

500.94 = 60

## **cementos siderúrgicos\***

JUAN JOSE URIA LOPEZ  
de «Industrias del Cemento, S. A.»

*«Los problemas de investigación que las escorias tienen que plantear, deben dirigirse más bien al campo de la hidratación y de la utilización técnica de los Cementos Metalúrgicos».*

(H. Kühl)

### **Desigual distribución de los tamaños de las partículas en los Cementos Siderúrgicos**

El Pliego Oficial de Condiciones para la recepción de los aglomerantes hidráulicos en la actualidad vigente, designa el cemento portland siderúrgico, en su capítulo IV, apartado A), como un producto hidráulico obtenido por la molienda de escoria granulada de altos hornos —como máximo treinta por ciento en peso— y un mínimo de setenta por ciento de clínker de cemento portland, siendo ambos productos molidos simultáneamente para conseguir una mezcla íntima. En el apartado B), se define el cemento portland de alto horno como un producto hidráulico, obtenido por la molienda de escorias granuladas de alto horno —de 31 a 85 % en peso— y clínker de cemento portland —de 15 a 69 % en peso—, siendo ambos productos molidos simultáneamente para conseguir una mezcla íntima (1).

En el presente trabajo nos referimos indistintamente a cualquiera de los cementos que contienen escorias granuladas, con la denominación de cementos siderúrgicos simplemente, y para los casos específicos señalaremos sus cualidades características.

Ya es sabido que el yeso molido conjuntamente con el clínker adquiere una finura de

molido superior a la de éste, y existe acumulación de yeso en las fracciones más finas de cemento (2).

En las producciones de molienda, la naturaleza propia de los materiales a moler desempeña un papel decisivo, porque uno de los factores que influyen en la ecuación de Rittinger es la «energía superficial» del material a moler, ya que, siendo iguales las condiciones de molienda según enseña la práctica, las producciones estarán casi exclusivamente condicionadas por la naturaleza del material, es decir, por su «molturabilidad» (3).

En la gráfica de G. Anselm referente a rendimientos específicos de molienda, puede apreciarse que los menores rendimientos son los obtenidos en la molturación de los cementos aluminosos y siderúrgicos, y en estos últimos el rendimiento se halla en razón inversa de la proporción de escorias granuladas que el cemento contiene.

Para comprobar estas circunstancias realizamos la prueba siguiente:

Si 100 gramos de un cemento portland artificial se hacen pasar por un tamiz de 4.900 mallas/cm<sup>2</sup> y se eliminan por medio de un imán las partículas de hierro que acompañan prin-

\* Ponencia presentada en los II Coloquios de Directores y Técnicos de Fábricas de Cemento. I. T. C. C., marzo de 1957.

cialmente al residuo y que proceden de la fractura y desgaste naturales de los elementos de molienda, efectuando el análisis químico del residuo y del polvo fino separadamente puede observarse una mayor proporción de óxido de calcio en el residuo que en el polvo, circunstancia fácilmente comprensible

porque el yeso agregado al clínker se pulveriza más finamente por ser más blando y por actuar el propio clínker como otro elemento de molienda.

De tres cementos portland artificiales de distintas procedencias que fueron analizados, los resultados fueron los siguientes:

### CEMENTO

	1	2	3
CaO en el Residuo .....	63,03 %	65,20 %	59,92 %
Polvo .....	62,41 %	64,58 %	59,61 %

Efectuando esta misma prueba con varias muestras de distintos cementos siderúrgicos, nos encontramos con resultados totalmente opuestos, es decir, que realizado el análisis del residuo sobre el tamiz de 4.900 mallas/cm<sup>2</sup> y del polvo fino, previa eliminación de las par-

tículas de hierro por un imán, el contenido en óxido de calcio era mayor en el polvo fino que en el residuo, y mayor también que en una muestra del propio cemento.

A continuación se exponen los resultados obtenidos en varios cementos siderúrgicos:

### CEMENTO

	A	B	C	D	E	F
Cemento .....	58,21 %	56,71 %	56,58 %	55,68 %	56,41 %	55,98 %
CaO en el Polvo .....	58,81 %	57,91 %	57,19 %	56,28 %	57,01 %	56,58 %
Residuo .....	57,31 %	55,51 %	53,87 %	51,47 %	55,21 %	53,87 %

Examinando al microscopio unas muestras de cemento siderúrgico, de su residuo y polvo de tamizado correspondiente, previamente humedecidas con una disolución de acetato de plomo acidulada con ácido acético, las partículas de la muestra correspondiente al residuo aparecían casi en su totalidad oscurecidas, siendo mucho menor la proporción encontrada en las muestras correspondientes al cemento y su polvo fino del tamizado.

También hemos podido observar que los residuos de tamizado de los cementos siderúrgicos contienen una mayor proporción de azufre de sulfuros que sus correspondientes cementos y

polvo fino tamizado, siendo menor en este último.

Después de estas pruebas quedó suficientemente aclarado para nosotros que, en la fabricación normal de los cementos siderúrgicos por molienda conjunta de clínker y yeso con la escoria granulada, existe en el cemento así preparado una granulometría tal, que los granos más gruesos corresponden a la escoria granulada, llegando a la conclusión de que, en el seno de los cementos siderúrgicos normales, la escoria granulada de alto horno tiene una superficie específica menor que los otros componentes, es decir, el clínker y el yeso.

## Materiales que integran los cementos siderúrgicos

Considerando separadamente los componentes básicos de los cementos siderúrgicos, se observa que el yeso utilizado en su fabricación, en los distintos aspectos de algeiz o cristalizado que corresponde al sulfato cálcico doblemente hidratado, de anhidrita natural o artificial y yeso calcinado a elevada temperatura en todos los casos, se trata de una sustancia característicamente blanda y de fácil pulverización por molienda, en comparación con las otras materias que intervienen en la fabricación de los cementos siderúrgicos.

El clínker de cemento portland artificial es otro de los componentes de los cementos siderúrgicos; se trata de una sustancia bien estudiada que se encuentra casi totalmente cristalizada, presentando especies químicas ya definidas, y los roentgenogramas parciales obtenidos justifican plenamente la cristalografía del clínker (4).

En el pasado año hemos tenido ocasión de ver un estudio muy completo sobre los problemas que su molienda origina en la fabricación del cemento portland artificial (5), y en la gráfica de rendimientos de Anselm puede apreciarse que los molinos tienen un rendimiento muy superior cuando se fabrica cemento portland artificial que cuando, en las mismas condiciones, se fabrican cementos siderúrgicos, por lo que la «molturabilidad» del clínker es mucho mejor que la de la escoria granulada. Vamos a considerar seguidamente el tercero de los componentes que forman parte de los cementos siderúrgicos, la escoria granulada, desde el punto de vista de la teoría de W. A. Weyl (6).

No basta con la neutralización pura y simple de las cargas eléctricas para que un compuesto sea neutro. La molécula  $\text{SiO}_2$  no puede existir libre en la escoria. El catión  $\text{Si}^{4+}$  compensa mutuamente su electrovalencia con los dos aniones  $\text{O}^{2-}$ . Siendo el catión  $\text{Si}^{4+}$  de reducido radio iónico, es un campo fuerte de potenciales positivos, resultando insuficientes dos  $\text{O}^{2-}$ , por lo que comparte ávidamente los aniones de los  $\text{Si}^{4+}$  próximos, originando un encadenamiento indefinido (polimerización), en el que otros cationes ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , etc.) de campos más débiles, hacen de cationes modificadores, siendo menor la contrapolarización que ejercen sobre los  $\text{O}^{2-}$  que la ejercida por el  $\text{Si}^{4+}$ , haciendo más polarizables a los  $\text{O}^{2-}$  y mejorando las condi-

ciones del bloqueo. Si existe una ordenación y el bloqueo de los cationes es perfecto, los efectos de los iones exteriores al sistema no producen una contrapolarización suficiente, porque los  $\text{O}^{2-}$  están fuertemente polarizados por la proximidad iónica de la estructura; entonces la escoria está cristalizada.

Cuando la escoria se halla en estado de fusión, las condiciones del bloqueo de cationes cambian, siendo inferiores, porque se hacen mayores las distancias entre los cationes y los aniones bloqueadores. Por un enfriamiento brusco (la granulación), la viscosidad aumenta rápidamente y el bloqueo de cationes no es perfecto, quedando como un líquido subenfriado o fase líquida en que se reúnen todos los óxidos no reducidos (7), en réplica al bloqueo más perfecto de cationes que constituye el estado sólido cristalizado.

Calentando gradualmente una escoria granulada, la resistencia que los iones encuentran en su movimiento es menor al disminuir la viscosidad y al aumentar la vibración térmica, cambiando las condiciones, completándose el bloqueo de los cationes y perfeccionándose hasta alcanzar la cristalización, corrientemente entre los  $750^\circ\text{C}$  y  $1.000^\circ\text{C}$ .

Las reacciones de la escoria vitrificada tienen lugar en la superficie, donde los cationes se hallan en bloqueo imperfecto. Los iones incorporados del exterior reaccionan por ejercer una contrapolarización excesiva, pasando a la estructura protones y cationes, que forman hidróxidos con cationes de campos más débiles ( $\text{Ca}^{2+}$ ), que replegándose al interior reaccionan con el  $\text{SiO}_2$  dando compuestos silicatados; los protones contrapolarizan los  $\text{O}^{2-}$  bloqueadores, por lo que los  $\text{Si}^{4+}$  mejoran su bloqueo, aumentando su número de coordinación de cuatro a seis, lo que hace aumentar el número de  $\text{O}^{2-}$  compartidos, polarizándose y formando gel de sílice.

Al poner en contacto la escoria granulada molida con el agua de amasado, se produce la reacción, y en la superficie que separa las dos fases, sólido y líquido, se produce un film de los productos hidratados que constituye una fase intermedia (8). Al engrosar esta película es preciso que se verifique un transporte de la fase acuosa a la fase escoria, o simultáneamente de ambas. Si los compuestos hidratados empiezan a cristalizar, la difusión es más difícil, porque también se forman coloides silíceos, que, al transformarse en gel de sílice, impiden la

difusión capilar entre los cristales, pudiendo cesar la reacción, por lo que no se aprovecha más que una parte de las propiedades hidráulicas de la escoria granulada, al limitarse, tanto la difusión iónica, como el transporte electrónico.

Según Mott, si las energías de paso son muy elevadas, la suma es muy grande y el film no crece, por disminuir y alcanzar valores muy pequeños la concentración.

De lo expresado anteriormente señalamos que, si se pretende obtener el mayor rendimiento hidráulico en las escorias granuladas, es preciso ampliar la superficie de contacto reaccionante, para lo cual hay que conseguir la mayor superficie específica posible que la economía de una producción permita, por medio de una molienda adecuada, ya que, si es verdad la favorable influencia que los factores presión y temperatura ejercen para una mejor difusión y un bloqueo perfecto de cationes, no resulta práctica la utilización de estos factores en la normal y corriente aplicación de los aglomerantes hidráulicos.

#### **Fabricación de cementos siderúrgicos, moliendo separadamente sus componentes**

En la primera parte del presente trabajo consideramos que, en la fabricación normal de los cementos siderúrgicos por molienda conjunta de los materiales que los integran, existe una gradación en su granulometría, siendo el yeso el componente de mayor superficie específica, teniendo los granos más gruesos un predominio de escoria granulada y formando el clínker la mayor parte de la superficie específica intermedia.

Cuando se trata de mejorar las condiciones de un cemento siderúrgico, es conveniente alcanzar una gran finura en su molturación, con objeto de obtener la mayor superficie específica posible, haciendo más imperfecto el bloqueo de cationes y eliminando la circunstancia que impide una mayor difusión de los iones. Hay que tener en cuenta que es inevitable una pulverización excesiva del yeso y del clínker: que cuando se muele un clínker hasta el máximo grado de finura que puede obtenerse en condiciones prácticas, se obtiene un cemento cuya utilidad es casi nula (9), y que, cuando las fracciones

finas bajan de las siete micras, la retracción aumenta (10). Para cada cemento, según el sistema de fabricación y su composición, existe una finura máxima en lo que se refiere a las resistencias mecánicas, y existen muchos cementos que pierden resistencia si la finura de molienda excede de un cierto valor (11).

Para los cementos sulfo-siderúrgicos se indica que resulta más ventajoso la molienda por separado del yeso o anhidrita (natural y artificial), de las escorias granuladas y del clínker, porque en la molienda conjunta de los materiales se obtienen unos brevísimos tiempos de fraguado que hacen inservible el cemento (12). Existe una patente alemana (núm. 498.202) que prevé la molienda separada del yeso y de la escoria, en la que se indica que, moliendo más groseramente el yeso cocido a altas temperaturas, se obtiene el fraguado deseado.

Conociendo la regularidad y excelente calidad de los cementos sulfo-siderúrgicos actuales, se deduce que la idea principal del procedimiento de molienda por separado conduce a la obtención de una granulometría ordenada de los componentes, como clave de su fabricación, aunque, en principio, se haya tratado con ello de evitar los perjuicios del falso fraguado y la deshidratación del yeso.

Considerando que no es necesaria una molienda muy fina del clínker y yeso, y que resulta conveniente obtener la mayor superficie específica de la escoria para obtener un mayor rendimiento hidráulico, pero que, sin embargo, en la molienda conjunta el clínker y el yeso consiguen una molienda ultrafina y la escoria no logra alcanzar la superficie específica deseada, decidimos comprobar los resultados prácticos que pudieran obtenerse preparando unos cementos siderúrgicos con una granulometría más adecuada, moliendo separadamente sus componentes.

Con objeto de que las diferencias que pudieran hallarse en los resultados no fueron debidas a irregularidades en la calidad de las materias primas utilizadas, cada una de éstas fué convenientemente homogeneizada, pudiendo considerarse que el clínker, la escoria y el yeso eran de la misma calidad para todos los cementos siderúrgicos preparados.

Tomada la mayor parte de la escoria, se procedió a su molturación hasta dejar un residuo de 1,5 % sobre un tamiz de 4.900 mallas/cm<sup>2</sup>. Con esta escoria molida se prepararon los cementos 1-2-3-4-5-7-8-9-10 y 11.

Para la preparación de los cementos se mezclaron mecánicamente la escoria granulada molida y el clinker homogeneizado que, conteniendo un 2% de yeso, fué previamente molido hasta dejar los siguientes residuos sobre tamiz de 4.900 mallas/cm<sup>2</sup>:

Cemento núm. 1. Clinker al 9%; Cemento núm. 2. Clinker al 7%; Cemento núm. 3. Clinker al 5%; Cemento núm. 4. Clinker al 3%; Cemento núm. 5. Clinker al 1,5%. Estos cementos contenían cada uno de ellos el 30% de escoria granulada, molida al 1,5% s/4.900. Los cementos que indicamos a continuación se fabricaron también por mezcla mecánica de los materiales molidos separadamente, conteniendo cada uno de ellos el 70% de escoria granulada

molida. Los cementos números 7-8-9-0 y 111 constaban además de clinker con 3% de yeso, molido al 9%, 7%, 5%, 3%, y 1,5% s/4.900, respectivamente.

El cemento núm. 6 se preparó moliendo conjuntamente clinker y yeso, con el 30% de escoria granulada, hasta conseguir un residuo de 1,5% sobre tamiz de 4.900 mallas/cm<sup>2</sup>.

El cemento núm. 12 fué preparado por molienda conjunta de clinker y yeso, con el 70% de escoria granulada, hasta dejar un residuo de 1,5% s/4.900 mallas/cm<sup>2</sup>.

En el cuadro 1 se expresan los resultados mecánicos obtenidos, siguiendo las Normas Oficiales para los ensayos de los aglomerantes hidráulicos:

CUADRO I

Residuos	Resistencias en mortero normal																	
	Ca-		A tracción en kg/cm <sup>2</sup>														A compresión en kg/cm <sup>2</sup>	
	mento	990	4.900	Fraguado en aire				Fraguado en agua				1 día	3 días	7 días	28 días	1 día	3 días	7 días
1	0,7	6,6	4 h. 50 min.	5 h. 45 min.	5 h. 40 min.	6 h. 30 min.	17	26	37	43	122	264	396	508				
2	0,5	5,2	3 h. 50 min.	4 h. 55 min.	4 h. 50 min.	6 h.	18,2	31	40	41,5	128	305	406	530				
3	0,4	3,6	3 h.	4 h. 10 min.	3 h. 50 min.	4 h. 55 min.	18	33	39	47	162	350	424	512				
4	0,4	2,8	2 h. 50 min.	3 h. 55 min.	4 h.	5 h.	19,2	30	39	40	173	352	432	527				
5	0,3	1,8	2 h. 25 min.	3 h. 15 min.	3 h. 35 min.	4 h. 40 min.	20	31	38	44	182	366	447	559				
6	0,2	1,6	3 h. 30 min.	4 h. 35 min.	4 h. 30 min.	5 h. 40 min.	14,5	26	37	41	130	256	371	482				
7	0,3	3,4	4 h. 45 min.	6 h. 15 min.	4 h. 50 min.	8 h.	7,4	20	28	40	36	226	330	520				
8	0,3	3,0	5 h. 25 min.	6 h. 35 min.	6 h. 20 min.	7 h. 40 min.	8	25	33,5	43,5	51	229	342	592				
9	0,2	2,6	4 h. 10 min.	5 h. 20 min.	5 h.	6 h. 25 min.	8	22,5	31	48	56	218	320	604				
10	0,2	2,1	4 h. 25 min.	6 h. 30 min.	5 h. 5 min.	7 h.	12	23	34	43	52	224	330	526				
11	0,2	1,7	4 h.	5 h. 30 min.	5 h. 15 min.	6 h. 50 min.	11	22	34	44	51	232	350	548				
12	0,1	1,6	4 h. 40 min.	6 h.	5 h. 55 min.	7 h. 10 min.	8	20	31	40	36	202	310	513				

De los resultados expresados se deduce que la molienda conjunta de los materiales para la fabricación de los cementos siderúrgicos no es condición indispensable para la buena calidad de los cementos, y que la duración del fraguado, así como las resistencias mecánicas, pueden ser modificadas en el sentido más favorable por una molienda separada de los componentes.

La fabricación de los cementos siderúrgicos por una molienda separada de sus componentes principales, debido especialmente a la menor «molturabilidad» de la escoria, parece presuponer un consumo mayor de energía para el producto así preparado. Sin embargo, cuando las proporciones de escoria son menores, no solamente se iguala el consumo de energía

con el de la fabricación normal, sino que resulta un considerable aumento en el rendimiento del producto terminado, debido a que puede utilizarse un clinker más groseramente molido.

En la práctica normal de fabricación de los cementos siderúrgicos por molienda simultánea se fabrican cementos de excelente calidad, pero se consume una gran cantidad de energía, porque los productos fabricados son de gran finura, dejando un residuo muy pequeño sobre el tamiz de 4.900 mallas/cm<sup>2</sup>, circunstancia que puede ser mejorada por una razonable distribución de las superficies específicas en la molienda por separado.

Como dato curioso cabe consignar que, en unas moliendas realizadas en fábrica, con un

molino compuesto de preparador (con carga de bolas) y refino (con carga de biconos), cuyo rendimiento normal es de 3,2 t/h en la producción de cementos siderúrgicos, se han efectuado unas molindas, por separado, de clínker con yeso, y de escoria. El rendimiento de la molienda del clínker con el 2 % de yeso, a una finura de molido que deja un residuo de 10 % s/4.900 mallas/cm<sup>2</sup>, ha sido de 5,5 t/h, y el rendimiento de molienda con escoria granulada solamente, a una finura de 1,5 % de residuo s/4.900 mallas/cm<sup>2</sup>, ha sido de 2,3 t/h.

### **Mezclado de los productos previamente molidos**

Uno de los problemas que más nos ha llamado la atención, ha sido la operación del mezclado de los componentes pulverizados (13). Actualmente no hay unidad de criterio en lo que respecta al grado de mezclado de sólidos pulverulentos, ni en la calidad de una mezcla, y mucho menos existe método alguno que permita a priori fijar las condiciones y el grado óptimo que debe de tener el mezclado. Resulta curioso observar que la mezcla de los sólidos que intervienen en la fabricación de los cementos siderúrgicos no ha sido considerada desde el punto de vista cinético ni estadístico, y no es posible definir la influencia que las condiciones de mezclado pueden ejercer sobre el producto fabricado. La difusión espontánea entre las partículas de los componentes pulverizados no es tan importante como para tomarla en consideración; sin embargo, hay que tener en cuenta la influencia que tienen las cantidades a mezclar, la diferencia de densidades y, especialmente, la diferente forma y tamaño que en la molturación adquieren las partículas, al proceder de sustancias de distinta estructura, como son el clínker, la escoria granulada y el yeso.

La calidad de una mezcla estará caracterizada por el destino que se le haya asignado, y el intentar superarle excesivamente puede resultar, además de antieconómico, completamente inútil.

Con objeto de comprobar el grado óptimo de mezclado, así como la influencia que la calidad de la mezcla puede ejercer en la fabricación de los cementos siderúrgicos por molienda separada de los materiales que los integran, efectuamos unas pruebas de mezclado, prepa-

rando varios cementos y realizando de distintas formas la mezcla de los materiales pulverizados.

Preparamos doce cementos: los seis primeros (A-B-C-D-E y F), con una proporción de 30 % de escoria granulada hasta dejar un residuo de 1,5 % s/4.900 mallas/cm<sup>2</sup>, y clínker que, conteniendo 2 % de yeso, fué molido hasta una finura de 9 % s/4.900 mallas/cm<sup>2</sup>. Los otros seis cementos (a-b-c-d-e-f), con una proporción de 70 % de escoria granulada, molida al 1,5 % s/4.900 mallas/cm<sup>2</sup>, y clínker con el 3 % de yeso, molido al 9 % s/4.900 mallas/cm<sup>2</sup>.

Las mezclas se efectuaron de la siguiente manera:

Cementos A y a: Materiales mezclados mecánicamente durante 1 minuto.

Cementos B y b: Materiales mezclados mecánicamente durante 5 minutos.

Cementos C y c: Materiales mezclados mecánicamente durante 30 minutos.

Cementos D y d: Materiales mezclados a mano durante 1 minuto.

Cementos E y e: Materiales mezclados a mano durante 10 minutos.

En la preparación de los cementos F y f no se mezclaron previamente los materiales en seco. La masa de los fraguados se efectuó pesando los componentes pulverizados y colocándolos en un recipiente, uno sobre otro, añadiendo el agua de una sola vez y efectuando el amasado en las mismas condiciones que para los demás cementos. El mortero normal se preparó colocando primero el litro de arena normal, encima la escoria molida, y sobre ésta el clínker, añadiendo el agua de una sola vez y continuando la operación en idénticas condiciones que para resto de los cementos.

El clínker empleado en todos los cementos dejó un residuo de 0,7 % s/900 mallas/cm<sup>2</sup>, y de 9 % s/4.900 mallas/cm<sup>2</sup>. La superficie específica Blaine resultó ser de 1.937 cm<sup>2</sup>/g.

La escoria utilizada en todos los cementos dejó un residuo de 0,09 % s/900 mallas/cm<sup>2</sup>, y de 1,5 % s/4.900 mallas/cm<sup>2</sup>, con 3.050 cm<sup>2</sup>/g de superficie específica Blaine.

Efectuados los ensayos, los resultados obtenidos se expresan en los siguientes cuadros 2 y 3:

**CUADRO 2**

Cemento	A	B	C	D	E	F	
Residuo s/900 mallas/cm <sup>2</sup> .	0,6	0,5	0,5	0,6	0,6	—	
Residuo s/4.900 mallas/cm <sup>2</sup> .	6,9	6,5	6,5	6,5	6,5	—	
Superficie específica Blaine.	2.450 cm <sup>2</sup> /g	2.419 cm <sup>2</sup> /g	2.389 cm <sup>2</sup> /g	2.419 cm <sup>2</sup> /g	2.419 cm <sup>2</sup> /g	—	
Densidad . . . . .	3,01	3,00	3,00	3,00	3,00	—	
Estabilidad de volumen a ebullición:							
Le Chatelier . . . . .	58 mm	53 mm	54 mm	51 mm	53 mm	51 mm	
Fraguado en aire	Principio . . . . .	4 h. 55 min.	5 h. 5 min.	5 h. 10 min.	4 h. 40 min.	5 h.	4 h. 50 min.
	Final . . . . .	5 h. 55 min.	6 h. 10 min.	6 h. 15 min.	5 h. 45 min.	6 h.	5 h. 45 min.
Fraguado en agua	Principio . . . . .	5 h. 50 min.	6 h. 5 min.	6 h. 5 min.	6 h. 35 min.	6 h. 40 min.	6 h.
	Final . . . . .	7 h. 5 min.	7 h. 15 min.	7 h. 20 min.	7 h. 25 min.	7 h. 30 min.	7 h. 10 min.
Resistencias en mortero normal:							
Tracción a	1 día . . . . .	18,0 kg/cm <sup>2</sup>	22,0 kg/cm <sup>2</sup>	22,0 kg/cm <sup>2</sup>	27,0 kg/cm <sup>2</sup>	25,0 kg/cm <sup>2</sup>	20,0 kg/cm <sup>2</sup>
	3 días . . . . .	28,0 kg/cm <sup>2</sup>	25,0 kg/cm <sup>2</sup>	31,0 kg/cm <sup>2</sup>	32,5 kg/cm <sup>2</sup>	26,0 kg/cm <sup>2</sup>	32,0 kg/cm <sup>2</sup>
	7 días . . . . .	38,0 kg/cm <sup>2</sup>	40,0 kg/cm <sup>2</sup>	38,5 kg/cm <sup>2</sup>	40,0 kg/cm <sup>2</sup>	40,0 kg/cm <sup>2</sup>	42,0 kg/cm <sup>2</sup>
	28 días . . . . .	44,0 kg/cm <sup>2</sup>	42,0 kg/cm <sup>2</sup>	41,0 kg/cm <sup>2</sup>	41,0 kg/cm <sup>2</sup>	44,0 kg/cm <sup>2</sup>	44,0 kg/cm <sup>2</sup>
Compresión a	1 día . . . . .	229,0 kg/cm <sup>2</sup>	229,0 kg/cm <sup>2</sup>	234,0 kg/cm <sup>2</sup>	274,0 kg/cm <sup>2</sup>	254,0 kg/cm <sup>2</sup>	239,0 kg/cm <sup>2</sup>
	3 días . . . . .	438,0 kg/cm <sup>2</sup>	406,0 kg/cm <sup>2</sup>	340,0 kg/cm <sup>2</sup>	442,0 kg/cm <sup>2</sup>	438,0 kg/cm <sup>2</sup>	423,0 kg/cm <sup>2</sup>
	7 días . . . . .	483,0 kg/cm <sup>2</sup>	483,0 kg/cm <sup>2</sup>	422,0 kg/cm <sup>2</sup>	508,0 kg/cm <sup>2</sup>	512,0 kg/cm <sup>2</sup>	508,0 kg/cm <sup>2</sup>
	28 días . . . . .	635,0 kg/cm <sup>2</sup>	596,0 kg/cm <sup>2</sup>	585,0 kg/cm <sup>2</sup>	547,0 kg/cm <sup>2</sup>	610,0 kg/cm <sup>2</sup>	590,0 kg/cm <sup>2</sup>

**CUADRO 3**

Cemento	a	b	c	d	e	f	
Residuo s/900 mallas/cm <sup>2</sup> .	0,2 %	0,2 %	0,2 %	0,2 %	0,2 %	—	
Residuo s/4.900 mallas/cm <sup>2</sup> .	3,3 %	3,3 %	3,2 %	3,2 %	3,2 %	—	
Superficie específica Blaine.	2.628 cm <sup>2</sup> /g	2.570 cm <sup>2</sup> /g	2.628 cm <sup>2</sup> /g	2.656 cm <sup>2</sup> /g	2.628 cm <sup>2</sup> /g	—	
Densidad . . . . .	2,94	2,95	2,95	2,95	2,95	—	
Estabilidad de volumen a ebullición:							
Le Chatelier . . . . .	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm	
Fraguado en aire	Principio . . . . .	6 h. 55 min.	6 h. 40 min.	6 h. 25 min.	6 h. 30 min.	6 h. 25 min.	6 h. 25 min.
	Final . . . . .	7 h. 5 min.	7 h. 45 min.	7 h. 30 min.	7 h. 30 min.	7 h. 35 min.	7 h. 25 min.
Fraguado en agua	Principio . . . . .	8 h. 15 min.	8 h.	8 h. 10 min.	7 h. 55 min.	8 h.	7 h. 30 min.
	Final . . . . .	9 h. 55 min.	9 h. 35 min.	9 h. 35 min.	9 h. 40 min.	9 h. 30 min.	9 h. 15 min.
Resistencias en mortero normal:							
Tracción a	1 día . . . . .	12,5 kg/cm <sup>2</sup>	9,5 kg/cm <sup>2</sup>	12,0 kg/cm <sup>2</sup>	11,5 kg/cm <sup>2</sup>	11,0 kg/cm <sup>2</sup>	12,5 kg/cm <sup>2</sup>
	3 días . . . . .	22,0 kg/cm <sup>2</sup>	22,5 kg/cm <sup>2</sup>	21,0 kg/cm <sup>2</sup>	22,5 kg/cm <sup>2</sup>	23,5 kg/cm <sup>2</sup>	22,0 kg/cm <sup>2</sup>
	7 días . . . . .	29,0 kg/cm <sup>2</sup>	32,5 kg/cm <sup>2</sup>	29,0 kg/cm <sup>2</sup>	28,5 kg/cm <sup>2</sup>	31,5 kg/cm <sup>2</sup>	29,5 kg/cm <sup>2</sup>
	28 días . . . . .	42,0 kg/cm <sup>2</sup>	39,5 kg/cm <sup>2</sup>	41,0 kg/cm <sup>2</sup>	39,5 kg/cm <sup>2</sup>	41,0 kg/cm <sup>2</sup>	40,0 kg/cm <sup>2</sup>
Compresión a	1 día . . . . .	122,0 kg/cm <sup>2</sup>	122,0 kg/cm <sup>2</sup>	112,0 kg/cm <sup>2</sup>	117,0 kg/cm <sup>2</sup>	117,0 kg/cm <sup>2</sup>	128,0 kg/cm <sup>2</sup>
	3 días . . . . .	290,0 kg/cm <sup>2</sup>	279,0 kg/cm <sup>2</sup>	279,0 kg/cm <sup>2</sup>	218,0 kg/cm <sup>2</sup>	218,0 kg/cm <sup>2</sup>	279,0 kg/cm <sup>2</sup>
	7 días . . . . .	381,0 kg/cm <sup>2</sup>	391,0 kg/cm <sup>2</sup>	356,0 kg/cm <sup>2</sup>	350,0 kg/cm <sup>2</sup>	350,0 kg/cm <sup>2</sup>	386,0 kg/cm <sup>2</sup>
	28 días . . . . .	497,0 kg/cm <sup>2</sup>	422,0 kg/cm <sup>2</sup>	516,0 kg/cm <sup>2</sup>	490,0 kg/cm <sup>2</sup>	508,0 kg/cm <sup>2</sup>	487,0 kg/cm <sup>2</sup>

Los resultados obtenidos son francamente sorprendentes; no deseamos exponer conclusiones definitivas, porque las pruebas fueron realizadas en el laboratorio, procediéndose con la mayor precisión y escrupulosidad en su preparación, de la forma y manera ya expuestas. En la actualidad continuamos las experiencias, con la mira de efectuarlas en las mismas condiciones que se dan en la práctica normal para fabricar el hormigón. Los primeros resultados obtenidos parecen confirmar los ensayos de laboratorio; por lo cual, un buen mezclado del clínker molido, con la escoria granulada molida y con los áridos, en la hormigonera o batidora, da excelente resultado, debiéndose añadir el agua de amasado con cierto cuidado para evitar la formación de grumos.

De confirmarse plenamente estos resultados en la práctica ordinaria, la fabricación de los cementos siderúrgicos puede variar por completo, ya que, para obtener un grado de mezclado suficiente, no resultaría imprescindible la molienda conjunta de los materiales que integran esta clase de cementos, y en el mismo pie de obra resultaría empresa sencilla preparar las proporciones de los materiales molidos que las condiciones técnicas y económicas fijasen como más convenientes.

Dedicados a la fabricación de cementos siderúrgicos, hemos comprobado experimentalmente que, para obtener un producto de buena calidad, es absolutamente necesario preparar el clínker con una composición adecuada para la escoria que normalmente se utiliza, porque, como expresó don Pablo García de Paredes, en la primera Reunión de Directores y Técnicos de Fábricas de Cemento, la composición química de las escorias depende exclusivamente del siderúrgico, sin que pueda influir en su ánimo el cementero, el cual tiene que limitarse a recoger la escoria, substancia que, aún en la actualidad y por antiguas prevenciones que la práctica de más de cincuenta años ha rechazado plenamente por erróneas, sigue considerándose como un embarazoso deshecho, en lugar de un valioso sub-producto de inestimable valor para la economía nacional. Cuando sea posible conseguir una mayor proporción en el contenido de alúmina y un elevado potencial hidráulico en las escorias de horno-alto, las posibilidades de su empleo en la fabricación de los cementos siderúrgicos podrán ampliarse más, generalizándose su empleo, con el consiguiente alivio para las necesidades que de manera progresiva se acumulan en nuestro país.

### Ensayos comparativos de varios cementos siderúrgicos, fabricados moliendo conjunta y separadamente los materiales que intervienen en su fabricación

Como final, exponemos los resultados obtenidos con dos cementos portland siderúrgicos y otros dos portland de alto horno, fabricados por molienda conjunta y separada de los materiales que integran dichos cementos.

El análisis químico de los materiales empleados en la fabricación de los cementos, y que se efectuó sobre las muestras desecadas a 110°C, fué el siguiente:

	Clínker	Yeso	Escoria granulada
SiO <sub>2</sub> . . . . .	21,90 %	2,60 %	35,80 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . . . . .	5,80 %	0,33 %	11,84 %
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . . . . .	3,80 %	1,47 %	FeO 1,96 %
Mn O . . . . .	1,50 %	—	0,55 %
CaO . . . . .	63,74 %	36,31 %	43,87 %
MgO . . . . .	2,17 %	2,53 %	3,46 %
SO <sub>3</sub> . . . . .	1,54 %	45,31 %	S 1,94 %
Pérdida al fuego . . . . .	0,60 %	11,20 %	—
Alcalis y sin determinar . . . . .	0,45 %	0,25 %	0,56 %
Total . . . . .	100,00 %	100,00 %	100,00 %

A continuación se detallan los ensayos de dos cementos portland siderúrgicos P. S.—1 y P. S.—2, fabricados con las mismas materias primas: el P. S.—1, por molienda separada de los componentes y posterior mezclado mecánico; y el P. S.—2, por molienda conjunta de sus componentes.



Análisis químico de los cementos preparados:

	P. S.—1	P. S.—2
SiO <sub>2</sub> .....	25,60 %	25,60 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	7,92 %	7,92 %
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	2,58 %	2,58 %
MnO .....	0,20 %	0,20 %
CaO .....	56,32 %	56,32 %
MgO .....	4,38 %	4,38 %
SO <sub>3</sub> .....	1,88 %	1,88 %
S .....	0,52 %	0,52 %
Pérdida al fuego .....	0,50 %	0,50 %
Alcalis y sin determinar..	0,10 %	0,10 %
Total .....	100,00 %	100,00 %

Densidad ..... 3,01 3,01

Residuo sobre 900  
mallas/cm<sup>2</sup> ..... 0,4 % 0,3 %

Residuo sobre 4.900  
mallas/cm<sup>2</sup> ..... 5,5 % 3,4 %

Superficie específica  
Blaine ..... 2.576 cm<sup>2</sup>/g—2.827 cm<sup>2</sup>/g

Agua necesaria para  
el amasado ..... 28,50 %—27,50 %

Fraguado { Principio...5 h 10 min.—5 h  
en aire { Final .....6 h 15 min.—6 h 5 min.

Fraguado { Principio...6 h 35 min.—6 h 15 min.  
en agua { Final .....8 h — 7 h 40 min.

Estabilidad de volumen—Sin novedad.

Resistencias en mortero normal:

A trac- ción a	12 horas..	7,0 kg/cm <sup>2</sup> — 6,5 kg/cm <sup>2</sup>
	18 horas..	12,5 kg/cm <sup>2</sup> —12,5 kg/cm <sup>2</sup>
	24 horas..	18,5 kg/cm <sup>2</sup> —16,0 kg/cm <sup>2</sup>
	3 días ...	28,5 kg/cm <sup>2</sup> —28,0 kg/cm <sup>2</sup>
	7 días ...	34,0 kg/cm <sup>2</sup> —32,0 kg/cm <sup>2</sup>
	28 días ...	39,5 kg/cm <sup>2</sup> —35,0 kg/cm <sup>2</sup>

A com- presión a	12 horas..	98,0 kg/cm <sup>2</sup> —98,0 kg/cm <sup>2</sup>
	18 horas..	171,0 kg/cm <sup>2</sup> —160,0 kg/cm <sup>2</sup>
	24 horas..	224,0 kg/cm <sup>2</sup> —211,0 kg/cm <sup>2</sup>
	3 días ...	409,0 kg/cm <sup>2</sup> —356,0 kg/cm <sup>2</sup>
	7 días ...	487,0 kg/cm <sup>2</sup> —448,0 kg/cm <sup>2</sup>
	28 días ...	596,0 kg/cm <sup>2</sup> —593,0 kg/cm <sup>2</sup>

En hormigón de 500 kg/m<sup>3</sup>, fabricado con guijillo y arena de caliza triturada, con la relación agua/cemento 0,50, se obtuvieron las siguientes resistencias a la compresión en probetas cilíndricas de 15 cm  $\phi$  x 30 cm de altura:

A 1 día	—177 kg/cm <sup>2</sup> —151 kg/cm <sup>2</sup>
A 3 días	—215 kg/cm <sup>2</sup> —190 kg/cm <sup>2</sup>
A 7 días	—292 kg/cm <sup>2</sup> —262 kg/cm <sup>2</sup>
A 28 días	—396 kg/cm <sup>2</sup> —374 kg/cm <sup>2</sup>

Características de los cementos portland de alto-horno P. A.—1 y P. A.—2, fabricados con las mismas materias primas: el P. A.—1 por molienda separada de los componentes y posterior mezclado mecánico, y el P. A.—2 por molienda conjunta de sus componentes.

Análisis químico de los cementos preparados:

	P. A.—1	P. A.—2
SiO <sub>2</sub> .....	30,90 %	30,90 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	9,74 %	9,74 %
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	2,43 %	2,43 %
MnO .....	0,40 %	0,40 %
CaO .....	49,45 %	49,45 %
MgO .....	2,90 %	2,90 %
SO <sub>3</sub> .....	1,18 %	1,18 %
S .....	1,21 %	1,21 %
Pérdida al fuego .....	0,90 %	0,90 %
Alcalis y sin determinar..	0,89 %	0,89 %
Total .....	100,00	100,00

Densidad ..... 2,97—2,97

Residuo sobre 900  
mallas/cm<sup>2</sup> ..... 0,3 %— 0,2 %

Residuo sobre 4.900  
mallas/cm<sup>2</sup> ..... 3,8 %— 2,6 %

Superficie específica

Blaine ..... 3.082 cm<sup>2</sup>/g—3.131 cm<sup>2</sup>/g

Agua necesaria para

el amasado ..... 30,0 %—27,5 %

Fraguado { Principio.. 6 h 35 min.—6 h 5 min.  
en agua { Final ..... 8 h — —7 h 40 min.

Fraguado { Principio.. 5 h 30 min.—4 h 55 min.  
al aire { Final ..... 6 h 30 min.—5 h 50 min.

Estabilidad de volumen—Sin novedad.

Resistencia en mortero normal:

A tracción a { 12 horas.. 0,0 kg/cm<sup>2</sup>— 0,0 kg/cm<sup>2</sup>  
18 horas.. 5,0 kg/cm<sup>2</sup>— 5,0 kg/cm<sup>2</sup>  
24 horas.. 9,5 kg/cm<sup>2</sup>— 8,0 kg/cm<sup>2</sup>  
3 días.... 24,0 kg/cm<sup>2</sup>—23,0 kg/cm<sup>2</sup>  
7 días.... 30,0 kg/cm<sup>2</sup>—28,5 kg/cm<sup>2</sup>  
28 días... 39,0 kg/cm<sup>2</sup>—36,0 kg/cm<sup>2</sup>

A compresión a { 12 horas.. 66,0 kg/cm<sup>2</sup>—68,0 kg/cm<sup>2</sup>  
18 horas.. 98,0 kg/cm<sup>2</sup>—92,0 kg/cm<sup>2</sup>  
24 horas.. 115,0 kg/cm<sup>2</sup>—112,0 kg/cm<sup>2</sup>  
3 días... 316,0 kg/cm<sup>2</sup>—237,0 kg/cm<sup>2</sup>  
7 días... 428,0 kg/cm<sup>2</sup>—369,0 kg/cm<sup>2</sup>  
28 días... 527,0 kg/cm<sup>2</sup>—513,0 kg/cm<sup>2</sup>

En hormigón de 500 kg/m<sup>3</sup>, fabricado con guijillo y arena de caliza triturada, con la relación agua/cemento 0,55, se obtuvieron las siguientes resistencias a la compresión en probetas cilíndricas de 15 cm  $\varnothing$  x 30 cm de altura:

- A 1 día — 90 kg/cm<sup>2</sup>— 83 kg/cm<sup>2</sup>
- A 3 días—151 kg/cm<sup>2</sup>—140 kg/cm<sup>2</sup>
- A 7 días—243 kg/cm<sup>2</sup>—196 kg/cm<sup>2</sup>
- A 28 días—334 kg/cm<sup>2</sup>—319 kg/cm<sup>2</sup>

BIBLIOGRAFIA

- (1) B. O. del E. núm. 243 (1946).
- (2) D. A. WADIA; Ultimos Avances (\*) núm. 34 (1952).
- (3) P. PALOMAR y D. LOPEZ PECIÑA; Cemento y Hormigón núm. 262 (1956).
- (4) J. CALLEJA; Ultimos Avances núms. 55 y siguientes (1954).
- (5) P. PALOMAR y D. LOPEZ PECIÑA; Cemento y Hormigón núms. 249 y siguientes (1955).
- (6) J. E. PEÑA DE CASTRO; Química e Industria (\*\*) V. 3 núm. 3 (1956).
- (7) P. GARCIA DE PAREDES; Ultimos Avances núm. 39 (1953).
- (8) A. G. VERDUCH; Química e Industria V. 3 núm. 5 (1956).
- (9) J. WUHRER; Ultimos Avances núm. 16 (1950).
- (10) W. GRÜNDER y S. TABBAH; Ultimos Avances núm. 18 (1950).
- (11) K. AICHINGER y A. JORDAN; Ultimos Avances núm. 50 (1954).
- (12) F. KÖBERICH; Ultimos Avances número 40 (1953).
- (13) SU REDACCION; Química e Industria V. 2 núm. 2 (1955).

Estos trabajos fueron realizados en los Laboratorios de la Empresa «Industrias del Cemento, S. A.» El autor agradece a su director gerente, don José Cámara Rica, el interés y entusiasmo puestos de manifiesto, los cuales han hecho posible la presentación de esta ponencia en los II Coloquios de Directores y Técnicos de Fábricas de Cementos.

\* Ultimos avances en Materiales de Construcción. Publicación del Instituto Técnico de la Construcción y del Cemento, del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Patronato «Juan de la Cierva».  
\*\* Revista de la Asociación Nacional de Químicos de España.