

ábacos de composición potencial y de fusión del clínker

(Abaque de composition potentielle et de fusion du clinker)

(«Revue des Matériaux», núm. 528, septien

introducción

El examen al microscopio de numerosos clínkeres y la comparación de los resultados de este examen con los dados por el cálculo con las fórmulas de Bogue y Dahl, demuestra las ventajas que pueden deducirse al emplear estas fórmulas. Permiten prever los límites a los que tiende un material dado cuando el tratamiento se hace de un modo adecuado.

Las ecuaciones de Bogue proporcionan una composición potencial capaz de dar indicaciones muy valiosas sobre las propiedades del aglomerante: molturabilidad, calor de hidratación, resistencia mecánica. La validez de estas fórmulas es buena; la experiencia ha demostrado que, en la mayor parte de los casos, son insignificantes las divergencias entre la composición mineralógica y la composición calculada.

Las fórmulas de Dahl informan sobre la evolución de los materiales en curso de cocción. A este respecto, el punto más importante es la determinación de la cantidad de líquido que aparece a distintas temperaturas.

Ya sabemos la importancia del papel que desempeña la aparición de fase líquida. Desde el punto de vista químico, su aparición acelera mucho las reacciones de clinkerización al permitir la difusión de óxidos. En este sentido, es evidente que existe un interés en que haya mucha fase líquida desde que aparece el material en la zona de cocción. Físicamente el líquido gobierna el mecanismo de la granulación del clínker, y de ahí, el que el material se pegue en el horno a temperaturas elevadas. También depende del líquido la formación de una buena costra de revestimiento; incluso, es en esta fase líquida donde debe buscarse la causa principal de los anillos de clínker.

Para poder hacer un empleo más amplio de estas fórmulas, el autor ha intentado traducirlas gráficamente bajo la forma de tres ábacos.

La idea de base reside en el hecho de que ambas fórmulas llevan consigo ecuaciones lineales, que pueden representarse por familias de rectas en coordenadas cartesianas.

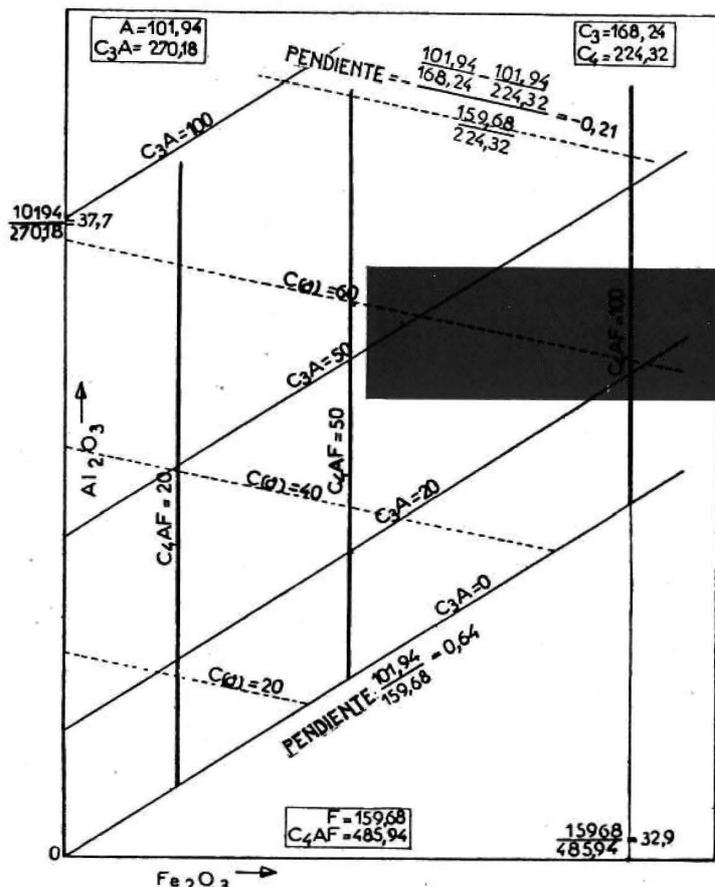


Fig. 1

A, F y C_3A a los pesos moleculares de alúmina, de óxido férrico y de aluminato tricálcico, respectivamente, tenemos:

$$\% C_3A = \frac{C_3A}{A} \left(y - \frac{A}{F} x \right) = \text{Constante}$$

donde $\frac{A}{F} x$ es la alúmina del aluminoferrito tetracálcico y $y - \frac{A}{F} x$ la alúmina del aluminato tricálcico.

Cada recta de igual C_3A % representa:

$$y = \frac{A}{F} x + \text{Const.}$$

Finalmente, se obtienen una serie de rectas paralelas de pendiente igual a $\frac{A}{F}$. La primera ($\% C_3A = 0$) pasa por el origen y la última ($\% C_3A = 100$) por el punto de abscisa $x = 0$ y de ordenada $y = 100 \cdot \frac{A}{C_3A} = 37,7$.

Una segunda serie de rectas representa los contenidos en C_4AF .

La ecuación de una recta de contenido constante en C_4AF es:

$$\% C_4AF = \text{Const.} = \frac{C_4AF}{F} x,$$

donde C_4AF es la masa molecular del aluminoferrito tetracálcico.

Abaco núm. 1

El ábaco permite determinar la composición potencial en aluminatos.

En la figura 1 se esquematiza la construcción del ábaco.

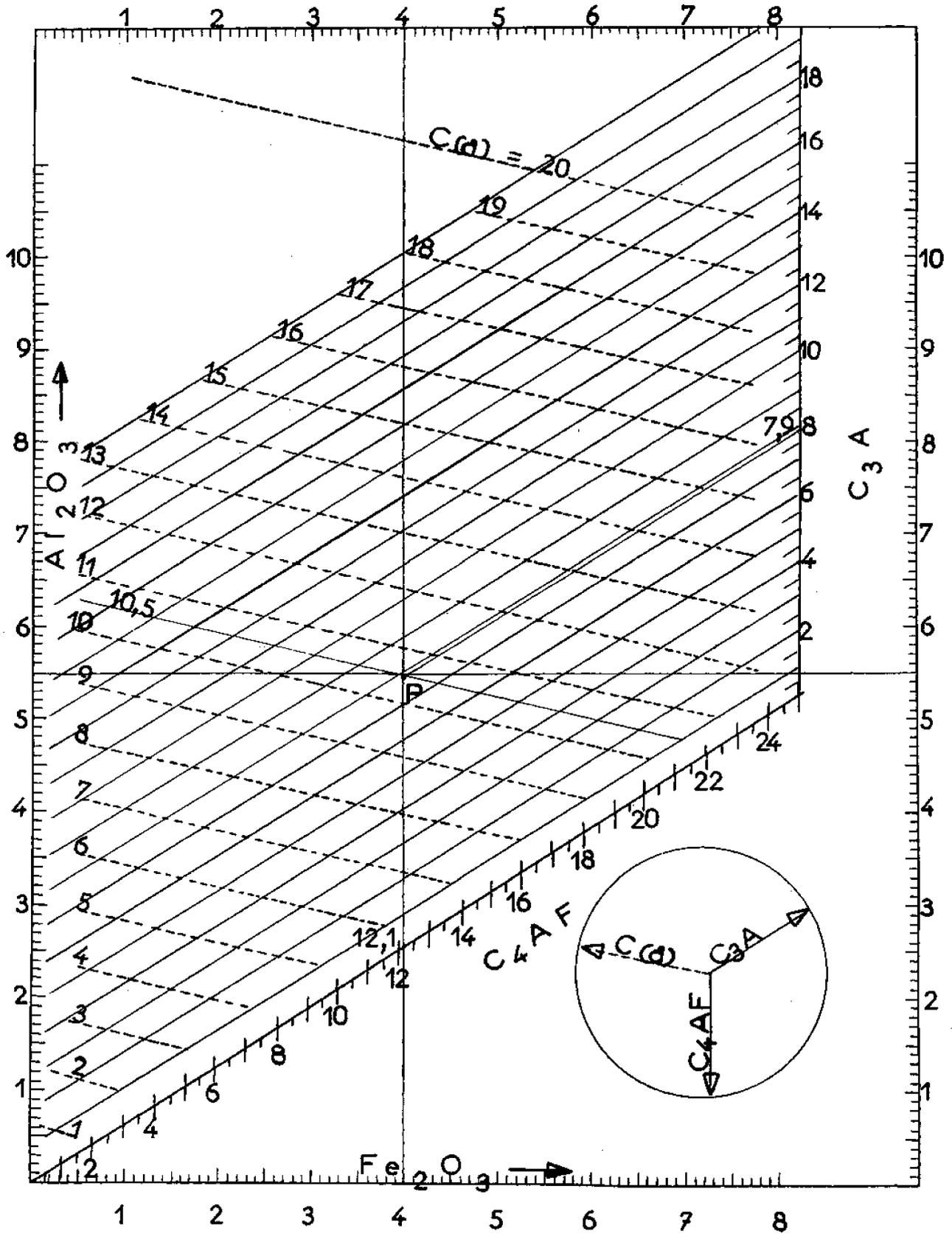
La abscisa representa porcentajes de Fe_2O_3 y la ordenada de Al_2O_3 .

Una serie de rectas representa los contenidos en aluminato tricálcico. Cada una corresponde a:

$$\% C_3A = \text{Constante},$$

y llamando x e y a los porcentajes de Fe_2O_3 y de Al_2O_3 ;

ABACO NUM. 1.



Cada recta corresponde entonces a:

$$x = \text{Const.}$$

Finalmente, obtenemos una serie de rectas paralelas al eje de ordenadas: la primera ($\%C_4AF = 0$) es el eje de ordenadas, y la última ($\%C_4AF = 100$) es la paralela al eje de ordenadas de abscisa $x = 100 \frac{F}{C_4AF} = 32,9$. Estas rectas de igual porcentaje de C_4AF están limitadas hacia la abscisa por la recta de pendiente $\frac{A}{F} = 0,64$. Las rectas de igual porcentaje de C_4AF no se representan sobre el ábaco, donde la recta de pendiente 0,64 se ha graduado en $C_4AF \%$.

El ábaco traduce, pues, el hecho de que la alúmina y el óxido férrico se combinan en la relación $\frac{A}{F} = 0,64$ para formar C_4AF y la alúmina restante forma C_3A . Por ello, se debe tener en todos los casos:

$$\frac{\% \text{Al}_2\text{O}_3}{\% \text{Fe}_2\text{O}_3} \geq 0,64$$

Una familia de líneas de puntos da los porcentajes de cal fijados por los aluminatos, $C_{(a)}$

Cada recta corresponde a $C_{(a)} = \text{Constante}$, es decir:

$$C_{(a)} = \left(x \frac{4C}{F} \right) + \left[\left(y - x \frac{A}{F} \right) 3 \frac{C}{A} \right] = \text{Constante},$$

donde:

$$x \frac{4C}{F} = \text{CaO del } C_4AF.$$

$$x \frac{A}{F} = \text{Al}_2\text{O}_3 \text{ del } C_4AF.$$

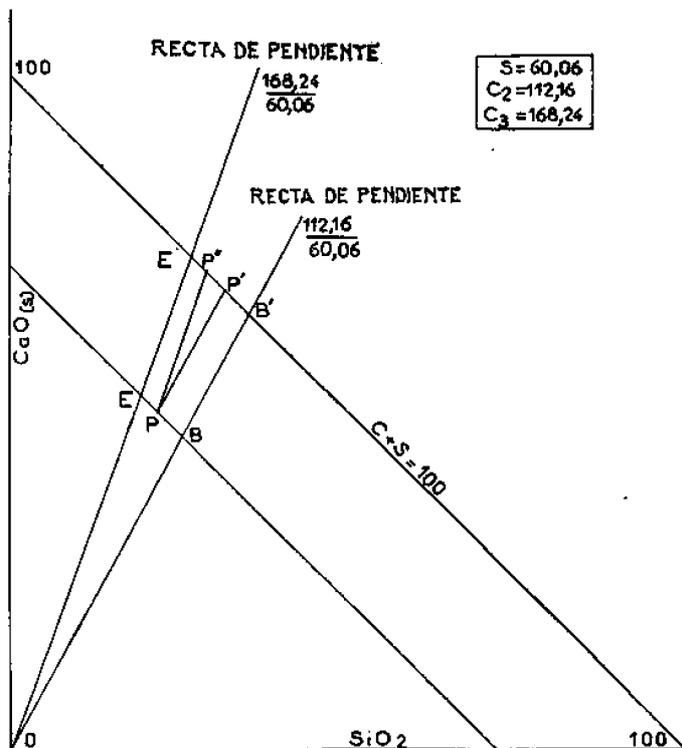


Fig. 2

$$y - x \frac{A}{F} = \text{Al}_2\text{O}_3 \text{ del } C_3A.$$

$$\left(y - x \frac{A}{F} \right) 3 \frac{C}{A} = \text{CaO del } C_3A.$$

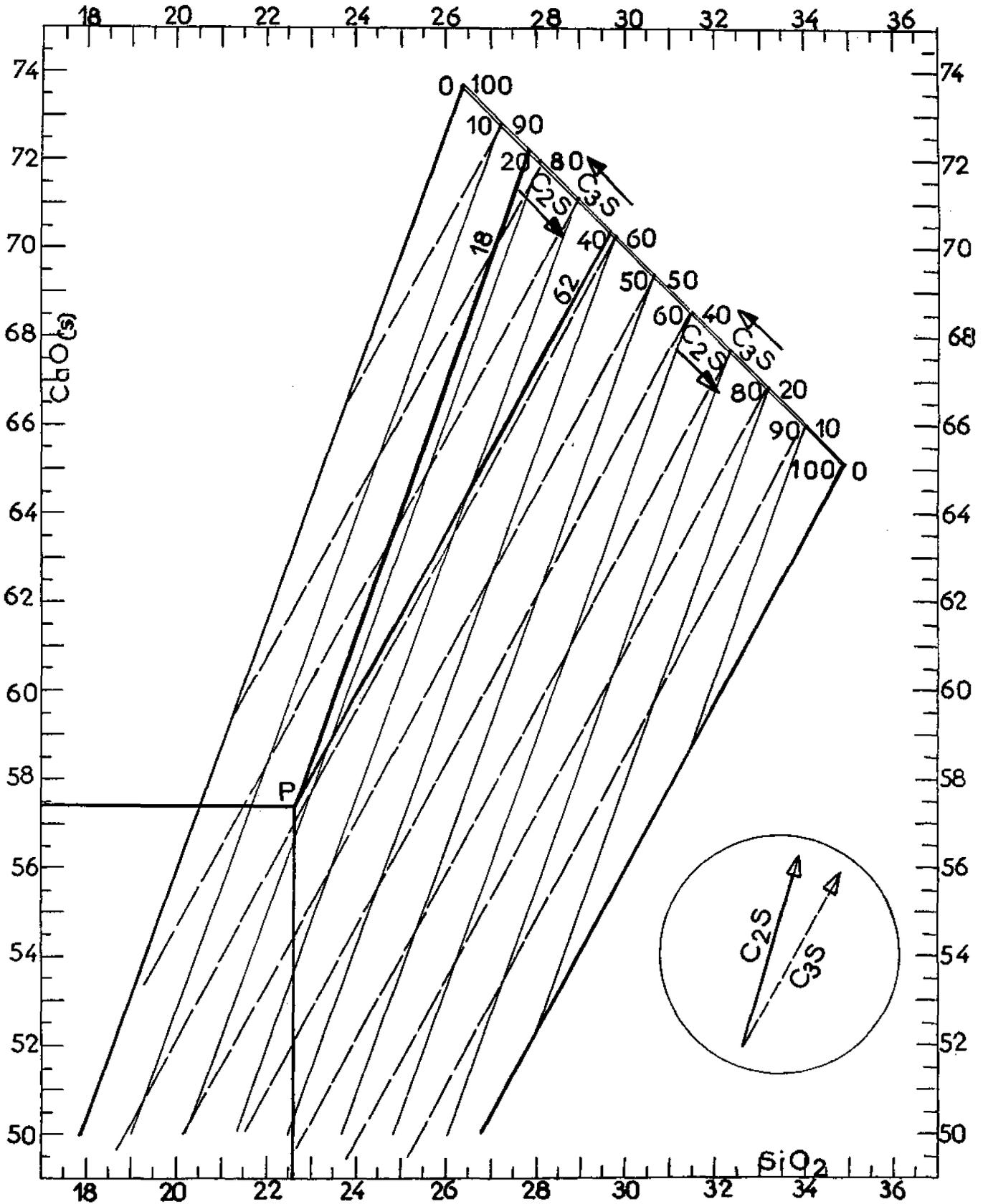
De aquí se deduce:

$$y = x \frac{A}{F} \left(1 - \frac{4}{3} \right) + \text{Const.}$$

Entonces se obtiene todavía un haz de rectas paralelas que tienen una pendiente igual a $-\frac{1}{3} \frac{A}{F}$, pendiente que corresponde a:

$$-\frac{\frac{A}{3C} - \frac{A}{4C}}{\frac{F}{4C}} = -0,21$$

ABACO NUM. 2



Ejemplo:

Sea un clínker, en el que:

$$\text{Al}_2\text{O}_3 = 5,5 \%$$

$$\text{Fe}_2\text{O}_3 = 4,0 \%$$

Por el punto P, de abscisa 4,0 y ordenada 5,5, tenemos:

— una línea, paralela a las rectas $C_3A = \text{Const.}$, que corresponde a $C_3A = 7,9 \%$.

— una línea, paralela a las rectas $C_{(a)} = \text{Const.}$, que corresponde a $C_{(a)} = 10,5 \%$

— la paralela al eje de ordenadas corta a la línea graduada en C_4AF en un punto donde $C_4AF = 12,1 \%$ (la ordenada de este punto dará el porcentaje de alúmina combinada bajo forma de C_4AF , es decir, $2,55 \%$).

Ábaco núm. 2

Este ábaco da la composición potencial en silicatos del clínker. El porcentaje de Si_2O se representa en abscisas, y en ordenadas el porcentaje de cal que combina bajo forma de silicatos $C_{(s)}$, el cual se obtiene restando de la cal total la suma de la cal libre, cal combinada en el yeso ($0,7 \times \text{SO}_3$) y cal de los aluminatos ($C_{(a)}$ dada por el ábaco núm. 1).

La figura 2 esquematiza la construcción del ábaco.

Se traza una recta de pendiente $\frac{C_3}{S} = \frac{168,24}{60,06}$ que representa aquellas composiciones para las que la cal de los silicatos y la sílice, se encuentran en la relación estequiométrica del C_2S ; a lo largo de esta recta, $\% C_3S = 0$.

Del mismo modo, se traza una recta de pendiente $\frac{C_2}{S} = \frac{112,16}{60,06}$ que corresponde al C_2S ; a lo largo de esta recta, $\% C_3S = 0$.

Por otro lado, la recta que une $C_{(s)} = 100$ con $S = 100$, significa que:

$$C_{(s)} + S = C_3S + C_2S = 100 \%$$

Así en el punto E' tenemos $\% C_3S = 100$ y $\% C_2S = 0$, y en el punto B', $\% C_2S = 100$ y $\% C_3S = 0$.

Consideremos un punto P en el triángulo OE'B'. Se encuentra situado en una recta EB sobre la cual $C_{(s)} + S = C_3S + C_2S = \text{Const.}$

En el punto P tenemos un porcentaje de silicatos igual a $\frac{EB}{E'B'} \cdot 100$. Por otro lado, nos encontramos:

$$\frac{C_3S}{\text{silicatos}} = \frac{PB}{EB} \quad \text{y} \quad \frac{C_2S}{\text{silicatos}} = \frac{EP}{EB}$$

Tracemos la recta PP' paralela a EE' y la PP' paralela a BB'. Podemos escribir:

$$\frac{\text{silicatos}}{\text{total}} = \frac{EB}{E'B'}$$

o

$$\frac{C_3S}{\text{total}} = \frac{C_3S}{\text{silicatos}} \frac{\text{silicatos}}{\text{total}}$$

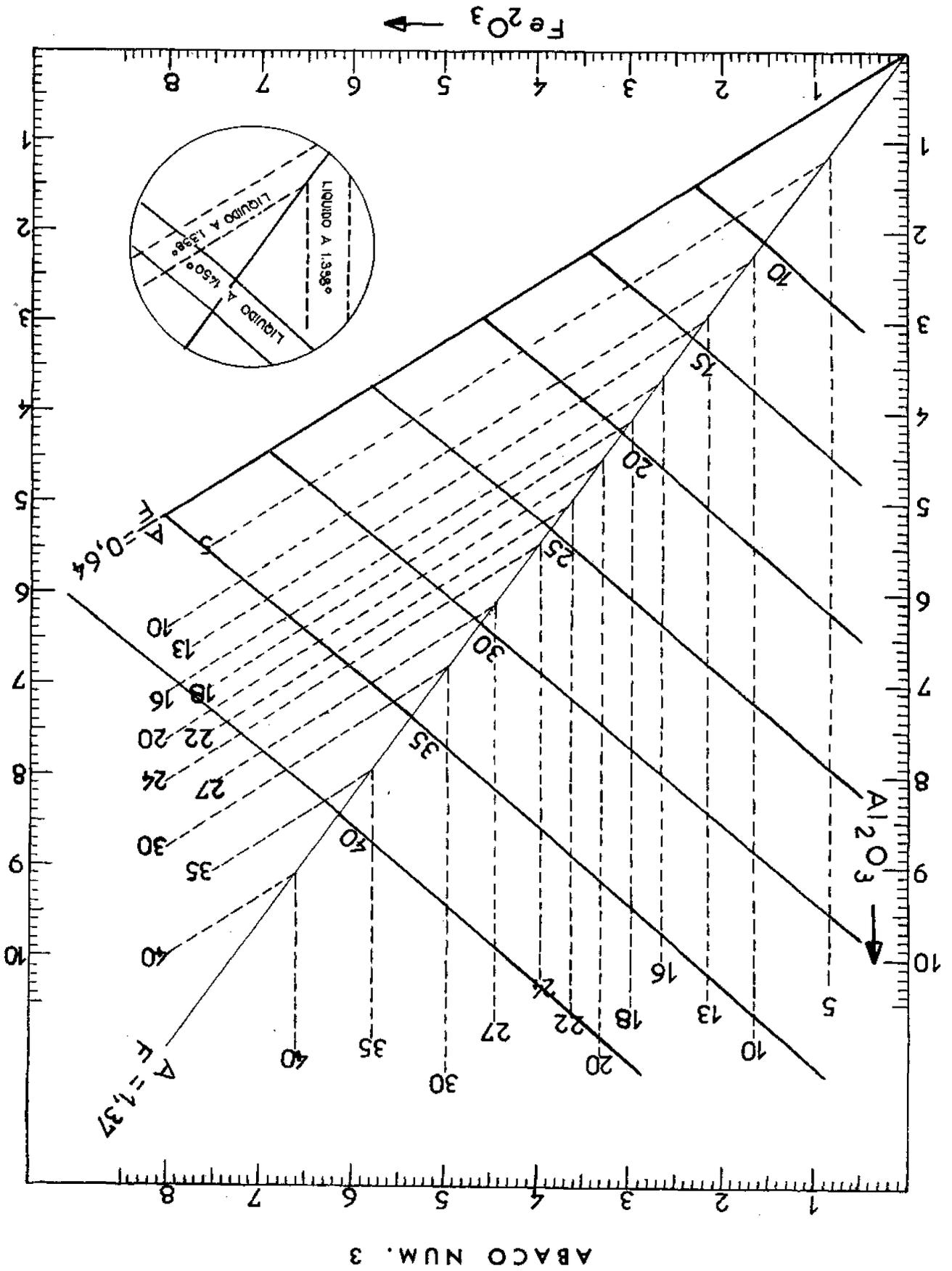
de donde:

$$\frac{C_3S}{\text{total}} = \frac{PB}{E'B'} = \frac{P'B'}{E'B'}$$

y

$$\frac{C_2S}{\text{total}} = \frac{EP}{E'B'} = \frac{P''E'}{E'B'}$$

De este modo, hemos trazado dos familias de rectas paralelas en el triángulo OE'B', que representan contenidos iguales en C_2S y en C_3S de 10 en 10 unidades.



Ejemplo:
Sea un clínker de la siguiente composición:

$$\begin{aligned} S &= 22,6\% \\ A &= 5,5\% \\ F &= 4,0\% \\ C &= 67,9\% \end{aligned}$$

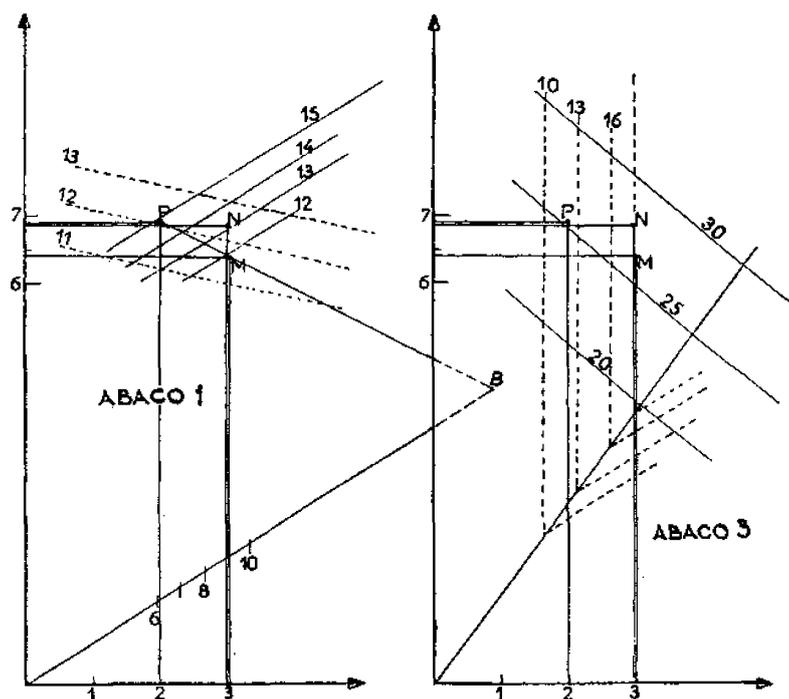


Fig. 3

Por el ábaco núm. 1, deducimos:

$$\begin{aligned} C_2A &= 7,9\% \\ C_4AF &= 12,1\% \\ C_{(a)} &= 10,5\% \end{aligned}$$

Coloquemos en el ábaco núm. 2 el punto P, de abscisa $S = 22,6$ y de ordenada $C_{(s)} = C - C_{(a)} = 67,9 - 10,5 = 57,4$. Por este punto tracemos una paralela a las rectas de igual C_3S y una paralela a las rectas de igual C_2S ; en las escalas correspondientes podemos leer:

$$\begin{aligned} C_3S &= 62\% \\ C_2S &= 18\% \end{aligned}$$

(necesariamente, se verifica que $C_3S + C_2S = C_{(s)} + S = 62 + 18 = 57,4 + 22,6 = 80$).

Abaco núm. 3

Este ábaco da el porcentaje de fase líquida a 1.338° y a 1.450° C, en función del contenido

en Fe_2O_3 y Al_2O_3 . Lo mismo que para los ábacos anteriores, nos basamos en el sistema C—S—A—F, es decir, se desprecia la influencia de óxidos menores. Además, se supone (lo que siempre es cierto en la práctica) que el líquido, a estas dos temperaturas, queda fijado sólo por la alúmina o el óxido férrico, o por los dos a la vez.

Consideremos el eutéctico que aparece a 1.338° C. Su composición es invariable:

Centesimal		Potencial	
CaO	54,8	C_3S	1,4
SiO_2	6,0	C_2S	16,2
Al_2O_3	22,7	C_2A	32,2
Fe_2O_3	16,5	C_4AF	50,2

Al calentar el material a la temperatura de 1.338° C, comienza a fundir y produce este líquido eutéctico, manteniéndose la temperatura teóricamente constante. Un producto con una composición como la potencial indicada

más arriba, fundiría completamente a dicha temperatura. Este no es nunca el caso; llega un momento en que este líquido no puede continuar formándose, a partir del sólido, sin cambiar de composición, puesto que en dicho sólido ha desaparecido todo el C_4AF o todo el C_3A . Es lo que se llama el estado de máximo calor: hasta este momento las calorías son absorbidas por la producción de una cantidad creciente de un líquido de composición fija, a temperatura constante; a continuación la temperatura crece, la cantidad de fase líquida progresa en aumento, pero su composición varía.

Vemos que el líquido eutéctico es tal que tenemos:

$$\frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3} = \frac{22,7}{16,5} = 1,37$$

y

$$\frac{C_3A}{C_4AF} = \frac{32,2}{50,2} = 0,64$$

Fácilmente se deduce que para composiciones en que $\frac{C_3A}{C_4AF}$ es inferior a 0,64 (o $\frac{A}{F} < 1,37$), el primero en desaparecer es el C_3A sólido, y diremos, en este caso, que él limita el líquido. Por la misma razón, será el C_4AF el que limita el líquido en composiciones tales como $\frac{C_3A}{C_4AF} > 0,64$ (o $\frac{A}{F} > 1,37$). Finalmente, cuando la relación de alúmina a óxido de hierro es igual a 1,37, el C_3A y el C_4AF limitarán el líquido, simultáneamente. (Recordemos que hacemos abstracción del caso bastante anormal en que el líquido estuviera limitado por uno de los silicatos.)

El ábaco se ha construido llevando Al_2O_3 en ordenadas y Fe_2O_3 en abscisas. La recta de pendiente $\frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3} = 0,64$, que representa en el ábaco núm. 1, $C_3A = 0$, figura aquí con el eje de ordenadas (donde $C_4AF = 0$): fase líquida a $1.338^\circ C = 0$.

Tracemos la recta de pendiente $\frac{A}{F} = 1,37$ (o $\frac{C_3A}{C_4AF} = 0,64$). En la región del plano situa-

da entre esta recta y el eje de ordenadas, tenemos que $\frac{A}{F} > 1,37$. Es el C_4AF el que limita la fase líquida.

La cantidad de líquido formada, en cada punto, es entonces igual a:

$$\begin{aligned} \% C_4AF \cdot \frac{\text{líquido total}}{C_4AF \text{ de la fase líquida}} &= \\ &= \% C_4AF \cdot \frac{100}{50,2} = 1,99 \% C_4AF, \end{aligned}$$

es decir, que el líquido a $1.338^\circ C$ está representado por una familia de rectas paralelas al eje de ordenadas o, lo que es lo mismo, paralelas a las rectas de igual contenido de C_4AF .

En la región del plano comprendida entre la recta de pendiente $\frac{A}{F} = 1,37$ y la de pendiente $\frac{A}{F} = 0,64$, el líquido está limitado por C_3A , y tenemos:

$$\begin{aligned} \text{líquido} &= \% C_3A \cdot \frac{\text{líquido total}}{C_3A \text{ del líquido}} = \\ &= \% C_3A \cdot \frac{100}{32,2} = 3,10 \% C_3A. \end{aligned}$$

Las rectas de igual porcentaje de líquido tienen entonces la misma pendiente que las rectas de igual contenido de C_3A del ábaco número 1. Obtenemos dos familias de rectas paralelos y sus intersecciones en la recta $\frac{A}{F} = 1,37$.

De este modo, en lo que respecta a la fase líquida a $1.338^\circ C$, debe hacerse notar que la relación $\frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3} = 1,37$ es la que permite, para una suma dada $Al_2O_3 + Fe_2O_3$, obtener el máximo de fase líquida.

Resalta de los cálculos de Dahl, relativos a la fase líquida a $1.450^\circ C$, que la cantidad de líquido formado a este temperatura es:

— para $A/F < 1,37$

$$\% \text{ líquido} = 1,16 C_3A + 1,43 C_4AF$$

— para $A/F > 1,37$

$$\% \text{ líquido} = 1,12 C_3A + 1,45 C_4AF$$

Estas dos relaciones se traducen en el ábaco en dos familias de rectas paralelas. En el caso general en que $\frac{A}{F} > 1,37$, las rectas de igual porcentaje de líquido pueden representarse por:

$$\text{líquido} = 1,12(2,65y - 1,69x) + (1,45 \cdot 3,04x).$$

Resultan ser paralelas de ordenada en el origen:

$$y_0 = \frac{\text{líquido a } 1.450^\circ \text{ C}}{1,12 \times 2,65}.$$

A esta temperatura de 1.450° C , la cantidad de líquido formado se relaciona con la cantidad de fundentes: $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$, pero es bastante independiente de la relación $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{Fe}_2\text{O}_3$.

Las fórmulas de Dahl permiten, en cada caso, precisar la composición del líquido a 1.450° C . En relación con esto, es posible completar el ábaco por líneas de igual porcentaje de Fe_2O_3 y líneas de igual porcentaje de Al_2O_3 que el líquido a 1.450° C . Estas líneas coinciden con rectas $\frac{A}{F} = \text{constante}$.

El empleo simultáneo de los ábacos, especialmente del primero y el tercero, permite resolver fácilmente problemas tales como el que daremos más adelante. Así se demostrará nuestro punto de vista y por qué se prefiere este sistema de representación al de puntos alineados, ya publicado para la composición potencial.

Aplicaciones.

Supongamos que se dispone de un material con la composición P:

$$\text{SiO}_2 = 22,35.$$

$$\text{Al}_2\text{O}_3 = 6,9.$$

$$\text{Fe}_2\text{O}_3 = 2,0.$$

$$\text{CaO} = 68,75.$$

El ábaco núm. 1 nos indica (fig. 3):

$$A = 6,9 \quad C_3A = 14,9$$

$$F = 2,0 \quad C_4AF = 6,1$$

$$C_{(a)} = 12,1$$

Y el ábaco núm. 2 nos daría:

$$S = 22,35 \quad C_3S = 60,7$$

$$C_{(s)} = 56,65 \quad C_2S = 18,3$$

La cantidad de líquido será (fig. 3):

$$\text{a } 1.338^\circ \text{ C} : 12 \%$$

$$\text{a } 1.450^\circ \text{ C} : 25 \%$$

Propongámonos aumentar el contenido en líquido sin modificar ni el porcentaje de C_3S , ni el de C_2S del clínker.

Para ello, vamos a mantener fijo el punto representativo en el ábaco de los silicatos, es decir:

$$S = 22,35$$

$$C_{(s)} = 56,65$$

El ábaco 3 nos indica que para aumentar el líquido, debemos desplazar el punto representativo de los aluminatos de izquierda a derecha. Habiendo fijado el valor de C_3S y C_2S , es decir de S y de $C_{(s)}$, necesariamente debemos desplazar el punto representativo de los aluminatos sobre una recta, donde:

$$100 - (S + C_{(s)}) = A + F + C_{(a)} = C_3A + C_4AF = \text{Constante}.$$

En el punto P tenemos que $C_3A + C_4AF = 21$. Unamos P con B, donde $C_3A = 0$ y $C_4AF = 21$. PB representan $C_3A + C_4AF = 21$. Desplacemos P sobre PB hasta M, donde se supone que las cantidades de líquido son ya suficientes, ya que, en este punto:

$$\text{líquido a } 1.338^\circ \text{ C} = 18 \%,$$

$$\text{líquido a } 1.450^\circ \text{ C} = 27 \%,$$

TABLA 1

	LIQUIDO		CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	C ₂ S	C ₃ S	C ₃ A	C ₄ AF	
	1338	1450									
P	12	25	68,75	22,35	6,9	2,0	60,7	18,3	14,9	6,1	P
M	18	27	68,25	22,35	6,4	3,0	60,7	18,3	11,9	9,1	M
N	18	29	68,07	22,13	6,83	2,97	58,7	19,2	13,1	9,0	N

En M, nos encontramos:

$$C_3A = 11,9 \quad y \quad A = 6,4$$

$$C_4AF = 9,1 \quad y \quad F = 3,0$$

$$C_{(a)} = 11,6$$

Finalmente:

$$SiO_2 = 22,35$$

$$Al_2O_3 = 6,4$$

$$Fe_2O_3 = 3,0$$

$$CaO = C_{(s)} + C_{(a)} = 56,65 + 11,6 = 68,25$$

En la práctica industrial donde, generalmente, no es posible variar por separado los óxidos de la arcilla, se llega sensiblemente al mismo resultado añadiendo 1 gramo de Fe₂O₃ por 100 gramos de la composición P, de suerte que se obtenga en el punto N:

CaO	68,75	68,07
SiO ₂	22,35	22,13
Al ₂ O ₃	6,90	6,83
Fe ₂ O ₃	3,00	2,97
	<hr/>	<hr/>
	101,00	100,00

Lo que nos conduciría a:

$$C_3A = 13,1 \quad y \quad \text{líquido a } 1.338^\circ C = 18 \%$$

$$C_4AF = 9,0 \quad \text{líquido a } 1.450^\circ C = 29 \%$$

$$C_2S = 58,7$$

$$C_3S = 19,2$$

En este caso se modifican un poco las proporciones de silicatos, pero estas variaciones son pequeñas comparadas con el aumento en fase líquida. Estos valores se reagrupan en la tabla núm. 1.

Conclusión

Es de esperar que los ejemplos expuestos aparezcan lo bastante claros para aquellos lectores que disponen de tiempo limitado para pensar en los principios constructivos de los tres ábacos, dado el mecanismo extremadamente simple de su utilización. Los dos primeros ábacos aportan un beneficio de tiempo en el cálculo de la composición potencial, y es de esperar que el ábaco de contenido en fase líquida permitirá poner fácilmente en práctica los cálculos de Dahl, cuya importancia ya conocen todos los cementeros.

Los principios de la construcción de los ábacos que hacen surgir la realidad física escondida en la sequedad de las ecuaciones, aportan nuevas ideas sobre un cierto número de cuestiones: los gráficos tienen la ventaja de mostrar la continuidad de fenómenos y, en consecuencia, la posibilidad de preverlos con más comodidad; sus propiedades geométricas extienden la aplicación de fórmulas permitiendo calcular resultados que no se encuentran explícitos en las ecuaciones: aluminatos de cal, alúmina combinada como C₄AF, etc.

F. S. S.