

Cementos puzolánicos*

Prof. Dr. JOSE CALLEJA

IETcc

1. INTRODUCCION

1.1. Cuestiones de Nomenclatura

SEÑORES:

Me cabe el alto honor de haber sido invitado por la Associação Brasileira de Cimento Portland, por mediación del Presidente de su Consejo Técnico, el Profesor Francisco de Assis BASILIO, con cuya amistad me honro, para tomar parte en los actos de inauguración del Centro Técnico do Cimento.

Esta invitación lleva consigo el ser incluido en el programa del Simposio de dicha inauguración, participando en el mismo con la aportación de una conferencia.

Yo voy a hacer con una exposición sobre ... Pero aquí surge mi primera duda. En la agenda de este día, y dentro del tema "Tecnología de los cementos", figura como título de mi conferencia el siguiente: CEMENTO PORTLAND PUZOLANICO. Todos sabemos lo que es, pero ¿debe llamarse así, o debe llamarse CEMENTO PUZOLANICO solamente, o debe hablarse de CEMENTOS PUZOLANICOS, en plural?

Yo supongo que habrá opiniones en pro y en contra de una u otra forma de denominación, todas defendibles y todas válidas, porque en realidad no se trata de una cuestión fundamental. Mi opinión personal, discutible, queda de manifiesto en el encabezamiento de este escrito y, eso sí, voy a tratar de ilustrarla, como ya hice al hablar de las nuevas normas españolas, en la Reuniao de Técnicos da Industria do Cimento.

Según países, los cementos puzolánicos, tal y como se entienden en general, se denominan de forma distinta, con y sin el apelativo de portland. Según datos del CEMBUREAU, de 17 países que —incluida España— tenían "Cementos puzolánicos" normalizados en 1968, 9**, es decir, el 53 por ciento, los denominaban cementos *portland* puzolánicos (o con puzolanas, o de cenizas volcánicas, o de "trass"), pero siempre con el apellido *portland*; 7***, esto es, el 41 por ciento, los denominaban cementos puzolánicos (o con puzolanas, o "a la puzolana", o de "trass"), pero sin el sobrenombre de *portland*; y un país****, lo que supone el 6 por ciento, los llamaba de las dos maneras, según se hiciera referencia a una u otra de dos clases diferentes de ellos incluidas en sus normas.

* Conferencia pronunciada en la Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), de Sao Paulo, Brasil, en mayo de 1976, y en el Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI) de Buenos Aires, Argentina, en junio de dicho año.

** Bulgaria - China - Holanda - Hungría - India - Méjico - Rumania - URSS - USA.

*** República Federal de Alemania - Checoslovaquia - España - Italia - Japón - Portugal - Turquía.

**** Yugoslavia.

Como es de apreciar, las opiniones al respecto se hallan equilibradamente repartidas, si bien predomina ligeramente la tendencia a añadir el apelativo de *portland*. Por otra parte, la tendencia opuesta se manifiesta precisamente en aquellos países de más destacada y antigua tradición puzolánica, y en particular en Italia.

En España, no sólo en las normas vigentes en 1968 y aún hoy día, sino en las que van a entrar en vigor a partir del 1.º de junio próximo, se incluyen los cementos puzolánicos sin la denominación de *portland*, lo cual concuerda con la opinión de quien expone, y a pesar de que ello no corresponda —por ahora y por no muy amplio margen de diferencia— a los hábitos internacionales mayoritarios.

Por otra parte, no todos los cementos que contienen puzolanas se llaman puzolánicos —con o sin el sobrenombre de *portland*— ni tendría por qué ser así. Recuerdo siempre a propósito de este asunto, los briosos y baldíos esfuerzos de los italianos en las reuniones de la ISO hace algunos años, frente a representantes de otros países, para darles a entender que cementos “a la puzolana” y cementos “puzolánicos” eran cosas distintas.

Se podría decir que los primeros son aquellos que, por contener puzolana en proporción sustancialmente menor que los verdaderos puzolánicos, no tienen que cumplir necesariamente con ninguna prescripción o ensayo relativo a “puzolanicidad”, Mientras que los segundos deben de cumplir obligatoriamente lo estipulado al respecto. Este ha sido el criterio adoptado en las nuevas normas españolas para cemento, como ya tuve ocasión de precisar.

1.2. Justificación de los cementos puzolánicos

En estos momentos de crisis por los que atraviesa el mundo —crisis de energía en general y del combustible (petróleo) en particular—, hay tres razones que justifican un desarrollo, previsiblemente más pujante cada vez, de los cementos puzolánicos.

La primera razón es la clásica, de orden técnico: los cementos puzolánicos, y sobre todo si son de la misma categoría resistente que los correspondientes *portland*, es decir, si cumplen con las mismas resistencias mínimas que se exigen a éstos a todas las edades, tienen propiedades y comportamientos de los cuales los *portland* carecen; y, por lo tanto, son utilizables con ventaja sobre éstos en muchos usos específicos, y en particular en los que tenga que ver el calor de hidratación, la plasticidad, la durabilidad frente a aguas ácidas y carbónicas agresivas, sulfatos, etc.

La segunda razón es de orden económico y está impuesta por las circunstancias, y por la necesidad de ahorrar energía —combustible (fuel-oil)—; pero no (o no solamente) a nivel de fábrica de cemento, o de empresa o firma cementera que reúna varias fábricas, o de sector cementero de un país, sino a nivel del país en su totalidad.

Si se admite como dato de referencia que la fabricación de una tonelada de cemento consume en promedio del orden de 100 kg de fuel-oil, la sustitución de clínker por puzolana en proporciones de 25, 30, 35 ó 40 por ciento supone un ahorro de otros tantos kilos de fuel-oil en cada caso (en promedio 32,5). Si se supone una producción de clínker, como la actual española, del orden de 20 millones de toneladas/año: si se supone asimismo que no más del 10 por ciento de esa producción va destinado a cementos puzolánicos, el ahorro anual de fuel-oil, oscilante entre 50 y 80 mil toneladas, sería, en promedio, de 65.000 toneladas, que podrían destinarse a otras necesidades. En forma análoga deberían intentar contribuir otros sectores industriales, si las circunstancias lo demandasen.

Pero además hay otro aspecto económico que reside en el hecho de utilizar, cada vez más y mejor, las cenizas volantes de central térmica como puzolanas. A todo subproducto le es atribuible una parte de la energía gastada en el proceso que da lugar a él. Si tales subproductos se desprecian como materiales de desecho, sin aprovechamiento, esa parte de energía gastada que les corresponde se pierde en su totalidad; pero, de otro modo, se puede aprovechar. Tal sucede con las cenizas volantes de las centrales térmicas, cuando se recogen y se utilizan como puzolanas.

La tercera razón es de índole ecológica. Si esas cenizas volantes no se recogen porque no hay interés en ello, contaminan; y si se acumulan y no se utilizan, llegan a constituir, como las escorias de horno alto que no se aprovechan, escombreras que afean el paisaje. En otro caso, el transporte para su vertido al mar, por ejemplo, supone un gasto adicional de energía.

Vemos que, por todo ello, la utilización de las puzolanas naturales y de las cenizas volantes puede contribuir a la mejora técnica de los cementos y al saneamiento de la economía nacional.

Naturalmente que no todas, ni siquiera la mayoría de las fábricas de cementos de un país, podrán hacer cementos puzolánicos —o siderúrgicos— en condiciones económicas iguales o comparables. Ello dependerá de su proximidad a los yacimientos de puzolanas naturales, cuando existan, o a las centrales térmicas —o plantas siderúrgicas—; y del precio y gastos de transporte de las puzolanas y cenizas volantes —o escorias—. Esto quiere decir que la producción de cementos puzolánicos —y asimismo de cementos siderúrgicos— deberá ser planificada en cada país, en función de las necesidades que de ellos se tengan ya, o se prevean para el futuro, y de las disponibilidades y facilidades para fabricarlos. Y quiere decir también que, a tenor de lo que precede, un cemento puzolánico de una categoría dada podría tener distinto costo de producción en diferentes fábricas y, corresponderle, en consecuencia, distinto precio de venta en las mismas.

De cualquier modo, el empleo de puzolanas y cenizas —y escorias siderúrgicas—, es, en algunas zonas y para algunas fábricas, prácticamente el único medio de abaratar el cemento o de hacer frente a importantes alzas de precio, neutralizándolas al menos en parte. Y esto porque, conseguir lo mismo por la vía de la innovación en las materias primas, en los procesos, en la maquinaria o en el empleo de la energía, es extraordinariamente difícil, y en todo caso no sería una solución inmediata como lo es el aprovechamiento de algo que ya se tiene.

En esta línea, la Administración española ha obrado en consonancia con lo que en su día acordó la Administración francesa. Ha previsto en las nuevas normas para cemento que entrarán en vigor a partir del día primero del próximo junio (Pliego de Recepción de Cementos RC-75), no sólo la inclusión de los clásicos cementos puzolánicos —y siderúrgicos— contemplados ya en el Pliego PCCH-64 aún vigente, sino también la nueva posibilidad de fabricar cementos puzolánicos con cenizas volantes de centrales térmicas.

Más aún, ha creado un nuevo tipo de cemento: el de los llamados “Portland con Adiciones Activas”, que puede contener hasta un 20 por ciento de escorias siderúrgicas, puzolanas naturales o artificiales, cenizas volantes, o mezclas, dando lugar a cementos portland binarios, e incluso ternarios o cuaternarios. Esto es particularmente interesante para un país como España, que cuenta con puzolanas naturales peninsulares (en la zona central y en Cataluña), y también insulares (Islas Canarias), estas últimas análogas a las puzolanas italianas de Segni y de Nápoles —traquitas alcalinas—. Estos materiales han probado cumplidamente su actividad puzolánica, de acuerdo con el ensayo y método de FRATINI, adoptado por las normas españolas.

2. INSUFICIENCIA DE LOS CEMENTOS PORTLAND

2.1. Aspectos positivos y negativos de los cementos portland

Sin entrar a describir lo ya bien conocido acerca de la historia, desarrollo y estado actual de la tecnología de los cementos portland en el campo de su fabricación y de su utilización, conviene considerar que a éstos, como fase final de la evolución progresiva de las cales grasas, las cales hidráulicas, los cementos romanos y los cementos naturales, se llegó a base de perfeccionamientos técnicos que, deliberadamente buscados o casualmente hallados, condujeron a productos que proporcionaban cada vez mayores resistencias a toda edad y, en especial, a corto plazo.

Pero estos logros, ya dentro de los cementos portland, se pagan en moneda de estabilidad y de durabilidad, a veces a precios muy altos, e incluso prohibitivos.

La gran resistencia a toda edad, es como se sabe, patrimonio casi exclusivo del silicato tricálcico. Pero un contenido alto de silicato tricálcico en cemento exige un alto grado de saturación de cal en clínker, con el riesgo de una elevada o inadmisibles proporción, sistemática o accidental, de cal libre y, en consecuencia, con posible y muy probable riesgo de tener cementos expansivos que pueden dar lugar a hormigones deleznable.

Al margen de esto, un alto contenido de cal libre en el cemento proporciona pastas con una reserva alcalina y un pH elevados. El pH alto es bueno para mantener, en condiciones normales, el estado de pasividad electroquímica de las armaduras en el hormigón armado y, sobre todo, en el pretensado, lo cual las protege contra la corrosión. La gran reserva alcalina contribuye al mismo objeto en condiciones de agresividad de tipo ácido al hormigón. Estos son aspectos positivos. Pero tanto el pH como la reserva alcalina elevados, por razones de equilibrio, exponen a los cementos a ser atacados más fuertemente por aguas puras y carbónicas agresivas. Este es un aspecto negativo que aclara los anteriores, en la forma siguiente: en unos medios agresivos de naturaleza ácida las armaduras se defienden a costa del sacrificio del propio hormigón... mientras éste puede seguir sacrificándose.

Una resistencia elevada a edades tempranas requiere un contenido alto de aluminato tricálcico. Pero entonces el cemento resultante puede ser difícil de regular en su fraguado y presentar una fuerte retracción, lo que implica el azar de tener hormigones fisurables. Además, y en ciertos casos esto es aún más importante; esos hormigones, en presencia de sulfatos, forman ettringita expansiva que provoca su destrucción.

Dado que la ettringita exige para su formación un medio saturado de cal, de pH elevado, los cementos hidratados ricos en silicato tricálcico, abundantes en portlandita, si tienen al mismo tiempo una alta proporción de aluminato tricálcico, son especialmente propensos a la expansión por la acción de los sulfatos.

Altos contenidos aislados o conjuntos de silicato y aluminato tricálcicos en un cemento, confieren a éste un elevado calor de hidratación, el cual, en hormigón en grandes masas, y sobre todo con dosificaciones altas y fuertes gradientes de temperatura en relación con el medio ambiente, puede dar lugar a fisuración por excesiva retracción térmica, dada la escasa conductividad del hormigón, como la de cualquier material de tipo pétreo.

Después de esta panorámica sucinta queda de manifiesto que la consecución de cementos con resistencias altas a una u otra edad, o a cualquier plazo, tiene, en cuanto a los aspectos de la estabilidad —expansión y retracción— y de la durabilidad —resistencia química—, más inconvenientes que ventajas.

2.2. Remedios para los aspectos negativos

La solución inmediata de reducir los contenidos de silicato tricálcico y/o de aluminato tricálcico de los clínkeres, conduce a una disminución de las resistencias de los cementos a largo y/o corto plazo. No siempre es posible, o fácil, o económico, o conveniente. Sin embargo, es una solución que se adopta en el caso de los cementos portland resistentes al yeso, y en los de bajo calor de hidratación.

Otra solución menos inmediata es la de reducir lo más posible en los cementos hidratados la proporción de portlandita, la cual, sin aportar nada en el aspecto de las resistencias, crea dificultades desde el punto de vista de la durabilidad. Pero para que esto sea eficaz se debe conseguir sin reducir los contenidos de silicato y de aluminato tricálcicos —y sobre todo del primero— en los clínkeres. Ya se comprende que esto requiere molerlos junto con materiales capaces de reaccionar con la cal de hidrólisis, para dar compuestos hidratados de la misma naturaleza que los que dan los propios componentes del clínker.

Estos materiales, por definición, no son otros que los de carácter y actividad puzolánica, bien sean naturales o artificiales. Con la particularidad de que desarrollan tanto mejor su acción y propiedades, precisamente cuanto mayor sea el grado de saturación del clínker al que se añadan, es decir, cuanto más alto sea su contenido de silicato tricálcico. En tales condiciones es también posible una sustitución de clínker por puzolana en una proporción mayor. Dicho de otro modo, al ser mayor la “dilución” del clínker en el cemento —conjunto de clínker más puzolana—, también se diluyen más en éste, tanto el silicato tricálcico, como el aluminato tricálcico y la posible cal libre, atenuándose los efectos expansivos, los reactivos —fisurabilidad— y la eventual susceptibilidad del cemento en cuestión, al yeso y a los sulfatos en general.

Este segundo remedio queda así justificado con más detalle desde el punto de vista técnico, y apoyado por los puntos de vista económico y ecológico glosados en el punto 1.2. desarrollado anteriormente.

Ello no quiere decir que este remedio sea una panacea. Como se indicaba al principio todo cuanto se consigue es a costa de algo. En este caso lo que hay que sacrificar son las resistencias a corto plazo.

Esto es así porque durante los primeros períodos de la hidratación prevalece el efecto de la “dilución” del clínker por parte de la puzolana, sobre la actividad de ésta, ya que la acción puzolánica no ha tenido aún tiempo suficiente para manifestarse, pues a temperatura ordinaria los procesos correspondientes son lentos. Pero a plazos intermedios y, sobre todo, largos, dicha acción contrarresta y llega a rebasar el efecto de la “dilución”, de tal manera que, a partir de una cierta edad, los cementos puzolánicos pueden dar resistencias superiores a las de los cementos portland, incluso procedentes del mismo clínker.

Debido al hecho general de que los cementos puzolánicos “a igualdad de lo demás” dan a plazos cortos resistencias más bajas que los portland del mismo clínker, se suele tender de una forma subjetiva e ilógica a extrapolar, haciéndose a la idea de que son menos resistentes —o de endurecimiento más lento— que los portland, *siempre*. Esto no es así, ya que no hay que olvidar que, al menos en las normas españolas, ahora y siempre, para cada categoría resistente de los cementos, se exigen las mismas resistencias mínimas a flexotracción y a compresión a *todas* las mismas edades especificadas: y esto con absoluta independencia del tipo y de la clase del cemento de que se trate. Por ejemplo, según las nuevas normas españolas, tanto a un cemento portland P-450 (“puro”) como a un portland con adiciones activas PA-450, o a un siderúrgico S-I-450, o a los puzolánicos PUZ-

I-450 y PUZ-II-450, se les exige —a todos por igual— las mismas resistencias mínimas, a 3, 7 y 28 días, de 50, 60 y 70 kg/cm² a flexotracción, y de 250, 350 y 450 kg/cm² a compresión, respectivamente.

¿Cómo se puede compaginar esto con el hecho real de que los cementos puzolánicos sean de endurecimiento más lento y den resistencias más bajas a corto plazo?

Pues, recordando que esto sólo ocurre “a igualdad de todo lo demás”, y haciendo que “todo o parte de lo demás” deje de ser igual. Y así, por ejemplo, se puede actuar sobre la molienda del clínker (y de la puzolana), de forma que los cementos puzolánicos tengan una finura mayor que los portland del mismo clínker. O se puede actuar sobre el crudo y la cocción, de manera que para fabricar un cemento puzolánico PUZ-450 se utilice un clínker propio para un cemento portland P-500 ó P-550. Está claro que estos hechos y su explicación están de acuerdo con la doctrina expuesta al comenzar a tratar de los cementos puzolánicos, como remedio alternativo de los portland especiales para paliar o eliminar los aspectos negativos de los portland ordinarios.

3. LAS PUZOLANAS

En el año 1968 el que les habla publicó en la revista española ION y en algún otro lugar, un extenso artículo monográfico titulado así: “Las Puzolanas”, con muy cerca de 100 referencias bibliográficas, lo que a la sazón pudo suponer una puesta a punto y al día del tema. No voy a repetir ahora lo expuesto entonces, pero sí voy a matizar, con puntos de vista más recientes, algunos de los aspectos fundamentales allí tratados.

Los griegos y romanos, por razones de puro azar geográfico y geológico, y por motivos que hoy se llamarían de “tecnología avanzada”, fueron los primeros en conocer y usar “la cal”, a la que, tal vez por casualidad, añadieron como simples “áridos”, en la idea de que iban a ser *inertes*, como la generalidad de ellos, ciertos materiales naturales de origen volcánico que tenían a mano: eran las después llamadas, por su origen, “puzolanas”. La observación hizo el resto, y así nacieron los primeros “conglomerantes” o, si se prefiere, “cementos puzolánicos”, a base de cal y puzolana, como surgieron después los primeros “conglomerantes” o “cementos siderúrgicos”, constituidos por cal y escoria.

Y, probablemente, desde esa época y a partir de ese hecho, por tradición, se viene arrastrando, bien que modificada y ampliada por el tiempo y el progreso, la definición clásica de puzolana: material natural de origen volcánico, capaz de combinarse con la cal a temperatura ordinaria y en presencia de agua, dando lugar a compuestos con propiedades hidráulicas conglomerantes.

En esta definición están lógicamente e indudablemente basados ciertos métodos de ensayo. Deliberadamente se dejan de mencionar, enumerar y describir los diversos análisis y ensayos a que a veces se somete a las puzolanas *solas* para tratar de evaluarlas. Pocos de ellos tienen aplicación válida, si no es a efectos comparativos dentro de un determinado tipo muy limitado de materiales, y para control rutinario de los mismos, que se mantienen aún hoy día, para determinar cualitativa o cuantitativamente la actividad o el “valor” de una puzolana, y que consisten en mezclarla con una cierta cal bien definida y en condiciones perfectamente establecidas, y preparar con la mezcla de modo asimismo muy preciso, bien sean suspensiones o pastas acuosas, o bien morteros, en los que se se determinan: o unos tiempos de fraguado y endurecimiento, o unas resistencias mecánicas —métodos físicos y tecnológicos—; o se determinan unos contenidos de cal excedente

no combinada, o unos residuos insolubles de la puzolana sola y de su mezcla con la cal en pasta —métodos químicos—. Todo ello realizado en condiciones minuciosamente especificadas.

Tantos métodos de tan diversa naturaleza, cada uno de ellos con distintas variantes, y, sobre todo, de tan diferentes resultados no siempre correlativos ni comparables, ni acordes con la realidad, indican que ninguno de ellos es suficientemente aceptable en exclusiva, e incluso que difícilmente se puede tener un índice de valoración de una puzolana natural, a base de una resultante de todos ellos.

Si esto es afirmativo en el caso particular de las puzolanas naturales no tratadas, mucho más lo es cuando a las mismas se añaden las sometidas a un tratamiento térmico “enoblecedor” para incrementar su actividad, o las directamente artificiales, o las cenizas volantes.

El problema se agrava aún más cuando a un determinado ensayo, buscando un mayor valor práctico, se le imponen condiciones suplementarias que lo complican y lo hacen aún más desacorde con la realidad. Tal sucede con los “ensayos acelerados” —en general por vía térmica—, sea cual sea su naturaleza.

Todo esto viene a resumirse en que el difícil problema de la valoración de una puzolana no tiene una solución única y satisfactoria. Y puesto que una puzolana ejerce acciones —positivas— diversas, y se utiliza en unas condiciones bien determinadas, su evaluación no tiene sentido si no se hace en función de la finalidad que con ella se persigue, y en condiciones lo más aproximadas posible a las de su empleo en la práctica; y siempre fijando o controlando el mayor número posible de variables. A este respecto cabe decir que una cosa son los métodos para el estudio teórico o básico de la acción puzolánica como tema de investigación en un laboratorio, y otra cosa muy distinta son los métodos para la valoración de los materiales puzolánicos. Si éstos han de ser forzosamente empíricos y limitados —y hay razones para pensar que es así—, hay que hacerse a esa idea y aceptarla sin reservas.

4. LOS CEMENTOS PUZOLANICOS

En el año 1966 publicó asimismo quien les habla, en la revista española CEMENTO-HORMIGON un trabajo titulado “Apología de los Conglomerantes Puzolánicos”. Tampoco voy a referirme ahora a él, sino que voy a exponer los aspectos tecnológicos más destacados de los cementos puzolánicos.

Conocida desde antiguo la acción, o por lo menos los efectos, de las puzolanas con la cal, al advenimiento del cemento portland en el primer tercio del siglo pasado y a su desarrollo a finales del mismo, se pensó en la alianza de los dos materiales. Y a partir de entonces se experimentó y se analizaron los resultados de la experimentación. Y hasta hoy se ha comprobado que, efectivamente, en condiciones adecuadas y en función de los materiales clínker y puzolana, se pueden producir ya verdaderos cementos (“portland”) puzolánicos, carentes en buena parte de las insuficiencias y deficiencias de los cementos portland señaladas anteriormente (2.1), y poseedores de algunas ventajas adicionales.

Y así proliferaron los cementos puzolánicos en diversos países, a base de materiales naturales autóctonos: “puzolana” en Italia y en España, “trass” en Alemania, Rumania y Rusia, “tierra de Santorin” en Grecia, “gaize” en Francia, “moler” en Dinamarca, y “kieselguhr” o tierras de diatomeas o infusorios en lugares diversos; e incluso a partir de

materiales artificiales: arcillas activadas como el “surki” indio, egipcio o japonés, por ejemplo, y más modernamente las cenizas volantes, utilizadas prácticamente en todas partes, y de modo especial en Francia.

Del éxito tecnológico que supuso la fabricación y la utilización de los cementos puzolánicos nació la necesidad de su normalización y, para ella y dentro de ella, la conveniencia de disponer de ensayos y de métodos para llevarlos a cabo. Y aquí surgen cuestiones har- to controvertidas: en primer lugar, ¿qué se debe ensayar: la puzolana, el clínker, el ce- mento puzolánico resultante, o tal vez todos ellos? y, en segundo lugar, y en cada caso, ¿cómo establecer los ensayos? ¿qué parámetros determinar? ¿cómo interpretar y valorar los resultados de tales determinaciones?

El problema es muy complejo. Las respuestas a tanto interrogante son múltiples, según el criterio o “sentimiento” de cada opinante.

Yo les voy a dar los míos, por si sirven de algo, partiendo de la base de que cuando los problemas son complicados en demasía, tanto vale —o si se prefiere, tan poco vale— una solución enrevesada y artificiosa, como otra simplista. Con la ventaja, en el caso de esta última, de su sencillez.

De los ensayos realizables con las puzolanas, tanto los de naturaleza química como los de índole física y/o tecnológica, como el conjunto de todos ellos, ya les he expuesto bre- vemente cual es la panorámica. A mi juicio no sirven, o son en todo caso insuficientes, y arranco para ello de los siguientes principios pragmáticos:

- I) las puzolanas en los cementos puzolánicos se emplean siempre mezcladas —moli- das conjuntamente— con clínkeres de cemento portland;
- II) los cementos puzolánicos resultantes se utilizan *como un todo*;
- III) de ese todo es previsible —y exigible— un cierto comportamiento en cuanto a de- terminados aspectos tecnológicos muy específicos.

A estos principios pragmáticos hay que añadir los siguientes hechos comprobados:

- i) una puzolana determinada (siempre la misma) puede dar, en idénticas condiciones, resultados diferentes en varios aspectos —incluso buenos en unos casos y malos en otros— con distintos clínkeres portland;
- ii) un clínker determinado (siempre el mismo) puede dar, en las mismas condiciones, re- sultados distintos en varios aspectos —incluso buenos en unos casos y malos en otros— con diferentes puzolanas;
- iii) una o varias puzolanas con uno o varios clínkeres, en condiciones iguales o distin- tas, pueden dar, en aspectos diferentes, resultados de cualquier signo y magnitud.

De estos principios y hechos se deduce que lo que hay que ensayar *siempre* es *cada* cemen- to puzolánico en *cada* caso —con independencia de que se ensayen o no las puzolanas y los clínkeres separadamente—.

Por otra parte, y a mayor abundamiento, si, según I), la puzolana en el cemento puzolá- nico se utiliza *siempre* con clínker, ¿por qué ensayarla con cal? Si el ensayo con cal se hace *además* del ensayo con clínker, parece supérfluo; si se hace *en lugar* del ensayo con clínker, parece insuficiente. Con esto queda contestado, desde mi punto de vista, el pri- mer grupo de interrogantes.

En cuanto a qué tipo de ensayos establecer y qué parámetros determinar, ello viene con- dicionado por el efecto o efectos de la puzolana que se quieran medir y comparar. Por fijar ideas, atengámonos a los correspondientes a los cuatro aspectos que se pueden con- siderar como fundamentales: resistencias mecánicas, estabilidad, durabilidad y calor de hidratación.

4.1. Resistencias mecánicas

Estas pueden ser consideradas desde un punto de vista absoluto o relativo. Generalmente se tiene en cuenta el primero, en el sentido de que para cada categoría de cemento puzolánico las normas prescriben unas resistencias mínimas dadas —a flexotracción y/o a compresión— a determinadas edades. No supone problema. Así está establecido en las normas españolas, antiguas y modernas.

Desde un punto de vista relativo puede interesar, a efectos comparativos, ver cómo influye una puzolana determinada, con un clínker dado, para unas proporciones de mezcla fijadas y con una finura preestablecida para el cemento puzolánico resultante, en las resistencias que se obtienen con éste, en parangón, por ejemplo, con las del cemento portland puro hecho con el mismo clínker molido a la misma finura. Y puede interesar también, dentro del cuadro expuesto, manejar la propia finura como variable.

A propósito de la finura, hagamos la siguiente consideración: si un clínker de buena calidad determinado, molido a la finura A (menor), da un cemento con unas ciertas resistencias a las edades normales de ensayo —3, 7 y 28 días—, ese mismo clínker molido a la finura B (mayor) dará un cemento con resistencias más elevadas, a las mismas edades. Por incorporación de una adición inerte en una proporción determinada, se puede hacer con dicho clínker un cemento con finura B que dé resistencias similares al anterior con finura A. Tal cemento podrá parecer un cemento puzolánico* —y cumplirá con las normas en cuanto a resistencias—, pero no lo será, pues la adición que contiene no es puzolánica, sino inerte. En consecuencia, no se podrá contar con las ventajas adicionales que en los aspectos de estabilidad y durabilidad cabe esperar de un verdadero cemento puzolánico.

Esto indica que no basta con el cumplimiento de unas resistencias mínimas a determinadas edades —aunque dichas resistencias, como ocurre en las normas españolas, sean iguales a las de los cementos portland puros de igual categoría—, para aceptar sin más un cemento que contiene adiciones, como cemento puzolánico.

Y por eso es necesario, además, algún ensayo que ponga de manifiesto de modo inequívoco tal condición. Las normas españolas lo resuelven con el método de FRATINI, basado en la posición del punto representativo de un cemento en el gráfico que muestra la curva (isoterma a 40°C) de la solubilidad de la cal en medio alcalino —milimoles de CaO por litro— en función de la alcalinidad —milimoles de OH⁻ (totales y de Na₂O + K₂O) por litro—. Si el punto se sitúa por debajo de la curva en el gráfico, el cemento al que representa es puzolánico; si se sitúa sobre la curva o por encima de ella, no lo es. En el caso de que la adición del cemento sea inerte, no hay razón para que el punto se sitúe por debajo de la curva.

El método de ensayo de FRATINI no es, ciertamente, una panacea, y hasta tiene puntos débiles, en función, entre otras cosas, del contenido de álcalis de las propias puzolanas. Pero tiene la ventaja de juzgar al *cemento puzolánico final como un todo*, y la de dar un resultado de interpretación inequívoca, en términos de “*si o no*”. También está establecido en las viejas y nuevas normas españolas.

* Lo parecerá tanto más cuanto mejor sea la calidad del clínker, ya que los efectos de los inertes se hacen sentir más en las resistencias a las edades más corta, predominando a las más largas las características resistentes del clínker.

4.2. Estabilidad

También puede ser considerada desde un punto de vista absoluto o relativo. En este caso las cosas son todavía mucho más complicadas que en el caso de las resistencias mecánicas, dependiendo del tipo de ensayo que se adopte.

Con los ensayos de expansión a temperatura ordinaria normal, o con los ensayos acelerados a temperaturas inferiores a 100°C —métodos de las galletas y de las agujas Le Chatelier—, no hay problema. Con los ensayos a temperaturas superiores a 100°C —método del autoclave—, sí lo hay. Veámoslo.

Las puzolanas fijan cal a la temperatura ordinaria, como reza en su definición. Pero a temperaturas superiores la fijan en mayor medida y con mayor velocidad.

La cal que pueden fijar las puzolanas presentes en los cementos puzolánicos es la cal de hidrólisis liberada en la hidratación de los componentes del clínker y la cal libre que éste contenga.

La cal de hidrólisis es una cal “naciente”, y por lo tanto con una gran capacidad de combinación con las puzolanas.

La cal libre del clínker, sobre todo la “primaria,” es en gran parte una cal “calcinada a muerte”, con escasa capacidad de reacción, la cual transcurre en general muy lentamente en condiciones normales.

Pero a temperaturas (y presiones) elevadas la capacidad y la velocidad de reacción aumentan considerablemente, y las reacciones se producen de forma completa.

Por todo ello, la hidratación de la cal libre a temperaturas normales es lenta; a temperaturas más altas, del orden de los 100°C es más rápida y completa, y a 215°C —temperatura del autoclave a 21 atmósferas: ensayo ASTM C 151— es aún mucho más rápida e igualmente completa.

La hidratación de la cal libre *es expansiva*, y por consiguiente, los ensayos que mejor ponen de manifiesto la expansión son, *en circunstancias ordinarias*, los más drásticos: autoclave, agujas y galletas en caliente, y agujas y galletas en frío.

Análogamente a lo que sucede con la hidratación de la cal libre, la acción puzolánica sobre ésta es también lenta a temperaturas normales, y más rápida y completa a temperaturas más elevadas.

Pero una diferencia sustancial entre la hidratación y la acción puzolánica es que a unos 100°C se produce la hidratación prácticamente completa de la cal libre y no se produce en absoluto acción puzolánica sensible.

Por otra parte, a la temperatura del autoclave tiene lugar de *manera directa* la formación de compuestos hidratados entre la cal libre (hidratada o no) y los elementos ácidos de la puzolana —sílice y alúmina, principalmente—, proceso conocido con el nombre de “efecto silícico”, el cual constituye la base de la fabricación industrial de algunos productos y materiales de construcción silicocalcáreos.

A diferencia de lo que sucede con la hidratación de la cal libre, esta acción puzolánica sobre ella, por “efecto silícico” en las condiciones del autoclave, *no es expansiva*.

Por consiguiente y como resumen: en circunstancias no ordinarias, y considero como tal la presencia de puzolanas o, en general, de materiales activos que puedan dar lugar al “efecto silícico” en el autoclave, los métodos más drásticos de determinar la estabilidad —expansión— de los cementos no son los más idóneos.

Por el contrario, pueden inducir a error, pues un cemento que contiene mucha cal libre y no es expansivo según el drástico ensayo del autoclave —en el que predomina el “efecto silíceo”— puede ser expansivo, no sólo según el ensayo más suave de las agujas Le Chatelier —en el que predomina la hidratación un tanto acelerada y expansiva de la cal libre—, sino también en la realidad.

Con esto queda muy mermado en algunos casos el valor de los resultados del ensayo de expansión en autoclave, que no se sitúan ya, como se creía y se decía, “del lado de la seguridad”, en el sentido de que, si un cemento cumplía con el ensayo, no sería expansivo nunca; mientras que si no lo cumplía, no tendría por qué ser necesariamente expansivo. Por el contrario, lo anteriormente expuesto muestra que un cemento “estable” —diríamos mejor “estabilizado”— en el autoclave, puede no serlo de acuerdo con otros métodos de ensayo y con su comportamiento real en la práctica.

4.3. Durabilidad

Se mencionó al principio que la acción puzolánica podía dificultar o inhibir la formación de ettringita por reacción expansiva de los aluminatos hidratados del cemento con el yeso o los sulfatos en general.

Pues bien, nada mejor que un ensayo específico de “susceptibilidad” del cemento al yeso, o a cualquier otro sulfato, para establecer de forma absoluta o relativa —comparativa— su comportamiento. Esto, dicho así, parece fácil, pero otra cuestión, que no lo es tanto, es la de determinar qué tipo de ensayo, de entre los conocidos y practicados —KOCH y STEINEGGER, LE CHATELIER-ANSTETT-BLONDIAU, WITTEKIND, MERRIMAN, GARCIA DE PAREDES— conviene al caso. Es este un tema que por sí solo requeriría bastante tiempo de tratamiento y coloquio, tal vez para llegar a la conclusión de que, por el momento, no existe entre los métodos en uso, uno particularmente idóneo para resolver el problema.

Y con esto pasa un poco —o un mucho— de lo que sucede con los métodos para ensayar y evaluar aisladamente las puzolanas: que los resultados de los distintos procedimientos para efectuarlo no concuerdan entre sí ni con los de la realidad práctica, y que la envolvente o resultante —media— de todos ellos tampoco pone en claro las cosas. ¿Que por qué es esto así? Es difícil precisarlo, pero tal vez se pudiera decir que por inadecuación de lo que se hace, en relación con lo que se pretende, a causa de que las variables que quedan sueltas son más, en número y en importancia, que las que se fijan y controlan. Y ello, tal vez también, por planteamiento deficiente, a causa de falta o imprecisión de datos.

Un factor hay, aparentemente ajeno al caso, que sin embargo es decisivo: un conglomerado —mortero u hormigón— de cemento puzolánico, a igualdad de todo lo demás puede resistir o no el ataque de un medio agresivo que actúe sobre la cal de hidrólisis, o cuya acción se vea favorecida o catalizada por ésta, según su edad o “grado de madurez”. Si la edad es lo bastante avanzada, y por lo tanto la “madurez” lo suficientemente desarrollada, toda o la mayor parte de la cal estará ya combinada y fijada por la puzolana y no supondrá un punto débil para el ataque. En caso contrario éste se producirá sobre ella o apoyado por ella, con efectos perniciosos.

A la evitación del mismo contribuye de manera eficaz y decisiva la formación de geles por reacción de la puzolana con la cal. Estos geles de naturaleza tobermorítica, análogos a los que se forman en la hidratación del cemento portland, suponen una extensión o am-

pliación del proceso hidráulico normal del clínker, y en ellos la relación molecular cal/sílice es menor que la usual en la hidratación normal de éste. Incluso la acción puzolánica puede dar por resultado una basicidad menor en los geles tobermoríticos normales.

De aquí la importancia del período de curado y maduración de los conglomerantes de cementos puzolánicos, a efectos de su durabilidad.

4.4. Calor de hidratación

Este sí que es un aspecto que, afortunadamente (y milagrosamente) no ofrece dificultades, ni en el aspecto absoluto ni en el relativo.

El calor de hidratación es un parámetro fisicoquímico fácil de medir por distintos métodos convencionales que, convenientemente adaptados a los cementos de tipo distinto del portland, permite llegar a resultados comparables con los obtenidos para éste.

Estos métodos, y en particular el llamado de disolución, permiten hoy día obtener resultados de valor tanto absoluto como relativo.

Pero aquí surge un problema análogo al que se presenta en el caso de las resistencias mecánicas: un cemento puzolánico es, se diría que por definición, un cemento de bajo calor de hidratación, sobre todo a cortos plazos*. Y un cemento que, procedente del mismo clínker que el anterior, contenga un material inerte en la misma o parecida proporción en que aquél contiene puzolana, es también un cemento de bajo calor de hidratación, no sólo a plazos cortos, sino también a plazos medios y largos. Es más, podrá ser un cemento de menor calor de hidratación que el otro, a cualquier edad. Pero, eso sí, sin ninguna de las ventajas de ser un cemento puzolánico, a todos los demás efectos.

¿Cómo evitar una posible suplantación, cuando el aspecto principal o único a considerar es el calor de hidratación? Pues como en el caso de las resistencias mecánicas: complementando el ensayo de determinación del calor de hidratación por un ensayo de puzolanicidad *del cemento*, del estilo del correspondiente al método de FRATINI, por ejemplo.

Así resuelven el problema las vigentes y próximas futuras normas españolas.

4.5. Efectos adicionales de la acción puzolánica

Aparte de los descritos, la acción puzolánica ejerce, con carácter general o particular —es decir, en algunos casos y con determinadas puzolanas— efectos benéficos de interés para la tecnología de los morteros y hormigones.

En primer lugar, los cementos puzolánicos proporcionan materiales de mejor trabajabilidad y facilidad de transporte, puesta en obra y compactación, con menor tendencia a la segregación.

* La sustitución de una parte de clínker por una cantidad equivalente de puzolana reducirá el calor de hidratación a cortos plazos de forma proporcional a la cantidad de clínker sustituida, puesto que a tales plazos la puzolana no actúa, comportándose como un material inerte. A más largos plazos la reducción del calor de hidratación es menor que la que corresponde a dicha proporcionalidad ya que interviene —sumándose— el calor correspondiente a la formación de compuestos hidratados por acción puzolánica, y a la hidratación más a fondo de los correspondientes del clínker; por una parte, por su posible mayor finura, y, por otra, por la dispersión que en ellos produce la interposición de la puzolana finamente molida.

En segundo lugar, los cementos puzolánicos son especialmente aptos para los tratamientos higrotérmicos con vapor a presión —en autoclave—, a causa del “efecto silícico” antes mencionado, el cual contribuye al incremento de los geles tobermoríticos de baja basicidad y gran poder conglomerante. Estos tratamientos tienen cada vez mayor importancia y desarrollo técnicos, con vistas a la prefabricación de elementos constructivos, como primera etapa indispensable de una posible industrialización de la construcción.

En tercer lugar, hay que tener en cuenta que los materiales puzolánicos son especialmente reactivos con los álcalis del cemento. Y sin embargo, las puzolanas no solamente no son nocivas a este respecto, sino que atenúan la expansión debida a la reacción árido (reactivo)-álcalis. Este hecho, aparentemente contradictorio, no lo es, si se tiene en cuenta que la nocividad de la reacción árido-álcali se debe al hecho de que esta reacción transcurre con carácter topoquímico y produce expansiones aisladas, intensas y muy localizadas, las cuales ocasionan la ruptura y desintegración del hormigón. Por el contrario, dado el alto grado de finura de las puzolanas y su íntima y homogénea mezcla con el clínker en los cementos puzolánicos, la reacción transcurre en este caso con carácter difuso y la expansión tiene lugar de forma homogéneamente dispersa y, por lo tanto, muy atenuada. Esta expansión ligera suaviza, por así decir, los efectos de la otra intensa y localizada, y, cuando menos los aminora.

En cuarto lugar, las pastas y los morteros de cementos puzolánicos suelen ser más impermeables que los de los portland, ya que los geles tobermoríticos suplementarios que se forman por acción puzolánica contribuyen a colmatar poros, reduciendo la porosidad global del material, por una acción de tipo físico. Esta acción evita las posibles acciones químicas de deslavado de la cal por aguas puras, o su disolución por ataque de aguas carbónicas agresivas.

Todo esto quiere decir que los cementos puzolánicos pueden tener indistintamente los mismos usos y aplicaciones generales que los portland, y algunos otros específicos en casos o aspectos determinados. Por ejemplo, a igualdad de otras variables, los hormigones de cemento puzolánico son probablemente más flexibles y elásticos que los de portland y presentan una mayor capacidad de fluencia bajo carga, antes de entrar en rotura.

5. COMPONENTES DE LOS CEMENTOS PUZOLANICOS

Y, finalmente, dos palabras de resumen sobre las condiciones que debe reunir un buen cemento puzolánico y sobre cómo conseguirlos.

La acción puzolánica se puede atribuir, tal vez sucinta y simplistamente expuesto, a los constituyentes vítreos o amorfos y, en parte, a los componentes mineralógicos microcristalinos, más o menos alterados y descompuestos, con redes distorsionadas o dislocadas.

La gran energía potencial de los primeros y la reactividad de los segundos hace que los elementos ácidos principales de la puzolana: la sílice, la alúmina y el óxido férrico, fijen cal, como también lo hacen, y en gran medida, los componentes zeolíticos de las tobas volcánicas.

Para que esta fijación de cal tenga lugar con amplitud y eficacia, la puzolana debe ser lo más activa posible, dependiendo la actividad total —otras cosas aparte— del contenido global de sílice y alúmina, y la actividad a corto plazo del contenido de alúmina, principalmente.

Con el mismo fin, el clínker portland debe poseer, como ya se indicó, un alto grado de saturación de cal y un elevado módulo silícico —es decir, un alto contenido total de sili-

catos, y en particular de tricálcico, y un contenido bajo de aluminato tricálcico, y tanto menor éste cuanto mayor sea el contenido de alúmina de la puzolana.

El regulador de fraguado puede ser el yeso dihidrato en el caso de puzolanas con actividad normal o intermedia, y la anhidrita en el caso de puzolanas de gran actividad.

Las proporciones de mezcla deberán ser, en cada caso, las óptimas resultantes de un estudio experimental sistemático con unos materiales dados, y teniendo en cuenta el grado de finura que se adopte para los cementos proyectados. No es posible establecer proporciones determinadas de antemano y en general, pero sí puede señalarse que para un clínker y una puzolana dados, la proporción de mezcla y la finura del cemento, íntimamente relacionadas, deberán establecerse en función de los resultados que se espere obtener en los diversos aspectos de la utilización del mismo.

C O N C L U S I O N

He tratado de hacer una exposición objetiva, y no negaré que apologética, acerca de los cementos puzolánicos. Y deliberadamente he querido hacerlo evitando aspectos muy específicos de la fisicoquímica de las puzolanas y de los propios cementos puzolánicos, que por otra parte ya quedaron tratados hace tiempo en publicaciones que he mencionado.

Por el contrario, he procurado orientar la exposición hacia aspectos técnicos, prácticos, económicos y de actualidad, en los que la fabricación y el empleo de los cementos puzolánicos pueden tener alguna incidencia.

Si este enfoque ha sido del agrado de ustedes, y si les ha servido de algo, me podré considerar satisfecho.