

EL AHORRO DE ENERGIA EN LA FABRICACION DE CEMENTO: ULTIMOS AVANCES SOBRE LAS ADICIONES PUZOLANICAS

(ENERGY SAVINGS IN THE CEMENT MANUFACTURE: LAST ADVANCES ON POZZOLANIC ADDITIONS)

R. Talero, Dr. Química Industrial. IETcc/CSIC.

616-3

RESUMEN

Se da una rápida panorámica de los planteamientos y actividad operacional llevados a cabo para intentar esclarecer en gran medida esta vasta problemática del comportamiento de las Adiciones Pozzolánicas –en forma de Cementos de Mezcla constituidos por Cementos Portland (clinker portland en su caso más regulador de fraguado), P o PY y Puzolana(s) únicamente, hasta un 40% en masa de esta(s) última(s)– frente a distintos medios más o menos seleníticos, así como también de las principales conclusiones, deducciones y consejos prácticos obtenidos y de las aplicaciones desarrolladas a raíz de la finalización oficial de unos densos trabajos (*) sobre las mismas, llevados a cabo en este Instituto.

Asimismo se hace hincapié de la trascendencia inmediata que las Aplicaciones de tales trabajos, van a tener en las industrias del Cemento y el Hormigón.

SUMMARY

This work draws up the operational activities carried out in order to clear the problematic of the behaviour of Pozzolanic Additions –mixed cements made only of Portland Cement (portland clinker is just a stronger setting regulator), P or PY and pozzolana, this one up to 40% in mass– facing the more or less selenitic means, so as the obtained deductions, conclusions and practical advices and the developed application areas till the end of this wide work (*) carried out in this Institute.

It also emphasizes the far-reaching that the application of this work will have on Cement and Concrete industries.

GENERALIDADES

En pasadas ediciones de esta misma revista, nuestros compañeros del E.I. «Clinkerización» del IETcc dieron una exacta panorámica del presente y futuro del ahorro energético en la fabricación del cemento (**). Asimismo indican con gran claridad y pragmatismo las dos líneas fundamentales de trabajo netamente definidas y diferenciadas a un tiempo,

- la que se refiere al ahorro energético en la propia clinkerización, de cuyos extraordinarios progresos viene dando periódicamente dicho E.I. puntual información en revistas especializadas, y

- la que se refiere al ahorro energético después de la propia clinkerización o sea mediante la adición al clinker de cemento portland una vez fabricado de adiciones inertes y/o activas en determinadas proporciones, y de entre estas últimas las que hacen referencia al empleo de puzolanas naturales, cenizas volantes, humo de silice, arcillas calcinadas y similares, las cuales han sido las que ha motivado la publicación del presente artículo informativo,

sin olvidar tampoco por otra parte y en igual sentido todo lo concerniente al estudio de canteras, la prehomogeneización de materias primas, la homogeneización de los crudos, el efecto de elementos minoritarios más o menos mineralizadores sobre la clinkerización, el empleo de materiales no tradicionales (generalmente subproductos industriales) como sustitutivos en forma parcial –o incluso total– de arcillas y calizas, los efectos de la molturación conjunta o separada de los mismos, el bajísimo rendimiento energético que se alcanza durante

(*) R. Talero: «Contribución al Estudio Analítico y Físico-Químico del Sistema: Cementos Pozzolánicos-Yeso-Agua»: Tesis Doctoral, Univ. Complutense de Madrid, Facultad de C. Químicas, 1986.

(**) M. T. Blanco-Varela y T. Vázquez: «La Investigación en la Química del Cemento: Ahorro de Energía en la Clinkerización», Informes de la Construcción 331.

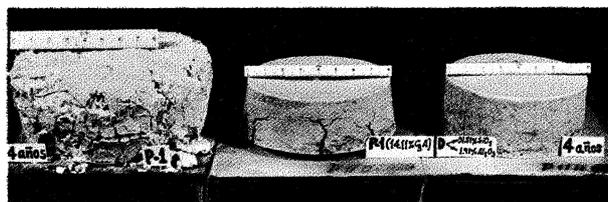
la fase de la molienda del clinker (apenas si se aprovecha un 5% de la energía suministrada), etc., etc. En fin, toda una gran variedad de circunstancias que han de ser estudiadas, conocidas y desarrolladas para que la fabricación del cemento sea más racional y económica cada día.

Pues bien, volviendo al tema que nos ocupaba o el de la adición al clinker de cemento portland de distinto tipo de adiciones inertes y/o activas y de entre estas últimas la que hace referencia a las puzolanas naturales y artificiales, cenizas volantes y similares, bástenos saber que la importancia cuantitativa del posible ahorro energético basado en la sustitución del clinker por adiciones activas, se pone de relieve en el siguiente dato: 9,75 t de adiciones suponen el ahorro de 1 t de fuel-oil (*). De aquí que no sea de extrañar que al igual que en clinkerización, el IETcc se hiciera eco de esta temática hace bastante tiempo, fruto de la cual y en lo que concierne a las puzolanas, pensamos que se ha conseguido dar un gran paso para comprender más y mejor su comportamiento y de él poder deducir el empleo más racional en calidad y cantidad de cada una de ellas, como veremos a continuación.

Para ello y puesto que en general la variabilidad en composición físico-química de las puzolanas puede considerarse infinita, en especial en lo que a su composición química se refiere, ya que los contenidos de los óxidos ácidos fundamentales SiO_2 (%), Al_2O_3 (%) y Fe_2O_3 (%) de las mismas varían respectivamente entre el 42% y el 85% para la SiO_2 , entre el 5% y el 20% para la Al_2O_3 y entre el 1% y el 14% para el Fe_2O_3 , lo cual haría que su muestreo hubiera de ser cuantioso y su estudio interminable, pues siempre habría alguna(s) que según tales planteamientos se quedara(n) fuera del mismo, se pensó realizar el estudio de ellas eligiendo el menor número posible de las mismas, pero de tal modo que todas pudieran sentirse representadas directa o indirectamente en dicho estudio. A tal fin y partiendo de la base que para llevar a cabo nuestro trabajo no se iba a atender en absoluto al origen o lugar de obtención de las mismas sino a su composición química mayormente se eligió,

- una puzolana que tuviera un gran contenido de SiO_2 , a ser posible amorfa, y un bajo contenido en Al_2O_3 , y la elección recayó en una diatomita purificada y calcinada y en un kieselgur natural, que es como presumiblemente se empleará este tipo de puzolanas en las industrias del cemento y el hormigón,

- una puzolana que tuviera un gran contenido de Al_2O_3 , a ser posible amorfa, y un bajo contenido de SiO_2 , o al menos aunque no lo fuera que el mismo no interfiriera, a ser posible, en el comportamiento de aquella Al_2O_3 amorfa, y la elección recayó en un metacaolín cuarzoso ($\approx 50\%$ de metacaolín) el cual se preparó en el laboratorio calcinando a 700°C durante 2 h el caolín cuarzoso originario, y
- las tres puzolanas naturales (y dos cenizas volantes) más utilizadas comúnmente por las industrias del cemento y el hormigón españolas, y



Obsérvese el buen comportamiento de la Puzolana D (diatomita) ante el ataque del yeso. Cemento Portland P-1 (14, 11% de C_3A) sólo y con Puzolana D, 80/20 y 60/40, en tortas L-A, edad 4 años.



Idem foto superior, Cementos de Mezcla P-1/D 80/20, 70/30 y 60/40 en tortas L-A, edad 4 años.

todas ellas con un grado de finura de molido muy aproximado y similar al exigido a estos materiales por la normativa existente de mayor influencia internacional.

Del mismo modo y por idénticos motivos, se habrían de elegir, lógicamente, una gama de cementos portland cuyo contenido de C_3A variara del

- 15% al 5% para los portland, P y del
- 5% al 0% para los portland de elevada resistencia al ataque de los iones sulfato, PY.

A continuación se prepararon las mezclas más adecuadas para cada ensayo de Cemento Portland P-n.º o PY-n.º más Puzolana X, en las proporciones (%) en masa

Cemento P-n.º o PY-n.º

Puzolana X

(*) OFICEMEN. Investigación del ahorro energético en la producción de cemento, Madrid, 1980.

80%/20%, 70%/30% y 60%/40%, o sea aquellas que están más próximas a las proporciones más empleadas por las fábricas de cemento españolas para preparar los actuales cementos PA y PUZ. Seguidamente a cada cemento de mezcla preparado se le ha añadido como agresivo las cantidades oportunas de piedra de yeso natural, $-\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ de elevada riqueza y con un grado de figura de molido adecuado-, del 15,05%, 33,33% y 45,16%, en masa, respectivamente, dándoles a continuación la forma

- de TORTA de pasta parcialmente hidratada del cemento a ensayar más yeso en relación 2:1 (de 80 mm de \varnothing y 30 mm de altura) según prescribe expresamente el método acelerado de ensayo de Le Chatelier Anstett (L-A), o
- de PROBETA, de 1" x 1" x 11 1/4" y de 1 x 1 x 6 cm, respectivamente, de mortero (1:2,75, mezcla-conglomerante cemento a ensayar más yeso como agresivo) selenitoso,
 - con 15,05% (= 7,0% SO_3), según prescribe expresamente el método acelerado de ensayo ASTM C 452, o
 - con 45,15% (= 21,0% SO_3), según prescribe expresamente el método acelerado de ensayo HIBRIDO-1,

las cuales se conservaron en sus medios de conservación acuosos apropiados respectivos, al objeto de provocar las reacciones de hidratación selenitosa subsiguientes y tratar de determinar los fenómenos físico-químicos y mecánicos originados correspondientes, merced a la medición de los parámetros más adecuados a cada uno de ellos. Tales parámetros determinados han sido,

- el $\Delta\varnothing$, $Vc\varnothing$ ($\Delta\varnothing/\text{día}$), la altura y la penetración de la aguja de Vicat, PAV, en el caso de las tortas, y
- el ΔL , la Vcl ($\Delta L/\text{día}$), las Resistencias Mecánicas a Flexotracción RMF y COMPRESION, RMC, la Porosidad, la Velocidad de Ultrasonido, Vu la cantidad de iones SO_4^- en los líquidos de conservación correspondientes y los derivados respectivos, en el caso de las probetas,

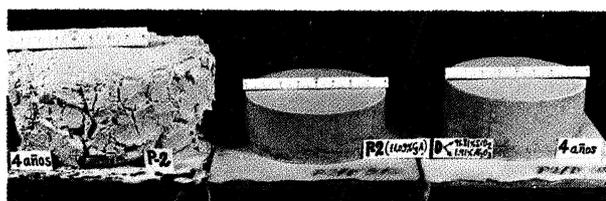
y los resultados experimentales obtenidos de toda esta labor han puesto de manifiesto que

- 1.a Los cementos portland con adición de materias Puzolánicas únicamente hasta un 40% en masa, se comportan de modo errático en sus resistencias ante el ataque de los iones sulfato, RS, y mecánicas a edades iniciales, RM, especialmente. La interpretación que cabe dar a estos resultados se fundamenta principalmente

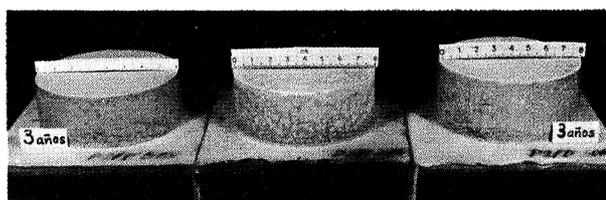
en los efectos que ejercen en el fraguado y endurecimiento, el estado de las alúminas aportadas por la puzolana y por el cemento portland (en éste formando parte del C_3A principalmente) y a la mayor o menor reactividad de la sílice puzolánica.

- 2.a Tomando como base la conclusión general anterior, se pueden perfeccionar las RM a edades iniciales especialmente, o la RS, de un cemento portland, por la(s) adición(es) puzolánica(s), si la(s) misma(s) es(son) compatible(s), por su composición y estructura, con la composición química del cemento portland de partida, para la consecución de cada objetivo anterior.
- 3.a Las expansiones producidas por formación de ettringita de origen puzolana y de origen cemento portland al formarse conjuntamente, son más que aditivas, SINERGICAS.

Se han establecido métodos tecnológicos apropiados y rápidos, que permiten determinar de una forma sencilla y económica la ACCION SINERGICA MAXIMA en cada caso, y conocer las dosificaciones más convenientes, en cantidad y calidad, de los componentes, Cemento Portland (o clínker portland en su caso) Puzolana y Yeso, para obtener Cementos de Mezcla, portland más puzolana únicamente, de características prefijadas.



Obsérvese el buen comportamiento de la Puzolana D (diatomita) ante el ataque del yeso. Cemento Portland P-2 (11,09% C_3A) sólo y con Puzolana D, 80/20 y 60/40, en tortas L-A, edad 4 años.



Idem foto superior, Cementos de Mezcla P-2 80/20, 70/30 y 60/40 en tortas L-A, edad 4 años.

Por otra parte y además, tales métodos tecnológicos sirven igualmente para clasificar y caracterizar a un conjunto de puzolanas al objeto de poder predecir su comportamiento y con él su grado más adecuado, o no, para alcanzar un fin determinado.

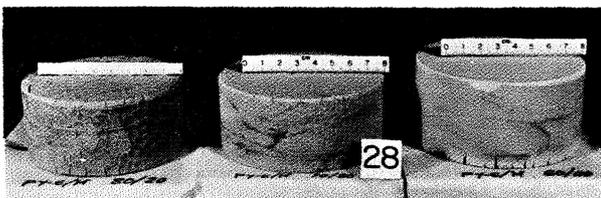
De igual modo, tales métodos tecnológicos sirven también para determinar la cantidad «Optima de SO_3 » u «Optimo de SO_3 » de un Cemento de Mezcla así constituido –el cual en fundamento es muy diferente al «Optimo de SO_3 » de un cemento portland–, para obtener la ACCION SINERGICA MAXIMA o ADECUADA –es decir, la máxima rentabilidad tecnológica (y económica) de sus componentes portland y puzolana–, según las características del elemento a hormigonar o en su caso la obra civil completa. Tal óptimo de SO_3 podría sobrepasar tranquilamente, en ocasiones, según la puzolana que los constituya, el valor máximo permisible para los cementos de mezcla PA, 4,0% de SO_3 , y PUZ, 3,5% de SO_3 , pudiendo llegar incluso, en ambos tipos de cementos, al valor tope máximo del 7,0% de SO_3 , sin peligro alguno para aquellas estructuras citadas.

Por lo tanto según todo lo anterior y los resultados experimentales obtenidos de estos trabajos sobre dicha materia realizados en el IETcc, en adelante TODOS los cementos portland con puzolana(s) únicamente hasta un 40% en masa de ésta(s), considerados como un TODO UNICO, HOMOGNEO E INDIVISIBLE, no se podrán continuar considerando como de ELEVADA o MODERADA RESISTENCIA AL ATAQUE DE LOS IONES SULFATO, en general, y de calcio (yeso), en particular, existiendo entre los mismos similar grado de variabilidad de comportamiento, elevado, moderado y escaso, aplicable aún dentro de cada grupo citado, ante dicho ataque, al igual que ocurriese entre los portland.

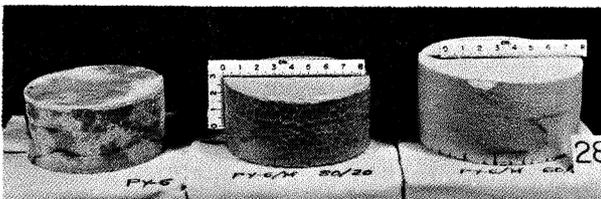
Del mismo modo y por idénticos motivos, otro tanto se puede decir de las puzolanas que los constituyen en cada caso, las cuales, en contra de la opinión generalizada, tampoco pueden continuar considerándose como un TODO UNICO, HOMOGNEO E INDIVISIBLE, sino TODO LO CONTRARIO, ya que TODAS NO HACEN que el grado de RS o RM a edades iniciales, de su(s) Cemento(s) de Mezcla respectivo(s), resulte ser siempre superior al correspondiente a su cemento portland P o PY, constitutivo sólo, y viceversa, sino tan sólo LA(S) ADECUADA(S) PARA CADA FIN. De aquí que según ello se proponga a raíz de tales trabajos que a las puzolanas no se las continúe clasificando como se venía haciendo, bien por su origen geológico o bien por su lugar de procedencia, sino por su utilidad tecnológica más adecuada, la cual al ser función directa de su composición química, da por resultado que se las deba calificar en adelante como,

- eminentemente «Silícicas», o
- eminentemente «Alumínicas», o
- incluso quizás, eminentemente «Férricas», o

- combinaciones diversas de tales calificaciones anteriores, es decir, o «Silico-Aluminosa», o «Alumino-Silícica», o «Férrico-Alumínica», etc., según sea el primer calificativo el carácter predominante sobre el resto, con sus consecuencias tecnológicas correspondientes.



Obsérvese el mal comportamiento de la Puzolana M (metacaolín) ante el ataque del yeso. Cemento Portland de elevada resistencia sulfática PY-6 (0,00% C_A) sólo y con Puzolana M, 80/20 y 60/40, en tortas L-A, edad 28 días.



Idem foto superior, Cementos de Mezcla PY-6/M 80/20, 70/30 y 60/40, en tortas L-A, edad 28 días.

Fotos: J. J. López del Amor. IETcc/CSIC.

Finalmente se ha de hacer saber que aunque entre tales calificaciones anteriores no figuran las correspondientes a las Cenizas Volantes «calcáreas» ni «sulfo-cálcicas», por no haber sido estudiadas explícitamente en estos trabajos, ello no es óbice para poder comprender, según los resultados experimentales aquí obtenidos, que su comportamiento más probable queda en gran medida implícito en los mismos.

FUTURO

Periódicamente y a través de los servicios de publicaciones del IETcc se tratará de ir dando cuenta puntual y detallada de tales trabajos al objeto de que los especialistas del ramo puedan conocer con más detalle las consecuencias de los mismos y deducir las influencias inmediatas tecnológicas y económicas que los resultados obtenidos de aquéllos pueden llegar a reportar a las industrias del cemento y el hormigón, así como también a aquellos especialistas de la ingeniería civil que pretendan acometer un estudio riguroso sobre la tecnología de los nuevos hormigones a preparar con tales cementos de mezcla, portland «X» más puzolana «Y» únicamente, propugnados a raíz de estos trabajos para alcanzar cada objetivo concreto.

NOTA DEL AUTOR

El autor de este INFORME desea hacer constar su agradecimiento al Instituto «Eduardo Torroja» de la Construcción y el Cemento, del C.S.I.C., por las facilidades proporcionadas para la realización de estos trabajos. Y dentro del mismo y muy especialmente a todas las personas que lo han formado y constituido hasta nuestros días y que de algún modo me han proporcionado las facilidades para llevarlo a cabo. Lógicamente y de entre todas ellas, cabe destacar, por su importancia para el autor, a D. Pablo García de Paredes y Gaibrois (†).