer a 1.165°C el eutéctico $CS - CAS_2 - SiO_2$. Con elementos menos silíceos se formaría el eutéctico 1.255°C, mezcla de $CS - CAS_2 - C_2AS$.

Si la cantidad de líquido que de esta forma aparece es importante, la materia llega a ser adhesiva y progresa muy lentamente como lo hemos indicado antes. Aumentando la temperatura, el punto característico del líquido se desplaza a lo largo de las curvas de separación de las diversas zonas, disolviendo los elementos a su contacto hasta no tener presentes más que 2 elementos en equilibrio; por ejemplo, C_2S y C_2AS .

Se concibe que, según la composición del crudo y el porcentaje de incorporación de las cenizas, se podrán obtener anillos cuyos puntos representativos estarán en zonas muy diferentes.

Los anillos que hemos encontrado en nuestra Fábrica de Haubourdin tienen su punto representativo en la zona del C_2S , en el triángulo $C_2S - C_3S_2 - C_2AS$.

El anillo se forma por fusión, seguida de un enfriamiento. Para los anillos considerados es probable que se verá aparecer el líquido correspondiente al punto quintuple invariante a 1.335°C, líquido que es una mezcla de $C_2S - C_2AS$ y C_3S_2 .

Al continuar subiendo la temperatura, el punto representativo del líquido se desplaza sobre la curva de separación de las 2 fases $C_3S_2 - C_2S$ o $C_2S - C_2AS$.

Si, como hemos visto, esta masa adhesiva sufre un ligero enfriamiento, se produce el movimiento inverso, se deposita $C_2S \beta$ y C_3S_2 hasta el punto 1.335°C donde aparece el C_2AS y donde el conjunto llega a ser sólido. El sólido que aparece en este último punto sería una mezcla de $C_2AS - C_3S_2 - C_2S \beta$.

Transformaciones posibles del anillo así formado:

Por lo dicho anteriormente son también fáciles de imaginar:

1) **La fusión.** Si la temperatura tiende a elevarse suficientemente, el líquido formado puede ser arrastrado por la materia que se combina con él.

Es de esta manera como desaparece la formación de costra en zona.

2) *Enfriamiento*. Hemos visto que debido a su formación a temperatura relativamente baja, el C_2S de los anillos se presentaba en general bajo la forma β . Si el anillo se enfría el C_2S β se transforma en C_2S γ que se pulveriza. Esto explicaría la dislocación extremadamente brutal de los anillos.

El mismo mecanismo podría explicar la destrucción de la formación de cortezas de zona cuando el horno se enfría a consecuencia de una parada o de una mala cocción. Se atribuiría entonces a una mala formación de costra realizada a baja temperatura.

Si se ha recocido de nuevo el anillo aunque éste no se haya destruido por fusión, el C_2S β debe poder transformarse en C_2S α . En este caso el anillo está en peligro de no poder ser destruido en marcha, y entonces el derribarlo a mano es difícil debido a su dureza.

Se observará que la transformación del C_2S β en C_2S γ se efectúa hacia 675° .

3) *Combinación con una materia de composición diferente*. Este fenómeno es muy difícil de aclarar. Hemos obtenido destrucciones de anillos extremadamente brutales tolerando una pasta de dosis calcárea más reducida. Pasábamos de un Δ bc de -4 a un Δ bc de $+4$.

Algunas horas después el anillo se rompe. Pero es difícil decir si la reacción era debida a una combinación con la materia o a una reacción de la llama. Nos inclinábamos más bien por esta 2.^a hipótesis. Al cocerse a temperatura más baja la pasta de título más bajo, se ha podido obtener un acortamiento de la llama y un enfriamiento de la zona del anillo que hace aparecer el C_2S γ . La interacción de la materia y de la llama nos lleva a hacer hipótesis.

Lucha contra los anillos

Vamos a estudiar los factores sobre los que se puede actuar. Para la mayor parte de los casos nos vemos reducidos a hipótesis sobre el mecanismo de su acción.

a) La tendencia a formar anillos es mucho más débil con mezclas pobres en materias volátiles que con mezclas grasas. Las mezclas magras siendo en general de cenizas menos fusibles, hacen difícil el determinar si esta acción se debe a la composición de las cenizas o a que las llamas magras son más calientes. Veremos al hablar de la longitud en las llamas cuán difícil es precisar, aún en este caso, si la acción sobre el anillo es debida a una fusión o a un enfriamiento.

Hemos obtenido anillos importantes en Haubourdin sobre un horno activado con una mezcla que contenga 30 % de cenizas y 23 % de materias volátiles.

Con mezclas muy magras las fábricas belgas y holandesas utilizan sin dificultades mezclas muy cenizas que contienen, además de los «schlamms», residuos «esquistosos» a 60 y hasta 70 % de cenizas.

b) La tendencia a formar anillos disminuye fuertemente cuando el contenido en cenizas disminuye.

A 35 % cenizas, hemos tapado nuestro horno con mezclas de 20 % de materias volátiles (M. V.).

A 30 % cenizas, lo tapábamos regularmente con mezclas de 22 % de materias volátiles (M. V.).

A 24 ó 25 % cenizas y 22 % de materias volátiles (M. V.), los anillos prácticamente han desaparecido.

Se observará, sin embargo, que los hornos que marchan con mazut no están exentos de anillos. Sin embargo, éstos son menos frecuentes.

c) La tendencia a formar anillos disminuye cuando se tiene mucho aire primario, es decir, una zona de cocción corta.

d) Se puede modificar la composición de las cenizas y disminuir así la tendencia a la formación de anillos si se añade caliza en la tobera.

Esto puede realizarse inyectando por ejemplo polvo por la tobera.

e) Los hornos forzados tienden más que los otros a formar anillos. Esto no quiere decir que no se pueda encontrar un régimen de gran rendimiento y que esté exento de los anillos. Personalmente hemos hecho la experiencia en varias fábricas.

f) La tendencia a formar anillos es más grande con un crudo sobredosificado en cal. Esto podría explicarse por la obligación que existe entonces de calentar más la zona de cocción. Se puede así acentuar la desviación de temperatura entre la llama y la materia en la zona crítica de formación del anillo. Los líquidos eutécticos tendrán, entonces, tendencia a aparecer más bruscamente y a formar un pegamento.

Inversamente hemos podido romper bruscamente anillos ya muy importantes y prácticamente en el último grado con introducción de crudos de dosis bajas en cal.

Pero este método es peligroso para la calidad del clínker y también para la mecánica debido a su brusquedad.

Nos explicamos, por otra parte, bastante mal el mecanismo de esta rotura que no

puede atribuirse más que a una transformación del C_2S . Esta sería entonces la consecuencia de un enfriamiento importante del anillo.

Les damos todas estas indicaciones como resultado de observaciones personales y de las que nos hemos enterado. No nos sorprenderíamos que otras personas que hayan tenido que enfrentarse con estos anillos tengan un punto de vista diferente al nuestro.

Los anillos que se forman son muy variados en su composición, en sus causas, es normal que haya también mucha variedad en los medios de combatirlos.

En este dominio complejo debemos ser muy modestos, primero encontrar el medio de evitar los anillos y el de destruirlos, y en segundo lugar, si podemos encontrarla, la explicación del fenómeno.

ANALISIS DE ANILLOS

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₂	MS	A ₁ F	Δ a 100	CaO libre
Hacia arriba de los 30 m . . .	27	6,05	2,35	61,1	0,80	0,90	3,22	2,95	+ 26,2	2,7
Hacia arriba de los 30 m . . .	27,95	6,30	2,45	60,3	0,80	1	3,20	2,57	+ 30,1	0,90
Hacia arriba de los 28 m . . .	28	6,30	2,40	58,8	0,80	0,80	3,22	2,63	+ 32,25	0,1
Hacia abajo de los 25 m . . .	25,55	5,95	2,45	64,5	0,85	0,75	3,05	2,43	+ 18	0,1
Formación de corteza a 15 m	24,35	5,05	2,35	65,1	0,80		3,29	2,15	+ 12,5	8,3

ANALISIS DE CENIZAS DE CARBONES UTILIZADOS

NATURALEZA	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₂	CO ₂	Agua Mat. Volat.	K ₂ O	Na ₂ O	Δ bc	TEMPERATURA DE	
												Reblandecimiento	Fusión
Finos magros 24,3 % C	48	29,75	8,25	4,30	2,30	1,50	—	0,70	3,9	0,9	200	1.200°	1.530°
Finos grasos 22 % C . . .	48,4	30,8	7,95	4,20	2,20	1,35	—	0,25	4,35	1,15	191	1.220°	1.550°
«Schlamm» magros 22,3 % C	53,9	28,8	6,20	4,10	1,70	1,05	—	0,20	3,65	0,45	210	1.220°	1.540°
Mezclas utilizadas antes de Septiembre 1957 55 % C	52,2	33,05	5,20	2	2	0,40	—	0,30	4,30	0,6	216	1.390°	1.610°
Mezclas utilizadas en Octubre 1957 29,7 % C	47,2	32,9	8,1	4,50	1,40	1,30	—	0,30			200	1.200°	1.540°

ANALISIS DE CLINKERES

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Δ nc	Δ k	CaO libre	Δ bc Pasta
23,05	5,45	2,40	65,30	10,8	12,7	1,7	+ 0,1
22,40	4,80	2,40	66,40	6,6	7,9	1,4	- 5

SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	C ₄ AF	Δ bc	Δ nc
22,4	3,27	63,04	4,92	- 5	6,6
23,05	3,92	61,94	4,92	+ 0,1	10,8

ANALISIS DE PASTAS

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MS	A/F	Δ bc
14,20	2,65	1,35	44,65	3,55	1,96	+ 0,1
13,60	2,40	1,40	45,70	3,57	1,71	- 5
15,05	2,55	1,40	43,65	3,81	1,83	+ 5,1

Δ bc	C ₄ AF	C	S	A
+ 0,1	4,10	73,6	23,4	2,95
- 5	4,25	75,2	22,4	2,48
+ 5	3,8	72,4	24,95	2,75

Tabla de puntos invariables del sistema C-A-S en la región del cemento Portland del diagrama de RANKIN

FASE3	REACCIÓN	COMPOSICIÓN			Temperatura (°C)
		CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	
CaO	Fusión	100	—	—	2.570
Al ₂ O ₃	Fusión	—	100	—	2.050
SiO ₂	Fusión	—	—	100	1.625
C ₂ S	Disociación	73,59	—	26,41	1.900 ± 20
C ₂ S	Fusión	65,00	—	35,00	2.130 ± 20
C ₂ S	Transforma. (α — β)	—	—	—	1.420 ± 2 (2)
C ₂ S	Transforma. (β — γ)	—	—	—	675 ± 5
C ₃ S ₂	Disociación	58,2	—	41,8	1.475 ± 5
CS	Fusión	48,2	—	51,8	1.540 ± 2
C ₃ A	Disociación	62,22	37,78	—	1.535 ± 2
C ₃ A ₂	Fusión	47,78	52,22	—	1.455 ± 5
CA	Fusión	35,44	64,56	—	1.600 ± 5
C ₃ A ₃	Fusión	24,78	75,22	—	1.720 ± 10
C — C ₂ S	Eutéctico	67,5	—	32,5	2.065 ± 10
C ₂ S — C ₃ S ₂ (1)	Reacción	55,32	—	44,68	1.464 ± 3
C — C ₃ A	Reacción	57	43	—	1.535 ± 2
C ₃ A — C ₃ A ₂	Eutéctico	50	50	—	1.395 ± 5
C — C ₂ S — C ₂ S	Reacción	68,4	9,2	22,4	1.900 ± 20
C — C ₂ S — C ₃ A	Reacción	59,7	32,8	7,5	1.470 ± 5
C ₂ S — C ₂ S — C ₃ A	Reacción	58,3	33,0	8,7	1.455 ± 5
C ₂ S — C ₃ A — C ₃ A ₂	Eutéctico	52,0	41,2	6,8	1.335 ± 5

(1) Valor corregido por E. F. OSBORN, J. Am Ceramic Soc. 26, 321 (1943).

(2) 1.456°C pour NEWMAN et WELLS.

Eutécticos de los álcalis según KUHL

- Eutéctico entre SiO₂ y Na₂O SiO₂ a 790°C
- Eutéctico entre Na₂O 2SiO₂ y Na₂O SiO₂ a 840°C
- Eutéctico entre Na₂O SiO₂ y 2Na₂O SiO₂ a 1.022°C
- Eutéctico entre K₂O 4 SiO₂ y K₂O 2SiO₂ a 742°C
- Eutéctico entre K₂O 2SiO₂ y K₂O SiO₂ a 780°C
- Eutéctico entre Na₂O Fe₂O₃ y Fe₂O₃ a 1.135°C

