

Escorias y cementos siderúrgicos(*)

Prof. Dr. JOSE CALLEJA - IETCC/CSIC - MADRID - España

RESUMEN

En este trabajo se describen las características químicas y mineralógicas que deben reunir las escorias siderúrgicas para su empleo en la fabricación de cementos y como adición para el hormigón. También se exponen detalles técnico-económicos de la fabricación de los cementos siderúrgicos y de la utilización de los mismos. Se mencionan y describen métodos para el control de la calidad de las escorias y para la determinación de su contenido en los cementos.

SUMMARY

This paper describes the chemical and mineralogical characteristics which must show the blast-furnace slags to be used in cement manufacture or to be added to concrete. There are also shown technical and economical details concerning manufacture and use of blast-furnace slag cements. Methods to control the quality of slags and to determine their content in cements are mentioned and described as well.

0. INTRODUCCION

Como "materiales de construcción" en una u otra forma, las escorias siderúrgicas parecen haber sido utilizadas por primera vez en Inglaterra, al final del primer tercio del siglo XVIII.

Al comienzo del tercer tercio de dicha centuria parece que se emplearon como materiales conglomerantes, añadidas a los morteros o argamasas de cal.

Y entre 1825 y 1875 se generalizó su utilización en Alemania, en forma ya de conglomerantes, mezcladas con cal, previa su granulación —cementos "de" escorias—, habiéndose comenzado a partir de la última fecha la investigación de los citados materiales por parte de MICHAELIS.

La activación de las escorias por sulfatos —yesos y anhídritas— fue descubierta por KUHL en la primera década del siglo actual, dando lugar a los cementos sulfosiderúrgicos, supersulfatados o sobresulfatados.

Es de advertir la primacía alemana en el estudio, en el conocimiento y en la aplicación de las escorias siderúrgicas como materiales de construcción y, en particular, como materias primas para la fabricación de conglomerantes hidráulicos de propiedades, comportamientos y empleos específicos muy directamente relacionados con la durabilidad o resistencia química del hormigón.

* Texto entregado con motivo de conferencias pronunciadas por el autor, sobre "Utilización de Cementos con Adiciones en Pavimentos de Hormigón", en la Reunión Anual de 1982 de la Asociación Brasileña de Pavimentación, en Brasilia, y sobre "Cementos con Adiciones para Hormigón de Cementaciones y Obras Subterráneas", en la Reunión Conmemorativa del 10.º Aniversario del IBRACON (Instituto Brasileiro do Concreto) y en la 33.ª Reunión de Técnicos de la Industria del Cemento, de la ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland, en Sao Paulo (Brasil), del 22 al 28 de Julio de 1982.

1. DEFINICION DE ESCORIAS SIDERURGICAS

Entre las adiciones que tienen por objeto ahorrar energía en la fabricación de cementos, aprovechar subproductos y contribuir a la conservación del medio ambiente incontaminado, tienen especial importancia y utilidad las escorias siderúrgicas.

Estas son el resultado de la combinación de las gangas o componentes no metálicos de los minerales en las distintas metalurgias, con las cenizas del combustible usado como agente reductor y con la caliza o dolomía empleadas como fundente o, en general, con los materiales utilizados para el refinado de los metales.

En particular, las escorias siderúrgicas, y más concretamente las de horno alto, resultan de la combinación de la ganga ácida "arcillosa" del mineral de hierro y de las cenizas y el azufre del coque —asimismo de carácter ácido—, con la cal y la magnesia —componentes básicos— de las calizas más o menos dolomíticas utilizadas como fundentes.

La combinación de los componentes oxidicos ácidos y básicos y la formación de los constituyentes de las escorias tienen lugar por fusión a alta temperatura de unos 1.600°C y enfriamiento del magma fluido a 1.400°C hasta la temperatura ambiente. Este enfriamiento tiene una importancia decisiva en las propiedades físicas y químicas, y en la naturaleza y comportamiento de las escorias y de los cementos fabricados a base de ellas, como se verá después.

2. COMPOSICION DE LAS ESCORIAS SIDERURGICAS

De este modo los componentes ácidos sílice y alúmina ($\text{SiO}_2 = \text{S}$ y $\text{Al}_2\text{O}_3 = \text{A}$) se combinan con los componentes básicos cal y magnesia ($\text{CaO} = \text{C}$ y $\text{MgO} = \text{M}$), con diferentes relaciones S/A y C/M , así como $(\text{C} + \text{M})/(\text{S} + \text{A})$, dependiendo de los materiales que utilice cada siderúrgica. Se ve así que en la composición de las escorias entran los mismos óxidos que en la del clínker de cemento portland, aunque en proporciones diferentes.

Las anteriores relaciones dependen también del grado de fluidez, de la mayor o menor capacidad para fijar azufre y álcalis, y de la composición analítica que se quiera dar a la escoria para su utilización posterior.

La composición química de las escorias varía entre límites que, en general, se pueden establecer como indican los Cuadros 1 y 2. Los valores del Cuadro 2 corresponden a 55 escorias que a su vez forman un grupo representativo de un total de 425.

La composición de las escorias es más uniforme cuando el mineral y el fundente se aglomeran antes de entrar en el horno.

Las del Cuadro 2, a pesar de todo, no son por sí solas muy representativas, dada la amplitud de los campos de variación de sus valores y los altísimos coeficientes de variación —salvo el correspondiente al contenido de cal—.

La composición de las escorias siderúrgicas, en relación con la de otros materiales para cemento y con la del propio cemento portland, queda de manifiesto en el diagrama triangular (C-S-A) de RANKIN de la figura 1, el cual destaca las diferencias entre unas y otras escorias y las puzolanas. También pone de relieve que las escorias siderúrgicas más idóneas para fabricar cementos supersulfatados son precisamente las más aluminosas, y al mismo tiempo más cálcicas, dentro del grupo general de todas ellas.

CUADRO 1

Composición química de escorias siderúrgicas

Oxidos	%			
	Máx.	Mín.	Med.	≈
C	50-55	25-35	40-45	45
S	40-55	25-40	30-40	30
A (+ T)	15-20	5-15	10-15	15
M	2-12	0- 8	4- 6	4
F (+ F)	0- 5	0- 1	1- 1,5	3
$\overline{\text{S}}$	0- 5	0- 1	1,5- 2,5	1
$\overline{\text{S}}$	0- 3	0- 1	1- 1,5	1
$\overline{\text{M}}$	0- 3	0- 2,5	1- 1,5	0,5
N + K	0- 1	0- 1	0- 0,5	0,5

C = CaO T = TiO₂ F = Fe₂O₃ $\overline{\text{S}}$ = S²⁻ N = Na₂O
 S = SiO₂ M = MgO $\overline{\text{S}}$ = SO₃ M = MnO K = K₂O
 A = Al₂O₃ $\overline{\text{F}}$ = FeO

CUADRO 2

Composición de 55 escorias alemanas, belgas, españolas, francesas, inglesas y norteamericanas

%	Valores			Varianza	
	Máx.	Mín.	Med.	σ	V %
C	52	33	44,5	3,1	7
S	38	27	32,5	2,5	77
A	24	8	14,0	3,8	27
F	5	0	1,25	1,0	80
M	10	0,5	3,0	1,7	57
$\overline{\text{M}}$	5	0	1,0	0,8	80
$\overline{\text{S}}$	5,5	0	0,75	1,5	200
$\overline{\text{S}}$	3	0,75	1,5	0,5	33

Las escorias siderúrgicas son útiles como adición al clinker de cemento portland para fabricar los cementos portland siderúrgicos o de horno alto*, por cuanto que tienen capacidad hidráulica latente o potencial. Es decir, que finamente molidas y amasadas con agua son capaces de fraguar y endurecer por sí mismas, y más aún bajo la acción de un activador. Lo que sucede es que la capacidad hidráulica latente o potencial de las escorias está muy atenuada y se manifiesta con lentitud, precisando de catalizadores para mostrarse de forma ostensible y con resultados prácticos. Los catalizadores o activadores usuales de las escorias son los sulfatos (yeso, anhidrita), y los álcalis (la sosa y la potasa, y la cal hidratada bien como tal, o bien procedente de la hidratación de los silicatos cálcicos del clinker de cemento portland).

* En lo que sigue se mencionarán los cementos siderúrgicos y los de horno alto, a veces de forma indiscriminada.

De haber, en casos, alguna diferencia, ésta consiste en que en los cementos siderúrgicos —denominación que, en general, se usa aquí como genérica—, la proporción de clinker es mayor y la de escoria menor que en los cementos de horno alto.

Por esta razón, cuando se muelen y mezclan escorias siderúrgicas en gran proporción (del orden de 80 %) con yeso y/o anhidrita aportadores de sulfato (del orden de 15 %) y clínker de cemento portland que suministra alcalinidad cálcica (del orden de 5 %), se obtienen los cementos sulfosiderúrgicos o siderúrgicos supersulfatados. Y cuando antaño se mezclaban las escorias molidas con cal apagada, aportadora de basicidad, se obtenían los llamados cementos "de" escorias. Y en la actualidad, la molienda conjunta o separada (y en el segundo caso la mezcla posterior) de escorias siderúrgicas y clínker o cemento portland —que aportan activadores de naturaleza sulfática y alcalina a la vez—, en distintas proporciones, constituyen los actuales cementos siderúrgicos o de horno alto (cementos portland "con" escorias).

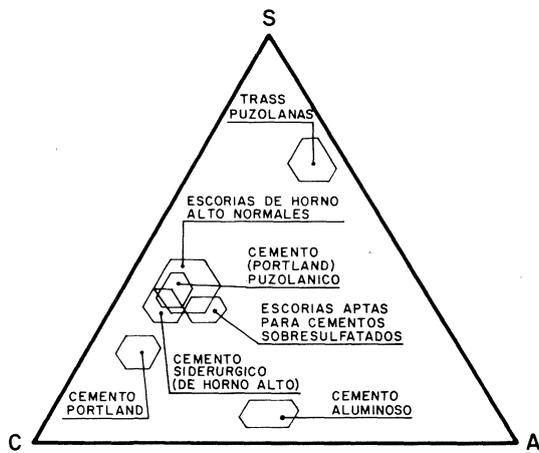


Fig. 1

Pero la mayor o menor utilidad y eficacia de una escoria para ser utilizada como adición al clínker en los cementos siderúrgicos depende de su composición. La escoria debe ser

básica, es decir, debe satisfacer unos ciertos valores de unos índices llamados *de basicidad*, y debe asimismo tener un mínimo de poder hidráulico potencial o latente, reflejado en otros índices llamados *de hidraulicidad*. Estos índices tienen un valor indicativo mucho mayor que la simple composición química de la escoria. El comportamiento y valor de las mismas depende también de los componentes minoritarios que contengan.

Los índices de basicidad y de hidraulicidad más usuales son los señalados en el Cuadro 3. Los valores límite superiores corresponden a las escorias de mejor calidad hidráulica, los valores inferiores a las de peor, y los valores intermedios a las de calidad asimismo intermedia. El último de los índices está expresado en moles, a partir de la composición oxídica porcentual.

CUADRO 3

Indices de basicidad e índices de hidraulicidad de las escorias siderúrgicas

	$IB_1 = C/S$	IB_1 e IB_2	> 1 escoria básica
	$IB_2 = (C + M)/S$	IB_1 e IB_2	< 1 escoria ácida
	$IB = (C + M)/(S + A)$		$\left\{ \begin{array}{l} > 1 \text{ escoria básica} \\ < 1 \text{ escoria ácida} \end{array} \right.$
BLONDIAU	$1,45 < C/S < 1,54$		
VENUAT	$1,8 < S/A < 1,9$		
VICAT	$(A + S)/C$		
NORMA DIN	$IH = (C + M + A)/S > 1$		
CHERON Y LARDINOIS	$IH = (C + 1,4 M + 0,56 A)/S > 1$		
NORMA ASTM	$IH = (C + M + 1/3 A)/(S + 2/3 A) > 1$		
SCHWIETE	$IH = [C + M + (A - 10)]/(S + 10) > 1$		
KEIL	$IH = (C + \bar{C}\bar{S} + 1/2 M + A)/(S + M)$		$\left\{ \begin{array}{l} > 1,9 \\ < 1,5 \end{array} \right.$
SOPORA	$IH = (C + \bar{C}\bar{S} + 1/2 M + A)/(S + \bar{M} + \bar{F})$		$\left\{ \begin{array}{l} > 1,9 \\ < 1,5 \end{array} \right.$
LANGAVANT	$IH = 20 + C + 1/2 M + A + 2 S$		$\left\{ \begin{array}{l} > 16 \\ < 12 \end{array} \right.$
SCHWIETE	$IH = (C/56)/(1,5 S/60 + 3,0 A/102) > 0,81$		

Es de advertir que en algunos de estos índices figura la alúmina en el numerador o en el denominador, o repartida entre ambos. Ello es debido al carácter anfótero (ambivalente, ácido y/o básico) que le es atribuible. Esto explica la evolución de algunos de los índices con el tiempo, incluso en un mismo país. El índice ASTM es el antiguo de las Normas Alemanas, sustituido en éstas por el actual DIN.

El índice de KEIL parece ser el más informativo de todos, aunque no resulte fácil encontrar escorias siderúrgicas que lo satisfagan en sus valores más altos, ya que para ello se requerirían adiciones fundentes y correctoras de la ganga que implicarían un mayor consumo de combustible en el proceso siderúrgico, el cual resultaría así menos rentable. Estos valores más altos los pueden cumplir mejor algunas escorias de la metalurgia del aluminio.

Los índices ASTM y DIN se suelen utilizar por igual. El DIN es el adoptado por las Normas Españolas. Con arreglo al mismo, las escorias japonesas dan valores de 1,75 a 1,90, dependiendo de su contenido de magnesia, variable entre 2 y 7 %.

Entre los índices suele haber una cierta concordancia relativa, no muy destacada, pues si bien los componentes básicos C y M favorecen la hidraulicidad, los contenidos elevados de A contribuyen al buen comportamiento hidráulico de las escorias de basicidad escasa.

En cuanto al valor de los índices de hidraulicidad en relación con el valor de las resistencias mecánicas de los cementos que contienen escorias —es decir, con la velocidad de endurecimiento de los mismos— se puede decir que los índices basados en C y en S se correlacionan mejor con las resistencias a edades cortas —hasta 7 días—, mientras que los basados en C, M, S y A muestran mejor correlación con las resistencias a edades largas —mayores de 28 días—.

3. CONSTITUCION DE LAS ESCORIAS SIDERURGICAS

Los óxidos de naturaleza ácida y básica de las escorias se encuentran combinados en forma de sílico-aluminatos cálcico-magnésicos más o menos complejos, los cuales constituyen en su mayoría minerales del llamado grupo de las *melilitas*, tal como indica el Cuadro 4.

Todos ellos son constituyentes deseables de las escorias, encabezados por dos silicatos cálcicos, la alita (tricálcico) y la belita (bicálcico), constituyentes mayoritarios del clínker de cemento portland. Las partículas más finas de las escorias son las de constitución más próxima a la del clínker portland.

Hay que señalar que el magnesio de las escorias vítreas juega un papel análogo al del calcio en cuanto a la hidraulicidad de los cementos siderúrgicos; su estado es iónico, mientras que en una escoria cristalizada estaría como akermanita C_2MS_2 , monticelita CMS o la propia melilita (definidora del grupo de minerales de la escoria y disolución sólida de akermanita y gehlenita), o incluso como periclasa.

Aparte de los silicoaluminatos calcicomagnésicos, la escoria puede contener pequeñas proporciones de sulfuros de calcio, hierro y manganeso, y otros óxidos más o menos libres o en uno u otro grado y forma de combinación, todos los cuales son considerados como constituyentes indeseables que se forman en la escoria como consecuencia de la necesaria extracción del azufre y de los álcalis de la fundición, y de la fijación al máximo de los mismos en aquélla.

A mayor basicidad de la escoria le corresponde una mayor capacidad de fijación o absorción de azufre por parte de la misma, de donde se deduce que, como se indicaba, la naturaleza de la ganga del mineral de hierro y de las cenizas del combustible determinan las características del fundente y la basicidad y composición de la escoria

En resumen, el proceso siderúrgico de formación de escoria, tal como se ha descrito, se puede representar esquemáticamente en la forma que se expresa en el Cuadro 5.

CUADRO 4		CUADRO 5		
M E L I L I T A S	C ₃ S	Alita	$\text{Mena y Ganga} + \text{Coque} + \text{Caliza (Dolomía)} \xrightarrow[\text{Reducción}]{\text{T}} \text{Horno Alto}$	
	C ₂ S	Belita (β)		
	CS	(pseudo)-Wollastonita		
	CAS ₂	Anortita	Horno Alto	Arrabio + Subproducto
	C ₂ AS ₂	Gehlenita	$\xrightarrow{\text{Reducción}}$	(Fundición) E S C O R I A
	C ₂ MS ₂	Akermanita		
	C ₃ MS	Merwinita	SACM	$\overline{\text{CS}} + \overline{\text{MS}} + \overline{\text{FS}} \quad \overline{\text{F}} + \overline{\text{F}} + \text{M} + \overline{\text{S}} + \text{T} + \text{N} + \text{K}$
	CMS ₂	Diópsido	Melilitas +	Sulfuros + Oxid os
	CMS	Monticelita	$\underbrace{\hspace{10em}}_{\text{deseables} \quad \text{indeseables}}$	
	M ₂ S	Forsterita		
MA	Espinela	P R O D U C T O S		

4. CARACTERÍSTICAS MINERALÓGICAS DE LAS ESCORIAS SIDERÚRGICAS

La composición química global de una escoria puede dar lugar a los constituyentes minerales del grupo de las melilitas ya señalados, más o menos cristalizados y/o a una mayor o menor proporción de fase vítreo-amorfa, la cual es, desde el punto de vista energético-potencial, mucho más activa e hidráulica que las fases cristalinas.

Aparte de la composición química de la escoria y de su basicidad e hidráulica expresadas por los respectivos índices, ésta última depende decisivamente y de forma bien directa del contenido de fase vítrea, hasta el punto de que en las escorias como adición para el clinker se exigen contenidos elevados, del orden del 95 % y superiores. Por ejemplo, en el Japón se consiguen de forma regular porcentajes de 98, y en Africa del Sur se exige no menos de 95 % en control interno, con valores prácticos no inferiores a 97 % y usuales de 98-99 %.

Tan importante es el contenido de vidrio para la hidráulica potencial de una escoria siderúrgica que, comparativamente, su composición química influye mucho menos, de tal forma que escorias con índices de hidráulica mediocres (por ejemplo, entre 1,5 y 1,7 según el índice DIN), dan excelentes resultados, con tal de que tengan porcentajes de fase vítrea del orden de los indicados.

Tales altos porcentajes se consiguen mediante enfriamiento rápido de la escoria fundida, por medio de aire o por templado con agua, de tal manera que los constituyentes de la escoria en equilibrio a la temperatura de fusión se mantengan como tales en estado vítreo a la temperatura ordinaria, por congelación brusca de dicho equilibrio. Son rechazables las escorias con más de 40 % de alúmina y con una proporción muy elevada de cal.

El simple enfriamiento al aire proporciona escorias muy cristalinas y sin propiedades cementicias, inservibles como adición al clinker, pero útiles para otros menesteres. El enfria-

miento forzado "con" aire, y más aún el templado "en" y "con" agua, da lugar a escorias muy vítreas y aptas para cementos. El vidrio se encuentra en las fracciones más finas de la escoria, que son las que más rápidamente se enfrían.

Las ventajas de un enfriamiento brusco de la escoria líquida, sobre todo por templado en agua, son múltiples:

- i) un aumento del contenido de fase vítrea y de la hidraulicidad potencial de la escoria, dependiendo también de la estructura del vidrio; en cualquier caso, parece que el contenido de vidrio no debe ser inferior al 50-60 %;
- ii) La evitación de la transformación $\beta \rightarrow \gamma$ del C_2S , cuando éste abunda, así como de la consiguiente pulverización de la escoria y pérdida de hidraulicidad por parte de la misma, al ser expansivo el proceso y no ser hidráulica la variedad γ del C_2S ;
- iii) la eliminación más completa del azufre indeseable como SH_2 y SO_2 , ya que la mayor parte de los sulfuros cálcico, ferroso y manganeso se descomponen por hidrólisis, cosa que no sucede en la escoria simplemente enfriada al aire;
- iv) la permanencia de la magnesia en forma vítrea, en lugar de cristalizar como periclasa, con la evitación de la posterior hidratación expansiva de esta última para formar brucita, consiguiéndose así escorias —y cementos derivados de ellas— estables. Esto permite la utilización de escorias altas en magnesia como adiciones hidráulicamente activas y no expansivas en los cementos.

En efecto, de cualquier modo parece que en la cristalización de una escoria en condiciones de equilibrio no se podría formar periclasa, incluso con contenidos de magnesia del orden del 20 %. De hecho, la periclasa en la escoria sólo sería posible cuando la relación molar entre C y M por una parte, y S por otra, fuese superior a la relación $(C + M)/S = 2$ de la monticelita CMS, y cuando no existiese melilita, pues ésta tiene mayor capacidad de fijación de magnesia, la cual se encuentra en ella más diluida y fija que en la akermanita C_2MS_2 .

Todo esto está en íntima relación con el problema de la limitación del contenido de magnesia en los cementos siderúrgicos, en algunas normas para cemento, y con el del ensayo de expansión en autoclave aplicado a éstos y otros cementos, acerca de lo cual hay siempre mucho que decir.

El proceso de templado con agua constituye la llamada *granulación* de la escoria, por dar lugar a un material granular de aspecto arenoso y forma angulosa. Por granulación selectiva se consigue hoy día ajustar a conveniencia el contenido de vidrio de las escorias, así como su densidad —masa volúmica— y, en general, sus características de calidad para diferentes empleos. La granulación se puede efectuar también con aire frío, o con aire y agua.

Otro factor importante para el contenido de vidrio en la escoria es la temperatura de partida en la granulación, ya que la granulación de escorias de baja temperatura puede dar lugar a cambios en la escoria que la conviertan en no apta como adición para cemento.

En la actualidad existe otro procedimiento de tratar la escoria a la salida del horno alto: la *peletización*, en la cual se forma un material rápidamente enfriado, esférico y muy vítreo. Esta técnica es y está siendo aplicada incluso a escorias de otras metalurgias no férreas.

Para peletizar se requiere un contenido de vidrio en la escoria no menor de 50-60 %. A veces, para desulfurar aparte el hierro líquido se emplea menor cantidad de fundente, con lo cual la sílice en la escoria pasa de 36-37 % a 40 % lo que no es conveniente, pues el índice hidráulico DIN llega a ser del orden de 1,4, es decir, bajo.

La escoria peletizada parece ser una solución de porvenir para la industria del cemento, pues, dada su naturaleza, la energía necesaria para su molienda es análoga a la requerida por el clínker y menor que la exigida por la escoria granulada, siendo por lo demás equivalente a ésta en cuanto a su empleo en cemento. El menor costo de la molienda y del transporte y secado, por su menor contenido de humedad, son circunstancias técnicas y económicamente favorables a la escoria peletizada.

5. HISTORIA Y ANTECEDENTES DE LOS CEMENTOS SIDERURGICOS

El conocimiento teórico de la capacidad hidráulica de las escorias siderúrgicas tuvo lugar en Alemania, como ya se ha indicado, y se remonta a 1822, y a 1887 en Francia. Su utilización práctica empírica se remite a finales del siglo XVIII, si bien la técnica y comercial en la fabricación de cementos de horno alto se desarrolló en el último tercio del XIX con MICHAELIS, y data de 1882 en Alemania, y de 1896 en USA, aunque en este último país no se afianzó su comercialización hasta 1938 primero, y hasta 1958 después.

El papel destacado de Alemania en el estudio de las escorias y de los cementos siderúrgicos se debe al gran desarrollo de la industria siderúrgica en dicho país, ya en las fechas de referencia, lo que exigía buscar y encontrar aprovechamientos técnicamente interesantes y económicamente rentables.

Se tenía al principio el temor de que los sulfuros contenidos en las escorias pudieran corroer las armaduras del hormigón, y de que los cementos de horno alto no endurecieran con suficiente rapidez al aire, por lo que se emplearon casi exclusivamente para obras marítimas y cimentaciones, usos en los que siempre han mostrado una gran resistencia química, mucho mayor que la de los cementos portland ordinarios.

Una primerísima razón para la utilización de las escorias, al menos en USA, fue la de aumentar la producción de cemento en épocas de escasez del material. Hoy día importa mucho más la conservación y el ahorro más directos de la energía en la fabricación del cemento —economizando clínker—, y sin que la escoria pierda su verdadera identidad, esto es, su potencial hidráulico latente, y tanto más cuanto que en el presente, como ya se indicaba, hay sistemas para obtener escorias de características adecuadas que hacen de ellas un material utilizable y rentable. En definitiva, ha cambiado su imagen de una época en la que era un subproducto de escaso valor y de un mercado muy limitado, porque la industria siderúrgica se preocupaba sólo del arrabio y poco o nada de la escoria.

En cementería se pueden utilizar las escorias de dos modos: molidas finamente y mezcladas con el clínker (por molienda conjunta o separada) en los cementos siderúrgicos, como queda indicado, y como materia prima, formando parte del crudo de alimentación de los hornos. En este segundo caso las escorias sí pierden su identidad hidráulica, hasta el punto de que para este fin vale cualquier escoria: básica de horno alto, básica de acería, altamente magnesiánica, enfriada o templada, e incluso de metalurgias no férreas, como las de cobre, níquel, zinc, aluminio, etc., entre otras. Algunas de éstas —las de níquel, cobre y aluminio— se emplean a veces como puzolanas.

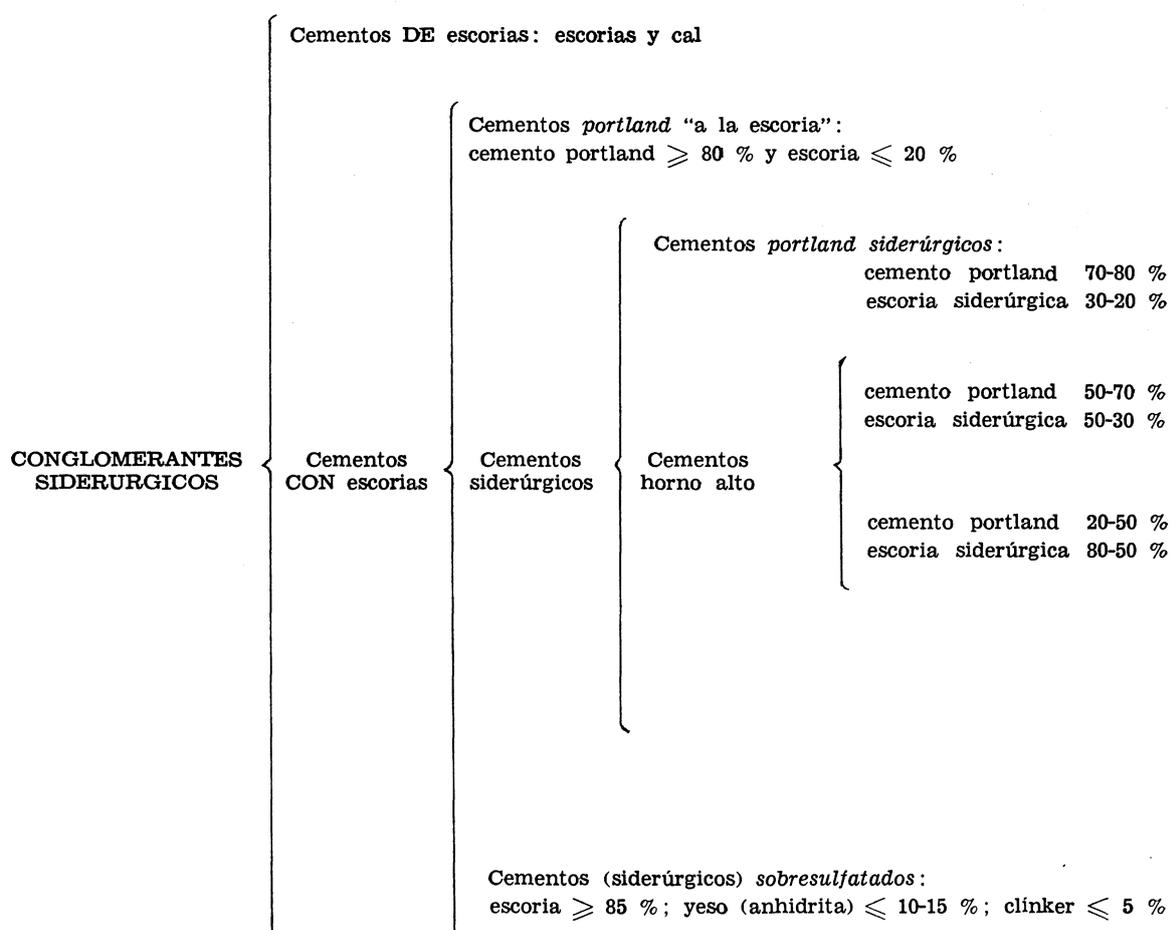
En Japón se aprovecha aproximadamente el 20 % de la producción de escorias granuladas en agua o enfriadas al aire, según los casos, como materia prima para crudo de clín-

ker, como adición a éste en el molino de cemento —cemento de horno alto—, o como adición al hormigón en obra.

Los primeros *cementos de escorias* fueron mezclas de cenizas molidas con cal hidratada, y el último adelanto en la materia lo constituyó, tal vez en su día, el *cemento supersulfatado* o *sulfosiderúrgico*, a base de escoria, yeso y/o anhidrita, y clínker. Cemento éste de peor conservación que el portland y de muy delicado empleo y tratamiento, aunque sumamente resistente al ataque de los sulfatos. Entre medias están los ya citados *cementos portland siderúrgicos* o *de horno alto*.

Si se hubiera de representar sinópticamente un cuadro empírico de los conglomerantes hidráulicos que contienen escorias siderúrgicas (conglomerantes siderúrgicos), y arbitrario —o convencional— en cuanto a los límites de composición que separan a unos y otros cementos dentro de dicho cuadro, éste podría ser el Cuadro 6. Sus límites se ajustan a los de las tres clases de cementos siderúrgicos incluidos en las actuales Normas Españolas para cemento. El criterio de sinopsis se basa en el tipo principal de activación —alcalina o sulfática— de las escorias, y en la naturaleza del activador alcalino —cal o clínker de cemento portland—, así como en el carácter más o menos predominantemente “aéreo” o “hidráulico” —cal— o exclusivamente hidráulico del conglomerante activador. Otra diferencia entre cementos siderúrgicos y supersulfatados reside en la relación SO_3 %/clínker %, que en los primeros no suele ser superior a 0,25, ni en los segundos inferior a 0,60.

CUADRO 6



6. LA FABRICACION DE LOS CEMENTOS SIDERURGICOS

Sentada la base de un ahorro sustancial de energía —o de conservación de la misma— en la fabricación de estos cementos, dicho ahorro es más o menos proporcional a la sustitución de clínker por escoria en los cementos siderúrgicos. En tal sentido los mayores ahorros se consiguen con porcentajes de hasta 80 (cementos S-III de las Normas Españolas).

El ahorro de energía queda de manifiesto en los términos de los Cuadros 8, 9 y 10, en relación con el Cuadro 7 de partida, tanto para la vía seca de gran rendimiento como para la vía húmeda de rendimiento escaso, con el uso de adiciones activas al clínker (escorias siderúrgicas y cenizas volantes de centrales termoeléctricas). Se supone en estos cuadros que no hay gastos de transporte ni trituración y secado de escorias ni, en su caso, de cenizas volantes.

En una planta de granulación de escoria se puede considerar que no hay ahorro respecto de una producción equivalente de cemento, pues si bien no tiene costos de extracción de cantera, ni de machacadora y transporte de materias primas, ni de molino de crudo, éstos se ven compensados por los de compra, granulación y secado de la escoria. Por otra parte, si bien ésta no supone gasto de horno, el de su molienda puede ser el doble que el de la del clínker. Con todo, el consumo específico total de energía de la escoria no es mayor que el del cemento.

CUADRO 7

Vía seca de gran rendimiento	Vía húmeda de bajo rendimiento
140 kWh = 120.400 kcal	96 kWh = 82.560 kcal
879 kWh = 756.000 kcal	2.051 kWh = 1.764.000 kcal
2.268 kcal/kWh en grandes termoeléctricas	
1.019 kWh = 876.400 kcal	2.147 kWh = 1.846.560 kcal

CUADRO 8

*Comparación de los consumos de combustibles
Cementos portland frente a cementos compuestos*

Fábrica de vía seca de gran rendimiento						
Consumo energético en Kcal/t (× 1.000)						
Escoria %	Ceniza %	Secado de la escoria (10 % H ₂ O)	Molienda de la escoria (90 kWh/t)	Utilización de la ceniza	Producción de cemento tipo I	TOTALES
0	0	0	0	0	1.185	1.185
50	0	60	115	0	590	765
0	20	0	0	12	948	960
Fábrica de vía húmeda de bajo rendimiento						
0	0	0	0	0	2.185	2.185
50	0	60	115	0	1.090	1.265
0	20	0	0	12	1.750	1.762

C U A D R O 9

Comparación de los cementos tipos I, IS e IP usuales

Tipo de cemento	I	IS	IP
Clinker %	100	50	80
Costo clinker	28/48	14/24	22.4/38.4
Escoria %	0	50	0
Costo escoria	0	5	0
Ceniza %	0	0	20
Costo ceniza	0	0	2
Costo molienda	8	12	6
TOTALES	36/48	31/41	30.4/46.4
Costo de los componentes:			
Escoria y ceniza 10 \$/t.			
Molienda separada de la escoria a 5.000 cm ² /g 16 \$/t.			

C U A D R O 10

Influencia del costo del transporte de la escoria o de la ceniza para dos costos distintos de clinker

Clinker %	Tipo I		Tipo IS						Tipo IP					
	100	48.00	65		50		30		80		70		60	
Costo de producción por t	28.00	48.00	33.50	41.30	31.00	37.00	28.80	32.40	34.00	40.40	28.20	36.60	25.60	32.80
Costo de transporte por t escoria o ceniza	0	0	2.10	2.10	3.00	3.00	4.20	4.20	1.20	1.20	1.80	1.80	2.40	2.40
TOTALES	28.80	48.00	35.60	43.40	34.00	40.00	33.00	36.60	35.20	41.60	30.00	38.40	28.00	35.20

Precisando más, el ahorro de energía en la fabricación de cementos siderúrgicos es equivalente al correspondiente de fuel en el horno —por lo menos—, y puede llegar a ser hasta el 40 % del costo total de la producción de cemento portland, y tanto mayor cuanto mayor sea en el futuro el costo del fuel a causa de las subidas sucesivas del mismo.

En valores numéricos aproximados, la inversión de capital en equipo necesario por tonelada de escoria "L" granulada producida, se estima en USA alrededor de 1/2 del correspondiente al equipo equivalente de producción de cemento, y la granulación consume de 1/5 a 1/10 de la energía total necesaria para dicha producción. Adicionalmente se invoca que la regularidad de calidad de la escoria producida es mucho mayor que la del clinker y que la de las cenizas volantes —menor coeficiente de variación—.

Sin embargo, los gastos de transporte de las escorias —o de las cenizas volantes—, pueden hacer antieconómicos los cementos con tales adiciones activas —o constituyentes secundarios, según la denominación francesa— para ciertas fábricas. De hecho, algunas con

bajo costo de producción pudieran estar poco interesadas en la fabricación de estos cementos, salvo por lo que respecta al consiguiente aumento de su capacidad de producción (una de las primeras razones de ser del uso de las escorias siderúrgicas en cementería, al menos en USA).

En cambio, las fábricas con alto costo de producción de clínker, con la utilización de las escorias —y de las adiciones en general—, pueden ver aumentada su capacidad de producción por una fracción del costo del capital requerido para una planta de producción de cemento equivalente al aumento de la misma conseguido con el empleo de adiciones. Es decir, se aumenta la capacidad de producción sin inversiones, ahorrando energía y produciendo cementos de características y usos específicos, con ventaja en muchos aspectos sobre los cementos portland ordinarios.

En tal sentido, en países de la Europa Occidental (Francia) se fabrican cementos hasta con 4 componentes: clínker, escorias, cenizas volantes y fillers calizos. En todo caso, la fabricación de estos cementos constituye para las fábricas un problema de ensilado, y más habida cuenta de que entre un mínimo de 25 % y un máximo de 65 % (en general) de escorias contenidas en ellos, se pueden fabricar cementos con distintas proporciones, según usos y destinos.

Un problema técnico que ha preocupado y preocupa a fabricantes y usuarios de cementos que contienen escorias es el de la molienda conjunta o por separado (con mezcla y homogeneización posterior) de sus componentes, escoria y clínker. En general, la escoria es aproximadamente el doble de dura y difícil de moler que el clínker, para obtener de ambos igual superficie específica, y, por lo tanto, se refina menos en una molienda conjunta. Esto lo pone de relieve el hecho de que el rendimiento específico de la molienda decrece —el consumo específico aumenta—, de moler cementos portland a moler cementos siderúrgicos hechos con un mismo clínker, y, dentro de los cementos siderúrgicos de un clínker dado, cuanto mayor es la proporción de escoria. No obstante, las escorias más aluminicas y mejor granuladas son más blandas que las muy básicas —cálcico-magnésicas—, e incluso que el clínker, sobre todo si éste está muy bien cocido. Por ello son más aptas para la molienda conjunta con dichos clínkeres, con lo cual no es tan necesaria —aunque siempre sea conveniente— la molienda por separado, al poderse obtener con la conjunta granulometrías adecuadas. Esto pone claramente de manifiesto la necesidad de una adecuación entre escorias y clínkeres en cuanto a la adopción de un tipo u otro de molienda (como en otros muchos aspectos).

En general, en la molienda conjunta el clínker se refina más, por ser más blando y porque la propia escoria actúa sobre él como elemento molidor. Al ser conveniente que el clínker se refine lo suficiente —pero no en demasía— para que la hidrólisis de los silicatos sea más rápida y masiva, y se libere gran cantidad de cal para el desarrollo de la capacidad hidráulica de la escoria en menos tiempo, e incluso para que tenga lugar en alguna medida una cierta acción puzolánica posterior, parece más conveniente la molienda por separado, ya que así también se puede refinar más la escoria y aprovechar más a fondo su capacidad hidráulica potencial. Y, sobre todo, si se tiene en cuenta además que en la molienda conjunta, al actuar la escoria, como se ha dicho, de elemento molturador, puede tener lugar un recubrimiento parcial de los gránulos de clínker por polvo del ya refinado, con lo cual resulta más difícil la molienda y el refinado de la parte aún gruesa del mismo. El resultado podría ser, exagerando tal vez la nota, que la fracción de clínker en el cemento siderúrgico tuviese una granulometría distinta de la del cemento portland ordinario del mismo clínker y para la misma superficie específica, en el sentido de presentar una mayor proporción de partículas demasiado finas e incluso también de más gruesas en el clínker y, por consiguiente, menor proporción de partículas intermedias, junto a las partículas de escoria, en las cuales abundarían las más gruesas del conjunto.

Todo esto daría lugar a la circunstancia de que, con arreglo al esquema de la Figura 2, en relación con la recta X representativa del cemento siderúrgico en conjunto, la recta representativa de la escoria fuese la A o la C, y la del clínker la B o la D, al contrario de lo que debe ser. Y todo esto, al suceder así para cualquier finura final y de conjunto del cemento, puede tener implicaciones en la demanda, absorción, retención y exudación del agua por parte del hormigón, así como en la retracción plástica del mismo.

Esto está agravado por el hecho de la distinta forma geométrica de las partículas de escoria, lo cual puede influir perjudicialmente en la trabajabilidad —transporte, puesta en obra y compactación— de los hormigones de cementos siderúrgicos. En cambio, en la molienda por separado y mezcla homogénea posterior, se puede conseguir que las partículas de escoria sean iguales o menores que las del clínker, lo cual es bueno, y tanto mejor cuanto mayor es la proporción de escoria en el cemento (por ejemplo, 50:50); en esta proporción de mezcla las partículas de escoria presentan los suficientes planos de deslizamiento en la pasta para que sobre ellos resbale el gel, ejerciendo así una acción y un efecto lubricantes. A ellos se suma el efecto de la menor absorción de agua por parte de la escoria, en relación con el clínker, lo cual permite obtener hormigones de buena plasticidad con menores relaciones a/c. Sobre este mismo aspecto se insiste más adelante.

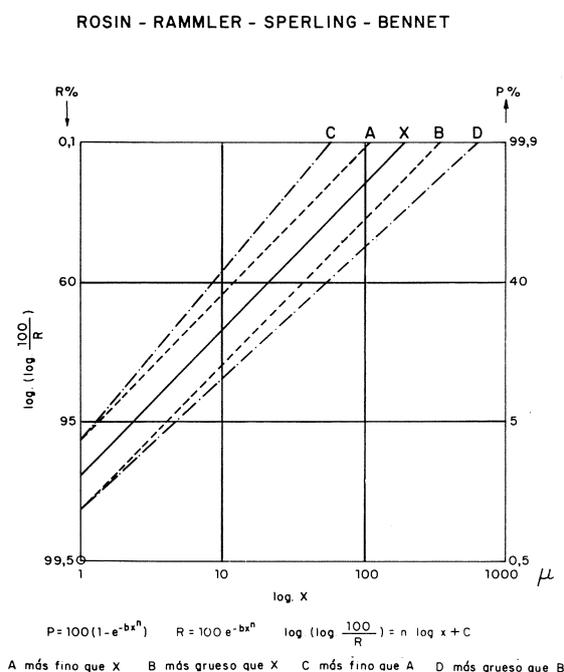


Fig. 2

Por otra parte, si bien es cierto que la finura influye directamente en la velocidad de reacción —hidratación— y por lo tanto en la rapidez con que se desarrollan las resistencias del cemento, no es menos cierto que el tratar de ganar resistencia a muy corto plazo con el empleo de los cementos siderúrgicos, a base de forzar la finura de los mismos en una molienda conjunta, es casi infructuoso y muy caro. Lo primero, porque la mayor finura del conjunto afecta muy poco a las resistencias tempranas, ya que las escorias son mucho más lentas que el clínker en sus reacciones de hidratación; y lo segundo, porque pasar de una finura de 4.000 BLAINE a otra de 5.000 puede suponer de 35 a 45 kWh/t, dependiendo de la molturabilidad de la escoria. Por otra parte, la recomendación de efectuar una molienda separada de componentes, con menor consumo de energía de molienda, y un mezclado de los mismos, bien subsiguiente o bien al tiempo del suministro o expedición del cemento, tropieza con el inconveniente de exigir equipos costosos de mezcla y homogeneización, y más instalaciones intermedias o complementarias de ensilado, variando mucho los costos de todo ello según los casos y habiéndose de realizar el estudio técnico-económico correspondiente en cada caso particular. Por ello, a pesar de todo aún se practica más hoy la molturación conjunta, si bien en algunos países es permisible la separada, teórica y técnicamente preferible siempre, por lo ya expuesto.

Experiencias españolas ya antiguas pusieron de relieve en su tiempo que la molienda separada, en relación con la conjunta y para residuos similares sobre tamices de 900 y 4.900 mallas/cm², proporciona, para los mismos cementos siderúrgicos y de horno alto, mayores resistencias a tracción, y sobre todo a compresión del hormigón, particularmente a las primeras edades.

Se han arbitrado soluciones intermedias consistentes en moler previamente el clinker en un cierto grado, y refinar después la mezcla con escoria.

Existe también la posibilidad de moler la escoria en húmedo para formar una papilla con 70 % de material sólido y emplearla en obra, o mejor en taller, mezclada con el cemento y los áridos. Esto se ha llevado a cabo con éxito en la fabricación de grandes bloques prismáticos para escolleras, de alrededor de 90 t (de unos $4 \times 3,5 \times 3$ m). Si la papilla se ensila y/o transporta, su temperatura no debe aumentar demasiado, pues a 70°C se hace inestable y comienza a coagular.

En la molienda por separado se suele moler la escoria aproximadamente a 5.000 BLAINE, a fin de conseguir con mezclas 50:50 resistencias a 3 y 7 días análogas a las de un cemento portland equivalente, aunque por lo ya expresado, las resistencias anteriores a las de 3 días sean algo más bajas que las de éste. En la molienda conjunta la finura final del cemento depende también del clinker, por lo que es conveniente optimizarla en cada caso, teniendo en cuenta las características del clinker y de la escoria en cuanto a molturabilidad de uno y otra. Es un hecho comprobado que las escorias que proporcionan menores resistencias, a igualdad de todo lo demás, son las más fáciles de moler; y viceversa.

Cabe indicar, finalmente, que la preparación de cementos siderúrgicos exige clinkerés algo distintos que los de los portland ordinarios —“clinkerés metalúrgicos”—, a saber, ricos a la vez en C_3S y C_3A , para lo cual se pueden utilizar las propias escorias como materia prima componente del crudo. Conviene asimismo dar a éste un grado de saturación (de LEA y PARKER) superior a 100, con objeto de que el clinker contenga cal libre en cantidad mayor que la normal, y tal que lo haga inestable al ensayo de expansión LE CHATELIER.

Por último, cabe añadir que en Alemania sólo se permite la molienda conjunta, y en Japón tanto ésta como la separada, con mezcla posterior de los componentes en fábrica. Lo mismo en Canadá. En Dinamarca existe el comercio separado de la escoria por falta de reglamentación; y en USA, donde el empleo de las escorias parecería que debiera gozar del mismo entusiasmo por parte de la industria cementera que la reconversión de las fábricas al carbón, las recomendaciones se dirigen más bien hacia el uso de las escorias como adición en la hormigonera, sin que falten los que prefieren su granulación para mezclarla con el clinker. Hay, pues, opiniones encontradas. La solución debería depender, en cada caso, del valor de la escoria para cada empleo, incluidos todos los posibles, aun cuando en USA se da la circunstancia de que, al parecer, toda la escoria es químicamente apta para cemento. En Japón, por ejemplo, se emplean las escorias siderúrgicas en todas las modalidades de usos y aplicaciones.

7. LA UTILIZACION DE LOS CEMENTOS SIDERURGICOS

Una cuestión previa en este punto es que, dado que la preparación de las escorias en las plantas siderúrgicas y su utilización en las fábricas de cemento requieren unos ciertos tratamientos y los correspondientes equipos para los mismos, si hay poca demanda de escorias se corre el riesgo de ser suministradas las enfriadas por aire —no templadas—, con escaso contenido de vidrio y exigua hidraulicidad potencial, y con la consiguiente mediocridad de los cementos correspondientes. El adecuado control en éste como en tantos otros aspectos es imprescindible.

Las ventajas económicas y de muchos otros órdenes, de la fabricación y utilización de los cementos siderúrgicos, se obtienen a costa de una menor resistencia mecánica a edades inferiores a los 3 días, de los hormigones hechos con estos cementos, dado su endurecimien-

to algo más lento. Por ello requieren una molienda más fina (los cementos) y un curado más esmerado (los hormigones), sobre todo si se hormigona en tiempo frío o a bajas temperaturas. Y por ello son precisos también tiempos más largos para el desencofrado y el descimbrado a corto plazo, aun cuando se han invocado plazos normales de desencofrado, incluso con cementos 60:40. La disminución de resistencia a corta edad causada por la escoria es aproximadamente proporcional al contenido de la misma en el cemento.

Salvo en este aspecto, en los demás los cementos siderúrgicos son equiparables a los portland ordinarios, por cuanto que sus resistencias mecánicas a plazos medios y largos son iguales e incluso bastante superiores a las de éstos.

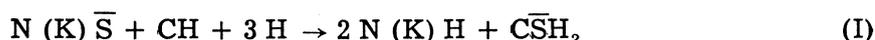
En efecto, hay contenidos óptimos de escoria que dan a 3, 7 y 28 días las mejores resistencias, superiores inclusive a las de un cemento portland equivalente a efectos comparativos, dependiendo de la relación a/c y del curado. Estos óptimos de escoria se sitúan alrededor del 40 % y varían con la escoria y con el clínker, como ya se ha expuesto, y con la finura de molido del conjunto (curva granulométrica).

Son varias las ventajas de otros órdenes que los cementos siderúrgicos presentan por sus características y comportamiento, función de la proporción de escoria que contienen.

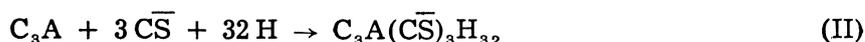
En primer lugar, en el aspecto de la estabilidad y durabilidad de sus hormigones. Su menor calor de hidratación —cementos “fríos”—, desprendido en tiempo más largo, disminuye el riesgo de retracción térmica y de fisuración y agrietamiento, por lo que pueden ser empleados con ventaja en hormigones masivos de presas, cimentaciones y obras subterráneas, incluso con dosificaciones altas de cemento, cuando se requiere una gran impermeabilidad. Este fue uno de los motivos de las primeras utilizaciones de estos cementos, los cuales presentan también menor retracción hidráulica.

Por otra parte, son cementos que proporcionan hormigones de alta resistencia química frente a los ataques por sulfatos y por agua de mar, aptos por lo tanto para obras marítimas y en terrenos yesíferos, y tanto más cuanto mayor es su contenido de escorias. En este aspecto el óptimo se sitúa por encima del 65 %. Se ha dicho alguna vez que las escorias ricas en alúmina hacían disminuir la resistencia de estos cementos a los sulfatos, pero no parece ser así cuando la dosis de escoria en ellos es del orden de 65 % o superior. Esta acción positiva se da con cualquier tipo de clínker (tipo II o tipo V ASTM), con distintos contenidos de C_3A . Los cementos siderúrgicos 50:50 son igualmente resistentes a los sulfatos que los portland específicamente resistentes (SRPC), y a finuras del orden de 4.000 BLAINE dan resistencias mecánicas a 28 días del orden del 100 % de la de los cementos portland equivalentes.

Desde el punto de vista químico esto es así porque la escoria actúa como reductor y diluyente de los constituyentes vulnerables o nocivos del clínker, como el C_3A y los álcalis, y de la cal de hidrólisis de los silicatos cálcicos en la pasta hidratada. Con ello se atenúa la formación expansiva de yeso cristalizado y de ettringita en un ataque por sulfatos o por agua de mar, pues el cemento siderúrgico presenta menos C_3A y su pasta cementante menos CH, necesarios ambos para la formación de yeso según (I):



y para la formación de ettringita según (II);



la cual requiere, además, un medio sobresaturado de CH.

La penetración de iones cloro Cl^- en pastas, morteros y hormigones de cemento siderúrgico parece ser mucho más lenta. Esto se ha comprobado por ensayos basados en ciclos de inmersión intermitente de probetas en disoluciones de cloruro cálcico, alternados con secado al aire de las mismas. Se midió el potencial eléctrico de hierros de armadura embebida en hormigón, frente a un electrodo de Cu/CuSO_4 , ya que este potencial da una medida de la tendencia a la corrosión, pues cuanto mayor es el potencial negativo, mayor es la probabilidad de la misma. Al propio tiempo se midió analíticamente la penetración de Cl^- . Se observó que la tendencia a la corrosión es mayor para relaciones a/c cada vez mayores, pero menor en las probetas de cementos siderúrgicos con 40, 50 y 60 % de escorias, ya que en ellas la penetración del ión cloro se retarda en relación con las probetas de cemento portland. Esto prueba una mayor impenetrabilidad de las pastas de cementos siderúrgicos a los iones cloro, y probablemente también a otros iones agresivos, como por ejemplo los iones sulfato.

Los potenciales del hierro se mantienen en valores negativos bajos, del orden de -10 a -250 mV en probetas de relación a/c = 0,55 con cementos de escorias —y sin presentar los hierros señales de corrosión—, mientras que en las probetas de cemento portland se aprecian, en las mismas condiciones, potenciales de -450 a -500 mV con señales evidentes de corrosión en los hierros. No obstante, estas observaciones deben ser en todo caso confirmadas en las condiciones prácticas reales de cada situación particular.

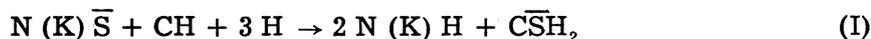
En cuanto al contenido de sulfuros de las escorias siderúrgicas, a efectos de la corrosión de las armaduras, aquéllos desaparecen con rapidez —tal vez por hidrólisis de los sulfuros de calcio, hierro y manganeso—, sin producir expansión —por oxidación a sulfatos y reacciones subsiguientes de éstos—, y, según se dice en algún lugar y por algún autor, sin producir corrosión, incluso en hormigón pretensado. Sin embargo, esto último hay que tomarlo con la máxima reserva y precaución y, sobre todo, no extrapolándolo ni generalizándolo a todas las escorias ni a todos los cementos siderúrgicos, ni a todos los casos prácticos, pues casos hay en los que se producen roturas frágiles de alambres pretensados por fenómenos complejos de corrosión fisurante, intercrystalina y/o transcrystalina del hierro, por fragilización del acero a causa del hidrógeno electrolítico que se puede formar y que penetra en la estructura del metal, todo ello complicado por el hecho de la fatiga de éste sometido a una tensión constante —corrosión bajo tensión—.

El menor contenido de cal de hidrólisis de las pastas de cementos siderúrgicos, que en determinados aspectos como los ya vistos de su mayor resistencia al ataque por sulfatos y agua de mar constituye una innegable ventaja, en otros aspectos puede ser un inconveniente, pues la menor “reserva alcalina” de dichas pastas, aun cuando su pH sea el mismo que el de las pastas de cemento portland, en medios agresivos puede disminuir tanto que lleguen a darse condiciones propicias para la corrosión por falta, en un momento dado, de la necesaria y suficiente protección —pasividad— del hierro. Esta situación puede verse agravada por la presencia y acción despasivante de los iones cloro.

En otro aspecto diferente, los cementos siderúrgicos reducen considerablemente los efectos de la expansión causada por la reacción árido-álcalis entre agregados sensibles a ella y los álcalis (no sólo del cemento, sino los totales contenidos en el hormigón, tanto de origen interno —los de sus materiales—, como de origen externo —por penetración de los mismos desde el medio ambiente—). Esto tiene una gran importancia en la actualidad —y tal vez más todavía de cara al futuro—, pues, a mayor rendimiento de los hornos de clinkerización, mayor retención y acumulación de álcalis en forma de sulfatos se produce en el clínker y en el cemento. Los efectos de ambas se reducen con la sustitución parcial de clínker por escoria en los cementos siderúrgicos, ya que, además del efecto de dilución de los álcalis, éstos reaccionan rápidamente con la escoria —lo mismo que lo harían con los áridos reactivos—, quedando así eliminados para la reacción expansiva.

El fenómeno tiene una explicación, lo mismo que en el caso de los cementos puzolánicos, tanto de orden químico como físico.

En el aspecto químico la escoria actúa, como se ha indicado, de reductor y diluyente de los álcalis del clínker, como asimismo de la cal de hidrólisis de la pasta, con lo cual la reacción (I) anterior:



vista ahora desde el lado de la formación de hidróxidos alcalinos, se minimiza.

Además, la reducción y dilución de los álcalis del clínker y la disminución de su formación por penetración de sulfatos alcalinos del exterior —por ejemplo, de aguas marinas—, y la reducción y dilución de la cal de hidrólisis en la pasta, ejercen una inhibición o impedimento sobre la formación de silicatos cálcico-alcalinos operantes en la reacción expansiva entre áridos susceptibles y álcalis, y que esquemáticamente se podría representar así (II):



En el aspecto físico la explicación es de muy distinta naturaleza: la sustitución de acciones poco numerosas y muy intensas y localizadas, por muchas acciones muy dispersas y de muy escasa intensidad, mucho más soportables y con mucho menos daño. Esto se debe precisamente al hecho a que la escoria es un “árido” reactivo que, molido a gran finura, como en el cemento siderúrgico, redobla su actividad ganándole la partida a los verdaderos áridos susceptibles, frente a los álcalis. En esto mismo estriba la explicación de otros medios de conseguir neutralizar, al menos en parte, los efectos de la expansión árido-álcalis, cuando no hay más remedio que utilizar áridos reactivos, incluso con cementos ricos en álcalis.

Otro efecto positivo de la reducción y dilución de CH en las pastas de cementos siderúrgicos es la eliminación o disminución del riesgo de expansión adicional por formación de brucita, cuando un ataque por sulfatos alcalinos según (I) está sustituido por o va acompañado de un ataque por sulfato magnésico, como en el caso del agua de mar, según (III):



en el cual, además de la brucita se forma también yeso, como en (I).

Y, finalmente, la pasta de cemento siderúrgico, con menor proporción de CH, resiste mejor los ataques por aguas puras, ácidas y carbónicas agresivas, al no producirse tanta lixiviación de cal de hidrólisis, ni las reacciones de ataque (IV) y/o (V) con tanta intensidad:



Por todo ello, los cementos siderúrgicos se utilizan preferentemente:

- i) en hormigones en masa de presas, embalses y obras de contención, en general;
- ii) en cimentaciones en toda clase de terrenos y, en particular, agresivos por yesos y otros sulfatos;
- iii) en la fabricación de tetrápodos y “dolos” (“tabas”) para diques de escolleras y rompientes y, en general, para todo tipo de obras marítimas, sumergidas, aéreas o mixtas;

- iv) en la construcción de desagües y vertederos industriales, de albañales y alcantarillados, y de canalizaciones conducidas por tierras de labor. En este orden de ideas, experiencias de durabilidad con cementos siderúrgicos 50:50 han dado excelentes resultados frente a acciones de nitrato amónico y nitrato cálcico;
- v) en silos para vegetales y productos derivados (una adición de 50 gramos por litro de bisulfito sódico en el agua de amasado evita el olor por desprendimiento de gas sulfhídrico).
- vi) en depósitos y tubos de conducción de agua potable tratada con desinfectantes y bactericidas los cementos siderúrgicos son tan utilizables como los portland;
- vii) en obras en contacto con gases de combustión que contengan óxidos de azufre;
- viii) en hormigones con áridos reactivos con álcalis, cuando no se disponga de otros;
- ix) en carreteras de hormigón y pistas de despegue y aterrizaje de aviones, por la poca tendencia de estos cementos al agrietamiento y por su menor fragilidad —baja relación entre sus resistencias a compresión y a flexión, dado el alto valor relativo de ésta última—.
- x) en pistas de hormigón sujetas a heladas y al empleo de sales de deshielo (en paridad con los cementos portland).

Por otra parte, las escorias siderúrgicas de los cementos juegan en el hormigón otros papeles importantes en aspectos físicos relativos a la trabajabilidad, a la compacidad, a la impermeabilidad y a la penetración iónica, como ya se ha visto.

En cuanto a la trabajabilidad —facilidad de puesta en obra y compactación del hormigón—, por una *acción lubricante* ya mencionada, promovida por la distinta forma y características superficiales de las partículas de escoria respecto de las de clínker. Las de éste, por alteración incipiente —meteorización (aireación): hidratación y carbonatación parciales—, forman rápidamente en los primeros momentos del amasado y de la hidratación un gel que tiende a rigidizar en cierta medida la pasta; y, a pesar de que dichas partículas son más redondeadas (esferoidales) y en consecuencia deberían proporcionar una mayor plasticidad al hormigón, por lo ya dicho sucede lo contrario. En cambio, pese a la forma más angulosa de las partículas de escoria, las superficies de fractura de éstas son más limpias y lisas y, como se ha indicado, actuando como inertes —como árido fino— proporcionan planos de deslizamiento que favorecen la plasticidad, incluso con menores relaciones a/c. A este efecto se une el de la corrección de la granulometría del árido, sobre todo cuando en éste escasean las fracciones más finas, siendo esta acción análoga a la aportada por algunos “plastificantes” sólidos pulverulentos, utilizados antaño como aditivos para hormigón.

Estas mismas acciones y efectos influyen favorablemente en la compacidad y en la impermeabilidad, así como en la menor penetrabilidad iónica ya mencionada, lo cual explica parcialmente la mayor resistencia de los hormigones de cementos siderúrgicos a los ataques químicos en general, y a los de sulfatos y agua de mar, específicamente.

En cuanto al proceso de fraguado, su comienzo se retrasa algo (unos 15 minutos) a temperaturas ordinarias (de 15 a 25°C) y sobre todo para relaciones a/c altas, en el caso de los cementos siderúrgicos. Estos son especialmente aptos para tratamientos higrotérmicos del hormigón, tanto con vapor libre como a presión en autoclave. En este último caso se comportan mucho mejor los cementos siderúrgicos con menores contenidos de escorias.

En los hormigones con aire ocluido la cantidad necesaria de agente inclusor de aire aumenta algo con el contenido de escoria en el cemento, sobre todo para relaciones a/c bajas.

Como resumen y en general, las dosis óptimas de clíker y escoria en los cementos siderúrgicos para obtener buenas resistencias aceptables a todas las edades —salvo las muy cortas— oscila alrededor de 40:60. Pueden ser de 30-40:60 para hormigón estructural en invierno, y tal vez algo mayores por lo que respecta a la escoria, en verano.

Una última consideración respecto de las cuestiones relativas al mercado de los cementos siderúrgicos: si éste no existe previamente, la introducción de estos cementos —o de cualesquiera otros con distintas propiedades, características, comportamiento y prestaciones que los cementos portland ordinarios, bien conocidos y acreditados—, exige un servicio técnico y de información al usuario, para que éste haga de ellos una utilización adecuada —no “standard”—, y con las debidas precauciones.

Factores a tener en cuenta al respecto, en cuanto a la posible aparición de problemas, son, entre otros:

- a) la dosificación de aditivos a los hormigones con cementos siderúrgicos —y, en general, no portland “puros”—;
- b) el comportamiento a largo plazo de estos cementos en hormigones pretensados —en su caso—;
- c) los niveles óptimos de SO_3 de estos cementos en función de las propiedades de las escorias —en general, de las de cualquier adición—, y de la finura. Este es un problema que afecta ante todo al fabricante del cemento;
- d) los contenidos óptimos de escoria (o de cualquier otra adición para los distintos usos de los cementos, en función de la durabilidad de los hormigones —resistencia química a sulfatos, agua de mar, etc.—). Esto incumbe por igual a fabricantes y a usuarios.

En cualquier caso, los cementos siderúrgicos —como cualquier otro material de construcción— requieren un nivel de calidad suficientemente alto y constante para crear y/o mantener su mercado, garantizado en primer lugar por el autocontrol de los fabricantes. A este respecto serían deseables unas especificaciones realistas y honestas que recogieran la experiencia y los avances logrados en todos los países. Tal parece ser lo que se espera en USA de las Normas ASTM, respecto de los cementos siderúrgicos.

En definitiva, las mayores ventajas de la utilización de las escorias siderúrgicas en la fabricación de los cementos (portland) de horno alto, estriban en:

- A) su menor calor de hidratación;
- B) su mayor estabilidad dimensional;
- C) la mejor reología y plasticidad de sus pastas;
- D) la mayor densidad y compacidad de las mismas;
- E) su mayor resistencia química, en general;
- F) su ventaja frente a áridos reactivos con álcalis;
- G) su aptitud para los tratamientos higrotérmicos;

8. LAS ESCORIAS SIDERURGICAS EN EL HORMIGON

Por razones complejas, entre las cuales las puramente técnicas parecen ser las que menos pesan, se ha desarrollado en algunos países una comercialización de las escorias siderúrgicas para ser utilizadas directamente como componentes del hormigón, bien en centrales hormigoneras o bien en obras.

Se consideran aquí únicamente las razones técnicas aducidas. La principal se basa en las ventajas de la molienda separada de la escoria, la cual permite una total variabilidad de dosificación de la misma en las plantas hormigoneras o en las obras, en función de sus características y en manos del usuario, en contraposición a la molienda conjunta de escoria y clínker en las fábricas de cemento, la cual, por razones obvias, no permite variar mucho sobre la marcha las proporciones de mezcla, según la calidad de la escoria, en un número grande de cementos, para obtener con rapidez y agilidad hormigones de características determinadas.

Se aduce que con la escoria molida aparte a una finura adecuada y añadida en la hormigonera, se consiguen hormigones de mucho mejor trabajabilidad que los de cemento portland sin adición, o que los de cemento siderúrgico de molienda conjunta, lo cual permite reducir más en muchos casos la relación a/c. Esto tiene que ver con los efectos lubricantes y compactantes ya señalados, y que se dan también en cierta medida en los cementos siderúrgicos, como se ha expuesto.

El peligro del uso de la escoria molida por separado reside precisamente en tantas facilidades y, sobre todo, en la obsesión peligrosa por el *ahorro de cemento* en las obras, al querer ver en la escoria un sustitutivo a ultranza y a "la par" del cemento portland. A este respecto se llega a considerar no sin cierta razón, pero sí con gran riesgo, que la escoria se puede usar para aumentar la resistencia mecánica del hormigón o, a igualdad de resistencia, para *economizar cemento*. No se olvide en este aspecto el hecho de que uno de los mayores incentivos para el constructor o usuario del cemento es la *reducción de costos* en las más diversas formas, incluida la del ahorro, a veces excesivo y siempre peligroso, de cemento. Y tampoco se pierda de vista el hecho, tal vez no casual, de que la escoria molida y comercializada en Gran Bretaña lleva el nombre "comercial" de "CEMSAVE".

La sustitución —¿o tal vez mejor "suplantación"?— de cemento por escoria en las obras está facilitada por el hecho de que, con la forma de comercialización directa de la escoria en ciertos países, dicha sustitución puede hacerse "bolsa por bolsa", lo que en hormigoneras con capacidad correspondiente a dos bolsas de cemento, al sustituir una de ellas por otra de escoria se está fabricando un hormigón 50:50 —lo cual no siempre se sabe si es lo que se quiere o conviene—, pero en todo caso con dudas, las más de las veces, sobre el grado de homogeneidad del hormigón producido, a causa de un (tiempo de) amasado insuficiente. Recuérdese a éste y otros respectos el *factor "hombre"*.

La consideración de que escoria y cemento han de ser tenidos en cuenta como dos componentes distintos del hormigón, en vez de uno solo como mezcla, dado que cada uno tiene su propia curva de hidratación y endurecimiento, componiendo ambas una sola curva resultante total, es poco consistente, porque lo mismo sucede en el caso de los cementos siderúrgicos "prefabricados". Y si del hecho de que a 7 días y más, algunas mezclas 50:50 de escoria y cemento den resistencias mayores que el 100 % de las de un cemento portland equivalente sin escoria, se quiere deducir que a partir del momento en que tal ocurre la escoria contribuye a la resistencia total en más de un 50 %, lo mismo se podría concluir respecto de los correspondientes cementos siderúrgicos hechos en fábrica por molienda conjunta de sus componentes.

A pesar de todo esto —o precisamente por ello mismo—, el mercado separado de las escorias, que comenzó en Africa del Sur con un planteamiento un tanto confuso, parece extenderse a Inglaterra, Canadá y Estados Unidos.

En cuanto a las escorias así suministradas, se les debería aplicar un control de calidad a base de los consabidos módulos e índices derivados de su composición química, de su contenido de fase vítrea —lo mismo que para las escorias utilizadas en cementería—, de ensa-

yos (acelerados) de activación alcalina con sosa cáustica, o de resistencia mecánica de morteros hechos con cementos 50:50 con escoria y con arena (inerte), y sin escoria ni arena —estos últimos ensayos con objeto de tener una idea aproximada del comportamiento de cada escoria en hormigón—. Y todo ello a pesar de —o precisamente por— haberse argumentado en algún caso que otra de las razones de la molienda (y comercialización) separada de la escoria es el mayor control de calidad de la misma.

Una razón más ha sido la de las mejores condiciones de almacenamiento de la escoria, en relación con el cemento siderúrgico. Sin duda que el argumento debe referirse a las obras y no a las fábricas de cemento.

De cualquier modo, a las escorias para hormigones se les exigen en el Japón los siguientes requisitos:

- i) índice de basicidad I: $1,8 < I < 2,0$
- ii) contenido mínimo de vidrio: 95 %
- iii) superficie específica BLAINE mínima: 3.500 cm²/g
- iv) adición de yeso (aproximada): 3 %

9. OTROS USOS DE LAS ESCORIAS SIDERURGICAS

El empleo de las escorias es diverso, según su origen, características y tratamiento.

Las de cualquier metalurgia se pueden emplear, en principio, como materia prima para el crudo de cemento, como se ha indicado. Y asimismo como árido normal de hormigones, y como arena-grava para la estabilización de suelos y terrenos mediante cemento o cal, para formar suelo-cementos y grava-cementos particularmente en bases y sub-bases de firmes, pero a condición de que tengan una densidad o masa volúmica alta y que sean estables, o se hayan estabilizado por completo previamente. Por ejemplo, las escorias LD con alto contenido de cal libre, o las de otras procedencias con mucha magnesia cristalizada —periclasa— no deben emplearse, por ser potencialmente muy expansivas.

En Japón se emplea alrededor del 50 % de la escoria producida de una u otra forma, en la construcción de bases y sub-bases para firmes viales.

Las escorias *expandidas* se pueden utilizar como árido para *hormigones ligeros* o livianos, particularmente las de masa volúmica o densidad más baja. Las escorias expandidas (también se suelen llamar dilatadas) se consiguen enfriando la escoria líquida a la salida del horno alto, con menor cantidad de agua que la necesaria para la escoria templada o granulada, o mediante un enfriamiento mixto, con aire y con agua.

También se pueden utilizar las escorias como fertilizantes y en la prefabricación de elementos constructivos, siempre que cumplan con la condición de ser totalmente estables, es decir, no expansivas por ningún concepto: cal libre abundante o magnesia libre cuantiosa, cristalizada en forma de periclasa.

10. CONTROL DE CALIDAD Y DETERMINACION DEL CONTENIDO DE LAS ESCORIAS SIDERURGICAS EN LOS CEMENTOS

Una condición elemental que han de tener las escorias para ser realmente hidráulicas y para su utilización más eficaz en los cementos siderúrgicos es, aparte de una composición adecuada y de unos valores aceptables de los índices de basicidad e hidraulicidad (lo cual

se comprueba por análisis químico), tener una proporción elevada de fase vítrea, resultado de su condición amorfa dada por una eficaz granulación en agua.

El contenido de vidrio se puede determinar, semicuantitativamente y, sobre todo, comparativamente, mediante la técnica de difracción de rayos X: a menor cristalinidad, menor cantidad y menor intensidad de "picos" representativos de especies cristalizadas; la ausencia total de picos corresponde así a un estado vítreo perfecto.

El calentamiento de las escorias a unos 1.000°C y su posterior enfriamiento lento las desvitrifica y cristaliza, de modo que la difracción de rayos X de la escoria desvitrificada permite reconocer la naturaleza —y composición— del vidrio. La mejor escoria para cementería es aquella cuyo vidrio responde —una vez cristalizado— a la composición de una melilita intermedia, con relaciones gehlenita/akermanita variables entre 70/30 y 50/50.

La actividad de la escoria se ha tratado también de poner de relieve mediante exposición a la luz ultravioleta de una lámpara de cuarzo, ya que aparecen así granos de color violeta o ambar, de cuya proporción relativa se deduce, asimismo en términos comparativos y aproximados, el valor hidráulico de la escoria, puesto que a los granos coloreados de ámbar les corresponde un contenido mucho mayor de fase vítrea y, por lo tanto, de actividad hidráulica. Es conveniente hacer esta observación en una muestra representativa de la escoria en conjunto, pero también en las fracciones granulométricas separadas por tamizado (finas, intermedias y gruesas).

Aparte de la calidad importa la homogeneidad y regularidad de la misma en las escorias. Se puede y se debe comprobar por métodos sencillos y rápidos, como es el procedimiento (empírico y arbitrario) de determinar la densidad aparente —el "peso del litro"— de la escoria como tal y/o de una franja granulométrica de la misma. El peso del litro debe ser muy constante para cada escoria, dentro de un estrecho margen de variabilidad, y constituye un parámetro que puede servir también como índice —relativo— de molturabilidad de las escorias (y de los cementos siderúrgicos que las contengan).

El índice de refracción de las escorias es otro criterio experimental que sirve para juzgarlas, ya que es proporcional al índice de hidraulicidad de VENUAT C/S, de tal modo que índices de refracción del orden de 1,65 corresponden a escorias hidráulicas básicas ricas en C.

Por otra parte, las escorias más hidráulicas presentan una gran capacidad de adsorción y de absorción de colorantes, entre ellos el azul de metileno, coloreándose ellas —y decolorando el medio— mucho más que las poco hidráulicas, y tanto más cuanto más claras, porosas y ligeras son —caracteres organolépticos y macroscópicos de apreciación directa y fácil—. Por lo tanto, también son más hidráulicas las que mayor capacidad de retención de agua tienen. Todo esto coincide con una mayor facilidad para la molienda, no tanto por su dureza cuanto por su buena granulación.

Existe un ensayo, el de MICHELSEN, que permite apreciar la calidad de una escoria por la observación microscópica de la formación y desarrollo de yeso, al tratarla con una disolución de sulfato de aluminio, y por la apreciación de la velocidad o del tiempo de formación del mismo. Son buenas aquellas escorias en que dicha formación transcurre en un tiempo de uno a dos minutos:



Es aconsejable la utilización de una escoria patrón de referencia y operar en condiciones bien definidas de temperatura y concentración de la disolución de sulfato de aluminio, así como de la finura y granulometría de la escoria.

La oxidación de las escorias, actuando sobre los sulfuros ferroso y cálcico de las mismas, produce un aumento de peso relacionado directamente con el contenido de sulfuros —y, por lo tanto, con la capacidad de captación de azufre por el fundente del horno alto—, y con la basicidad —y, por consiguiente, con la calidad de aquéllas—.

En cuanto a la determinación cuantitativa de las proporciones de escoria y de clínker en los cementos, el interés del problema es obvio, tanto para el fabricante como para el usuario de dichos cementos. Se resuelve —de forma aproximada— por métodos físicos, químicos o mixtos, basados en características diferenciales del clínker y de la escoria. Su precisión depende de que se disponga de muestras representativas de los componentes aislados —clínker y escoria— y del cemento mezcla (caso que no suele ser muy frecuente), o sólo de este último (caso más usual).

Un método físico consiste en el recuento óptico, con lente reticular de 150 aumentos, de partículas de escoria y de clínker en el cemento, y en la multiplicación de los valores obtenidos por las respectivas densidades. El recuento se hace sobre la fracción del cemento comprendida entre 88 μm (que pasa por el tamiz de 4.900 mallas/cm²) y 60 μm (retenida por el tamiz de 10.000 mallas por cm²), supuesta representativa del conjunto, y conocida (determinada) su parte alícuota en el mismo.

Si C y E son los recuentos de clínker de densidad 3,1 y de escoria de densidad 2,8, respectivamente, los contenidos de ambos en la fracción 60-88 μm del cemento, serán:

$$\text{clínker } \% = 100 \frac{3,1 C}{3,1 C + 2,8 E} = C \%$$

$$\text{escoria } \% = 100 \frac{2,8 E}{3,1 C + 2,8 E} = E \%$$

Y si dicha fracción supone un X % del total del cemento, los contenidos porcentuales de clínker y escoria en el mismo serán:

$$\text{clínker } \% = 100 C \% / X$$

$$\text{escoria } \% = 100 E \% / X$$

Un método químico es el basado en la diferencia entre el calcio C_E cedido por la escoria E , el calcio C_C cedido por el clínker C y el calcio C_{CE} cedido por el cemento siderúrgico mezcla de ambos CE , a una disolución de cloruro amónico, estimándose dicha cal por el amoníaco desprendido en la reacción, recogido en ácido clorhídrico en exceso y valorado por el método de KJELDAHL (con álcali). Se tiene que:

$$E \% = 100 \frac{C_{CE} - C_C}{C_{CE}}$$

$$C \% = 100 \frac{C_{CE} - C_E}{C_{CE}}$$

Otro método de naturaleza química se funda en el distinto poder reductor PR_C del clínker C , PR_E de la escoria E y PR_{CE} del cemento siderúrgico CE , frente a un agente oxidante como el permanganato potásico. Determinados químicamente estos poderes por una

valoración reductora del oxidante en exceso se tiene que:

$$E \% = 100 \frac{PR_{CE} - PR_C}{PR_{CE}}$$

$$C \% = 100 \frac{PR_{CE} - PR_E}{PR_{CE}}$$

Un método mixto consiste en la aplicación del método químico precedente a la totalidad del cemento y a la fracción 60-88 μm separada como en el método físico antes descrito. Si es E_F % el contenido de escoria determinado por el método físico en la fracción 60-88 μm , PR_F y PR_T los poderes reductores de la fracción y de la totalidad del cemento, respectivamente, y E_T el contenido de escoria en dicha totalidad, se tiene que:

$$E_T \% = E_F \% \frac{PR_T}{PR_F}$$

Otro método mixto se basa en la separación de la escoria y del clínker del cemento, mediante líquidos densos, de densidad intermedia entre la de ambos componentes, de forma que el más ligero flote y el más denso se sumerja —bromoformo, yoduro de metileno y mezclas de ambos—, forzando la flotación y la sedimentación mediante centrifugación. La separación no es del todo cuantitativa, pero puede permitir obtener escoria y clínker, prácticamente exenta la una del otro y recíprocamente. En los componentes separados y en el cemento mezcla se determina después el manganeso por un método químico adecuado y, siendo M_{CE} , M_C y M_E los contenidos de manganeso hallados en el cemento CE, en el clínker C y en la escoria E, respectivamente, se tiene que:

$$E \% = 100 \frac{M_{CE} - M_C}{M_{CE}}$$

$$C \% = 100 \frac{M_{CE} - M_E}{M_{CE}}$$

Dentro de esta línea analítica química, cabe decir finalmente que, en el caso particular de los cementos sulfosiderúrgicos o siderúrgicos sobresulfatados, aparte de los índices de basicidad e hidráulicos de las escorias, cuando el estado vítreo de éstas es prácticamente completo, existen criterios que establecen la cantidad de cal que es preciso proporcionarles para una buena activación sulfática.

Dicha cantidad de cal es grande cuando la composición de la escoria satisface la desigualdad:

$$C - \frac{112}{102} A - \frac{56}{32} \bar{S} - \left(S - \frac{60}{40} M \right) \cdot \frac{56}{60} < 0 \quad (\text{I})$$

pequeña si se cumplen las desigualdades

$$C - \frac{112}{102} A - \frac{56}{32} \bar{S} - \left(S - \frac{60}{40} M \right) \cdot \frac{56}{60} > 0 \quad (\text{II})$$

$$C - \frac{168}{102} A - \frac{56}{32} \bar{\bar{S}} - \left(S - \frac{60}{40} M \right) \cdot \frac{56}{60} < 0 \quad (\text{III})$$

y nula si se cumple que

$$C - \frac{168}{102} A - \frac{56}{32} \bar{\bar{S}} - \left(S - \frac{60}{40} M \right) \cdot \frac{56}{60} > 0 \quad (\text{IV})$$

ya que (I) y (II) suponen la existencia de C_2S , $\bar{\bar{CS}}$, MS y CS , para lo cual según (I) falta cal y según (II) sobra; y que (III) y (IV) implican la existencia de C_3A , $\bar{\bar{CS}}$, MS y CS , para lo cual según (III) sobra cal y según (IV) falta.

Por lo tanto, no se precisará añadir cal si la escoria contiene C_3A , CS , MS y $\bar{\bar{CS}}$ (toda la alúmina en forma de C_3A); se necesitará añadir poca si la alúmina forma C_3A y C_2A (MS y CS aparte); y hará falta añadir mucha si la alúmina forma sólo C_2A , o una mezcla de este aluminato con otro de aún menor basicidad.

BIBLIOGRAFIA

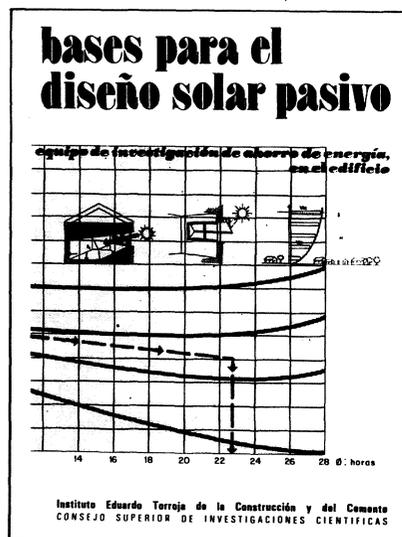
- SLAG CEMENT SEMINAR: UAB Special Studies. The University of Alabama, Hyatt Birmingham. Abril-Mayo, 1981:
- BINTENER, E.: "Paul Wurth's Granulating Process".
- COTSWORTH, R. P.: "National Slag's Pelletizing Process".
- FIESER, A. H.: "Blast-Furnace Slag Granulation".
- GEE, K. H.: "ASTM Studies on a Slag-Cement Specification".
- LEWIS, D. W.: "History of Slag-Cements".
- PIERSON, Ch. U.: "Realities of Producing and Marketing Blended Cements".
- SPELLMAN, L. U.: "Advantages for Slag-Cement in North-American Market".
- STEPHENSON, R. L.: "Availability and Uses of Blast-Furnace Slag".
- WOOD, K.: "Twenty Years of Experience with Slag-Cement".
- SPELLMAN, L. U.: "The Transition of Blast-Furnace Slag as a Cementitious Material". Proceedings of the 15th International Cement Seminar. Rock Products, 1980.
- CALLEJA, J.: "Escorias Siderúrgicas". Curso sobre Adiciones y Materiales Puzolánicos para Cementos. Instituto Colombiano de Productores de Cemento. Medellín (Colombia), Octubre 1977.
- CALLEJA, J.: "Cementos Siderúrgicos". Curso sobre Adiciones y Materiales Puzolánicos para Cementos. Instituto Colombiano de Productores de Cemento. Medellín (Colombia), Octubre 1977.
- FORTI BATTAGIN, A.: "Aplicación de técnicas físico-químicas en la caracterización mineralógica de las escorias de altos hornos de las principales siderurgias del Brasil". CEMENTO-HORMIGON LII (568), 209-247 (Marzo), 1981.

índice

0. Introducción	11
1. Definición de escorias siderúrgicas	12
2. Composición de las escorias siderúrgicas	12
3. Constitución de las escorias siderúrgicas	15
4. Características mineralógicas de las escorias siderúrgicas	16
5. Historia y antecedentes de los cementos siderúrgicos	18
6. La fabricación de los cementos siderúrgicos	20
7. La utilización de los cementos siderúrgicos	24
8. Las escorias siderúrgicas en el hormigón	29
9. Otros usos de las escorias siderúrgicas	31
10. Control de calidad y determinación del contenido de las escorias siderúrgicas en los cementos	31
BIBLIOGRAFIA	35

* * *

última publicación del I.E.T.C.C.



Equipo de Ahorro de Energía en el edificio

Dirección y coordinación:
Arturo García Arroyo

M.^a José Escorihuela
José Luis Esteban
José Miguel Frutos
Manuel Olaya
Bernardo Torroja

selectividad en la aplicación de los sistemas y procedimientos pasivos dando origen a un ecumenismo arquitectónico solar, al margen de las condiciones climáticas y funcionales específicas de cada caso y lugar.

En este libro, utilizando criterios y metodología pedagógicos, se dan los fundamentos e instrumentos teórico-prácticos necesarios para el planteamiento de todo proyecto arquitectónico solar pasivo, de acuerdo con los principios éticos y económicos de conservación y ahorro de energía. Es decir: respeto de los presupuestos bioclimáticos, búsqueda de la máxima captación y acumulación de la radiación solar, y esmero en el aislamiento térmico de los cerramientos.

Un volumen encuadernado en cartulina ibiza plastificada, a cinco colores, de 16 × 23 cm, compuesto de 216 páginas, 217 figuras, 87 gráficos, 19 tablas y 10 cuadros.

Madrid, 1983. Precios: España 2.100 ptas.; 30 \$ USA.

Las dificultades de suministro y el alto coste de los productos energéticos convencionales han despertado la atención de los usuarios, técnicos e industriales de la edificación hacia los procedimientos y sistemas en que se basa el aprovechamiento de otras fuentes alternativas de energía, principalmente la solar. Esto ha generado un rápido desarrollo industrial y comercial que, en opinión de los autores de este libro, arrastran los siguientes defectos: un mimético tecnologismo respecto de los sistemas convencionales que violenta las peculiaridades de la energía solar (baja densidad y variabilidad en el tiempo), y una escasa