Materiales de Construcción Vol. 10 nº 100
Octubre, noviembre, diciembre de 1960

616 - 89

factores a tener en cuenta en la granulación de crudos para la fabricación de cemento

J. RICHARD TONRY

(«Pit and Quarry», 53, núm. 2, agosto 1960, pág. 102.)
(«Pit and Quarry», 53, núm. 3, septiembre 1960, pág. 117.)

parte I

sinopsis

El estudio de los gránulos preparados con los crudos en tambores o artesas, así como aquellos nodulizados naturalmente en los hornos de vía húmeda, es reciente. Pero también puede decirse que, hasta la fecha, se han estudiado con poco detenimiento en la industria del cemento americana. En este trabajo se exponen y analizan los ensayos de laboratorio de crudos procedentes de fábricas que usan nódulos en su proceso natural o por vía de experimentación.

La granulación de crudos secos es necesaria en el uso de hornos del tipo de parrilla (Lepol, por ejemplo) y puede practicarse también para preparar la alimentación para otros hornos rotatorios de vía seca. Los resultados varían con los diferentes crudos, en lo que se refiere al grado de perfección, para conseguir unos gránulos satisfactorios.

La producción de nódulos húmedos no es difícil, como se evidencia por los resultados obtenidos con cinco crudos. Sin embargo, una vez secos, los gránulos procedentes de diferentes crudos varían mucho en sus propiedades.

Dichos nódulos se ensayaron en capacidad bajo carga y en su resistencia a la abrasión en un amplio intervalo de temperaturas, pareciendo ser el más importante el ensayo de resistencia a la abrasión. En algunos casos, los aditivos químicos mejoran los nódulos.

Las propiedades mineralógicas de los crudos tienen un efecto pronunciado sobre la consistencia del gránulo una vez seco. En este estudio se emplearon la difracción por rayos X y el análisis térmico diferencial.

introducción

La granulación o nodulización es el proceso de formación de pequeñas bolas con los crudos y agua a la temperatura ambiente y con aparatos adecuados de los tipos de tambor o artesa. El método ordinario de fabricación es alimentar conjuntamente el polvo seco y el agua en la máquina.

Como criterio de calidad del nódulo se emplea su supervivencia a través del secado y cocción en el horno, o en la parrilla. Si el nódulo soporta la prueba, formará poco polvo y el objetivo se supone alcanzado. Si un nódulo se rompe, produce polvo y, como consecuencia, un aumento de las pérdidas de material o el cegamiento (cosa más grave) del lecho de nódulos en la parrilla.

La buena aptitud en la granulación de un crudo es un requisito previo en los hornos con parrilla. La resistencia a la abrasión y su capacidad bajo carga es importante en dichos hornos. La resistencia al choque térmico es fundamental en la supervivencia de los gránulos en hornos horizontales de vía seca. En el primer caso, los nódulos se encuentran con gases a 260-315° C sobre la parrilla; y en el horno horizontal, los gases en la superficie del lecho se encuentran a 540-1.000° C.

Los ensayos de laboratorio demostraron que podían nodulizarse cinco crudos comparables, aunque sus composiciones fueran notablemente diferentes. Puesto que la finalidad era saber cómo reaccionan los nódulos, no se hizo ningún esfuerzo para conocer la marcha de la pequeña máquina de granulación más allá de los ajustes requeridos para producir el material necesario para el ensayo.

Se hicieron los estudios de nodulización de crudos por su interés en la alimentación de hornos rotatorios para vía seca y su marcha en parrillas.

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://materconstrucc.revistas.csic.es

Este procedimiento de alimentación parece atractivo en dichos hornos como medio de reducir pérdidas de polvo y, no obstante, el grado de eficacia en las instalaciones existentes parece ser muy variable, lo cual se debe al hecho de que unos nódulos sobreviven al choque térmico después de haber entrado en el horno y otros se desintegran.

Se ensayaron aditivos químicos con los crudos; éstos no produjeron, en general, las características necesarias para sobrevivir en el intervalo de 820 a 920° C. En algunos casos, se consiguió una resistencia mejorada a temperaturas inferiores.

La comparación más significativa en el variado comportamiento de los crudos en forma de nódulos se expresa en la figura 1. El intervalo en la pérdida por abrasión va de menos del 1 al 100 %. Este ensayo se hizo sobre nódulos secos, pero no enfriados. Las pérdidas por abrasión en nódulos húmedos es aproximadamente la misma para todos los crudos, siendo normalmente inferior al 1 %.

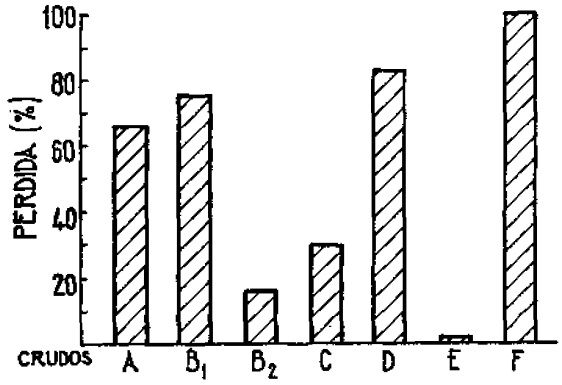

Fig. 1.—Pérdida, por abrasión, de nódulos a 95° C, después del secado (nodulización con agua sola).

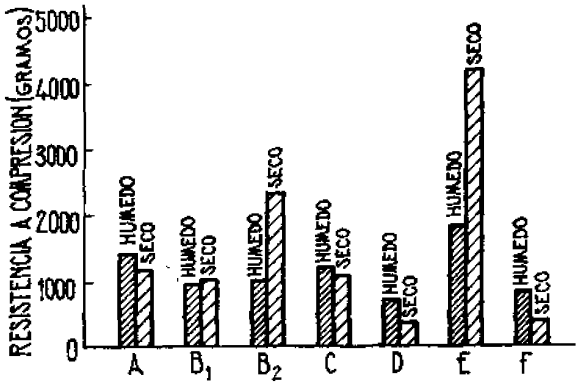

Fig. 2.—Resistencia, a compresión, de los nódulos (húmedos y secos a 95° C).

Otra característica importante es su resistencia mecánica a compresión (figura 2). Es evidente que los nódulos pueden fortalecerse o debilitarse después del secado. Por ejemplo, el crudo F sufre una reducción de resistencia por el secado del orden del 50 %. El crudo E, por el contrario, manifiesta al secar un aumento de resistencia superior al 50 %.

propiedades del nódulo

Las características más importantes de un buen gránulo son las siguientes:

— Resistencia a la abrasión.
— Resistencia al choque térmico.
— Resistencia mecánica o capacidad bajo carga.

resistencia a la abrasión

Los gránulos deben ser lo suficientemente resistentes a la abrasión como para sobrevivir en el horno, en tanto se mueven con la carga o deslizan sobre el refractario. Hay dos caminos por los que el nódulo puede fallar: (a) por desgaste de su periferia en forma de polvo fino; o (b) por rotura en trozos (de 5 mm de diámetro y aún menos) lo bastante pequeños para pasar a través de las ranuras de la parrilla.

Se improvisó un ensayo para valorar los gránulos, construyendo un tambor emparrillado cuya velocidad de rotación era tal que producía aproximadamente la misma velocidad periférica que un horno de 3 metros de diámetro (a 60 r.p.hr.). El grado de resistencia a la abrasión resultante se considera importante para indicar cómo se comportará en la marcha real del horno.

En la figura 3 se representan los resultados del ensayo de abrasión sobre nódulos tratados por el calor, procedentes de los crudos industriales A, C, D y E. El crudo E mostró un comportamiento muy satisfactorio en el horno con parrilla de la fábrica E y una resistencia a la abrasión elevada en los ensayos de laboratorio. Los crudos A y D se comportaron deficientemente al alimentarse granulados en los hornos horizontales de fábrica. El crudo C se comportó bien una vez nodulado al alimentarse a un horno con parrilla. Los resultados reales en fábrica siguen de un modo general la trayectoria de los ensayos de laboratorio que se representan en el gráfico.

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://materconstrucc.revistas.csic.es

La comparación de crudos a 95° C sirve como un índice de su comportamiento. Por ejemplo, el crudo E sufre un 0,9 % de pérdida en el ensayo de abrasión, en tanto que el crudo C pierde el 30,0 %. Se incluyen los resultados a temperaturas más altas para completar las características del nódulo. Se elige la temperatura de 95° C como comparativa, porque el fallo del nódulo en este punto significaría su caída definitiva en la marcha por el horno, particularmente en la parrilla. Las partículas de polvo cegarían el lecho de nódulos y reducirían el flujo de gases calientes, de tal manera que cualquier mejora posterior en su comportamiento tendría poca importancia. De un modo análogo en un horno horizontal la rotura de nódulos en el secado anularía el objetivo buscado.

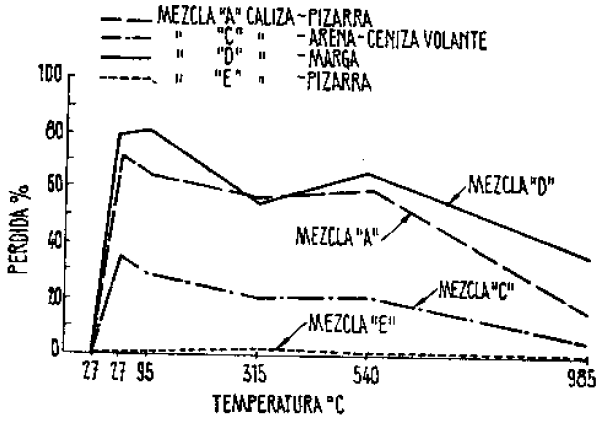

Fig. 3.—Ensayo, de abrasión, de los nódulos a varias temperaturas

Para comprender el porqué pueden coexistir aparentemente, una baja resistencia a la rotura y una resistencia elevada a la abrasión, deben considerarse, entre otras, las siguientes características:

1. Nódulos con baja resistencia mecánica se pulverizan o rompen en trozos diversos.

2. Nódulos con una resistencia elevada a la abrasión soportan este ensayo sin roturas o desintegración notables.

3. Si en un mismo nódulo coexisten una baja resistencia mecánica y una buena resistencia a la abrasión, es porque existe una condición plástica que probablemente evita la desintegración.

resistencia al choque térmico

Al caer el gránulo en la parrilla se le somete bruscamente a un aumento de temperatura de 25 a 250-300° C. En un horno horizontal este cambio puede ser de 25 a 550-1.000° C. Para poder resistir este choque deben soportar ciertas presiones de vapor internas para evitar su "estallido", lo cual es muy importante en la marcha de los hornos. Debemos señalar que en el horno horizontal los nódulos se exponen a los gases y entierran en la carga, alternativamente, siendo las condiciones, en cuanto a temperatura, menos severas que las existentes en un horno de laboratorio, donde se ensayan los nódulos aisladamente.

En casi todos los ensayos, soportan el tratamiento a 250-300° C. Los ensayos de laboratorio sobre nódulos preparados en fábrica también mostraron esta característica. En la Tabla I se encuentran los resultados sobre nódulos de la fábrica E, en cuatro tamaños (10 mm, 12,5 mm, 20 mm y 25,0 mm), ensayados a tres temperaturas (370, 425 y 480° C). En el horno se colocaron a la vez dos nódulos: en uno se observó la reacción inmediata y en el otro los resultados después de 10 minutos de exposición.

El horno se puso a la temperatura deseada antes de colocar los gránulos húmedos en su interior. En cada caso se anotó el tiempo de reacción.

Este ensayo demuestra que los nódulos de 10 y 12,5 mm, preparados con caliza y pizarra en la fábrica E, soportan el choque térmico a 370 y 425° C. Los mayores de 20 mm se rompen por estallido cuando se sobrepasan los 370° C, y los de 25 mm rompen a todas las temperaturas de ensayo. En la figura 4 se observan los restos de gránulos después del tratamiento térmico.

TABLA I

Ensayos, de «explosión», del nódulo: Fábrica E

TEMPERATURA HORNO (° C)	TIEMPO DE REACCION INICIAL Y TIEMPO PARA SU DESINTEGRACION			
	10 mm	12,5 mm	20 mm	25 mm
370	S. R.*	S. R.	S. R.	S. R. 600 segundos
425	S. R.	S. R.	144 segundos 264 segundos	150 segundos 285 segundos
480	38 segundos 600 segundos	90 segundos 600 segundos	138 segundos 245 segundos	133 segundos 255 segundos

* S. R.—Sin reacción.

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://materconstrucc.revistas.csic.es

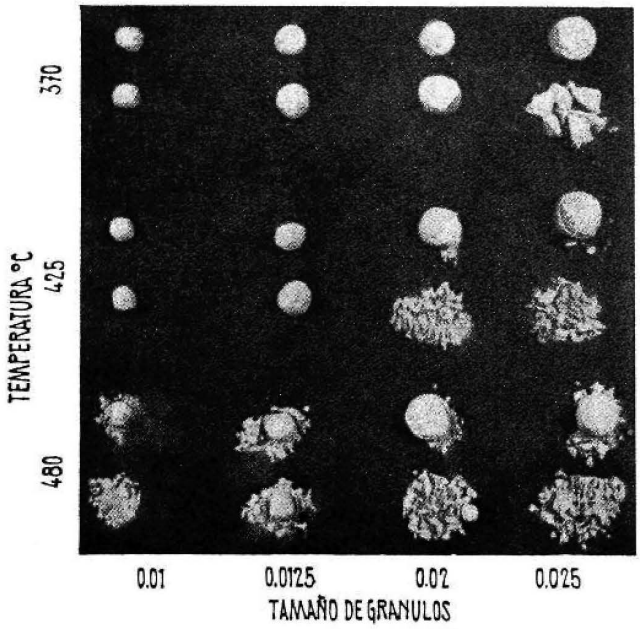

Fig. 4.—Gránulos tratados por el calor.

Los gránulos que han conducido a resultados satisfactorios tienen alrededor de un 30 % de porosidad (fig. 5). Aquellos que no conducen a buenos resultados (contienen cenizas volantes) se representan en la figura 6 y tienen un 37 % de porosidad. La diferencia visible entre los dos gránulos yace en la cantidad de huecos presentes. El examen microscópico revela que existe otra propiedad que puede ser importante: la permeabilidad. Los nódulos de cenizas volantes, aunque más porosos son menos permeables, es decir, tienen "menos discontinuidad física entre las partículas".

Los nódulos preparados con aditivos químicos se ensayaron en su resistencia al choque térmico, colocándolos en el horno de laboratorio a varias temperaturas. Esto se hizo con nódulos húmedos y con la temperatura del horno ajustada antes de cada ensayo. Si uno de ellos soportaba la temperatura de ensayo, se trataba uno nuevo a mayor temperatura hasta lograr el "estallido" o la rotura del mismo. Los resultados pueden observarse en la tabla II.

Al comparar un nódulo preparado con el crudo C en escala piloto y un nódulo de la misma fábrica, se observan algunas diferencias. Los nódulos se comportaron satisfactoriamente en el horno piloto, pero en escala industrial su comportamiento era deficiente.

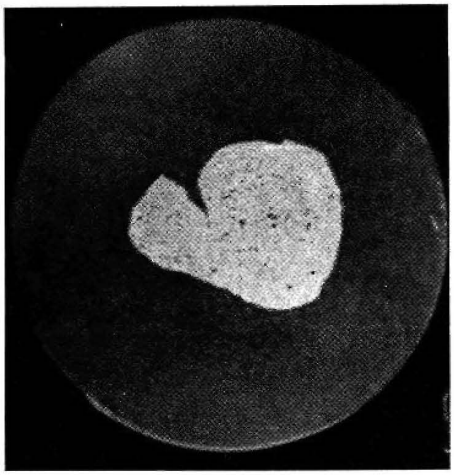

Fig. 5.—Nódulo de caliza y pizarra procedente de fábrica, seccionado diametralmente, montado en resina y pulido hasta superficie lisa (nódulo de 12,5 mm de diámetro medio).

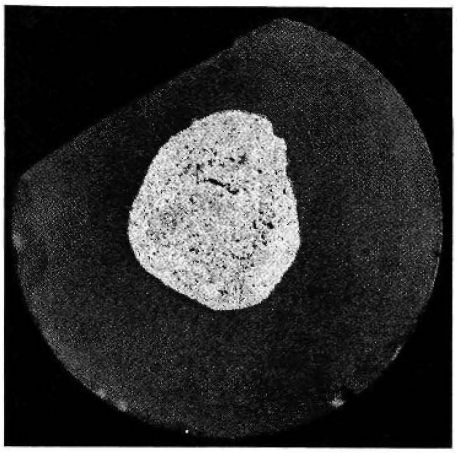

Fig. 6.—Nódulo industrial que contiene cenizas volantes, seccionado diametralmente, montado en resina y pulido hasta superficie lisa (nódulo de 12,5 mm de diámetro medio).

TABLA II

Efecto de aditivos sobre las temperaturas de explosión del nódulo

Aditivos empleados con el crudo B	Temperatura de «explosión» (°C)
Producto almidón	480
Extracto de corteza de pino de California	345
Floculante	595
Cloruro cálcico	345
S. T. P. (tripolifosfato sódico 0,02%)	315
S. T. P. 0,10%	370
Acido clorhídrico 0,10 %	370
Producto de lejía sulfítica 0,10% ...	355
Clínker 5%	480
Arcilla bentonita	370

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://materconstrucc.revistas.csic.es

Las diferencias observadas a simple vista y con el microscopio eran las siguientes:

1. El nódulo de la planta piloto era casi perfecto en su forma, en comparación con el aspecto irregular del preparado en escala comercial.

2. El nódulo de la planta piloto contenía menos huecos, pero, aparentemente, era menos denso que los comerciales. Este aspecto de densidad se describe por el petrógrafo como la existencia de "una discontinuidad física menor entre las partículas", que puede llamarse "permeabilidad".

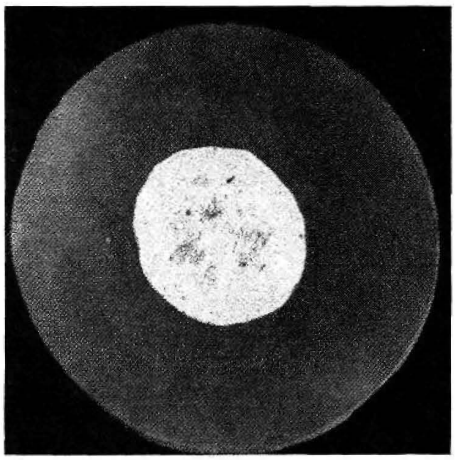

Fig. 7.—Nódulo que contiene cenizas volantes y preparado en planta piloto; sección diametral montada en resina y pulida hasta superficie lisa (diámetro medio, 12,5 mm).

resistencia o capacidad bajo carga

Los nódulos deben ser lo suficientemente fuertes para soportar la carga de los demás en la tolva de alimentación y sobre la parrilla. Para obtener una comparación, se ideó un ensayo sencillo mediante el cual se aplicaba una carga sobre un gránulo hasta que caía por desmenuzamiento o rotura. El aparato se montó en los talleres del laboratorio.

Para la valoración de nódulos con un sentido práctico, que es lo que interesa en las fábricas, este ensayo no se considera de gran importancia. Sin embargo, para tener una idea del posible comportamiento proporciona una información definitiva. Por ejemplo, dos crudos que presentan una resistencia baja muestran también una pérdida elevada en el ensayo de resistencia a la abrasión.

En la figura 2 se representó la resistencia de los nódulos para siete crudos diferentes. La resistencia en húmedo se refiere a los nódulos procedentes de la artesa; y la resistencia en seco, a los nódulos tratados a 100° C y ensayados inmediatamente sin posterior enfriamiento. El crudo E mostró las resistencias más altas, tanto en húmedo como en seco.

rodadura prolongada de los nódulos

Los ensayos de laboratorio indicaron que una rodadura prolongada en la artesa de los gránulos ya formados colaboraba a mejorar su comportamiento. Los resultados de los ensayos mostraron que tres de los crudos responden a este tratamiento. Por ejemplo, el crudo C aumentó su resistencia en seco y en húmedo en un 30 %, aproximadamente, y redujo la pérdida en el ensayo de abrasión en otro 30 % después de una rodadura prolongada.

Como estos crudos no eran plásticos, una acción de moldeo o trabajo adicionales proporcionados por este tratamiento prolongado, llevó, en apariencia, la densidad de los nódulos a un punto más próximo al porcentaje óptimo. Comparando las figuras 6 y 7 se observa una diferencia en la cantidad de huecos visibles, lo mismo que ocurre al comparar las figuras 5 y 6. Teniendo en cuenta que los nódulos presentados en la figura 5 eran buenos, resulta que la densidad o "porosidad" es una característica importante. Del mismo modo, los expuestos en la figura 7 son del mismo crudo que los de la figura 6, pero, sin embargo, se prepararon en las condiciones de la fábrica piloto y resultaron correctos en escala semi-industrial.

TABLA III

Efecto de una «rodadura» prolongada de los gránulos

Crudo	Resistencia Capacidad bajo carga en gramos		Resistencia a la abrasión % de pérdida en ensayo		Aditivo
	Húmedo	95°C	Húmedo	95°C	
B_1	1.336	1.756	0,2	11,9	0,1 R. B. E. **
B_1-Pr*	2.357	2.858	—	4,4	0,1 R. B. E.
B_1	938	1.272	0,4	32,6	0,02 Floculante
B_1-Pr	1.069	1.647	0,0	37,5	0,02 Floculante
B_1	1.556	1.212	0,6	76,5	0,02 $CaCl_2$.
B_1-Pr	2.365	1.545	0,4	62,6	0,02 $CaCl_2$.
B_1	1.406	1.065	0,4	46,8	0,1 $CaCl_2$.
B_1-Pr	1.682	1.423	0,4	38,6	0,1 $CaCl_2$.
C	1.230	1.106	0,0	30,0	Agua sólo.
C-Pr	1.588	1.433	0,0	21,0	Agua sólo.

* Pr significa «rodadura» prolongada de los gránulos.
** R. B. E. significa extracto de corteza de pino de California.

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://materconstrucc.revistas.csic.es

En la tabla 3 se dan más datos que demuestran que una rodadura adicional de los nódulos mejora sus características. Estos ensayos se hicieron sobre nódulos recién preparados y sobre otros que sufrieron una nueva granulación durante quince minutos. En la referida tabla se encuentran representados los ensayos de resistencia mecánica y de resistencia a la abrasión sobre nódulos húmedos y secos a 100° C, con mejoría en todos los resultados, prácticamente.

La rodadura prolongada se llevó a cabo sobre nodulizadores comerciales usando un reborde o pestaña complementaria sobre la artesa.

humectación previa de los crudos

El crudo C se humedeció con agua antes de entrar en el nodulizador. Esto se hizo en un intento de neutralizar o impedir la presencia de posibles propiedades higroscópicas debidas a las materias primas.

El agua se añadió con un pulverizador de laboratorio en cantidad tal que desapareciera el aspecto seco de la mezcla. El agua añadida fué de 2,6 %; el crudo humedecido se añadió más tarde en el nodulizador con nueva adición de agua (agua total añadida del orden del 14 %). Los resultados de esta humectación previa fueron los siguientes:

1. Los nódulos del crudo C eran menos polvorientos.
2. La resistencia mecánica y la resistencia a la abrasión prácticamente no cambiaron.
3. El contenido de agua de los nódulos acabados era, aproximadamente, 1,5 % más elevado.
4. Los nódulos se forman más fácilmente en el aparato nodulizador.

finura de los crudos

La tabla IV muestra la finura de los crudos empleados en la nodulización. Los crudos de fábrica (A, C, D y E) proceden de la alimentación de hornos que contienen cantidades normales de polvo de retorno (5 al 10 %). El crudo B_1 se preparó en el laboratorio y no presenta la granulometría que probablemente se conseguiría en un sistema de molienda industrial; pero puesto que los materiales son similares a los empleados en otros crudos, puede emplearse como comparación aunque en otro intervalo de finuras.

TABLA IV

Finura de crudos

ENSAYOS DE TAMIZADO

CRUDO	PORCENTAJE QUE PASA POR EL TAMIZ NUM.						
	10	20	28	48	100	150	200
A	—	—	99,8	99,6	95.7	91,9	83,2
B_1*	100	99,6	99,2	97,9	80,8	71,5	63,1
C	—	—	100,0	99,9	98,8	97,0	90,0
D	100	99,9	99,9	99,5	95,4	91,3	88,0
E	—	—	—	99,9	98,3	94,6	88,6

* Este crudo se preparó en un molino de laboratorio. El resto son crudos procedentes de la alimentación de hornos de fábrica.

DISTRIBUCION GRANULOMETICA DE CRUDOS*

MICRAS	CRUDO			
	A	C	D	E
+ 60	26,6 %	14,3 %	20,7 %	14,9%
— 60	73,4	85,7	79,3	85,1
— 55	72,0	83,2	76,9	82,2
— 50	68,2	81,0	73,6	80,4
— 45	65,7	79,0	72,0	78,9
— 40	62,0	76,0	69,5	73,8
— 35	57,8	71,9	65,4	70,5
— 30	52,6	67,5	63,2	67,3
— 25	47,6	62,7	59,2	61,7
— 20	41,5	55,8	53,9	56,2
— 15	33,9	49,2	44,2	49,7
— 10	25,6	39,0	29,1	40,5
— 5	14,2	25,1	12,2	27.2
Sup. específica (cm^2/g)	2487	3957	2443	4140

* Determinada por el turbidímetro de Wagner.

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://materconstrucc.revistas.csic.es

parte II

Se estudian las características de los nódulos hechos con cinco crudos de fábrica y dos crudos de laboratorio. En la tabla V se indican las composiciones de estos crudos, en cuanto a las materias primas empleadas, junto con los resultados de los ensayos a varias temperaturas.

La resistencia a la abrasión, tal como se observa en dicha tabla, manifiesta un amplio margen de comportamiento. A este respecto, destacan el crudo E con una elevada resistencia a la abrasión y el crudo F con una resistencia nula.

Al comparar todos los ensayos es evidente que el crudo E muestra unos resultados totalmente diferentes de los otros. Esto es muy significativo, puesto que este crudo se está manejando con resultados satisfactorios en escala comercial.

descripción y ensayo de los crudos

Se ensayaron los crudos de cinco fábricas para conocer sus características de granulación. Cada uno de ellos se estudió por separado y, con especial atención, los materiales no plásticos para conocer su reacción frente a varios aditivos y su comportamiento en forma de nódulos. En el estudio comparativo se tomó el crudo E como bueno, y, por ello, lo discutiremos primero.

TABLA V

Características de nodulización

COMPOSICION

CRUDO	A	B_1	B_2	C	D	E	F
Caliza	X	X	X	X	X	X	X
Marga		X			X		
Pizarra	X				X	X	
Arcilla			X				
Ceniza volante				X			
Escoria							X
Arena				X			X

RESISTENCIA DE NODULOS-GRAMOS*

TEMPERATURAS		A	B_1	B_2	C	D	E	F
Húmedo	26°C	1.435	975	1.039	1.234	735	1.812	860
	93	1.155	1.046	2.327	1.106	366	4.200	384
	540	3.445	—	—	1.205	—	5.695	—
	600	5.630	—	—	1.450	—	6.300	—
	650	4.325	—	—	1.835	—	6.300 +	—
	700	5.740	—	—	3.020	—	6.300 +	—
	750	3.760	—	—	1.985	—	6.300 +	—
	820	2.740	—	—	4.600	—	4.500	—
	875	2.355	—	—	8.200	—	2.742	—
	925	1.640	—	—	8.300	—	1.658	—
	985	1.105	—	—	6.780	—	1.293	—
	1.040	695	—	—	4.100	—	1.240	—
	1.095	695	—	—	2.600	—	1.160	—
	1.150	1.310	—	—	—	—	1.688	—
	1.200	1.990	—	—	—	—	2.112	—

* Todos los ensayos se hicieron con nódulos comprendidos entre 10 y 12,5 mm de diámetro.

PERDIDA POR ABRASION. PERDIDA DE PESO (%)**

Húmedo	26°C	0,4	0,2	0,4	0,0	0,4	0,4	—
	93	66,4	75,7	16,2	30,0	82,8	0,9	100,0
	315	57,2	56,7	—	23,4	55,1	1,4	100,0
	540	61,1	45,2	—	24,4	67,0	0,7	100,0
	985	17,1	9,2	—	5,5	38,3	0,5	44,4

** Cada resultado se obtuvo en distintas muestras.

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://materconstrucc.revistas.csic.es

Crudo E.—Este crudo está formado por caliza y pizarra y se comporta bien en la granulación, tanto en la fábrica como en el laboratorio.

El análisis térmico diferencial de este crudo demostró que el proceso endotérmico comienza a ser rápido hacia 650° C, después de marchar lentamente desde los 40° C, aproximadamente.

La figura 8 muestra la relación entre la pérdida de peso y la elevación de temperatura de una muestra de crudo. La figura 9 representa la resistencia de los nódulos preparados con este crudo desde 25° C a 1.200° C. El tratamiento con el calor eleva rápidamente la resistencia hasta unos 650-760° C, temperatura a partir de la cual baja bruscamente hasta su nivel original o menos (ver tabla VI).

TABLA VI

Ensayos, de resistencia y abrasión, del crudo «E» con aditivos

Porcentaje de agua	Porcentaje de aditivos *	Resistencia (gramos)		Pérdida por abrasión (%)	
		Húmedo	Seco (100°C)	Húmedo	Seco (100°C)
11,8	Ninguno	1.812	4.200	0,4	0,9
11,5	0,1 WSP**	1.118	5.057	0,0	1,3
13,5	0,1 STP***	695	2.689	0,8	1,6
12,9	0,02 STP	760	2.958	0,4	2,0
12,2	1,0 Cl_2Ca	716	3.842	0,2	0,8
13,1	0,1 Almidón	604	2.632	0,8	2,0

* Aditivo referido como tanto por ciento de crudo seco.

** WSP: lejía sulfítica.

*** STP: tripolifosfato sódico.

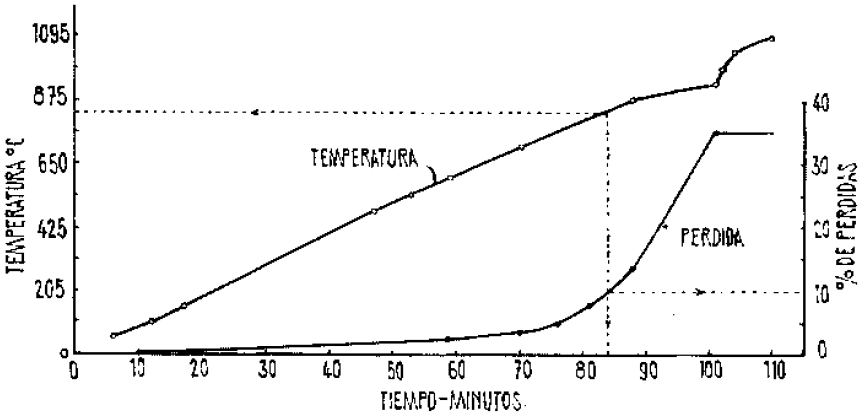

Fig. 8. — Pérdida de peso del crudo E en función de la temperatura y con calefacción controlada.

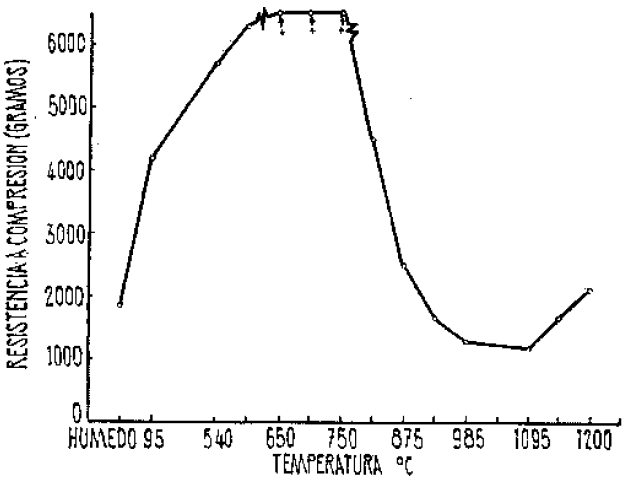

Fig. 9.—Resistencia de gránulos del crudo E.

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://materconstrucc.revistas.csic.es

Sobre este crudo E se hizo un análisis granulométrico, por ser el que presentaba mejor comportamiento. Los resultados con el turbidímetro de Wagner son los siguientes (ver Cuadro 1).

CUADRO 1

∅ (μ)	% que pasa
60	85,1
55	82,2
50	80,4
45	78,0
40	73,8
35	70,5
30	67,3
25	61,7
20	56,2
15	49,7
10	40,5
5	27,2

Superficie específica: 4.140 cm^2/g

Crudo A.—Las materias primas de este crudo eran una caliza de alta calidad y pizarra. En tanto que la caliza es importante al considerar las características de los nódulos, el componente arcilloso proporciona los minerales de la arcilla que determinarán el grado de aptitud.

En los ensayos de fábrica, este crudo se granula en una artesa de 4,50 m de ∅ y se alimenta a un horno rotatorio. Esto se considera poco acertado, ya que no existe ninguna referencia de la posible supervivencia de los gránulos.

La composición mineralógica de este crudo, dada por la fábrica A, es la siguiente (ver Cuadro 2).

CUADRO 2

	(%)
Mineral arcilloso, mica o illita	45
Cuarzo	30
Materia orgánica	10
Pirita	5
Carbonatos	5
Clorita	2
Feldespatos	2
Minerales accesorios	1
	100

Puesto que este crudo cayó en el grupo de las mezclas no plásticas, se hicieron ensayos de nodulización usando los aditivos químicos que resultaron beneficiosos en otros ensayos.

Resultó que, tanto el cloruro cálcico como el almidón, producían un aumento sustancial en la resistencia en seco y una disminución en las pérdidas por abrasión, también en seco (tabla VII). Los gránulos hechos con agua no "estaballan" a 700° C.

TABLA VII

Ensayos, de resistencia y abrasión, del crudo «A» con aditivos

Porcentaje de agua	Porcentaje de aditivo (sobre peso seco)	Resistencia (gramos)		Pérdida por abrasión (%)	
		Húmedo	Seco (100°C)	Húmedo	Seco (100°C)
12,8	Ninguno	980	924	0,4	64,5
13,3	0,1 WSP*	546	2.093	0,1	4,7
14,6	0,1 STP**	414	1.306	0,8	5,0
13,4	1,0 Cl_2Ca	656	3.171	0,3	1,5
14,8	0,1 Almidón	362	1.839	0,4	2,0

* WSP: lejía sulfítica.

** STP: tripolifosfato sódico.

Crudo B_1.—Este crudo estaba formado por una caliza alta en cal de la fábrica B y una segunda caliza con algún componente arcilloso. Aun cuando el análisis de esta segunda caliza parecía el de una pizarra, el comportamiento del crudo es similar al de un material no plástico.

Los nódulos hechos con este crudo B_1 no eran, con todo, resistentes a la abrasión, como lo demuestra el 70 % de pérdida a 100° C (tabla VIII). Se encontraron tres aditivos que redujeron esta pérdida por abrasión a un límite aceptable.

0,1 % de estrato de corteza de pino de California.

0,1 % de tripolifosfato sódico.

5,0 % de clínker (molido a 5 % de residuo por el tamiz de 4.900 mallas/cm^2).

Los resultados de estos ensayos son análogos a los conseguidos en el ensayo real en el horno. En él, los nódulos desaparecían a medida que la alimentación marchaba a través del horno.

Crudo B_2.—Este crudo consta de una caliza alta en cal de la fábrica B y una mezcla de arcilla, pizarra y arena. Al comparar este crudo con el B_1, se observa una gran mejora en las características del nódulo (tabla IX). En ambos casos se usó la misma caliza alta en cal.

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://materconstrucc.revistas.csic.es

TABLA VIII

Ensayos, de resistencia y abrasión, de gránulos del crudo «B_1» con aditivos

Porcentaje de agua	Porcentaje de aditivo (sobre peso seco)	Resistencia (gramos)		Pérdida por abrasión (%)	
		Húmedo	Seco (100°C)	Húmedo	Seco (100°C)
10,4	Ninguno	975	1.046	0,2	70,0
12,8	0,02 Almidón	361	818	0,6	98,9
12,4	0,1 Almidón	958	2.908	0,4	26,6
8,8	0,02 RBE*	2.079	1.339	0,6	43,3
9,6	0,1 RBE	1.336	1.756	0,2	11,9
12,8	0,02 Floculante.	938	1.272	0,4	32,6
9,6	0,02 Cl_2Ca	1.556	1.212	0,6	76,5
8,8	0,1 Cl_2Ca	1.406	1.065	0,4	46,8
9,6	0,02 STP**	1.234	1.686	0,4	74,0
8,8	0,1 STP	1.351	2.896	0,4	6,0
10,8	0,1 ClH	760	1.205	0,4	79,5
9,8	0,02 WSP***	732	990	0,4	87,2
9,4	0,1 WSP	1.083	1.680	0,4	26,7
10,6	5 % Clínker	1.004	1.760	0,6	6,3
10,0	0,1 Bentonita	579	804	0,6	85,9

* RBE: Extracto de corteza de pino de California.

** STP: Tripolifosfato sódico.

*** WSP: Lejia sulfítica.

TABLA IX

Ensayos, de resistencia y abrasión, del crudo «B_2»

Porcentaje de agua	Porcentaje de aditivo (sobre peso seco)	Resistencia (gramos)		Pérdida por abrasión (%)	
		Húmedo	Seco (100°C)	Húmedo	Seco (100°C)
10,4	Ninguno	1.039	2.327	0,4	16,2

TABLA X

Ensayos, de abrasión, de gránulos del crudo «C» con aditivos

Porcentaje de agua	Porcentaje de aditivo *	PERDIDA DE PESO (%)				
		Húmedo	Seco (100°C)	315°C	590°C	980°C
12,5	Agua sola	0,0	30,0	23,4	24,5	5,5
13,6	2 % Silicato sódico	0,0	7,8	14,8	9,8	—
13,0	0,1 Bentonita	0,0	26,4	29,9	13,3	—
13,2	0,5 Bentonita	0,0	24,6	41,4	22,1	—
12,0	0,1 Espato flúor	0,2	23,9	24,1	14,9	—
12,4	0,1 STP**	—	11,7	8,8	6,7	—
11,8	0,02 STP	0,4	22,2	12,1	2,7	—
12,4	0,1 RBE***	2,7	88,0	77,9	72,0	—
13,0	0,02 RBE	0,8	57,5	30,7	13,5	—
13,8	1 % Clínker	0,6	38,3	25,4	16,0	—
13,0	3 % Clínker	0,8	29,4	10,0	13,4	—
11,0	5 % Clínker	0,9	38,3	7,3	21,3	—
11,6	3 % Clínker + 2 % Cl_2Ca	0,0	0,6	0,4	4,2	—
12,6	0,02 Cl_2Ca	0,2	21,2	14,4	6,6	—
12,8	0,1 Cl_2Ca	0,6	18,7	28,9	5,9	—
11,4	2,0 Cl_2Ca	0,0	1,6	2,8	1,6	—
12,4	0,1 ClH	0,0	13,7	—	6,6	—
11,6	0,1 WSP****	0,0	20,1	41,8	21,4	—
13,6	0,02 WSP	1,4	—	43,6	28,1	—

* El aditivo se refiere como tanto por ciento de crudo seco.

** STP: Tripolifosfato sódico.

*** RBE: Extracto de corteza de pino de California.

**** WSP: Lejia sulfítica.

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://materconstrucc.revistas.csic.es

Se hicieron ensayos para conocer las características del polvo de chimenea de la fábrica B, haciendo nódulo y calentándolos. A 650° C comienza a decrecer la resistencia, cae a cero, a 800° C y después sube un poco a 1.100° C. Esto se hizo por ver qué sucede a los nódulos de temperaturas más elevadas—540 a 1.200° C—, ya que éste es un intervalo crítico. Los resultados del ensayo de resistencia fueron los siguientes:

Polvo del horno de la fábrica B 100 % (Colector mecánico).

Resistencia de nódulos separados (Hechos a mano con agua).

(0°C)	540	600	650	700	750	820	875	925	985	1.040	1.095	1.150	1.200
(g)	1.495	1.255	1.490	950	745	0	0	0	0	0	735	1.340	1.280

Crudo C.—En las tablas X y XI se encuentran los resultados de los ensayos hechos con el crudo de la fábrica C: una mezcla no plástica compuesta de caliza, arena y cenizas volantes (80:8:12). Los nódulos hechos con agua desprendían polvo una vez secos y mostraron una resistencia a la abrasión relativamente baja. Para poder determinar el efecto de aditivos en la mejora de esta propiedad, se hicieron una variedad de ensayos para evitar la formación de polvo y hacerlos resistentes a la abrasión.

Algunos aditivos empeoraron los nódulos, pero otros los mejoraron:

a) El tripolifosfato sódico (STP) mostró una mejora.

b) Un producto de desecho de lejías sulfíticas y un extracto de corteza, dieron nódulos de peor calidad.

c) El cloruro cálcico en cantidad relativamente elevada (2 %) mejoró el nódulo frente a la abrasión. Esto parece deberse a una tendencia cohesiva de los nódulos a 315° C y 540° C.

d) El clínker adicionado de cloruro cálcico produjo un nódulo resistente a la abrasión, que era débil de resistencia hacia 985° C, pero muy resistente por debajo de esta temperatura.

El clínker usado en este ensayo era lo bastante bajo en C_3A como para producir un fraguado lento. Para compensar esto se añadió cloruro cálcico, que acelera el tiempo de fraguado. Los resultados indican que, moliendo conjuntamente con el crudo un clínker alto en C_3A sin yeso (capaz de tener un fraguado rápido) o un cemento de alta resistencia inicial, pueden producirse nódulos prometedores. El endurecimiento rápido ayudaría materialmente a desarrollar resistencia mecánica y resistencia a la abrasión.

TABLA XI

Ensayos, de resistencia y abrasión, de gránulos del crudo «C» con aditivos

Porcentaje de agua	Porcentaje de aditivo *	Resistencia (gramos)		Pérdida por abrasión (%)		Temperatura de «explosión» °C
		Húmedo	Seco (100°C)	Húmedo	Seco (100°C)	
12,5	Ninguno	1.234	1.100	0,0	30,0	480
13,6	0,1 % Silicato sódico	1.116	1.715	0,0	7,8	480
13,0	0,1 Bentonita	973	1.249	0,0	26,4	590
12,0	0,1 Espato flúor	1.880	1.133	0,2	23,9	—
11,8	0,02 STP**	2.072	1.260	0,4	22,2	—
12,4	0,1 STP	1.855	1.408	—	11,7	—
13,0	0,02 RBE***	934	526	0,8	57,5	—
12,4	0,1 RBE	395	550	2,7	88,0	—
13,8	1 % Clínker	1.001	875	0,6	38,3	—
13,0	3 % Clínker	1.254	706	0,8	29,4	—
11,0	5 % Clínker	1.140	410	0,9	38,3	—
12,6	0,02 Cl_2Ca	1.237	1.135	0,2	21,2	—
12,8	0,1 Cl_2Ca	1.019	1.226	0,6	18,7	425
11,4	2,0 Cl_2Ca	1.078	7.500 +	0,0	1,6	—
12,4	0,1 ClH	939	1.509	0,0	13,7	425
11,6	0,1 WSU****	1.370	1.616	0,0	20,1	480
13,6	0,02 WSP	930	1.053	1,4	—	495

* El aditivo se refiere como tanto por ciento de crudo seco.

** STP: Tripolifosfato sódico.

*** RBE: Extracto de corteza de pino de California.

**** WSP: Lejía sulfítica.

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://materconstrucc.revistas.csic.es

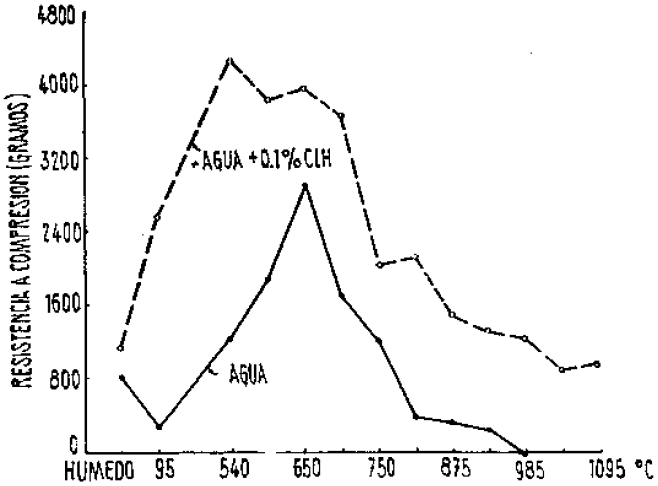

Fig. 10.—Resistencia, a compresión, de gránulos del crudo D.

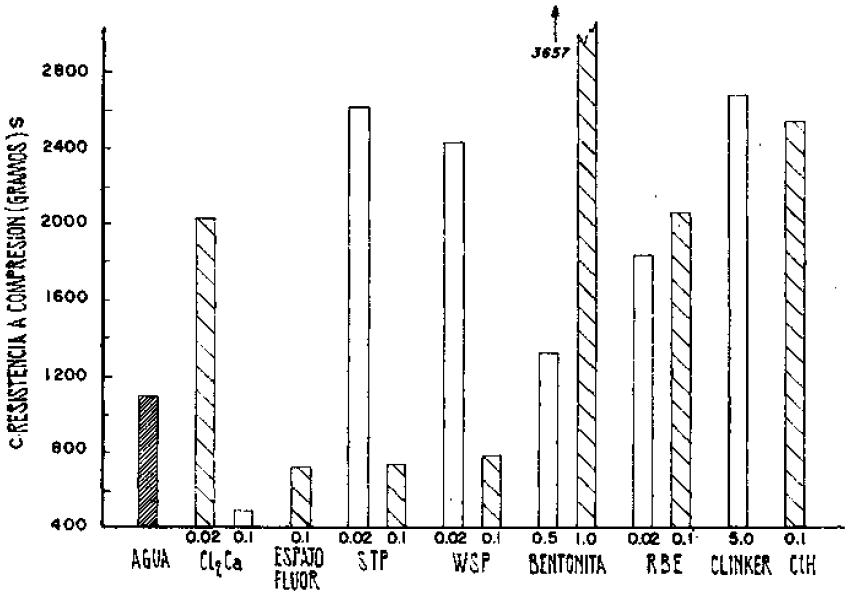

Fig. 11. — Resistencia, a compresión, de gránulos del crudo D a 95°C.

Crudo D.—Este crudo se compone de caliza, marga y pizarra. Por los ensayos de fábrica se ha calificado como que su nodulización no es buena.

Los ensayos de laboratorio mostraron claramente que los nódulos hechos con este crudo son de baja resistencia mecánica en seco y presentan, además, baja resistencia a la abrasión. Algunos aditivos químicos produjeron una mejora, pero probablemente no lo suficiente como para considerarla en escala comercial. El mejor resultado se consiguió empleando como aditivo el ClH diluído (0,1 %) en agua. El crudo D mostró un aumento en la resistencia en seco de 295 a 2.548 gramos y una mejora en la resistencia a la abrasión de 79,4 % a 2,2 %. En las figuras 10 y 11 pueden observarse las mejoras en la resistencia en seco de los nódulos (ver también tablas XII, XIII y XIV).

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://materconstrucc.revistas.csic.es

El examen de este crudo, por análisis térmico diferencial (A. T. D.) y térmico ponderal, simultáneamente, mostró una pérdida de peso a unos 315° C, seguido de un aumento a unos 380° C, lo que probablemente se deba a alguna reacción de oxidación que tiene lugar en este intervalo de temperaturas.

Por análisis químico, la pérdida al fuego era de 35,9 %; y por el ensayo antes mencionado, esta pérdida era de 29,9 %. Probablemente, esta diferencia del 6 % se deba a un aumento por oxidación de algunos componentes (quizás azufre y hierro). Es posible que sea necesaria una temperatura superior a 1.100° C o un tiempo más largo para la pérdida total de los constituyentes volátiles. Esto no es corriente y es un detalle digno de atención en posteriores ensayos de este crudo.

TABLA XII

Ensayos, de resistencia a compresión (gramos), de gránulos del crudo «D» con aditivos

Temperatura °C	Agua	0,1 ClH	0,02 STP	0,1 Cl_2Ca	1,0 Bentonita	0,02 WSP	0,1 Silicato sódico
Húmedo	805	1.120	995	691	973	1.253	970
93	295	2.548	2.609	487	3.657	2.423	364
540	1.240	4.260	2.810	2.705	3.040	3.820	2.790
600	1.890	3.825	3.650	—	2.865	3.970	4.210
650	2.935	3.970	4.350	2.690	4.940	4.900	4.915
700	1.705	3.675	4.960	2.395	4.370	4.390	4.165
750	1.235	2.055	2.800	1.455	3.060	4.175	2.045
820	410	2.150	1.600	890	2.250	1.850	1.055
875	375	1.515	1.320	820	2.010	1.370	1.220
925	275	1.305	1.410	1.015	1.390	1.450	625
985	—	1.255	1.080	670	1.965	1.840	715
1.040	—	895	620	725	1.000	1.400	770
1.095	—	970	1.490	1.200	1.150	985	745

TABLA XIII

Ensayos, de resistencia a la abrasión, de gránulos del crudo «D» con aditivos

PORCENTAJE DE ADITIVO (sobre peso seco)	PERDIDA DE PESO (%)			
	Húmedo	93°C	315°C	590°C
Agua sola	0,4	79,4	72,7	63,1
0,1 ClH	0,2	2,2	6,1	6,9
0,1 STP*	0,0	49,0	29,9	26,3
0,1 Cl_2Ca	0,3	75,4	56,1	28,0
0,1 WSP**	0,8	79,8	68,8	37,3
0,1 Espato flúor	0,0	73,0	60,5	39,3
0,02 RBE***	0,4	12,7	—	6,8
1,0 Bentonita	1,0	5,7	7,7	4,2
0,02 WSP	0,2	5,5	7,3	5,4
0,02 Cl_2Ca	0,0	11,4	10,8	7,5
5 % Clínker	0,2	21,3	22,8	7,5
0,02 STP	0,4	7,3	14,2	7,3
0,5 Bentonita	0,0	24,6	41,4	22,1
0,1 RBE	0,0	18,2	17,6	15,0
0,1 Silicato sódico	0,0	85,6	64,0	60,8

* STP: Tripolifosfato sódico.

** WSP: Lejía sulfítica.

*** RBE: Extracto de corteza de pino de California.

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://materconstrucc.revistas.csic.es

TABLA XIV

Ensayos, de resistencia y abrasión, de gránulos del crudo «D» con aditivos

Porcentaje de agua	Porcentaje de aditivo *	Resistencia (gramos)		Pérdida por abrasión (%)		Temperatura de «explosión» °C
		Húmedo	Seco (100°C)	Húmedo	Seco (100°C)	
—	Ninguno	736	367	—	82,8	820
14,4	Ninguno	805	295	0,4	79,4	—
13,6	0,1 ClH	1.120	2.548	0,2	2,2	—
14,2	0,1 STP**	1.054	735	0,0	49,0	480
14,2	0,1 Cl_2Ca	691	487	0,3	75,4	—
14,2	0,1 WSP***	895	772	0,8	79,8	700
13,6	0,1 Espato flúor	1.362	699	0,0	73,0	700
13,0	0,02 RBE****	1.146	1.846	0,4	12,7	820
13,4	1,0 Bentonita	973	3.657	1,0	5,7	750
12,8	0,02 WSP	1.253	2.423	0,2	5,5	650
13,6	0,02 Cl_2Ca	889	2.037	0,0	11,4	700
13,4	5 % Clínker	1.344	2.588	0,2	21,3	820
13,2	0,02 STP	995	2.609	0,4	7,3	—
13,2	0,5 Bentonita	712	2.640	0,0	24,6	—
12,8	0,1 RBE	1.212	2.070	0,0	18,2	700
14,8	0,1 Silicato sódico	970	364	0,0	85,6	700
14,2	0,1 ClNa	790	485	0,3	75,4	650

* El aditivo se refiere como porcentaje de crudo seco.

** STP: Tripolifosfato sódico.

*** WSP: Lejía sulfítica.

**** RBE: Extracto de corteza de pino de California.

análisis térmico diferencial

La aplicación de este método de trabajo al estudio de crudos se ha extendido mucho hasta la fecha. No obstante, ofrece un medio prometedor para conocer mejor las reacciones de secado y las previas a la calcinación. Usando un equipo de registro e indicadores de temperatura sensibles, pueden fijarse perfectamente las reacciones endotérmicas y exotérmicas del proceso.

Por análisis térmico diferencial se han examinado cuatro muestras de crudo, junto con sus determinaciones simultáneas de pérdida de peso. Con esto se tiene un conocimiento más completo del comportamiento térmico de los materiales a las temperaturas de precalentamiento y calcinación. Los minerales de la arcilla mostraron reacciones endotérmicas y exotérmicas a varias temperaturas. De acuerdo con la bibliografía, la eliminación de agua y los cambios químicos motivan los picos característicos de los varios minerales de la arcilla.

En estos crudos, la arcilla o la pizarra sólo se encuentran en una proporción del 20 %, aproximadamente, y las reacciones débiles no pueden detectarse; por ello, son difíciles las interpretaciones convencionales. Las reacciones que tienen lugar a baja temperatura en el calentamiento de crudos se consideran en la siguiente tabla:

Reacciones, a baja temperatura, durante el proceso de calentamiento de crudos

TEMPERATURA	REACCION	PROCESO
100° C	Evaporación del agua libre	Endotérmico.
480° C y más	Eliminación del agua combinada en la arcilla	Endotérmico.
900° C y más	Cristalización de los productos amorfos procedentes de la deshidratación de la arcilla	Exotérmico.
	También se desprende el anhídrido carbónico del carbonato cálcico.	Endotérmico.
Por debajo de 800° C	Formación de $CaO.Al_2O_3$ y probablemente $CaO.Fe_2O_3$	
800-900° C	Empieza la formación de $2CaO.SiO_2$	

No se incluyen entre estas reacciones las que tienen lugar por oxidación de ciertos minerales metálicos o por combustión de sustancias orgánicas, las cuales, probablemente, tienen lugar entre 100 y 500° C.

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://materconstrucc.revistas.csic.es

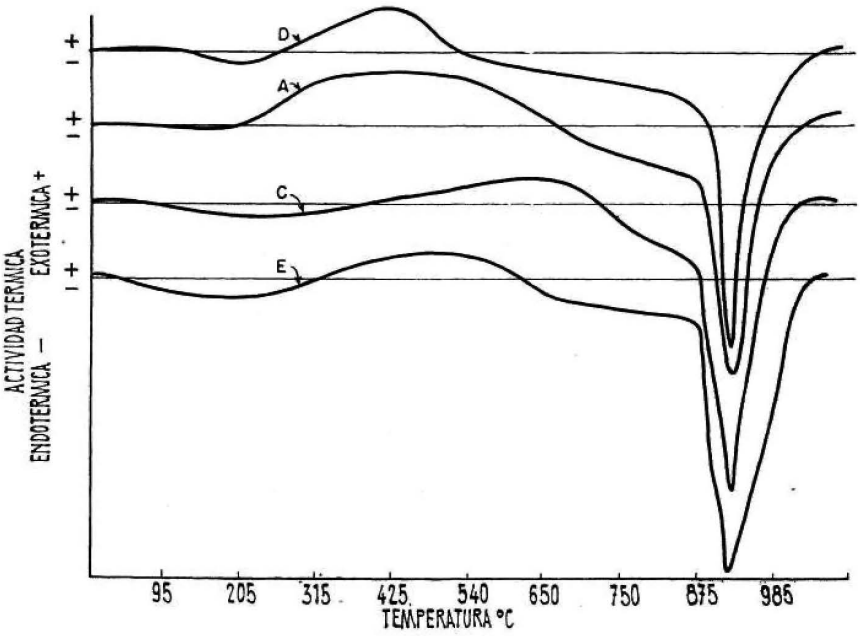

Fig. 12. — Curvas de análisis térmico diferencial para los distintos crudos.

En el proceso de calentamiento se elimina, en primer lugar, el agua retenida mecánicamente, seguida a mayor temperatura del agua combinada químicamente; ambos procesos requieren una absorción de calor. De todos los crudos, los A y D muestran este carácter endotérmico (—) en una extensión limitada, seguido de zonas de actividad exotérmica (+) más pronunciada.

El examen de las curvas de la figura 12 nos proporciona una comparación de los cuatro crudos entre 37 y 1.000° C. Todas son diferentes, aunque las C y E se parecen en sus rasgos generales. Sin embargo, en el crudo C las reacciones exotérmicas (+) comienzan a mayor temperatura y continúan a temperatura más elevada que en el crudo E.

El crudo A presenta una reacción más exotérmica que los otros tres. El análisis mineralógico del componente pizarroso de este crudo da un 10 % de materia orgánica y presencia de piritas, las cuales pueden colaborar en esta manifestación.

Refiriéndonos a las figuras 3 y 12, puede hacerse una comparación del comportamiento de los nódulos y las reacciones térmicas a varias temperaturas. Por ejemplo, a 315° C los crudos A y D muestran una pérdida elevada en el ensayo de abrasión, coincidiendo con los principios de una reacción exotérmica.

El crudo D manifiesta el principio del período endotérmico hacia 540° C, que es la temperatura más baja encontrada en los cuatro crudos. Otro ensayo muestra una mejora en la resistencia de los nódulos de este crudo a 540-650° C, indicando un posible principio de reacción, aunque limitada, para formar ferritoaluminatos cálcicos.

conclusiones

1. Los nódulos se preparan fácilmente a partir de crudo y agua, pero, una vez secos, su comportamiento varía notablemente.

2. Algunos aditivos químicos mejoran, o bien la resistencia mecánica, o bien la resistencia a la abrasión; pero, normalmente, nunca ambas a la vez. Así, un nódulo puede resistir la abrasión y ser tan baja su resistencia mecánica que surja su destrucción en el horno. Una característica

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://materconstrucc.revistas.csic.es

importante para la supervivencia, es la tendencia a desarrollar un poco de plasticidad o aglutinamiento a medida que la temperatura sube desde 100° C hasta 650° C.

3. Los crudos de caliza y pizarra, considerados como un grupo general, varían en su comportamiento a la nodulización como ocurre con otras combinaciones de materias primas.

4. La desintegración de nódulos puede motivarse por:

a) Ausencia de un material plastificante adecuado, tales como arcilla o pizarra, que daría resistencia en seco y mantendría la cohesión del nódulo.

b) Presencia de ciertas arcillas con reacción frente al calentamiento, tales como las illitas, que, por sus cambios de volumen, pueden motivar una pérdida de resistencia.

c) Ciertos materiales combustibles que volatilizan rápidamente, conduciendo al nódulo al debilitamiento y a su destrucción.

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://materconstrucc.revistas.csic.es