

Las puzolanas y el ahorro energético en los materiales de construcción*

FRANCISCO SORIA SANTAMARIA
Dr. en Química Industrial. Profesor de Investigación del (IETCC/CSIC)

RESUMEN

Comienza esta exposición con unas consideraciones generales sobre la crisis energética y su impacto en la industria cementera, con los correspondientes problemas de reconversión al carbón. Se mencionan los tres aspectos en que se ha centrado el ahorro energético: proceso tecnológico, materias primas y producto acabado, destacando el interés de este último que incluye la incorporación de adiciones activas al cemento portland.

Se hace a continuación un rápido comentario sobre puzolanas, su origen, definiciones y clasificación. Se destaca la composición química de las mismas y se desarrolla el concepto de actividad puzolánica.

Más tarde se hace una exposición sobre cementos puzolánicos, sus propiedades más destacadas y las ventajas que supone el empleo de la puzolana.

Tras una exposición amplia de las posibles aplicaciones de las puzolanas y cementos puzolánicos, se concluye comentando las tendencias actuales en la normalización internacional sobre estos cementos y la posible evolución del consumo de adiciones hacia el año 2000, con vistas al mayor ahorro energético, sin detrimento de las propiedades esenciales de los cementos.

SUMMARY

This discussion commences with some general comments on the energy crisis and its impact on the cement industry, with the corresponding coal reconversion problems. Three factors are highlighted where saving has been centered: technological process, raw materials and finished product, emphasizing the interest of latter which includes incorporating active additions in Portland cement.

A quick review then follows about pozzolanas, their origin, definitions and classification. Their chemical composition is underlined, and the concept of pozzolanic activity is described.

Later on, pozzolanic cements, their most significant properties and the advantages of using pozzolana are explained.

After a lengthy description about possible applications of pozzolanas and pozzolanic cements, the conclusion reviews current trends in international standards for such cements and possible evolution in consumption of additions by the year 2000, with a view to saving more energy, without impairing the essential properties of the cement.

1. INTRODUCCION

El campo de los materiales de construcción es muy amplio y, a la vez, heterogéneo. Dentro de ellos hay un sector que procede del aprovechamiento de rocas que, bien en estado natural, o bien por tratamiento y/o transformaciones adecuadas, conducen a materiales como los cementos, los productos cerámicos, los yesos, las cales, los áridos para hormigones, etc., etc.

Dentro de estos ocupan un lugar importante los conglomerantes, entre los que destacan los hidráulicos con su cabeza de serie que es el cemento portland y todos los que de él derivan completando la serie de los silico-calcáreos.

La crisis energética, que afecta a gran parte de los países desde 1973, obliga a reconsiderar las posibles formas de crear un ahorro, singularmente en aquellas industrias que, como la del cemento, presentan un elevado consumo energético en su proceso de fabricación y/o, por tradición, están supeditadas al consumo de combustibles líquidos, normalmente de importación.

* Conferencia pronunciada en el "II Curso de Rocas Industriales", patrocinado por la Fundación Universidad-Empresa, celebrado en Madrid en abril de 1983.

Afortunadamente, en el caso del cemento, esto último se ha resuelto prácticamente en su totalidad, con una reconversión rápida y programada al carbón, llevada a cabo en los últimos tres años. Así, en 1982, para una producción del orden de 30 millones de toneladas de cemento (2.^a producción en Europa Occidental y sexta a nivel mundial), se previó un consumo térmico de 3,2 millones de toneladas de carbón (6.500 Kcal/kg) y 0,6 millones de toneladas de fuel-oil, y un consumo de energía eléctrica de unos 3.000 millones de Kwh. En el futuro, y de forma complementaria, cabe pensar en otros productos pobres, de inferior calidad o, incluso, de desecho, o subproductos industriales con algún aporte energético en forma de calor.

La energía térmica es la más importante, siendo del orden de 5 a 7 veces superior al consumo de energía eléctrica.

Por ello, gran parte del esfuerzo se ha centrado en el ahorro de energía térmica, enfocando el problema hasta ahora en tres aspectos: el proceso tecnológico, las materias primas y el producto acabado.

El proceso tecnológico ha considerado de modo permanente el ahorro energético, logrando notables mejoras desde la introducción de los intercambiadores de calor en vía seca (suspensión gaseosa) o semiseca (parrilla), con reducción gradual del proceso por vía húmeda. La inclusión de la precalcificación en la década de los 70, reduciendo el volumen de horno a igualdad de producción, con ligeras mejoras en el consumo específico, supuso un nuevo perfeccionamiento.

La segunda vía de participación con mejoras en el ahorro energético la constituyen las materias primas, contempladas desde su origen, naturaleza, composición químicomineralógica y presencia de componentes minoritarios (mineralizadores y fundentes). Por este concepto, en los crudos convencionales se encuentran consumos que divergen hasta en un 20 % para la energía térmica y en un 50 % en la energía eléctrica, a igualdad de todo lo demás. No se debe olvidar que, aunque, en general, los recursos de materias primas son frecuentes y abundantes, puede ahorrarse energía por este concepto empleando desechos industriales con lo que, además, se colabora a la conservación de recursos y del medio ambiente (escorias, cenizas volantes, estériles de minas, etc., etc.).

Finalmente, la solución más inmediata y más amplia para ahorrar combustible (energía térmica) es incorporar adiciones activas al producto en su fase final de preparación, tal como ha manifestado recientemente la Agencia Internacional de la Energía y Grupos de Expertos reunidos con este fin (1).

Esta solución, anterior a la crisis energética por razones técnicas (estabilidad, durabilidad química, bajo calor de hidratación, de los cementos resultantes) se ha adoptado a escala mundial, especialmente en Europa, sentando unas bases científicas amplias en la fabricación, normalización y empleo de estos cementos, denominados mixtos.

Se ha hablado de “adiciones activas”. Pero ¿Qué son las adiciones activas? En principio podemos definir las como productos que, en presencia del cemento portland base, colaboran al desarrollo hidráulico-resistente del conglomerante.

Hay unos que, por su composición químico-mineralógica tienen hidráulidad propia (fragan y endurecen bajo el agua), como es el caso de la escoria granulada de horno alto. Otros, por el contrario, no poseen ninguna propiedad hidráulica pero, por su composición (ricos en compuestos de sílice y alúmina), y en estado de elevada finura, son capaces de fijar hidróxido cálcico a la temperatura ordinaria y en presencia de agua, para dar lugar a compuestos estables con propiedades hidráulicas. A estos segundos es a los que se llaman “puzolanas”.

2. PUZOLANAS: DEFINICION. CLASIFICACION

El término puzolana que, originalmente, se restringía a designar una toba volcánica existente en las proximidades de Nápoles (Pozzuoli), se emplea hoy genéricamente para definir a los materiales que tienen las características antes mencionadas, es decir:

- Aptitud para reaccionar con Ca(OH)_2 , en presencia de agua.
- Aptitud para formar productos hidratados con propiedades conglomerantes.

Es decir, el término puzolana ha pasado de un significado eminentemente geológico a tenerlo más bien tecnológico.

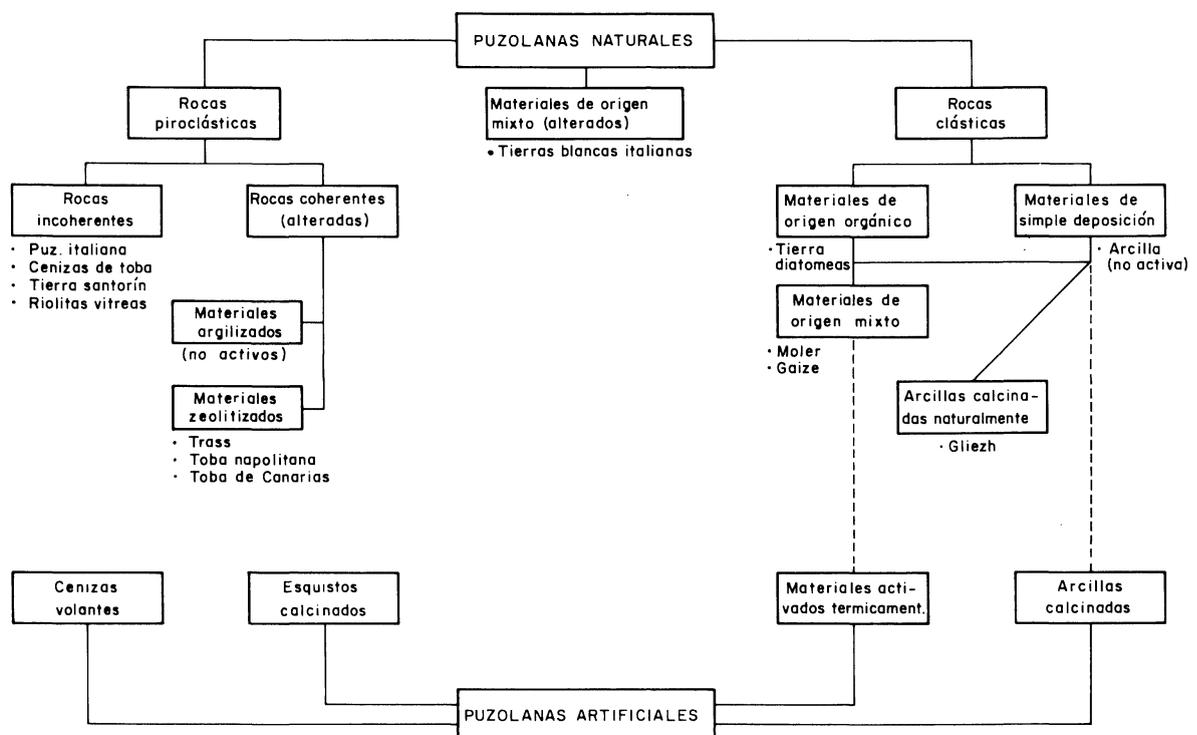
El Ca(OH)_2 necesario para la reacción puzolánica puede proceder en la práctica, o de cal apagada directamente, o de un cemento portland en proceso de hidratación.

Hacer una clasificación precisa de puzolanas es difícil, puesto que, hoy día, con este término se abarcan materiales muy diversos en su origen y en su composición, tanto química como mineralógica, que tienen un comportamiento idéntico al mezclarlos con cal (o cemento) y agua.

La clasificación más comúnmente aceptada se relaciona con el origen. Por tanto, una primera subdivisión es en naturales y artificiales (Cuadro I). (2).

Las primeras no requieren, en su empleo, tratamientos que creen modificaciones químicas y mineralógicas sustanciales, es decir, son activas "per se". Las segundas resultan de la transformación químico y/o estructural de materiales que, originalmente, no tenían o presentaban características puzolánicas débiles.

CUADRO I



CLASIFICACION DE LAS PUZOLANAS (Prof. F. Massazza)

Naturalmente, hay un grupo de materiales intermedios que, aunque contienen componentes típicamente puzolánicos, estos se encuentran contaminados con cantidades variables de materiales arcillosos que sólo adquieren carácter puzolánico por calcinación.

2.1. Puzolanas naturales

Materiales de origen volcánico (rocas piroclásticas)

Estas rocas surgen de erupciones volcánicas explosivas, depositándose en los alrededores del volcán en formas diversas solidificadas, dependiendo de la viscosidad, velocidad de enfriamiento y contenido en gases del magma fundido original. Así han surgido, las *cenizas* (de aspecto pulverulento), las *pómez* (fragmentos con pequeños alvéolos regulares, separados por pequeñas películas de lava), las *escorias* (poros irregulares y mayor densidad) y las *bombas* (materiales densos).

Los fragmentos incoherentes de estos depósitos piroclásticos originales pueden estar expuestos a fenómenos diagenéticos de cementación, transformándose en rocas compactas llamadas *tobas*. Esta cementación va acompañada de transformaciones químico-mineralógicas que pueden influir, favorable o desfavorablemente, en el comportamiento puzolánico de estos materiales.

Estudios realizados por R. Sersale (3) concluyen que hay una clara relación entre ambos materiales: la génesis de las tobas se atribuye a un fenómeno de zeolitización de la parte vítrea de los materiales muy activos, provocando la cementación de los depósitos originalmente incoherentes. El paso de una puzolana con matriz vítrea a una toba con matriz zeolítica ha sido reproducido por este autor en el laboratorio trabajando con varios materiales naturales. A veces la transición puzolana → toba va acompañada de una progresiva transformación en arcillas.

Entre los materiales incoherentes se incluyen: las típicas puzolanas italianas de Campania (Nápoles) y Lazio (Roma); las piedras pómez del Campo de Calatrava (Ciudad Real), Olot (Gerona) y Almería; la tierra de Santorín (Grecia), que es una toba andesítica poco coherente; las puzolanas del Macizo Central francés y las riolitas vítreas de EE.UU. y la India, entre otros.

Ejemplos típicos de tobas son: el trass alemán (Baviera y Renania), empleado, como las puzolanas italianas, desde la época de los romanos, y las tobas de Canarias, Nápoles, Rumanía o Crimea.

No todos los depósitos piroclásticos presentan actividad puzolánica, sino sólo aquellos con componentes ácidos abundantes, ricos en vidrio, con una estructura física porosa producida por gases y vapores que les confiere una gran superficie interna, o aquellos que contengan minerales zeolíticos.

Materiales de origen clástico

Los materiales de origen clástico, que manifiestan la capacidad de fijar cal, son las arcillas y las llamadas tierras de diatomeas. Las primeras son rocas de simple depósito mientras que las segundas tienen un origen orgánico.

Los minerales arcillosos pueden fijar cal, pero debe descartarse su empleo como adición puzolánica porque reducen notablemente la resistencia de las mezclas.

Las tierras de diatomeas, compuestas por esqueletos silíceos de microorganismos, depositados en agua de mar o lacustre, son ricas en sílice hidratada. Frecuentemente se encuentran contaminadas

por arcilla o arena, como ocurre con el *möler* danés; sus propiedades, en este caso, se mejoran notablemente por calcinación ya que así se descomponen y activan los minerales arcillosos.

A pesar del comportamiento francamente bueno de las tierras de diatomeas como puzolana, su empleo en cementos está frenado por la elevada cantidad de agua que consumen, lo que lógicamente repercute en las resistencias mecánicas.

En España, los yacimientos más importantes se encuentran en las provincias de Albacete y Jaen.

En el cuadro I se cita el *Gliezh*, que es un material común en el Asia Central, procedente de esquistos que se han calcinado durante la combustión subterránea. Es un material de origen arcilloso, rico en SiO_2 y Al_2O_3 .

Materiales de origen mixto

Es típica la tierra de Sacrofano (norte de Roma), compuesta de materiales de origen diverso (volcánico, sedimentario y orgánico). También puede citarse el *gaize* (Ardenas-Francia), que es una roca silícea muy rica en residuos orgánicos silíceos y arcilla. Su actividad puzolánica mejora por tratamiento térmico.

2.2. Puzolanas artificiales

Son materiales que adquieren propiedades puzolánicas por un adecuado tratamiento térmico, que transforma profundamente su primitiva naturaleza.

Arcillas y esquistos calcinados (Materiales naturales silicatados)

Los minerales de la arcilla, inertes en principio, presentan una actividad puzolánica notable cuando se calcinan a temperaturas comprendidas entre 600 y 900°C y se muelen a finura de cemento. Por su origen, estas puzolanas están constituidas esencialmente de sílice y alúmina. La pérdida de agua combinada, por efecto del tratamiento térmico, provoca la destrucción de la red cristalina de los constituyentes arcillosos quedando sus componentes en estado amorfo, mal definido, pero, en cualquier caso, inestable. El empleo de la arcilla calcinada es muy antiguo y muy extendido en países como la India (*surkhi*).

Este grupo de puzolanas podría incluirse en el de origen mixto citado en las puzolanas naturales.

Cenizas volantes (Subproductos industriales)

Son cenizas, con elevado grado de división, producidas en centrales termo-eléctricas por la combustión de carbón pulverizado y recogidas en colectores mecánicos y/o electrostáticos.

Por la elevada temperatura alcanzada en la combustión instantánea del carbón, la ganga funde en su mayor parte y da lugar a pequeñas gotas que, en un posterior enfriamiento brusco, se transforma en partículas mayoritariamente vítreas.

En las cenizas volantes prevalecen los componentes ácidos (sílice y alúmina) aunque, en algunos casos, la cal puede presentarse en cantidades importantes (cenizas sulfocálcicas, -cal libre y anhidrita-).

La superficie específica es muy variable, oscilando de 2000 a 8000 cm^2/g medido con el permeabilímetro Blaine; el tamaño de partícula oscila de 1 a 200 μ .

Las cenizas volantes de interés en la industria del cemento están compuestas de partículas vítreas, esféricas o redondeadas y suelen ser ligeras.

3. COMPOSICION QUIMICA DE LAS PUZOLANAS

El examen de los análisis químicos de las puzolanas, bien sean naturales o artificiales, manifiesta que estos materiales presentan un fuerte carácter ácido, con predominio de la sílice y la alúmina e, incluso, el óxido de hierro, cuya suma ponderal suele ser superior al 70 %. De ellos, a su vez, predomina la sílice que, en casos excepcionales, puede suponer cerca del 90 % del producto (Cuadro II).

CUADRO II
Análisis químico de algunas puzolanas naturales y artificiales

Puzolana	% en peso								
	P. calc.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃
<i>Puzolanas incoherentes</i>									
- Almagro (Ciudad Real)	4,6	42,2	19,4	12,1	12,0	11,0	1,6	1,7	
- Olot (Gerona)	0,9	42,5	13,5	13,5	8,8	9,1	1,9	3,7	0,46
- Segni (Italia)	4,0	45,5	19,6	9,9	9,3	4,5	0,8	6,3	0,16
- Auvernia (Francia)	0,2	46,6	17,6	11,8	9,8	5,6	3,1	1,8	
- Tierra de Santorín (Grecia)	4,8	63,8	13,0	5,7	4,0	2,0	3,8	2,5	
<i>Tobas</i>									
- Toba de Gran Canaria	6,0	57,5	18,0	4,5	1,5	1,0	5,0	6,5	
- Tras Renano	11,1	52,1	18,3	5,8	4,9	1,2	1,5	5,1	
- Toba de Nápoles (Italia)	9,1	54,7	17,7	3,8	3,7	0,9	3,4	6,4	
- Toba de Rumania	7,3	67,7	11,3	2,7	3,7	1,6			0,2
<i>Otros materiales naturales</i>									
- Tierra de diatomeas	7,6	65,2	19,2	2,8	0,8	0,2			0,3
- Surkhi (India)	0,9	73,6	6,4	14,0	2,5	2,4			
- Riolita pumicea (EE.UU.)	3,4	70,7	12,8	1,4		1,1	0,4		
- Gaize (Francia)	5,9	79,6	7,1	3,2	2,4	1,0			0,9
- Moler (Dinamarca)	5,6	66,7	11,4	7,8	2,2	2,1			
<i>Cenizas volantes</i>									
- C.V. Puertollano (C. Real)	4,7	66,6	17,7	5,2	2,9	1,6			0,6
- C.V. Soto de Ribera (Asturias)	1,4	46,9	23,5	7,8	10,6	1,8			0,5
- C.V. Serch (Barcelona)	0,3	40,1	20,6	12,6	21,1	0,9			3,7
- C.V. Ponferrada (León)	8,6	47,3	28,3	6,7	3,3	2,4			0,4
- C.V. Andorra (Teruel)	0,8	45,4	30,0	16,1	4,0	1,1			1,9

Estos óxidos mantienen uniones inestables o débiles en el material de origen (vidrios y tobas volcánicas) o se crea la relajación por un tratamiento térmico (arcillas activadas, por ejemplo).

Poco se sabe, hasta ahora, del papel que juegan los componentes menores, a veces de cierta importancia ponderal, tales como los álcalis, aunque sí se debe destacar que estos son de capital importancia por sus relaciones de solubilidad con la cal.

Dentro de las puzolanas naturales, se observan diferencias entre las de origen mineral y las de origen orgánico, en el sentido de que las primeras contienen, por lo general, menos sílice y más alúmina y álcalis, siendo también mayor la pérdida por calcinación.

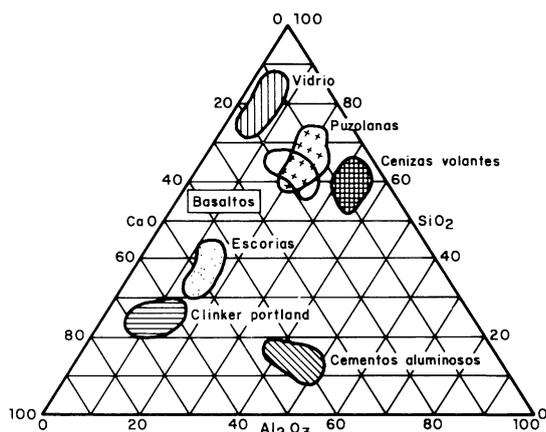


Fig. 1

Las puzolanas artificiales (principalmente las cenizas volantes ácidas o silicoaluminosas, como las de más amplio uso), son más pobres en sílice, cal y álcalis que las naturales y más ricas en alúmina y óxido de hierro (Figura 1). Existen cenizas básicas (llamadas también sulfocálcicas), capaces de fraguar per se, ricas en cal y sulfato cálcico, con las que se pueden presentar problemas de expansión producida por la cal libre. La calidad de las cenizas, en general, se afecta por el contenido de inquemados, lo que se refleja en la pérdida por calcinación.

Hay normas que establecen valores máximos y/o mínimos para los componentes químicos de las puzolanas pero, en general, los valores analíticos tienen sólo un valor relativo a la hora de establecer la actividad.

4. ACTIVIDAD PUZOLANICA

De un modo general, con esta expresión se define todo el complejo de fenómenos que transforman una mezcla de puzolana, cal y agua, en un material compacto de aspecto pétreo.

Por otro lado, esta expresión se limita a aquellos materiales capaces de reaccionar con la cal, en un tiempo razonable, a temperatura y presión ordinarias y con las finuras industriales normales. Conviene hacer esta precisión para evitar que, materiales inertes como el cuarzo, se consideren puzolanas por el simple hecho de que a temperaturas y presiones elevadas sean capaces de reaccionar con cal y agua para dar lugar a materiales de elevada resistencia mecánica.

4.1. Origen de la actividad puzolánica

La actividad puzolánica responde a un principio general que se basa en que los componentes ácidos principales de las materias puzolánicas reaccionan con la cal, siempre que sus uniones en dichos materiales sean lábiles. Los casos particulares en que se da esa debilidad en las uniones son las estructuras zeolíticas, los vidrios volcánicos, las estructuras de gel y los minerales activados (amorfos).

Puesto que la reactividad frente a la cal se extiende también a materiales cristalizados como las zeolitas, no puede considerarse factor determinante de la actividad puzolánica la inestabilidad termodinámica de los constituyentes amorfos y/o vítreos de las puzolanas. Dicha actividad puzolánica habrá que relacionarla con la inestabilidad termodinámica del sistema puzolana-hidróxido cálcico-agua, merced a la cual se provocan una serie de reacciones que conducen, si se cumplen ciertas condiciones, a la rigidización del sistema con desarrollo ulterior de elevadas resistencias mecánicas.

Por otro lado, junto a estas consideraciones sobre la actividad puzolánica relacionadas con la estructura, pueden hacerse otras relacionadas con la composición química, el grado de finura (tamaño de grano) y con la influencia de la temperatura sobre dicha actividad. En unos casos, por ejemplo en las tobas, el calor incrementa la actividad por deshidratación y ahuecamiento de la red cristalina; en otros, como los vidrios volcánicos, no se modifica o, incluso, se perturba la actividad. Siempre, pasada cierta temperatura, se reduce o anula totalmente la actividad (recristalización). (4).

Debemos concluir que, en cualquier caso, todos los compuestos (vítreos, amorfos e, incluso, minerales cristalizados que, en ocasiones, se encuentran alterados o en fase de descomposición) participan en mayor o menor grado de la actividad puzolánica. Por eso, es difícil cuantificar el fenómeno; cada puzolana es un caso particular y no es posible, por el momento, establecer una teoría general sobre la actividad puzolánica.

4.2. Valoración de la actividad puzolánica

Determinar la actividad de una puzolana es esencial si se quiere emplear como producto activo en una mezcla conglomerante.

Por ello se han hecho muchos estudios sobre este tema, aunque las múltiples y diversas propuestas formuladas demuestran la dificultad de encontrar un método general de ensayo que, aparte de ser válido para todos los tipos de puzolana, se pueda relacionar con las características de empleo y sea aceptable por su rapidez y precisión.

Las cosas se complican porque, a diferencia de la escoria siderúrgica, la puzolana no es hidráulica “per se” y, para comprobar su aportación resistente, debe ensayarse en combinación con cal o con cemento portland, dos productos comerciales cuyas dudas en emplear como reactivo en un ensayo normalizado son obvias.

Los métodos propuestos hacen alusión, tanto a la puzolana sola como a sus mezclas con cal o con cemento portland.

Con la puzolana sola se valoran conceptos tan diversos como: Análisis químico (SiO_2 , Al_2O_3 , y agua combinada, principalmente); solubilidad (de SiO_2 , y Al_2O_3 , principalmente) en ácidos y/o álcalis (incluso cal); absorción o fijación de cal en distintas variantes (cal o cemento portland, en suspensión o en pasta); variación del residuo insoluble por tratamiento térmico (1.000°C) de la puzolana sola y de mezclas con carbonato cálcico, etc.

Los ensayos en mezclas puzolana-cal son los más antiguos, lo cual es lógico, porque desarrollan la idea en que se basa el efecto puzolánico. Entre otros destacan: el ensayo de fraguado, estableciendo unos tiempos máximos de principio y de final, de acuerdo con unas condiciones experimentales; el ensayo mecánico-resistente, con variadas proporciones de puzolana y cal y de conglomerante/arena en el mortero, así como con condiciones de curado y tipos de probeta de los más diversos (es el más usado); la determinación del residuo insoluble en CIH de la puzolana sola y de la pasta cal/puzolana a incrementos de tiempo dado, con o sin tratamiento térmico; etc.

Los métodos propuestos sobre mezclas puzolana-cemento portland son similares a los de la mezcla cal-puzolana, destacando el ensayo mecánico-resistente, con o sin tratamiento térmico.

En síntesis, puede decirse que un solo ensayo no valora la actividad puzolánica y hay que buscar, entre varios, los más idóneos relacionados con el fin a que se desea destinar el cemento.

4.3. Productos de la reacción puzolana-cal

Los resultados de los estudios acerca de la naturaleza de las fases producidas en la reacción puzolana-cal, en presencia de agua, han permitido encontrar los siguientes compuestos:

- a) Silicato monocálcico hidratado (CSH I), en forma de gel, con un bajo grado de cristalización y composición variable, aunque siempre dentro de los límites de la tobermorita.
- b) Aluminato cálcico hidratado hexagonal (probablemente C_4AH_{13}).

En condiciones específicas es posible encontrar también:

c) Gelenita hidratada (C_2ASH_x).

d) Ettringita ($3 CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3 CaSO_4 \cdot 32 H_2O$) y monosulfato ($3 CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 12 H_2O$).

Estos últimos pueden darse, por ejemplo, en el caso de los caolines calcinados, más ricos en alúmina, (Gelenita) y en el caso de cenizas volantes que contienen sulfatos (ettringita).

En general, y al cabo de cierto tiempo, se estabiliza la composición de los compuestos citados, siendo la relación C/S de los silicatos hidratados de 0,8 a 0,9.

Estos productos de hidratación de las puzolanas con cal son análogos a los obtenidos con las escorias siderúrgicas y del mismo tipo de los que resultan en la hidratación de los componentes anhidros del cemento portland, apareciendo como fundamental el silicato hidratado de baja basicidad y composición variable con el tipo y proporción de puzolana y con el tiempo.

5. CEMENTOS PUZOLANICOS

Hecha una breve exposición de las puzolanas, acerca de su origen, composición y actividad frente a la cal, creo necesario dedicar unas palabras para justificar su empleo en el campo de los cementos, con razonamientos científico-técnicos al margen del tema del ahorro energético.

El cemento portland artificial, descubierto ya hace más de 150 años, ha sido el material básico durante muchos años en el campo de la construcción. Ha llegado ya, gracias a los avances de la Ciencia y de la Técnica, a la cumbre de sus posibilidades, en su versión convencional.

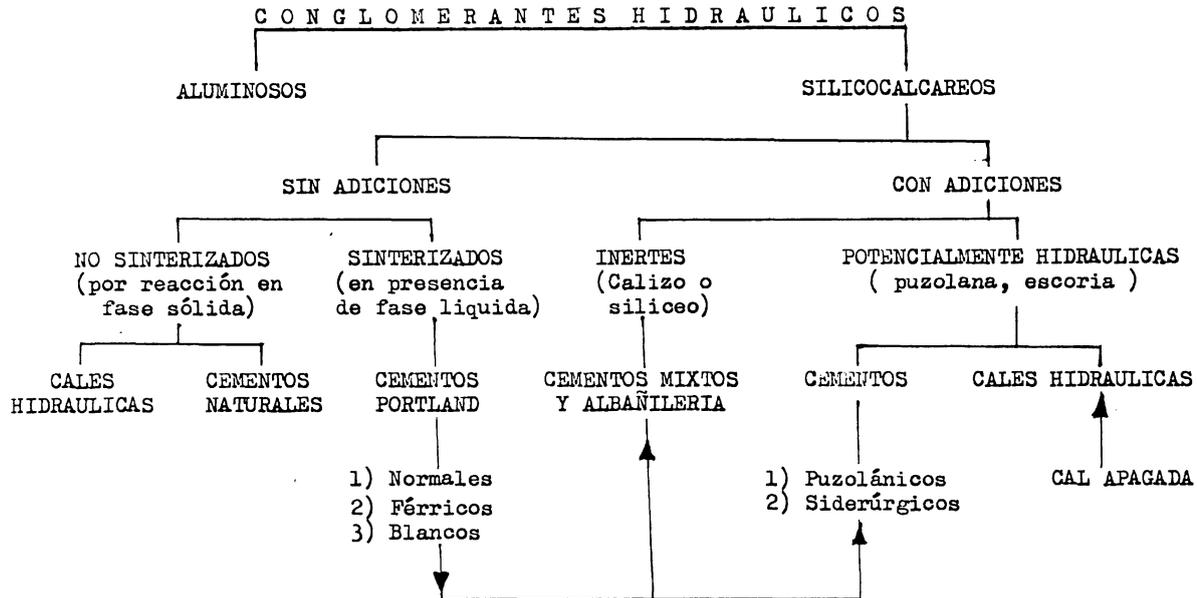
Desde el punto de vista fisicoquímico, por su elevada saturación en cal, son los cementos de mayor contenido de energía en estado latente a la hora de la hidratación, con las consiguientes desventajas:

- Liberación de gran cantidad de hidróxido cálcico (elevado pH en la pasta e inestabilidad frente al medio circundante).
- Carácter fuertemente exotérmico de las reacciones de hidratación (peligro de contracciones y fisuras).
- Posibilidad de reacción de carácter expansivo de los aluminatos cálcicos (tercer componente principal de los cementos portland) con los sulfatos del medio, reacción favorecida por la primera desventaja citada, es decir, el elevado pH.

Todas estas desventajas motivaron que, desde hace años, se estudien cementos que, bien por constitución propia en estado puro (caso de los cementos altos en alúmina o de los cementos portland resistentes a los sulfatos) o bien por adiciones adecuadas al cemento portland (caso de los cementos puzolánicos, siderúrgicos y sideropuzolánicos) creen estabilidad, durabilidad en la pasta endurecida, manteniendo y, a ser posible, mejorando, las buenas cualidades que, indudablemente, tiene el cemento portland. (Cuadro III).

En el caso concreto de los cementos puzolánicos (mezclas de cemento portland y puzolana), lo que se trata es de sustituir, en la hidratación del portland, un producto no hidráulico, soluble y pernicioso, como es el hidróxido cálcico (que puede llegar a ser hasta 30-40 % de la cal total presente en el clínker) por un producto hidráulico y resistente, resultante de la reacción puzolana-cal, llamado tobermorita. Es decir, que la puzolana, no sólo estabiliza el fenómeno hidráulico, sino que se amplía, al fijar la cal liberada en la hidratación.

CUADRO III



5.1. Propiedades de los cementos puzolánicos

Entre las principales propiedades de los cementos puzolánicos son de destacar las siguientes:

Calor de hidratación

El calor desarrollado en la hidratación de un cemento puzolánico disminuirá, con el tiempo, en una cantidad prácticamente proporcional a la puzolana añadida. No se obtienen valores rigurosamente proporcionales porque también la reacción cal-puzolana es débilmente exotérmica y porque el efecto de dispersión de la puzolana sobre la fracción de portland facilita su ataque y acelera un poco su calor de hidratación. (Fig. 2).

Consecuencia inmediata de esta propiedad es la reducción de la tendencia a la fisuración de origen térmico.

Resistencia química a ambientes agresivos

En este aspecto debe recordarse que el cemento portland hidratado y endurecido, por su gran cantidad de cal liberada, es altamente básico y, por constitución (C_3A , en mayor o menor cuantía) es vulnerable al ataque de sulfatos en general (terrenos y aguas selenitosas, agua de mar, etc.). Ambas causas de posible agresión (cal liberada y aluminatos) pueden llegar a reducirse y hasta anularse, en presencia de puzolana.

Para tener éxito conviene que el cemento hidratado adquiera suficiente madurez antes de

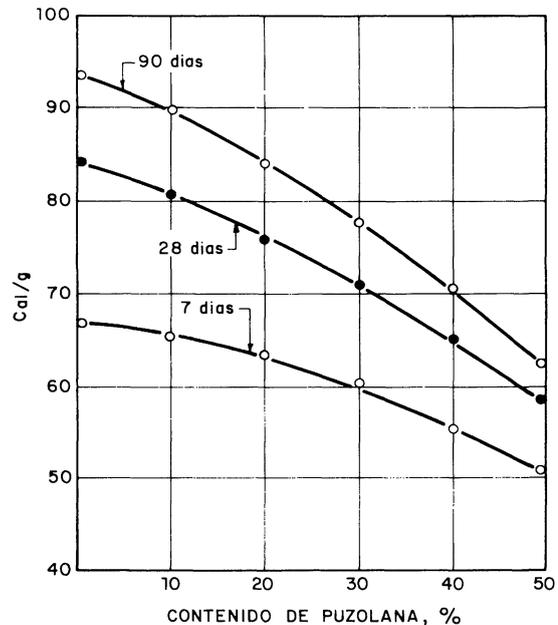


Fig. 2.-Efecto de la sustitución del cemento portland por puzolana, sobre el calor de hidratación.

exponerlo al medio agresivo para que el cemento reduzca su contenido en $\text{Ca}(\text{OH})_2$, causa de la alcalinidad y ambiente propicio para el desarrollo de otras reacciones secundarias perniciosas, como las que tienen lugar en presencia de sulfatos.

A este fenómeno debe añadirse la colaboración del efecto de geles de nueva creación procedentes de la reacción cal-puzolana y que tienden a rellenar los espacios vacíos, reforzando la compacidad y estanqueidad, cualidad muy valiosa en trabajos que han de soportar el continuo contacto con el agua: mayor impermeabilidad y, en consecuencia, menor tendencia al deslavado de la cal por aguas puras o ácidas, y a la formación de eflorescencias.

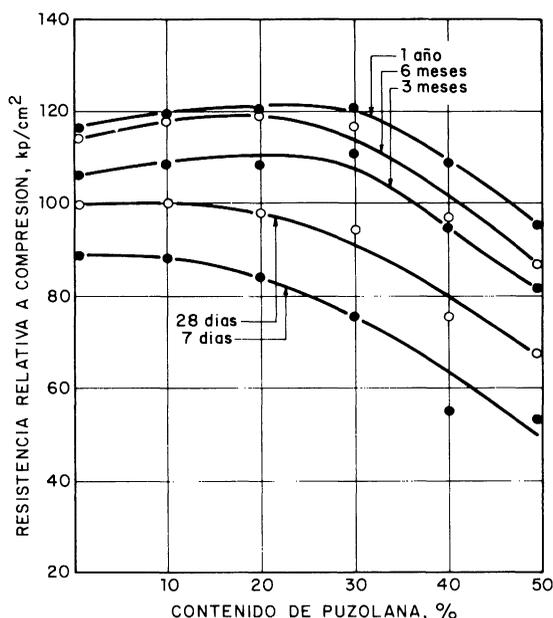


Fig. 3.—Efecto de la sustitución del cemento portland por puzolana sobre la resistencia a compresión del mortero normal ISO. Porcentaje de la resistencia a 28 días del cemento portland puro.

Resistencias mecánico-resistentes

En este sentido, la presencia de una puzolana en el cemento portland tiene dos efectos distintos y en los que juega un papel importante el tiempo.

Inicialmente, actúa como un inerte no nocivo, con un endurecimiento más lento que el portland base. Más adelante, aparece como un componente activo, cuyos óxidos ácidos (sílice, alúmina e, incluso, óxido de hierro) combinan gradualmente con la cal liberada en la hidratación de los silicatos del portland, para formar nuevos compuestos hidráulicos estables; las discrepancias mecánicas con el portland disminuyen, más tarde desaparecen y, finalmente, la resistencia del cemento puzolánico es superior a la del cemento portland, a igualdad de condiciones. Es el reflejo de la ampliación del fenómeno hidráulico que se citaba anteriormente. (Figura 3).

Como inciso debe señalarse que el incremento de la resistencia a flexotracción es más rápido que el de la de compresión, manteniendo siempre más elevado el factor tracción/compresión, lo que conduce a materiales más flexibles, más elásticos, por la naturaleza de sus productos hidratados, que los cementos portland puros. Esto es una garantía frente a la posible fisuración de origen térmico.

Otros efectos

En otro orden de cosas, ciertas puzolanas como las cenizas volantes y las puzolanas vítreas, mejoran la docilidad de las pastas y reducen la tendencia de los áridos a la segregación, así como la relación agua/cemento. Otras, como la tierra de diatomeas, exigen mucha agua para producir un hormigón trabajable, con el consiguiente aumento de la retracción por secado.

La reacción “árido-álcali”, que transcurre entre áridos silíceos reactivos (ópalo, cristobalita y algunos vidrios volcánicos) y los álcalis o sales alcalinas (aportados por el cemento, principalmente, y, en menor proporción, por áridos y aditivos) puede combatirse paradójicamente con el empleo de puzolanas, evitando sus peligrosos efectos expansivos. Paradójicamente, porque la puzolana es un árido de gran reactividad frente a los álcalis; sin embargo, su finura y su reactividad son tales que, gran parte de la reacción se produce tan rápida y homogéneamente que no crea dilataciones una vez fraguado y endurecido el cemento.

Por otro lado, la adición de puzolana a los cementos que presentan expansión, singularmente si su empleo va acompañado de tratamiento térmico, transforma un producto defectuoso en un cemento que puede emplearse con toda seguridad y sin precauciones especiales. Esto, naturalmente, es aplicable con garantías cuando la expansión es producida por cal libre.

En resumen, las múltiples ventajas que pueden lograrse con el empleo de las puzolanas en los cementos pueden agruparse de la siguiente manera: (5).

A) En estado fresco

Rebajando la relación agua/cemento.

Reduciendo la segregación y evitando la exudación.

B) En resistencias mecánicas

Aumento, a largo plazo, tanto a tracción como a compresión, al prolongar el periodo de endurecimiento, mejorando la relación tracción-compresión.

C) En la impermeabilidad

Produciendo mayor cantidad de tobermorita (silicatos hidratados).

Reduciendo la porosidad y, en consecuencia, aumentando la compacidad.

Evitando la formación de eflorescencias por sales, o deslavado de la cal.

D) En la estabilidad de volumen

Frente a la expansión por cal libre, sobre todo si hay tratamiento térmico.

Frente a la expansión por sulfatos.

Frente a la expansión por áridos reactivos.

Frente a la retracción hidráulica por secado, con ciertos tipos y proporciones de puzolana.

Frente a la retracción térmica y posterior fisuración, al ser menor el calor de hidratación o producirse menor elevación de temperatura.

E) En la durabilidad química

Frente al ataque de aguas puras y ácidas.

Frente a ataques por aguas y suelos selenitosos.

Frente a ataques por agua de mar.

Frente al ataque por gases de descomposición y fermentación de materias orgánicas.

6. APLICACIONES DE LAS PUZOLANAS Y DE LOS CEMENTOS PUZOLANICOS

6.1. Puzolanas

Ciertos tipos de puzolanas naturales (tales como la piedra pómez en sus distintas variedades) o

artificiales (tales como las cenizas volantes) pueden tener, entre otras, las siguientes aplicaciones:

- En vías de comunicación, como árido antideslizante y como filler en las capas de rodadura.
- Como elemento filtrante in situ (camino, campos de deportes, etc.) o en prefabricados (por ejemplo, tubos de drenaje).
- En estabilización mecánica o química de suelos.
- En suelo-cemento.
- En problemas de estanqueidad (inyecciones).
- En la preparación de áridos ligeros.
- En cerámica porosa.

6.2. Cementos puzolánicos (morteros y hormigones)

Todas las cualidades mencionadas a lo largo de esta exposición hacen que los cementos puzolánicos sean de uso más general y de espectro más amplio que los portland, siendo preferidos para gran número de empleos específicos por alguna propiedad particular.

Entre las aplicaciones destacan las siguientes:

- Cimentaciones en cualquier tipo de terrenos.
- Hormigones en masa y, especialmente, en presas y obras hidráulicas.
- Hormigones sumergidos o en contacto con aguas puras, ácidas o selenitosas.
- Hormigones en contacto con terrenos yesíferos.
- Hormigones expuestos a la acción del agua de mar o ambientes marinos.
- Elementos de saneamiento, fundamentalmente en canalizaciones.
- Hormigones medianamente refractarios con base portland (hasta 1.200° C).
- Morteros para fábrica de ladrillo, mampostería, solados y alicatados.
- Morteros para enfoscados y enlucidos.

Además, hay muchas aplicaciones en que pueden emplearse indistintamente portland o puzolánico, con sólo tener en cuenta el tipo resistente adecuado según establecen las Normas o Pliegos de Condiciones.

6.3. Cementos puzolánicos (Hormigón armado y pretensado)

Sobre su empleo en hormigón armado y, sobre todo, en pretensado, se han expuesto, en ocasiones, dudas sobre si la presencia de puzolana puede deteriorar la protección frente a la corrosión de las armaduras. Numerosos ensayos, experiencias y realizaciones prácticas han demostrado que estas ideas no acaban de tener un fundamento claro.

En primer lugar, la adición de puzolana no produce cambios sustanciales en la alcalinidad del hormigón, que mantiene una película protectora de hidróxido ferroso sobre la superficie del acero, película cuya función es prevenir el acceso de agua y oxígeno a dicha superficie.

Como alcalinidad debe considerarse la concentración de iones OH^- , definidores del pH, y en ello intervienen también, en gran medida, los hidróxidos alcalinos además del cálcico, al menos empleando ciertas puzolanas.

Esto se observa analizando los resultados del ensayo de puzolanicidad de los cementos donde, en muchas ocasiones, a pesar de reducirse sustancialmente la cal en solución, se mantiene y hasta se aumenta la alcalinidad total en el tiempo. A pesar de las grandes diferencias entre el ensayo y la realidad práctica en cuanto al grado de dilución, resulta poco probable que, en cualquier caso, sea muy notorio el descenso del pH al emplear un cemento puzolánico, no llegando, en ningún caso, a rebasar el nivel exigido para la pasivación del acero.

En segundo término, la reacción puzolánica aumenta la impermeabilidad del hormigón, disminuyendo por tanto la penetración hasta la superficie del acero, de agua y oxígeno, por una parte (causa directa de la corrosión), y de anhídrido carbónico y sales disueltas, por la otra (causas de la destrucción de la pasivación).

Finalmente, la práctica ha demostrado que los hormigones hechos con cemento puzolánico muestran mejor comportamiento en lo que respecta a la fisuración (causa frecuente en los fenómenos de corrosión de armaduras). Este mejor comportamiento es consecuencia de la menor contracción térmica y de una mayor capacidad de fluencia bajo carga antes de que se produzca la rotura debido a la mayor riqueza en productos amorfos o microcristalinos en la pasta hidratada.

No se debe olvidar que un hormigón fisurado, lo mismo que un hormigón permeable, pueden facilitar la penetración de sustancias nocivas en solución o en fase gaseosa.

7. CONCLUSION

Como colofón de esta exposición, debe precisarse que la incorporación de las puzolanas a los cementos portland no es un hecho nuevo ni, por supuesto, consecuencia de la crisis energética. Su ya viejo empleo como material de construcción, se ha perfeccionado y desarrollado ampliamente a lo largo del presente siglo, acusándose más en los últimos años (y aquí sí participa ya la crisis energética) la necesidad de un mayor conocimiento y aprovechamiento de recursos de todo tipo y origen, para su aplicación en la industria del cemento.

En esta línea están trabajando todas las Organizaciones, tanto a nivel nacional como internacional, comenzando por las de Normalización. Así, el Comité Europeo de Normalización (CEN), a través de la TC-51 (Cementos), ha previsto una serie de tipos de cemento que permiten cubrir todas las composiciones técnicamente posibles con incorporación de adiciones.

En una encuesta llevada a cabo por la Agencia Internacional de la Energía de la OCDE, sobre evolución de la composición de los cementos hasta el año 2000, se llegó a los resultados orientativos del cuadro IV. (6).

CUADRO IV
Proporción (%) de constituyentes distintos del clínker en cemento

Países o zonas	Años			
	1980	1983	1990	2000
Europa Occidental (CEMBUREAU)	15	17	23	30
América del Norte	3	5	12	20
Japón	1	3	10	20
OCDE	9	11	16	25

Debe señalarse la ventaja de la industria europea en el consumo de adiciones, frente al resto del mundo. Hoy día, estos cementos, en sus distintos tipos (compuestos, de horno alto y puzolánicos), representan ya la mitad de la producción, esperando que en el año 2000, habida cuenta de las adiciones técnicamente admisibles (un tercio para las puzolanas y dos tercios para las escorias), los cementos compuestos puedan llegar a representar más de las tres cuartas partes de la producción. Los cementos portland quedaran relegados a cementos especiales, para emplear en casos muy particulares en los que se exijan prestaciones excepcionales.

Teniendo en cuenta la situación de la tecnología de fabricación y el desarrollo previsible de los cementos compuestos, la evolución estimada de las necesidades energéticas (en su casi totalidad de carbón) en los próximos años, en función de la producción de cemento calculada para los países de la OCDE, será la del cuadro V.

CUADRO V
Reducción global de las necesidades de energía

		Año		
		1980	1990	2000
Producción de cemento (10 ⁶ T)		376	423	451
(%)		(100)	(112)	(120)
Consumo de carbón	Global (10 ⁶ T)	56,0	48,9	44,3
	(%)	(100)	(87)	(79)
	Específico (kg/T cemento)	149	115	98
	(%)	(100)	(78)	(66)

Es decir, a pesar de aumentar la producción en un 20 %, el consumo de carbón puede disminuir en otro 20 %, lo cual representa un ahorro de un tercio de la energía necesaria, por tonelada de cemento.

Esto es una forma de dominar la crisis energética, y en ello colaboran, y lo harán en mayor medida en el futuro, las puzolanas, a las que hemos dedicado esta exposición.

Muchas gracias.

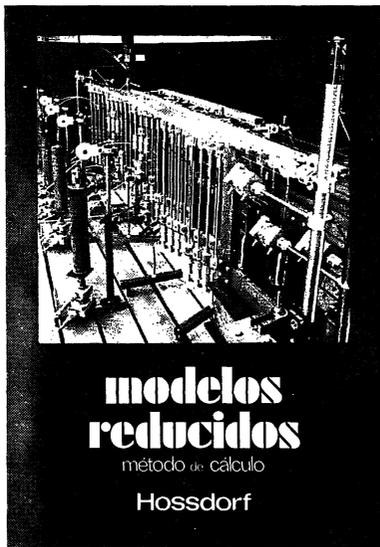
8. BIBLIOGRAFIA

- (1) "Contribución de la industria del cemento y del hormigón a la conservación de la energía". Cemento-Hormigón, n.º 536, Agosto 1978, pp. 818-25.
- (2) F. MASSAZZA: "Química de las adiciones puzolánicas y de los cementos de mezcla". Il Cemento, n.º 1, 1976, pp.3-38.
F. MASSAZZA y V. COSTA: "Aspectos de la actividad puzolánica y propiedades de los cementos puzolánicos". Il Cemento, n.º 1, 1979, pp. 3-18.

- (3) R. SERSALE: "Problemas de mineralogía aplicada". Rend. Soc. Mineral. (Italia), 18, 1962, pp. 215-258.
- (4) R. SERSALE: "Estructura y caracterización de las puzolanas y de las cenizas volantes". 7.º Congr. Intern. Chim. Cim. (París), 1, Tema IV, 1980, pp. IV-1/3-21.
- (5) J. CALLEJA: "Las puzolanas". Íón, núms. 340, 341, 343 y 344, noviembre y diciembre 1969, febrero y marzo 1970, pp. 623-38, 700-713, 81-90 y 154-60.
- (6) P. DUTRON: "La respuesta de la industria cementera a los problemas económicos y técnicos actuales". Cemento-Hormigon, n.º 580, marzo 1982, pp. 211-226.

* * *

publicaciones del i.e.t.c.c.



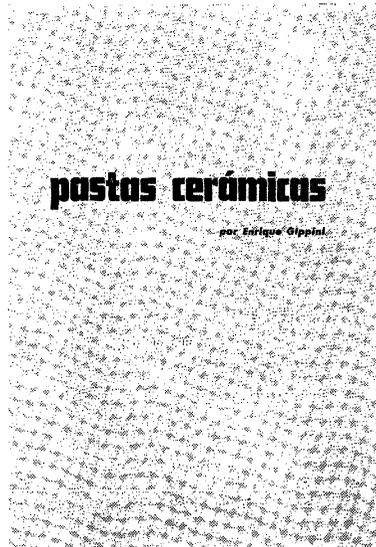
Modelos reducidos. Método de cálculo

H. Hossdorf, Ingeniero Civil

La técnica de los ensayos en modelos reducidos de estructuras sufre hoy día una decisiva metamorfosis. Hasta hace poco era un medio más bien de artesanía, que no siempre era tomado en serio por los académicos teorizantes para comprender el comportamiento resistente de las estructuras complejas y al que se acudió las más de las veces, como a un último remedio debido a sus indiscutibles insuficiencias. Sin embargo, en poco tiempo y gracias a su conexión con los ordenadores digitales, se ha transformado en un instrumento científicamente valioso, que no puede quedar a un lado en la práctica diaria del Ingeniero Projectista.

Un volumen encuadernado en cartón plastificado con lomo de tela, de 17 x 24 cm, compuesto de 250 páginas, 158 figuras y fotografías.

Precios: 1.800 ptas.; \$ USA 26.00.



PASTAS CERAMICAS

Enrique Gippini,
Dr. en Ciencias Químicas

El nexo de unión de todos los capítulos del libro es la idea subyacente de crear una teoría general de pastas. Moldeo y Cocción son los dos procesos a los que debe adecuarse la composición. Las características físico-químicas más importantes que deben presentar las pastas para que los resultados de estos procesos sean satisfactorios y cómo pueden cambiarse dichas características son los temas de discusión escogidos.

Un volumen encuadernado en cartón, de 25 x 17 cm, compuesto de 259 páginas, 143 figuras y fotografías, y 37 tablas.

Precios: 2.000 ptas.; \$ USA 29.00.



La presa bóveda de Susqueda

A. Rebollo,
Dr. Ingeniero de Caminos

El esfuerzo del constructor de presas se sitúa, por su pretensión de perennidad, a contracorriente de las tendencias de la civilización actual, caracterizada por lo fungible. Pueden evocarse las 10.000 grandes presas en funcionamiento o en construcción que están envejeciendo y reclaman los cuidados gerontológicos para mantener y perfeccionar su servicio y garantizar su inalienable pretensión de perennidad. En la medida en que todas nuevas obras, grandes o pequeñas, son portadoras de riesgos ecológicos y, a veces, catastróficos, que aumentan con el envejecimiento, la gerontología de las presas es todo un emplazo. La acción adelantada de Arturo Rebollo en este terreno marca un camino a seguir para todos los que aman su propia obra con la devoción paternal que él ha puesto en Susqueda.

Un volumen encuadernado en cartón plastificado con lomo de tela, de 18 x 24,5 cm, compuesto de 408 páginas, 330 figuras y fotografías y 39 tablas.

Precios: 1.700 ptas.; extranjero, \$ USA 24.00.