

- Instituto Técnico de la Construcción y del Cemento -

616 - 49 LAS PROPIEDADES DE LOS CRUDOS Y SU INFLUENCIA SOBRE LA COCCION DEL CEMENTO

(Die Eigenschaften der Zementrohmaterialien und deren Einflüsse auf das Zementbrennen)

de: Zement - Kalk - Gips, nº 4, abril 1952, pág. 91.

- - -

Tres factores tienen particular importancia para la cocción del cemento en un determinado sistema de hornos: el crudo a cocer, el carbón y el obrero encargado de la cocción. No es necesario decir nada sobre las dificultades reinantes hoy día en general en el problema del carbón; sobre el papel del hornero volveremos más tarde; vamos a considerar primero más de cerca los crudos.

Siempre se está haciendo observar que, en los casos más diversos, por ejemplo, en consideraciones sobre la formación de polvo y de anillos, en el montaje de nuevos hornos, en la comparación del rendimiento de distintos molinos y hornos, y del consumo de fuerza y calor, etc., se parte con frecuencia del falso supuesto de que la materia prima es siempre la misma, y que el crudo molido es siempre el mismo. Este concepto es fundamentalmente falso, y debemos acostumbrarnos a considerar cada material por sí. Cada material tiene sus propiedades específicas perfectamente determinadas; con frecuencia se comporta, con un mismo tratamiento, de un modo totalmente distinto frente a otro material, y el descuidar este hecho da lugar frecuentemente a

experiencias muy desagradables. Ahora bien, para un director de industria, en particular, suele ser muy difícil encontrar la diferencia, pues él sólo conoce su propio material. Así se explica también que se oigan las opiniones más contradictorias sobre una misma cosa en conferencias, discusiones, etc.

Ahora bien, tenemos la posibilidad de controlar exactamente varios crudos muy diferentes, y de compararlos constantemente. Se aprende así, al transcurrir el tiempo, a conocer las diferencias. Vamos a describir a continuación algunas de estas diferencias que hemos encontrado por medio de ensayos de laboratorio y observaciones del funcionamiento práctico de los hornos. Vamos a suponer que los ensayos de laboratorio no exigen absolutamente un rigor científico elevado; todos están adaptados a la práctica en la medida de lo posible y se realizan con el personal y los aparatos más sencillos, existentes en todo laboratorio normal de cemento.

Si se hacen análisis, continuos y sistemáticos, de crudos, clinker y cemento de distintas fábricas, se comprobará muy pronto lo grandes que son las fluctuaciones en la composición química. Y esto no sólo en las fábricas que tenemos encomendadas, sino también probablemente en la mayor parte de las otras fábricas. Al menos, en tres fábricas en las que ha trabajado el autor anteriormente durante años así era.

Así, por ejemplo, en una de nuestras fábricas, el módulo de sílice varió en el crudo molido entre 2,39 y 3,20 en el espacio de un año, y en la materia prima entre 2,07 y 3,86. Esta fábrica disponía de un sólo tipo de marga caliza como materia -

prima. En otra fábrica que trabajaba con marga, arcilla y arena como materia prima, el módulo de sílice oscilaba entre 2,06 y 2,30 en el crudo molido, entre 1,78 y 3,38 en la caliza, entre 2,07 y 2,21 en la arcilla y entre 3,16 y 5,80 en la arenisca.

Además de esto, en la composición final del cemento no solamente influye el crudo molido, sino también las cenizas de carbón y el polvo introducido después en el crudo molido, o el polvo que se le quita, resultando entonces para el cemento terminado la gráfica de la figura 1: se ven en ella los valores mensuales del módulo hidráulico (HM), módulo de sílice (SiM), módulo de alúmina (AlM) grado de saturación de cal (KS) en una fábrica. El primero es relativamente uniforme, oscila entre 2,12 y 2,31. El módulo de sílice fluctúa entre 2,35 y 2,77, el de alúmina entre 1,67 y 3,22 y, de acuerdo con esto, el grado de saturación de cal entre 89,4 y 97,9 %. Este diagrama es típico para todas las fábricas: a un módulo hidráulico relativamente uniforme -el encargado del laboratorio puede hacer correcciones rápidas determinando la cal de un modo rápido y continuo- se oponen fuertes fluctuaciones en los otros factores. El encargado del laboratorio puede hacer aquí muy pocas correcciones finas. Las determinaciones de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  son muy largas y, en la mayoría de los casos no tiene tiempo de hacer correcciones, pues dispone de poca, o ninguna cantidad de producto molido. Desgraciadamente, en Alemania, con pocas excepciones, no se dispone de espacios amplios para almacenar el crudo ni de grandes silos para el crudo molido, de modo que el encargado del laboratorio tenga tiempo de introducir correcciones. Este pecado de omisión se paga las más veces duramente en las resistencias. Pues exactamente ---

igual que las curvas en la figura 1, las curvas de resistencia fluctúan hacia arriba y hacia abajo. Pero no queremos entrar en esto con más detalle, ya que por sí solo constituirá un capítulo. En cualquier caso se comprenderá que, con estas grandes oscilaciones en la composición química de las materias primas y del crudo molido preparado, no es muy fácil fabricar un cemento de resistencia siempre uniforme.

Pero, además de la composición química, también otras propiedades de las materias primas representan un importante papel, sobre todo la composición mineralógica. Pues de ésta depende la plasticidad de los gránulos de crudo molido y también el comportamiento en la cocción. Existe una gran diferencia entre tener un material, constituido por una marga que ya tiene la composición que se necesita, y tener que mezclar los componentes más diversos, hasta conseguir la composición deseada. Así, por ejemplo, nosotros tenemos dos fábricas que trabajan exclusivamente con margas del cretácico. En cada una de estas fábricas se mezclan únicamente dos margas, que se diferencian solamente en el contenido de cal. Dos de nuestras fábricas trabajan con una roca del conchífero y margas de composición muy variable, a las que se añade arcilla y arenisca o loess, pues el módulo de sílice es demasiado bajo en general. Ahora bien, sucede con gran frecuencia particularmente en estas dos fábricas que reciben de la cantera una marga con mucha cal, a la que hay que añadir mucha arcilla y arena. Pero en el espacio de un corto tiempo puede suceder que haya que trabajar con una marga cuyo contenido de cal es exactamente el preciso para la fabricación del cemento sea por dislocaciones en la cantera o por segregaciones en la tolva

de almacenaje, no tolerando ya adicción alguna de arcilla y arena. Pero en cualquier caso se tiene la diferencia entre una marca que, por ejemplo, contiene la mayor parte de la sílice en forma de cuarzo, pero finamente distribuida, y un material al que se han añadido grandes cantidades de arcilla y cuarzo, pero en granos relativamente gruesos. Estas diferencias se harán perceptibles de algún modo al seguir trabajando con el crudo molido, especialmente en la deformación del mismo, que ha de tener lugar necesariamente en los hornos verticales y Lepol. Así, se habla con frecuencia de material plástico o largo y de no plástico y corto. Además de hornos verticales, tenemos en cuatro de nuestras fábricas hornos Lepol, y en éstos las deformaciones, o sea la granulación, representa un papel muy importante. Surge así en seguida la cuestión de cómo se forman los gránulos en el trómel, cual es su resistencia y cómo se comportan, en la cocción.

Sobre la primera cuestión volveremos más tarde. Para el ensayo de la resistencia hemos aplicado un método, después de diversos ensayos previos, que no es nuevo, y no es rigurosamente científico, pero que en la práctica da buenos puntos de referencia. En un pequeño trómel de 300 x 300 mm. hemos preparado material granulado por rotación del trómel e inyección de agua. Los gránulos resultantes se tamizaron en un tamiz de 3 mm., para separar el material más fino, en parte aun no granulado, y entonces se determinó exactamente la humedad, secando una cantidad determinada. Una determinada porción de estos gránulos secos se vibró entonces en un tubo cerrado de unos 70 mm. de diámetro y unos 250 mm. de longitud por un número siempre igual de revoluciones, y se determinó el desgaste o disgregación tamizando en

el tamiz de 1 mm. En estos ensayos resultaron en los gránulos - de las distintas fábricas diferencias muy considerables. En general puede decirse que, girando lentamente el trómel, resultan por término medio gránulos más gruesos que girando rápidamente; cuanto mayor es la cantidad de agua añadida, tanto mejores son los gránulos; los crudos molidos plásticos necesitan más agua para una buena granulación que los no plásticos. Esto es fundamentalmente válido para todas las fábricas. En particular se determinaron los siguientes valores:

Fábrica A: Materia prima: 2 margas calizas.

Cantidad de agua añadida	Desgaste
14,2 %	28,4 %
14,9 %	14,9 %
15,5 %	9,8 %
16,8 %	10,0 %

Después del secado los granos son muy duros, con los - dedos sólo se pueden aplastar con dificultad; cayendo desde una altura de  $1\frac{1}{2}$  m. todos los granos permanecen enteros.

Fábrica B: Materia prima: Marga, arcilla, arena y cal procedente de conchas de moluscos.

Cantidad de agua añadida	Desgaste
11,6 %	42,0 %
13,3 %	28,0 %
15,3 %	15,2 %

Pero la adición de 15,3 % de agua era ya tan elevada - que los granos se pegaban entre sí. Después de desecados los granos son muy blandos, se aplastan fácilmente con los dedos, al caer desde una altura de  $1 \frac{1}{2}$  m. se reducen a polvo.

Fábrica C: Materia prima: 2 margas distintas a base de cal procedente de caparazones de moluscos, pero de origen muy distinto del de la fábrica B.

Contenido de agua	Desgaste
13,3 %	6,5 %
14,6 %	5,7 %
15,0 %	4,7 %

Gránulos muy buenos, duros, no se destruyen al caer.

Fábrica D: Materia prima: Cal de caparazones de moluscos, análoga a la de la fábrica B.

Contenido de agua	Desgaste
13,2 %	40,0 %
14,3 %	29,0 %
17,0 %	14,0 %

Comportamiento de los gránulos, malo, como en la fábrica B.

Fábrica E: Materia prima: dos margas cretácicas.

Contenido de agua	Desgaste
12,8 %	14,0 %
14,3 %	8,0 %
15,6 %	4,0 %
17,0 %	3,0 %

Los gránulos son muy duros, no se pueden triturar con los dedos y con el pié sólo con fuerza, permanecen enteros al caer desde una altura de  $1 \frac{1}{2}$  m.

Por su interés hemos introducido también un crudo molido de una fábrica de cemento metalúrgico, fabricado a partir de caliza y escorias de alto horno y que prácticamente no se puede granular.

Cantidad de agua añadida	Desgaste
11,0 %	94,3 %
11,2 %	94,7 %
12,5 %	92,5 %
13,3 %	87,9 %
13,9 %	86,5 %

Estos gránulos no tienen resistencia ninguna, ya se reducen a polvo al caer desde 10 cm. de altura.

Por consiguiente, la resistencia de los gránulos varía de fábrica a fábrica. También puede fluctuar fuertemente la plasticidad de un determinado crudo molido, residiendo la causa en la cantera. Así en un ensayo posterior con crudo molido de la fábrica E se determinó un desgaste del 37,8 % para 13,7 % de H<sub>2</sub>O, mientras que en el primer ensayo con 12,8 y 14,3 % de H<sub>2</sub>O se de-



terminó un desgaste de 14 a 8 %. Con el crudo de alto desgaste se quejaban mucho los operarios de que no podían cocer el material; en realidad, el peso aparente del clinker era muy bajo.

Con un mismo material desempeña también un papel esencial el tipo de molienda y la finura. Una de nuestras fábricas (la B) tiene dos molinos de crudos, un molino compuesto normal - de 3 cámaras y un molino cribador. El crudo molido del molino - cribador tenía, para una finura muy buena (7,6 % de residuo en - 4.900 mallas) un desgaste del 52,5 %, pero el mismo crudo molido en el molino compuesto (14,8 % de residuo en 4.900 mallas) sólo el 38 %. Molidos de nuevo ambos productos en el molino de laboratorio a una finura de aproximadamente 2 % de residuo en 4.900 mallas, el procedente del molino cribador tenía un desgaste del 42 %, mientras que el del molino compuesto tenía 31,5 %.

La adición de polvo procedente del horno actúa muy perjudicialmente sobre la capacidad de granulación. En la fábrica B ya citada anteriormente, se elevó el desgaste en un ensayo al 28% con aproximadamente 13,3 % de H<sub>2</sub>O. Un 5 % de polvo del horno llevó el mismo ya al 33,5 %, el 10 % de polvo al 39 %, y se elevó - al 62 % con 30 % de polvo. Con ello aumenta también el contenido de agua necesario desde el 13,5 % al 15,0 %.

También influye el secado. Nuestra fábrica E, experimentó en una ocasión grandes dificultades en la cocción al cambiar el sistema de calefacción del trómel de secado de carbón a aceite. El horno ya no rendía y la calidad del clinker era muy mala. La causa era el excesivo calentamiento del crudo en el - trómel de secado, que trabaja según el principio de contracorriente y que, con aceite, alcanzaba una temperatura mucho más alta -

que con carbón. En un ensayo de laboratorio se mezcló molido normal con distintas cantidades de molido calentado previamente a - 900 °C durante largo tiempo. El molido normal tenía un desgaste del 38 %; una adición del 5 % de material calentado elevó el mismo al 51 %, el 10 % al 60 % y el 20 % al 67 %. Probablemente por la elevada calefacción se elimina toda el agua de hidratación de la arcilla y ésta se hace no plástica. Igualmente el apagado del CaO libre y el desmoronamiento de ésta ejercerá una influencia - sobre los gránulos.

Se ve, por consiguiente, cuán diversos son los factores que influyen sobre la formación de gránulos. En todos los hornos hay que tender a gránulos resistentes, duros. Cuanto más resistentes sean, y más duros, tanto menos polvo se origina en el horno. Pero también tanto mayor es su rendimiento y tanto menos varía la composición química del crudo molido en cuestión, pues la mayor parte del polvo es recogida detrás del horno y añadida de nuevo al crudo molido.

Se puede conseguir mejorar la capacidad de granulación mediante diversos aditivos. Sin embargo la mayor parte de las veces estos aditivos son tan caros que su aplicación no es tolerable económicamente. No es preciso insistir más en esto.

Pero en todos los ensayos de laboratorio resultó interesante el que no se consiguió hacer reventar los gránulos. A pesar del más variado tratamiento térmico de los gránulos frescos y secos, éstos no estallaban. Volveremos a insistir sobre este punto.

Hemos visto, pues, que existen diferencias entre los -

crudos molidos en la plasticidad y en la capacidad de granulación. Ahora bien, ¿Cómo se comportan los crudos molidos en la cocción? La figura 2, representa las diferencias cuando el crudo molido es calentado a 900 °C durante distintos periodos de tiempo. Estos ensayos tampoco pretenden tener rigor científico, pero proporcionan puntos de referencia suficientes para la práctica. En estos ensayos se calentaron cantidades determinadas de crudo molido de las 5 fábricas antes citadas A á E, durante 10, 20, 30, etc., minutos, en un horno eléctrico que se podía ajustar con bastante exactitud en los 900 °C. Al cabo de los tiempo fijados se determinó la pérdida al fuego-residuo, y la parte soluble, o sea  $\text{SiO}_2$  soluble +  $\text{R}_2\text{O}_3$ . Se determinó entonces por medio del cálculo el  $\text{CaCO}_3$ , el  $\text{CaO}$ , el soluble y el insoluble. Previamente se realizó el mismo ensayo con  $\text{CaCO}_3$  químicamente puro. Los resultados pueden verse en la figura 2.

El  $\text{CaCO}_3$  precisa exactamente 120 minutos hasta perder totalmente el  $\text{CO}_2$ ; los últimos restos son muy difíciles de eliminar. La misma cantidad de crudo molido, en condiciones de completa igualdad, necesita para la consecución del mismo efecto 50 minutos en la fábrica A, 60 en la E y en las fábricas B, C, y D, 70 minutos. Los tiempos relativamente cortos en comparación con el  $\text{CaCO}_3$  puro no se pueden explicar por la menor cantidad de  $\text{CaCO}_3$  en el crudo molido. Más bien debe suponerse que en el crudo molido, ya a la temperatura de 900 °C, tienen lugar reacciones en estado sólido que favorecen la eliminación del  $\text{CO}_2$  en un corto tiempo; por tanto, debe tratarse de la formación de nuevos compuestos a partir de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{CaO}$ . Esto se desprende también del hecho de que la porción soluble, o sea la  $\text{SiO}_2$  y el  $\text{R}_2\text{O}_3$  so-

lubles, que se eleva en el crudo molido a un máximo de 2 á 3%, - aumenta ya mucho al cabo de 10 minutos de calentamiento, pero al canza su valor máximo al fin de la reacción. Este es también máximo en la fábrica A entre todas las fábricas con 22 % aproximadamente, mientras que en la fábrica D sólo se alcanza el 17 %. - Desgraciadamente no fue posible por falta de tiempo, realizar aná lisis exactos, o sea determinar que cantidad de CaO está libre y que cantidad combinada y de ésta cual lo está con SiO<sub>2</sub> ó Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, etc. Pero quizá este trabajo, sólo a guisa de ensayo, sugiera - la idea para que en una tesis doctoral se determine que reacciones tienen lugar, cuales son los nuevos minerales que se forman, cuales son las temperaturas mínimas a que tiene lugar su forma ci ón, como progresa ésta al elevarse la temperatura, etc. En to do caso, semejante trabajo sería interesante y de importancia pa ra juzgar los distintos crudos para el cemento.

Pero creemos haber demostrado que la velocidad de reacci ón de la calcinación puede ser muy distinta en los diversos crudos molidos. Queda claro, sin más, que estas diferencias se hacen fuertemente perceptibles en la cocción práctica en el horno.

Pero en último extremo la demostración de nuestros en sayos de laboratorio y de las conclusiones sacadas de ellos la dieron las observaciones en la práctica en tres hornos Lepol en tres fábricas distintas, A, B y D. En estos tres hornos se siguie ron los granulos desde el trómel de granulación a través de la zona seca de la parrilla en la cámara de cocción hasta la entrada en el horno. Se han escogido hornos Lepol porque tenemos cuatro de éstos en funcionamiento y porque se pueden tomar de la parrilla

probetas de material durante el funcionamiento, lo que no es posible en otros hornos. En la parrilla del horno Lepol se ha calentado siempre el material hasta una temperatura de alrededor de 1000° C.

Los trabajos se realizaron de modo que se tomaron simultáneamente, durante 4 a 5 días consecutivos, probetas del tromel de granulación, del extremo de la cámara de secado y de la parrilla, en total unas 20. Se realizaron determinaciones granulométricas de las probetas, se determinó la humedad, la pérdida al fuego, la cal, etc., y se hicieron los cálculos correspondientes. Al mismo tiempo se midió en los puntos más diversos la temperatura, el tiro, etc. puede verse el resumen de los datos encontrados en las figuras 3 a 5. La figura 3 representa la distribución granulométrica de los gránulos al salir del tromel de granulación.

Se determinaron los tamaños de grano de 0 a 7 mm. de 7 a 15 mm, de 15 a 20 mm. no había ningún grano por encima de 30mm. y por debajo de 3 mm., apenas la fábrica A muestra una gran porción de granos de 0 a 7 y sobre todo de 15 a 30. En las otras dos fábricas predomina el tamaño de grano de 7 a 15 mm. los tromels de granulación de A y B son casi iguales en dimensiones y también en el número de revoluciones, de modo que la diferencia en el tamaño de los granos no puede atribuirse al tromel.

La humedad de los gránulos en la fábrica A oscila entre 14,0 y 18,0, sin embargo, las humedades medias de los tres tamaños de grano son casi iguales, a saber, 16,6; 16,8; 17,2. En la fábrica D 15,4; 15,1 y 15,5. Parece como si los gránulos gruesos tuviesen algo más de humedad que los más pequeños.

El contenido de  $\text{CaCO}_3$  oscila dentro de ciertos límites, sin embargo, las fluctuaciones de los tres tamaños distintos de grano son iguales, así como los resultados medios. En la fábrica A el contenido de  $\text{CaCO}_3$  fluctúa en el tamaño de grano de 0 a 7 entre 76,3 y 79,0 %, media 78,0; en el tamaño de grano de 7 a 15, 76,5 a 79,0, media 78,0; en el tamaño de grano de 13 (?) a 30, - 76,8 y 78,7, media 77,9. En la fábrica B los valores correspondientes son:

Tamaño de grano:	0 - 7	77,4 - 78,4	Media:	78,1
"	7 - 15	77,5 - 78,5	"	78,0
"	15 - 30	77,4 - 78,5	"	78,0

Fábrica D:

Tamaño de grano:	0 - 7	75,9 - 78,2	Media:	77,4
"	7 - 15	76,6 - 78,0	"	77,4
"	15 - 30	76,5 - 78,0	"	77,3

Análogamente las relaciones de la pérdida al fuego:

Fábrica A:

Tamaño de grano:	0 - 7	34,54 - 35,89	Media:	35,16
	7 - 15	34,48 - 36,00	"	35,38
	15 - 30	34,72 - 36,77	"	35,51

Fábrica B:

Tamaño de grano:	0 - 7	35,46 - 36,76	Media:	35,85
"	7 - 15	35,38 - 36,68	"	35,77
	15 - 30	35,46 - 36,06	"	35,79

Fábrica D:

Tamaño de grano:	0 - 7	34,44 - 35,64	Media:	35,11
"	7 - 15	35,00 - 35,82	"	35,46
	15 - 30	34,72 - 35,93	"	35,44

Por lo tanto, en la granulación no tiene lugar segregación del material.

Sin embargo, los pesos aparentes de los gránulos fluctúan fuertemente. El peso aparente medio en la fábrica A es 1058, en la fábrica B 1175 y en la fábrica D 1166 g.

La figura 4 representa la composición granulométrica de los gránulos al abandonar la cámara de secado. Aquí se ve claramente cómo retroceden las porciones gruesas y cómo avanzan las finas. La porción de finísimos es ya también, en parte, muy elevada. Si se consideran como polvo que sale del horno y se fija sobre la capa de gránulos los tamaños de grano hasta 1 mm., esta porción se eleva en el caso máximo en la fábrica A al 5,0 % en la fábrica B al 11 % y en la fábrica D al 14,1 %.

Estas figuras muestran claramente que entre el trómel de granulación y el extremo de la cámara de secado ha tenido lugar una trituración de los gránulos en escala bastante importante.

Esta trituración se debe probablemente a que los granos revientan. Todo aquel que ha trabajado con un horno Lepol conoce el ruido característico, casi de fuego de fusilería, provocado por el estallido de los gránulos. Nosotros no hemos conseguido en los ensayos de laboratorio, como ya queda dicho, hacer reventar los gránulos a pesar de todos los tratamientos térmicos posibles, o únicamente unos pocos. Grosso modo podemos afirmar que sólo se desprenden capas de los gránulos con frecuencia varias, unas sobre otras, hasta que sólo queda un núcleo de 5 a 7 mm.

En la granulación las cosas probablemente suceden de modo que al caer una gota de agua sobre el crudo molido seco se forma una esfera homogénea. Si ésta se humedece de nuevo y se hace rodar sobre crudo molido se forma una capa o corteza sobre el núcleo primitivo. Y así se pueden formar de 2 a 3 y más capas de éstas, sobre un núcleo. Y estas cáscaras saltan al calentar los gránulos húmedos. La temperatura crítica, por así decir, o sea, la temperatura a la cual comienzan a reventar es muy distinta según los diversos crudos. La mayoría de las fábricas conocen esta temperatura con gran exactitud, y mantienen en la cámara de secado una temperatura correspondientemente inferior. Esta temperatura es en la fábrica A de aproximadamente 350 á 380 °C, en la fábrica B de unos 250 a 280 °C y en la fábrica D de unos 520 á 550 °C. De nuevo tenemos aquí claramente una diferencia de comportamiento en los crudos.

También fué interesante la humedad residual en los gránulos al abandonar la cámara de secado. Debería suponerse que los gránulos quedan completamente secos después de atravesar la cámara de secado. Pero desgraciadamente no es éste el caso. Las



humedades residuales fluctúan mucho.

En la fábrica A entre 0,1 y 2,9 %. Media 0,9 %

En la fábrica B entre 0,2 y 9,7 %. Media 2,7 %

En la fábrica D entre 0 y 7,3 %. Media 1,0 %

Por consiguiente, podría hablarse aquí de una segregación, pero en todos los casos de falta de uniformidad en la cámara de descarbonatación. Mientras que en una parte de los granulos ya puede aprovecharse el calor de la cámara de combustión para el precalentamiento a 900 °C y con ello para la descarbonatación, en otra parte de los mismos debe eliminarse primeramente la humedad.

La figura 5 representa las relaciones granulométricas de los granulos al abandonar la cámara de descarbonatación a la entrada del horno propiamente dicho. A diferencia de la figura anterior, en general no hay variaciones esenciales. Quizá las fracciones gruesas hayan retrocedido algo más. La fracción de finos hasta 3 mm. aumenta. Llama la atención particularmente la fracción de 0 á 0,2 mm. en la fábrica A. En esta fracción parece, depositarse la mayor parte del polvo procedente del horno en la cámara de descarbonatación. No es posible dar aun una explicación exacta del fenómeno.

Son interesantes las condiciones de descarbonatación. En general puede decirse que las fracciones más finas son las que se descarbonatan más, una media del 94,6 % en la fábrica A, del 72,5 % en la B y del 64,4 % en la D.

Al aumentar el tamaño de grano se hace más pequeña la

descarbonatación; para los tamaños de grano comprendidos entre 25 y 30 mm. es del 31,7 % en la fábrica A, del 22,7 % en la B y del 16,6 % en la D. El grado de descarbonatación medio de todos los tamaños de grano es en la fábrica A del 42,5 %, en la B del 34,2% y en la D sólo del 19,8 %. Se ven aquí de nuevo las grandes diferencias entre los crudos de distintas fábricas. Mientras que en la fábrica A la mitad casi del material llega descarbonatada ya al horno propiamente dicho, en la D escasamente un quinto. El resto de la descarbonatación tiene que tener lugar en el horno.

Para poner de manifiesto como fluctúan realmente los valores del contenido en  $\text{CaCO}_3$ , humedad, tamaños de los granos, grado de descarbonatación, etc., hemos resumido en una tabla (que dá en el original) todos los resultados de los ensayos de la fábrica A. En las otras fábricas son totalmente análogos. Durante los ensayos se realizaron también medidas de la temperatura y del tiro, así como análisis de gases con el aparato de Orsat. Pero sería muy largo introducir todas estas cifras, que presentan precisamente las mismas diferencias que los valores dados en la tabla.

Se desprende de estas consideraciones cuan intensamente fluctúan las propiedades de los crudos. La composición química, pero muy en especial la mineralógica, es muy distinta en los diferentes materiales, su comportamiento a elevadas temperaturas varía también mucho en función de la composición mineralógica, la resistencia de los gránulos, la cantidad de polvo, etc., varían igualmente, pero no sólo en los distintos materiales, sino también dentro de la misma fábrica. Nuestras canteras no dan productos artificiales que tengan una composición química y mine

ralógica totalmente igual, pues, desgraciadamente la madre naturaleza no trabaja con tanta exactitud como una fábrica química. Pero a todo esto hay que añadir el horno, con los carbones que - sobre todo ahora varían mucho, y los tres operarios diarios cada uno de los cuales, como sabe todo técnico, tiene sus opiniones - propias sobre la cocción. Si se considera, además, que en el horno no transcurren procesos químicos que necesitan una temperatura - determinada y sobre todo, cosa que se olvida con frecuencia, un tiempo determinado, queda claro enseguida lo que realmente entra en el horno y que diversos son los procesos que transcurren allí simultáneamente, tendiendo todos en último extremo a suministrar un buen producto final, o sea, un clinker bien cocido, que debe ser siempre homogéneo, de modo que no se tengan posteriores dificultades en la molienda. Aquí remito al lector a un trabajo de Azbe quien ha tratado estos temas en diversos trabajos en Rock - Products en 1951.

Ahora está clara también la importancia del tercer factor que mencionamos al principio, el hornero. Este recibe en su horno un número descomunal de granos, cada uno de los cuales tiene distintas propiedades, distinta composición química, distinta magnitud, distinta humedad, distinta temperatura, etc., y a partir de este conglomerado que varía constantemente debe obtenerse finalmente un clinker bien cocido, de un determinado peso aparente, con un consumo mínimo de carbón y con un rendimiento máximo y lo más uniforme posible del horno. El hornero tiene una responsabilidad realmente grande. Por ello es de una importancia fundamental para una fábrica de cemento nombrar únicamente horneros a gente escogida, que deben aprender exactamente toda la industria del cemento, laboratorio inclusive, antes de ser puestos al

frente del horno. La dirección de la empresa debe prestar el máximo apoyo al hornero en relación con todas las modificaciones deseadas en material, etc. y con las no deseadas en el carbón, etc. y sobre todo poniendo a su disposición instrumentos de medida de modo que él en todo momento pueda prever en seguida los cambios que puedan resultar en un punto cualquiera de su horno. Si se presenta una modificación en algún lugar, el hornero debe reaccionar en seguida. Pero esto lo puede hacer únicamente cuando su formación es tal que comprenda claramente la causa y efectos de todo cambio, que esté dispuesto a obrar y que no tenga reacciones lentas. Un hornero que quizá se asoma a la ventanilla de observación cada cuarto de hora, o que, cosa también frecuente, está también encargado del molino de carbón y una perturbación le mantiene alejado media, se puede decir ciertamente que no controla.

Finalmente nos referiremos a un fenómeno que en último extremo está también relacionado con la composición no uniforme del crudo molido, con las heterogeneidades del carbón y con las fluctuaciones de la temperatura, a saber, la formación de anillos. Nos referimos aquí únicamente a los anillos que se forman especialmente en los hornos Lepol a la entrada de la zona de sinterización. Todo aquel que ha trabajado con hornos Lepol sabe que estos anillos se presentan con frecuencia a diario, desaparecen repentinamente y al cabo de algún tiempo vuelven a aparecer, sin que se pueda determinar realmente la causa.

Cada fábrica tiene también su dispositivo especial para eliminar estos anillos durante el funcionamiento, pero permanecen siempre, molestando, pues el rendimiento de horno disminuye en todos los casos; si los anillos no se pueden eliminar, hay que des-

montar el horno. Hasta ahora se han considerado siempre las cenizas y los álcalis como la causa principal de la formación de anillos. Los álcalis representan ciertamente un importante papel, pero por el contrario, las cenizas no son en modo alguno un factor primario para la formación de anillos, existen fábricas que calientan únicamente sus hornos con petróleo y, sin embargo, tienen que eliminar anillos casi todos los días. Por tanto la causa real de la formación de anillos no puede ser las cenizas de carbón, sino que tiene que ser obra. En todo caso tiene que tratarse de un proceso de fusión. En nuestra opinión la causa principal reside en el calor exotérmico que se presenta en la sinterización a unos 1285 °C. Si este calor no puede ser absorbido por otras reacciones que transcurran endotérmicamente a esta temperatura, puede conducir a la fusión y con ello, a la formación de anillos. Pero un proceso fuertemente endotérmico es la calcinación del  $\text{CaCO}_3$ . Cuando se realizan determinaciones exactas del  $\text{CO}_2$  en el material de un horno rotatorio, se encuentra que al entrar en la zona de sinterización siempre existe aún del 2 al 3 % del  $\text{CO}_2$ . Ahora bien si el calor que se libera a unos 1285 °C encuentra aun restos de  $\text{CaCO}_3$ , primero se desprende el  $\text{CO}_2$  que queda y el calor empleado en ello no puede dar lugar a fusión. Las cosas son de otro modo cuando por cualquier tipo de fenómenos en el horno el  $\text{CO}_2$  ha sido eliminado ya totalmente y el calor liberado sirve exclusivamente para calentar el material. En general, se calcula hoy que el calor liberado se eleva a unas 100 kcal/kg. de clinker. Si por otro lado se calcula que teóricamente solo se consumen unas 425 kcal para la sinterización del clinker, de las cuales de 300 a 310 son necesarias para la descarbonatación, se ve que con un material ya completamente descarbonatado, estas 100 kcal de calor exotérmico suponen una importante cantidad de calor

para un clinker que ya ha sido precalentado a 1285°. Y este caso de que el material llegue a la zona de sinterización descarbonatada ya en el 100 % es muy fácilmente posible. Sucede con frecuencia en los hornos Lepol, sobre todo en la actualidad con las calidades de carbón tan variables, pero también con los crudos tan variables, que al horno "se le va" el carbón, como dicen ellos, esto es, la zona de sinterización está demasiado fría, una parte del carbón no arde y es arrastrada por el tiro. El carbón se quemaba en parte en la porción posterior del horno, en particular en la cámara de cocción (o descarbonatación). Aquí se eleva la temperatura, que de otro modo es normalmente de 1000 °C, a 1100 a 1200 °C. Con esto tiene lugar una calcinación más intensa ya en la cámara de descarbonatación. Al mismo tiempo tienen lugar en el horno fenómenos de reducción, pues está lleno de polvo de carbón; se forma  $\text{FeO SiO}_2$  que funde fácilmente y así se puede llegar por calentamiento repentino a la fatal temperatura de 1285 °C a fenómenos de fusión, que dan lugar a las primeras adherencias para la formación de anillos. Una vez se ha formado un anillo, se produce una disminución de la sección del horno, el calor se acumula, partículas de ceniza se adhieren al anillo y éste se hace cada vez más grueso y más compacto. Nuestra opinión sobre este proceso es reforzada por el trabajo de Matouschek quien afirma que sin reducción no hay anillos; por un trabajo del italiano Indaco que ha dejado privadamente al Sr. Anselm, y que atribuye igualmente la formación de este tipo de anillos al calor exotérmico, y por los trabajos de Azbe aparecidos en Rock Products en los últimos tiempos, quien atribuye la máxima importancia al calor exotérmico para el calentamiento total del material en el horno.

De todos nuestros trabajos y ensayos solamente queda una

exigencia de la industria del cemento: cread unas condiciones uniformes, o sea un crudo homogéneo para los hornos, un carbón homogéneo, un control riguroso y continuo de todas las partes del horno por medio de instrumentos exactos de medida y tantas cuestiones sobre las que debatimos todavía hoy se resolverán rápidamente por sí mismas.

El objeto de mis consideraciones ha sido inducir a otros técnicos del cemento a realizar investigaciones más amplias y más exactas, de modo que consigamos una idea exacta de las complicadas relaciones que se presentan en la cocción del cemento.

- - - - -

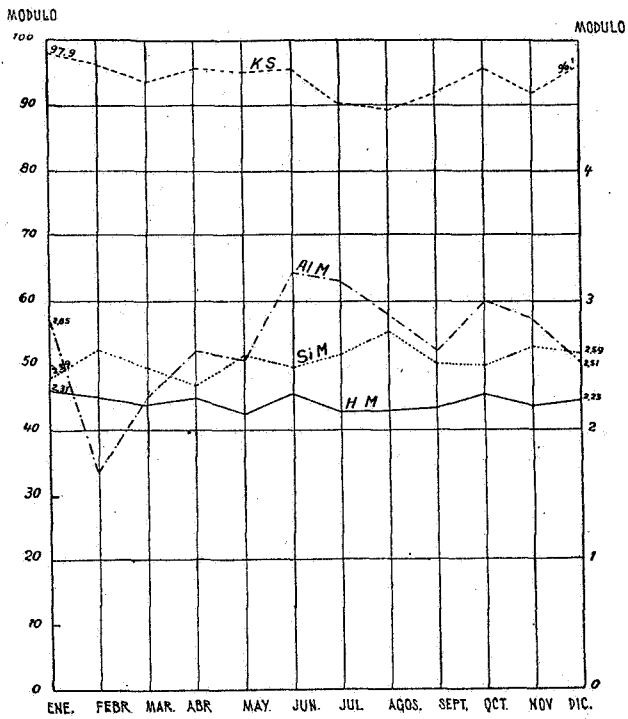


Fig. 1.

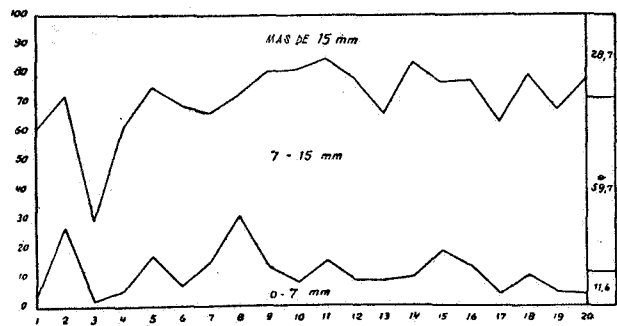
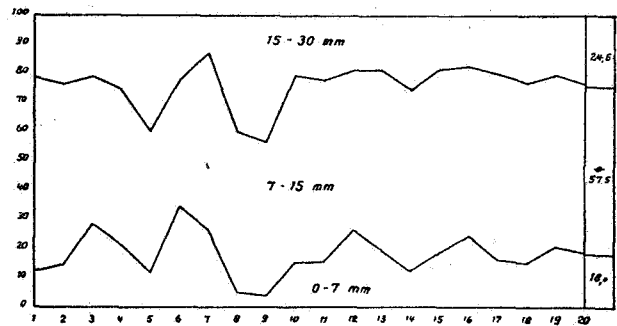
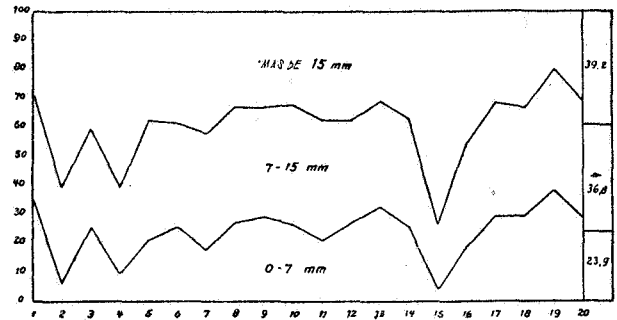


Fig. 3.



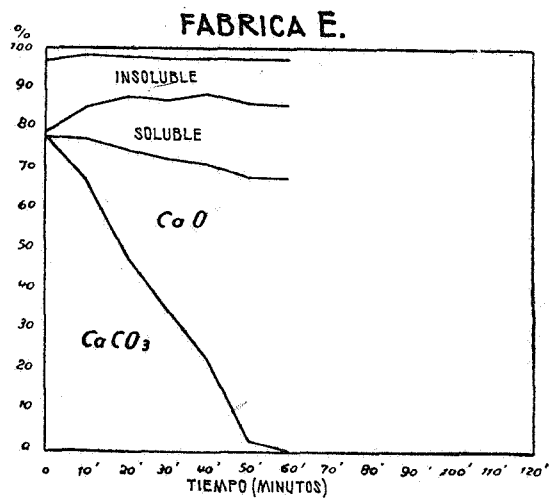
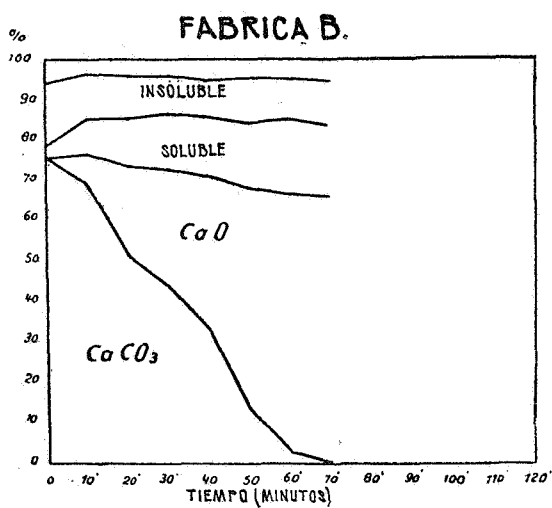
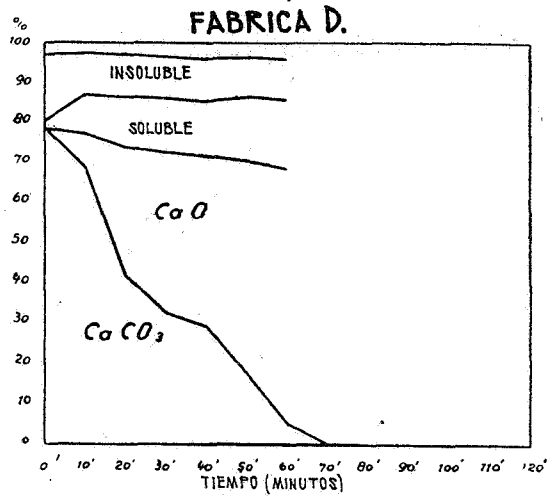
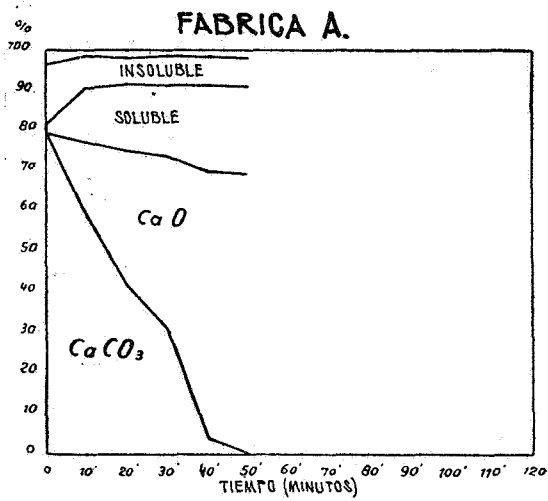
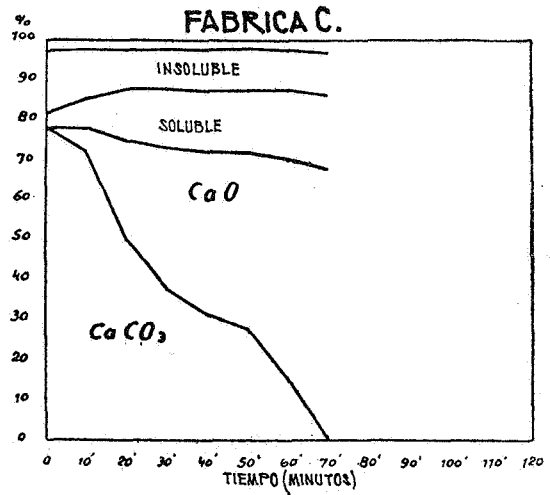
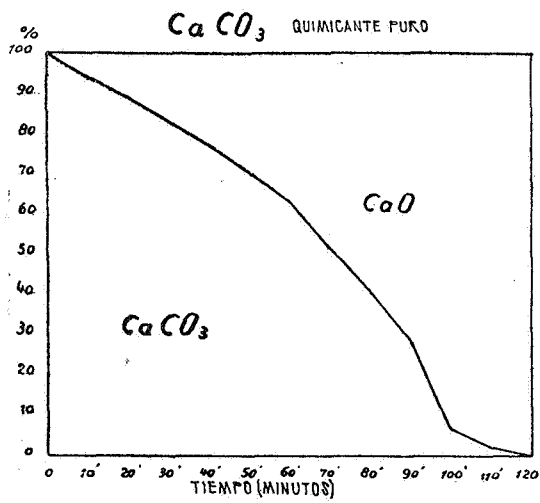


Fig. 2.

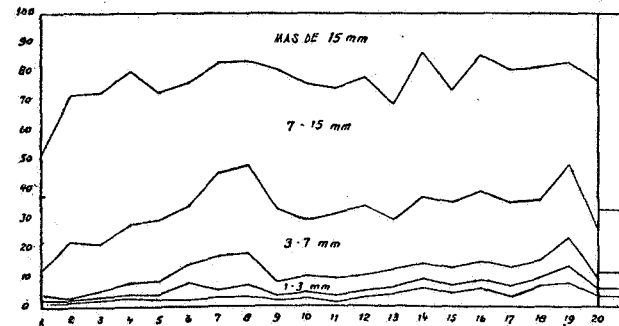
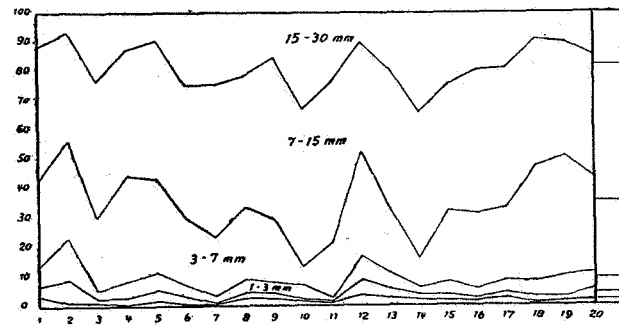
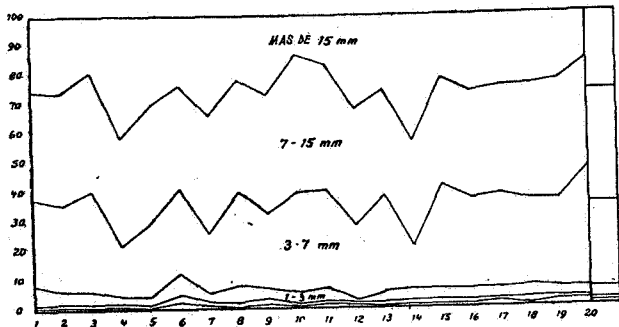


Fig 4

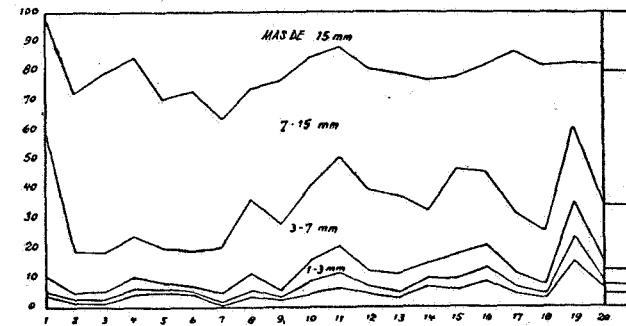
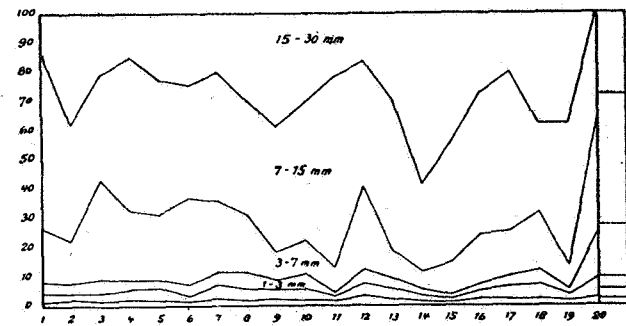
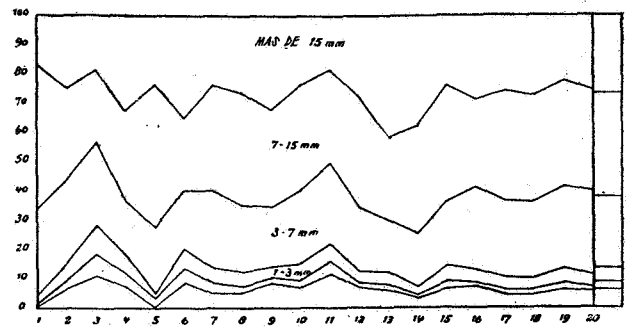


Fig. 5.