Informes de la Construcción Vol. 20, nº 196
Diciembre de 1967

conglomerantes puzolánicos

propiedades y aplicaciones

M. DE LUXAN BAQUERO, Dr. Ing. de Caminos

sinopsis

En el presente trabajo se ha tratado de poner de manifiesto la importancia que, para mejorar la durabilidad de gran número de obras, tiene la adopción de un conglomerante de tipo puzolánico.

Tan sólo cuando se requiera el empleo de un conglomerante al que haya que solicitar alta resistencia mecánica a muy corto plazo, es decir, cuando nos veamos forzados a emplear un P-450, no nos será posible sustituir el portland por un cemento puzolánico. Sí podemos, en cambio, reemplazar a un P-250 o a un P-350 por un PUZ-250 o un PUZ-350, respectivamente. Con tal elección habremos conseguido el equivalente a un portland mejorado, de cuyo seno hidratado ha desaparecido la cal apagada, sustancia nociva que el portland genera siempre al endurecer.

Y así como el P-450 no tiene un PUZ equiparable, hemos de procurar no invadir, con los cementos portland, el amplio campo que corresponde a los puzolánicos. De esta forma atenderemos adecuadamente al concepto real de calidad.

615-1

0 Introducción

Guiados por el interés despertado en todo el mundo y, fundamentalmente, en aquellos países en los que es posible disponer de sustancias adicionables activas, hacia las numerosas aplicaciones de los cementos puzolánicos, hemos creído oportuno resumir, en un breve trabajo, los datos más sobresalientes sobre este tema. Para España la importancia es manifiesta.

Existen abundantes yacimientos de piedra pómez, cuya puzolanicidad natural ha sido comprobada y con cuyo mineral se están obteniendo cementos puzolánicos de cualidades muy destacadas. Por otra parte, de todos son conocidas las llamadas puzolanas artificiales que, con un riguroso control, pueden también, en algún caso, ser tomadas en consideración.

Este resurgir de la atención prestada a la incorporación de puzolana en los conglomerantes hidráulicos, ha sido motivado por la necesidad de buscar un mayor campo de aplicaciones al clínker de portland que, unido sólo al yeso, queda sometido a grandes limitaciones en su empleo. Con puzolana aumenta su resistencia química, disminuye su calor de fraguado y endurecimiento, aumenta su impermeabilidad, carece de expansión, etc.

Recordemos aquí que por cemento puzolánico se entiende aquel producto obtenido por la molienda, sin incorporación alguna de materia inerte, de una mezcla íntima y homogénea de clínker de cemento portland y puzolana, con la adición conveniente de yeso o anhidrita como regulador de fraguado.

En el momento presente y concorde con un dilatado período de una industria monoproductora, un amplio sector de consumidores aprecia en un conglomerante tan sólo sus resistencias mecánicas y desestima todas las demás características. Piensa en un portland.

Ahora puede adquirir también cemento puzolánico y nosotros queremos mostrarle sus virtudes. Y hacerlo con rigor.

Por dicho motivo, es imprescindible desarrollar con cuidado el estudio de cómo se generan, en los cementos puzolánicos, los elementos que han de resistir las tensiones externas.

Con esta tesis iniciamos nuestro examen detenido del mecanismo de combinación de la puzolana.

Posteriormente, nos referiremos a aquellas propiedades que les adornan especialmente, resumiendo nuestra opinión en la recopilación de las unidades de obra en las que debe ser utilizado el cemento puzolánico con preferencia sobre los más difundidos de tipo portland, lo que constituye el verdadero objeto de esta publicación al cual hemos pretendido llegar razonadamente.

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es

1 Propiedades

1.1. RESISTENCIAS MECANICAS

Al enjuiciar el comportamiento de los cementos puzolánicos hay que destacar que la presencia de la puzolana como adición al portland tiene dos efectos dispares y en los que el tiempo es factor preponderante.

Inicialmente actúa como un inerte no nocivo, del cual ha sido posible añadir un alto porcentaje, que puede llegar y a veces sobrepasar el 40 por 100.

Más adelante se manifiesta como un elemento activo, cuyos óxidos ácidos se combinan para formar nuevos cuerpos estables, con la cal liberada por los silicatos en la hidratación del portland.

Por eso, al estudiar las resistencias de los cementos puzolánicos establecemos dos etapas: una, a corto, y otra, a largo plazo.

1.1.1. Resistencias mecánicas a corto plazo

Está muy extendida la teoría de que el cemento puzolánico es un cemento lento, y, en términos generales, se afirma que tarda más en alcanzar las mismas resistencias que el portland, por lo que, en los hormigones ejecutados con aquél, han de mantenerse más tiempo los encofrados.

Semejante criterio se desvanece a la simple observación del Pliego de Recepción de Conglomerantes Hidráulicos, vigente desde el 6 de mayo de 1964, de la que se deduce que no se pueden asignar cualidades genéricas diferenciadas de resistencias mecánicas a los distintos tipos de conglomerantes, ya que dentro de cada uno de ellos existen varias designaciones que corresponden, precisamente, a la mínima carga de rotura a la compresión o flexotracción, exigible a los 28 días.

Sin referirnos a otros tipos de cemento anotamos que en los portland se distinguen los P-250, P-350 y P-450, y en los puzolánicos los PUZ-250 y PUZ-350, lo que significa que, salvo cuando se emplee el P-450, siempre hay un cemento puzolánico al que se le pueden reclamar las mismas cargas de rotura que al portland. Y esto no sólo a los 28 días, sino también a edades más tempranas, de las que el Pliego fija las correspondientes a los 7 y 3 días.

Debemos, pues, desechar, por carecer de fundamento, la supuesta constante de lentitud aplicada al endurecimiento de los conglomerantes con adición de puzolana.

Este concepto puede tener su origen en el sistema de fabricación del cemento puzolánico. Por definición del Pliego Oficial recibe la denominación de cemento puzolánico —PUZ— el obtenido por la mezcla de clínker de cemento portland, puzolana y yeso, elementos que designaremos C, P e Y*.

El fenómeno puzolánico, de acuerdo con el proceso de hidratación y endurecimiento que estudiamos más adelante en el apartado de las resistencias mecánicas a largo plazo, no tiene lugar con intensidad en los momentos iniciales, 1 a 3 días. En éstos se produce el endurecimiento de la fracción de C, pero aún no ha empezado a actuar decididamente P. Si el cemento que manejamos tiene, por ejemplo, la composición

$$0{,}69\,C + 0{,}28\,P + 0{,}03\,Y = PUZ \qquad [a]$$

y hemos ejecutado un hormigón de dosificación de 300 kg de conglomerante PUZ, en los primeros días se comporta como de dosificación de:

$$300 \times 0{,}69\,C = 207 \text{ kg de C;} \qquad [b]$$

lo que, prescindiendo de los demás factores que intervienen en la fecha del desencofrado, explicaría la opinión general que rebatimos.

Pero para alcanzar un PUZ que encaje en el propio Pliego y que pueda merecer designación de PUZ-250 hay que partir de un C de más altas resistencias. Normalmente, de un C definido P-350,

* Recordemos que de aquí en adelante designaremos: C = cemento portland; P = puzolana; Y = Yeso.

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc) http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es

al que a los 28 y 7 días se le exigen, respectivamente, cargas de rotura de 350 y 250 kg/cm², que son:

$$\frac{350 - 250}{250} = 0{,}40 \quad ; \quad \frac{250 - 167}{167} = 0{,}50 \, ;$$

un 40 y un 50 por 100 más elevadas que las del P-250. A los 3 días la relación de valores sería aún mayor.

Si introducimos este nuevo factor de corrección en la expresión [b] nos queda, a los 7 días:

$$300 \times 0{,}69 \times 1{,}50 \ (\text{C def. P-350}) = 310 \text{ kg de un cemento P-250.}$$

Al principio del empleo de un PUZ-250 —cuya fórmula es la desarrollada en [a]— su endurecimiento es el de un P-250 en virtud de que C tiene designación P-350. La acción puzolánica de P está en estado embrionario y será más adelante cuando produzca su efecto beneficioso.

Cuanto acabamos de razonar para un PUZ-250 lo podemos hacer extensivo a un PUZ-350, para el que habría que partir de un C definido P-450. Es por esto por lo que no se ha incluido en el Pliego un PUZ-450, porque habría que partir de un C definido $P > 500$, que tampoco está incorporado.

Luego, independientemente de las diferencias que pueda haber en las distintas marcas de cemento puzolánico, como también las hay entre las de cemento portland, llegaríamos a la conclusión de que el endurecimiento a corto plazo tiene valores semejantes para los P-250 y PUZ-250, así como para los P-350 y PUZ-350.

1.1.2. Resistencias mecánicas a largo plazo

El examen de las resistencias a largo plazo de los cementos puzolánicos reviste gran interés. En tiempo dilatado siempre será más resistente un portland con puzolana que el mismo portland solo.

Hemos visto en la fórmula [a] que para que el PUZ definido por ella pueda tener la designación 250, la fracción de cemento portland ha de pertenecer a la P-350.

En la masa del cemento puzolánico tenemos, pues, un elemento C que, considerado aislado, fue suficiente para proporcionar, a los 7 y 28 días, unas resistencias al conjunto que permitieron estimarlo como 250. Es indudable que si la puzolana no ejerciera acción ninguna y hubiera sido únicamente añadida como un inerte no nocivo para rebajar las cargas de rotura del portland y eventualmente para darle una mayor plasticidad y evitar retracciones posteriores, el conglomerante puzolánico así constituido seguirá siendo comparable con un P-250; sus resistencias a 6 meses, 1 año y más, tendrían valores semejantes en ambos.

Pero la puzolana no es inerte. Por el contrario, tiene una acción suficientemente conocida. A medida que los silicatos del C al hidratarse liberan hidróxido cálcico, su parte activa se combina con éste y reproduce la fase de endurecimiento del portland en sentido inverso. Es decir, que así como al humedecerse las partículas en el portland, los silicatos cálcicos pierden parte de la cal para convertirse aproximadamente en monocálcicos con reacción exotérmica, la puzolana, en cambio, llega a formar estos mismos últimos silicatos, pero en vez de alcanzarse por desdoblamiento, se obtienen por combinación.

En los esquemas que se acompañan bajo el título de: «Procesos de hidratación y endurecimiento», se ha tratado de dar una representación gráfica a este fenómeno, comparando los estados finales del conglomerante hidratado endurecido en un cemento tipo portland y en otro puzolánico. Puede observarse que ha aumentado la fracción resistente en este último (ver los esquemas).

El conglomerante definido por la fórmula [a] tendrá, por tanto, a largo plazo, unas resistencias que no serán inferiores a las del C que le sirvió de base, sino que, en vez de ello, si se compara con un cemento portland con fórmula

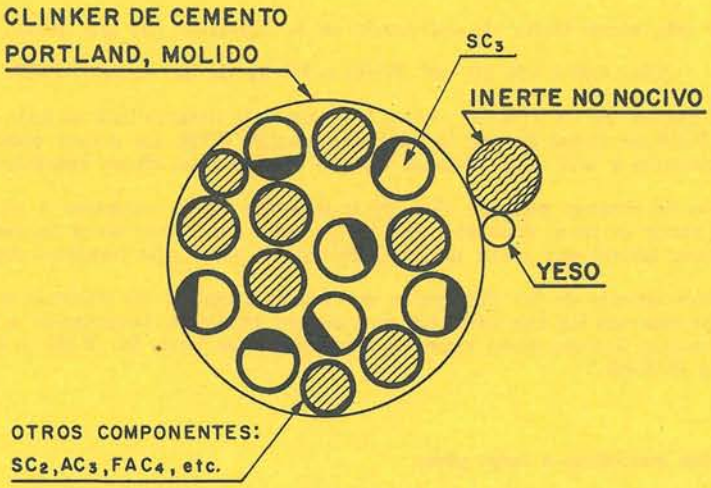
$$0{,}92\,C + 0{,}08\,Y = P \qquad [c]$$

llegaría a alcanzar valores mayores que este último o, lo que es lo mismo, que el cemento [a] merecería la designación superior de PUZ-350. Repetimos que esto es así como consecuencia de que la necesidad de compensar la escasa intervención que la puzolana tiene en las resistencias que a corto plazo se exigen al cemento puzolánico, nos obliga a emplear como base un portland susceptible de mayores cargas.

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es

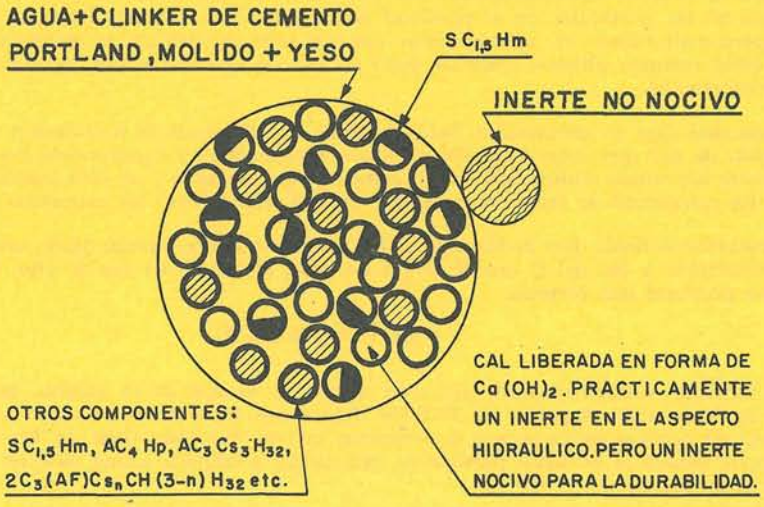
PROCESO DE HIDRATACION Y ENDURECIMIENTO EN EL CEMENTO PORTLAND

CEMENTO ANHIDRO



+ AGUA

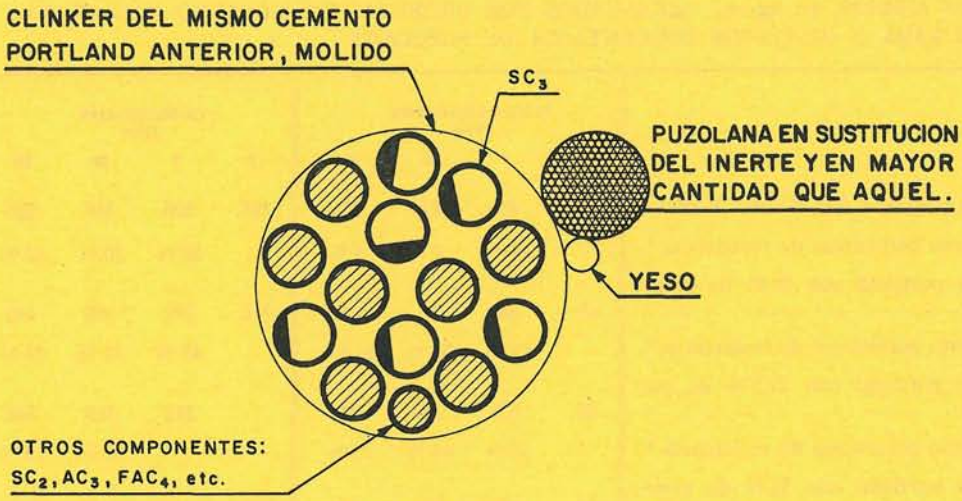
CEMENTO HIDRATADO ENDURECIDO



© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es

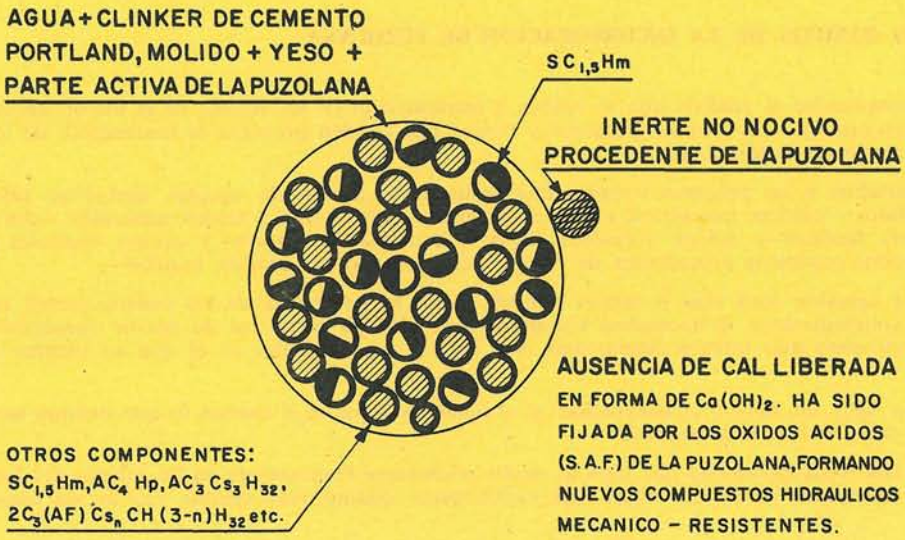
PROCESO DE HIDRATACION Y ENDURECIMIENTO EN EL CEMENTO PUZOLANICO

CEMENTO ANHIDRO



+ AGUA

CEMENTO HIDRATADO ENDURECIDO



© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es

A título informativo incluimos un cuadro de resistencias mecánicas de un excelente cemento portland, al que en parte se ha sustituido por puzolana. Las probetas han sido preparadas y sometidas a cargas de rotura de acuerdo con las normas RILEM.

Hemos recogido en el cuadro reproducido un dato muy significativo y es el del incremento porcentual de resistencias. Estos incrementos dejan patente la acción puzolánica.

VALORES MEDIOS, en kg/cm², ALCANZADOS POR PROBETAS DE MORTERO CON ARENA NORMALIZADA Y DISTINTOS PORCENTAJES DE PUZOLANA

	FLEXOTRACCION Días				COMPRESION Días			
	3	7	28	90	3	7	28	90
Cemento portland. En el saco, P-350 ...	66	81	87	90	298	390	468	526
Incremento porcentual de resistencia *.		23 %	7 %	3 %		30 %	20 %	12 %
Cemento portland con 20 % de puzolana.	45	64	78	89	210	297	398	490
Incremento porcentual de resistencia *.		42 %	22 %	14 %		42 %	34 %	24 %
Cemento portland con 27,5 % de puzolana	40	52	75	94		242	365	448
Incremento porcentual de resistencia *.		30 %	44 %	2 5%			51 %	23 %
Cemento portland con 35 % de puzolana	33	47	73	86	159	210	329	417
Incremento porcentual de resistencia *.		42 %	55 %	18 %		32 %	57 %	27 %

* El incremento anotado es el correspondiente a dos valores contiguos.

Las curvas que aparecen a continuación orientan también con mucha claridad sobre las resistencias futuras de cada uno de los conglomerantes ensayados y en ellas se reflejan las mayores cargas que admitirán los puzolánicos.

Es típico de una puzolana con actividad cierta, provocar un crecimiento más rápido de las cargas admisibles a flexotracción que a compresión. Los gráficos así lo atestiguan (ver gráficos).

1.2. EFECTOS BASICOS DE LA INCORPORACION DE PUZOLANA

Para mejor comprender el análisis que se realiza a continuación de los efectos de la incorporación de puzolana, recordamos las causas químicas y físicas que pueden provocar la destrucción de los morteros y hormigones hidráulicos.

Entre las imputables a las primeras tenemos que destacar la acción de agentes agresivos, tales como: los sulfatos —cálcico, magnésico, sódico o amónico—; otras sales y ácidos minerales —cloruros, carbonatos, fosfatos—; ácidos orgánicos libres o combinados —grasas y aceites vegetales o animales—; ácidos orgánicos procedentes de fermentaciones —láctico, acético, húmico—.

Ahora bien, la agresión será más o menos temible según la naturaleza de los constituyentes endurecidos del conglomerante, destacándose los aluminatos cálcicos como los de mayor vulnerabilidad, y ésta será tanto más intensa cuanto más rico en cal sea el medio en el que se plantee el ataque.

La destrucción será de mayor consideración si el medio penetra en el cuerpo, lo que siempre será debido a una causa física: la porosidad.

Puede existir una macroporosidad que deje al medio adentrarse francamente en los huecos del hormigón y hará disminuir su solidez tanto más rápidamente cuanto más soluble sea la sal considerada.

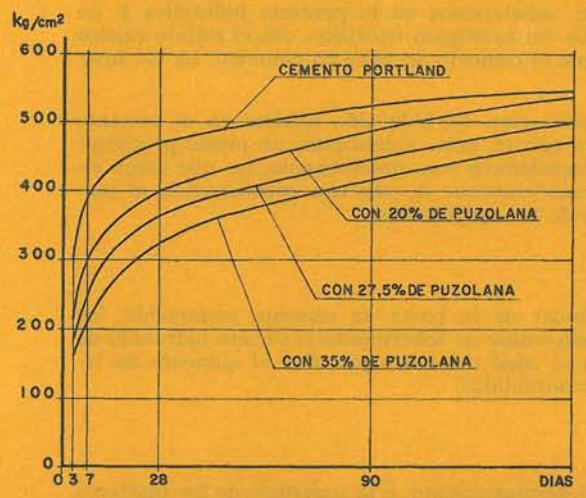
© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc) http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es

Cuando exista capilaridad y si la obra está expuesta a la vez al medio de ataque y al aire, el agua se evaporará y las sales se concentrarán y cristalizarán en el interior, en un proceso irreversible, que puede llegar a provocar la destrucción del conglomerado.

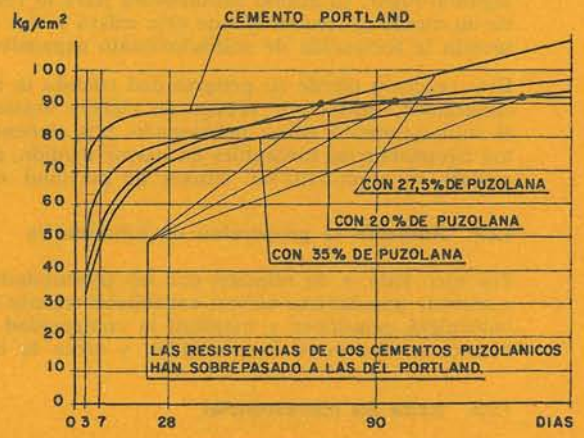
Para defenderse de la disgregación que en un hormigón puede producir un ambiente hostil debemos, en primer lugar, disminuir las superficies en contacto buscando en el aspecto físico la consecución de masas con el mínimo de porosidad.

Después, y dando por sentado que la impermeabilidad absoluta no es alcanzable en la práctica, hemos de procurar que el cemento presente componentes hidratados con resistencia propia a los agentes nocivos y de los cuales ninguno puede actuar como catalizador de la externa amenaza.

RESISTENCIAS MECANICAS A LA COMPRESION



RESISTENCIAS MECANICAS A LA FLEXOTRACCION



Por último, aunque lo mencionaremos repetidamente, destacamos, en esta primera ocasión, que el componente más pernicioso del cemento endurecido es el hidróxido cálcico liberado en la hidrólisis de los silicatos cálcicos. Tanto los sulfatos alcalinos como el magnésico reaccionan con él, dando lugar al sulfato cálcico, causa de la disgregación del hormigón. Los ácidos fundamentalmente orgánicos, formados en descomposiciones y fermentaciones, lo disuelven. Las grasas y aceites forman jabones insolubles que provocan el hinchamiento y fisuración del hormigón, etc.

Y hemos de resaltar también que la ausencia de hidróxido cálcico disminuye la porosidad y da lugar a un conglomerante que ya ha merecido de varios autores el nombre de cemento cerrado.

Con estos antecedentes podemos adentrarnos en la contemplación individualizada de cada uno de los efectos básicos de la incorporación de puzolana a los cementos, morteros y hormigones.

1.2.1. Anula la expansión

En un cemento con un exceso de cal libre —CaO—, ya sea debido a un simple defecto de cocción o a una imposibilidad de obtener la clinkerización total de un crudo excesivamente básico, se producirán expansiones en el ensayo del autoclave.

Es un hecho comprobado experimentalmente, que una adición de puzolana en porcentaje que nunca ha de ser superior al 10 por 100 estabiliza el cemento y anula su expansión.

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es

1.2.2. Disminuye la relación agua/cemento y, en consecuencia, la retracción, la segregación y la exudación

La puzolana obtenida de minerales naturales de origen volcánico, de los llamados de tipo escoriáceo —piedra pómez—, disminuye la relación agua/cemento de la pasta de consistencia normal.

Esta propiedad se refleja en una reducción de la retracción, de la segregación y de la exudación, para la que se han obtenido espectaculares disminuciones del 50 por 100 con un 25 por 100 de puzolana.

También la poseen algunas puzolanas artificiales, pero no así todas las naturales de constitución tobácea.

1.2.3. Reduce la cal liberada

El cemento portland durante su hidratación produce, a los 28 días, más del 10 por 100 en peso de hidróxido cálcico, del que sólo una pequeña fracción se transforma en carbonato cálcico compacto y con misión positiva.

Los únicos cementos capaces de reducir en gran escala la cal así liberada son los puzolánicos.

La cal apagada —portlandita—, que va apareciendo al humedecer el conglomerante, es un componente indeseable, por dos razones: en primer lugar, señalaremos su inoperancia hidráulica y, en segundo lugar, su acción catalizadora para la reacción del aluminato tricálcico, con el sulfato cálcico de un medio nocivo en el que éste exista y con el que el cemento se halle en contacto. La cal favorecería la formación de sulfoaluminato expansivo.

Esta reacción pierde su peligrosidad cuando la concentración de hidróxido cálcico, en el cemento endurecido, queda por debajo de ciertos límites, ya que en estas condiciones no puede precipitar el sulfoaluminato antes mencionado. Los cementos puzolánicos son, precisamente, los que crean estas circunstancias favorables en mayor medida, dejando entonces de ser una preocupación el porcentaje en aluminato del clínker de portland, base de los puzolánicos.

1.2.4. Aumenta la proporción de tobermorita

Por otro lado, y en relación con las posibilidades físicas de la pasta de cemento endurecida, los cementos puzolánicos elevan considerablemente el porcentaje de tobermorita o silicato hidratado de naturaleza gelatinosa y mejoran la compacidad con la edad del hormigón. Con el aumento de tobermorita disminuye la porosidad y crece la impermeabilidad.

1.2.5. Evita las eflorescencias

Conocemos que las eflorescencias se producen por el desplazamiento, a la superficie de los morteros y hormigones, de la solución acuosa del cemento portland que contiene hidróxido cálcico, el cual, al ponerse en contacto con el anhídrido carbónico del aire —CO_2—, precipita en forma de carbonato cálcico.

La presencia de la puzolana las evita, al desempeñar un papel que las modernas teorías consideran que se ejerce en una doble vertiente: en la química, combinándose con la cal apagada; y en la física, obstruyendo el paso del líquido.

1.2.6. Aumenta la resistividad química frente al ataque de suelos o aguas agresivos

1.2.6.1. Suelos. Si nos referimos a los suelos, sabemos que son particularmente agresivos aquellos que contienen sulfato cálcico (ver apartado 1.2.6.3).

Pero no olvidemos que el cemento portland endurecido es altamente básico, con un pH del orden de 12, valor que es poco frecuente encontrar en el terreno. El desequilibrio que así se origina hace que, en principio y colocándose del lado de la máxima seguridad, se deban preferir en general, para las cimentaciones, los cementos en los que la basicidad haya sido disminuida con adición de puzolana.

1.2.6.2. Aguas ácidas. Cuanto acabamos de decir en el párrafo anterior sobre los suelos es aplicable a las aguas ácidas, cuyo ataque presenta además la desventaja de producirse conjugado con la hidratación del cemento. En este caso, la presencia de puzolana puede no ser suficiente para proteger el hormigón, en cuyo seno el conglomerante aún no ha madurado. Tendríamos que recurrir a la aplicación de barnices, entre los que resulta específicamente apropiado el obtenido con ácido fluosilícico, ácido que, contrariamente a los demás, al combinarse con el cemento, da compuestos insolubles.

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es

Amparada la superficie, daremos lugar a que se verifique el endurecimiento interno del hormigón en un medio inocuo y adquiera la necesaria resistividad química. Esta precaución no se hace precisa si nos ha sido permitido dejar endurecer el hormigón en campos de curado, antes de situarlo en obra. Tal sucede cuando hemos adoptado piezas prefabricadas.

1.2.6.3. Aguas selenitosas. El sulfato cálcico de las aguas selenitosas reacciona con el aluminato tricálcico y forma el sulfoaluminato trisulfato que puede en algún caso contribuir a la compacidad, si cabe dentro de los poros de la masa, pero que, en mayor grado, la desagrega. En presencia de un exceso de cal los aluminatos son insolubles y entonces el sulfato, después de penetrar por difusión en el interior, actúa sobre el aluminato sólido y produce la destrucción.

Sin embargo, cuando no hay más cal que la de una disolución muy diluida por la hidrólisis del silicato, al haberse combinado parte de ella con los elementos activos de una puzolana, la acción se produce sobre el aluminato de cal disuelto y, en este caso, se aumenta la compacidad. La puzolana evita la destrucción.

De la misma manera, la puzolana evita la disgregación del hormigón en terrenos que contengan yeso. Y aún podemos añadir que en el caso de suelos su protección será suficiente, pudiendo ser necesario, en cambio, cuando se trata de aguas con alto contenido de sulfato cálcico o cuando éstas se hallen en movimiento, defender la superficie como señalamos en el apartado 1.2.6.2.

Al tratar el tema de las aguas selenitosas, nuestro trabajo quedaría incompleto si no nos refiriéramos al cemento PAS que, por definición, es un cemento portland con buena resistividad en este medio a causa de su bajo contenido en aluminatos, ya que, si bien la sulfatación de ferritos también es posible, lo es en grado y duración muy distinta a la de aquéllos.

Ahora bien, la saturación en cal de sus crudos puede y debe elevarse en los cementos de tipo PAS, a fin de aumentar el contenido en silicato tricálcico, que compense la caída que en las resistencias mecánicas iniciales provoca la ausencia de aluminato tricálcico, que, como sabemos, es el componente de más rápida hidratación. La elevación de la saturación en cal de los cementos férricos —PAS— se ha demostrado no ser nociva, ni por la presencia de un exceso de cal libre en el producto anhidro, ni por el aumento de cal liberada en el hidratado. La existencia de una mayor proporción de silicato tricálcico lleva consigo una disminución en el contenido de silicato bicálcico.

Los cementos PAS han encontrado un equilibrio en su fabricación, para que también estén armonizadas sus resistencias bajo carga a corto y largo plazo.

Pero el hecho que hemos de destacar es que en el PAS hidratado, al igual que en el portland normal, existe, y en mayor cantidad que en aquél, por su fuerte basicidad, hidróxido cálcico liberado, cuya presencia favorece la formación de los sulfo-ferritos y representa una causa de debilidad del conglomerante, al mantenerlo permeable.

Creemos que la coyunda PAS-puzolana proporcionará cementos de alta resistencia a las aguas selenitosas, y en las que, mejorando las del PAS solo, las cargas de rotura a plazos largos tendrán garantizado su crecimiento, acompañado del cierre de la estructura interna del conglomerante, que asegurará más impermeabilidad.

1.2.6.4. Aguas puras. En una ordenación escalar de los líquidos nocivos para el cemento hidratado, quizá debamos reservar el primer lugar para las aguas puras, ya que éstas atacan, no sólo al hidróxido cálcico libre o a los aluminatos, sino a los silicatos y ferritos, extrayendo de éstos la cal y dejando en libertad la sílice, la alúmina y el óxido férrico.

Pero la nocividad del agua no es la misma cuando la cantidad es escasa que cuando hay exceso. Tiene fácil explicación: puesto que al estar en pequeña cantidad, ésta disuelve las sales, deja de ser pura y su acción queda interrumpida. Sin embargo, al renovarse —caso de una conducción—, la acción disolvente se prolonga y puede llegar a descomponer el hormigón en su totalidad.

La única defensa, en este caso, la tenemos en un hormigón que sea lo más impermeable posible, y a ello contribuyen, de un modo eficaz, las cualidades de los cementos puzolánicos.

1.2.6.5. Agua de mar. La acción del agua de mar es múltiple. Sus efectos son muy diferentes. Pero, al fin, destructores. Hay en ella presencia de cloruro magnésico, sulfato cálcico y magnésico, que son causa de que se forme sulfoaluminato de Candlot; el resto de las sales pueden formar cloruro cálcico, solubilizando la cal de la pasta fraguada.

El sulfato magnésico es particularmente agresivo y se encuentra contenido en cantidades importantes en el agua de mar. Su acción destructiva se ejerce sobre el hidróxido cálcico liberado en la hidrólisis de los silicatos, transformando a éste en hidróxido magnésico, poco soluble, y a aquél en sulfato cálcico, que producirá la sal de Candlot expansiva.

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es

Señalaremos que otro motivo determinante de la destrucción química del conglomerante por agua de mar, resulta de la simple eliminación por disolución y difusión de la cal liberada en la hidrólisis de los silicatos.

Como consecuencia de lo anteriormente expuesto, todos los especialistas señalan como inadecuado el cemento portland para permanecer en contacto con el agua de mar y recomiendan que se empleen aquellos en que desaparezca la cal liberada. El conglomerante puzolánico por su propia naturaleza presenta esta propiedad.

1.2.7. Confiere resistencia frente a los gases de materia orgánica

Esta propiedad es la que concreta como ineludible el empleo de conglomerante puzolánico en las tuberías de saneamiento.

El ácido sulfhídrico que se produce en las tuberías de saneamiento se transforma en ácido sulfúrico al oxidarse. Este se combinará con la cal liberada, formando sulfato cálcico, que da origen a la destrucción de la corona de la tubería, con la repetición del proceso tantas veces descrito.

Eliminando el hidróxido cálcico con puzolana, desaparece la destrucción.

1.2.8. Disminuye el calor de hidratación

Un conglomerante hidráulico al fraguar y posteriormente al endurecerse desprende calor. Podemos estimar que un cemento portland normal desprende 65, 80 y 95 cal/g, a los 7, 28 y 90 días, respectivamente. Si sustituimos una parte de cemento por puzolana, las cal/g alcanzadas por el producto resultante disminuirán en cada una de las fechas citadas, en una cantidad prácticamente proporcional a la puzolana añadida. No se obtienen valores rigurosamente proporcionales, porque también es débilmente exotérmica la reacción de la puzolana con la cal y porque la dispersión que la puzolana produce en el polvo de portland facilita su ataque y acelera su velocidad de hidratación.

En todo caso es fácil comprender que la conversión en puzolana de una parte de cemento portland, que equivale a una disminución de la dosificación de dicho cemento, reduce el calor desprendido en la masa total del hormigón.

Una consecuencia directa de esta propiedad de los conglomerantes puzolánicos es la disminución de las fisuras y su buen comportamiento en la construcción de obras hidráulicas, de entre las que podemos destacar las presas y los canales.

Como entre todos los componentes del cemento portland anhidro, es el aluminato tricálcico —C_3A— el más enérgicamente exotérmico —200 cal/g— y en segundo lugar se encuentra el silicato tricálcico —C_3S— —120 cal/g— el Ministerio de Obras Públicas español, al sólo efecto de disminuir el calor de hidratación, ha limitado el contenido de ambos en los conglomerantes de tipo portland a emplear en la construcción de grandes presas, a porcentajes aislados del 10 y 50 por 100, respectivamente, y suma del 58 por 100.

Al mismo fin conduce la utilización de la puzolana, sin necesidad de exigir de los fabricantes la modificación de los crudos. Sin perder de vista que la puzolana no sólo evitará la producción de las grietas, sino que lleva más allá su función impermeabilizante, al combinarse con el hidróxido cálcico liberado en la hidratación. En cambio, un cemento portland bajo en C_3A y en C_3S impedirá las fisuras, pero dejará libre cal apagada.

1.2.9. Aumenta la impermeabilidad

Por el incremento de tobermorita se ha mejorado la impermeabilidad. En teoría, pues, un cemento puzolánico ha de proporcionar, a igualdad de las demás circunstancias, un hormigón menos permeable.

Así se ha comprobado en ensayos de laboratorio de muy distinto origen y de los cuales hemos recogido los siguientes datos:

Un cierto hormigón de 250 kg de cemento portland por m^3 dejó pasar agua cuando la presión era de 1,5 atmósferas, mientras que, en idénticas condiciones y con la misma cantidad de cemento puzolánico, la impermeabilidad a esa presión fue completa. Si en vez de 250 kg se eleva la riqueza en cemento a 350 kg, empleando cemento portland se observa paso de agua a una presión de 4 atmósferas; mientras que con cemento puzolánico no sucede este fenómeno.

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es

De la misma manera, en pruebas llevadas a cabo por el Laboratorio de la EXCO del Ministerio de la Vivienda, para determinar la impermeabilidad al agua de lluvia de muros de fábrica de ladrillo comparativos, empleando cementos portland y puzolánico, con constancia en el resto de las condiciones de construcción, se obtuvieron resultados muy ventajosos para aquellos en los que en su ejecución intervino el cemento puzolánico.

1.3. OTROS EFECTOS DE LA INCORPORACION DE PUZOLANA

1.3.1. Aumenta la plasticidad

Por la razón apuntada en 1.2.2, un cemento con puzolana será más manejable, con incremento de sus cualidades plásticas.

1.3.2. Prolonga el período de endurecimiento

Teórica y experimentalmente hemos adquirido el conocimiento de que los cementos puzolánicos tienen una actividad hidráulica mucho más prolongada que los portland y aluminosos. En éstos, los fenómenos físico-mecánicos apreciables del endurecimiento se acaban prácticamente a los 3 años, mientras que en los puzolánicos, a los 6 años aún no han terminado.

1.3.3. Hace crecer los módulos de elasticidad

En todo material a cada solicitación corresponde un coeficiente de elasticidad diferente; esto también ocurre en el hormigón.

Los coeficientes de elasticidad para esfuerzos de compresión o tracción crecen con los que, provocados por cada una de estas presiones, es capaz de soportar la pieza sometida a carga.

Tanto la compresión como la tracción llegan a alcanzar valores más altos —ver 1.1.2— en los cementos puzolánicos que en los portland. También serán mayores los módulos elásticos. Y habrá crecido más de prisa el debido a la tracción —ver último párrafo de 1.1.2—.

Un alto coeficiente de elasticidad ya es un índice, por sí solo, de la buena calidad de un material.

Pero, además, un módulo elástico elevado para la tracción tiene como efecto correlativo una menor deformación para la misma tensión o, lo que es lo mismo, un menor peligro de que aparezcan fisuras. Esta propiedad se reflejará en una mejor protección de las armaduras en las construcciones de hormigón armado.

1.3.4. Posee mayor volumen a igualdad de peso

La puzolana es generalmente poco densa, por lo que el cemento puzolánico tiene un peso específico menor que el portland. Siguiendo nuestra costumbre de fijar, en peso, la cantidad de cemento que se ha de añadir a un árido, resulta que en los morteros puzolánicos hay un volumen de cemento mayor, lo que provocará un aumento de las superficies en contacto entre el conglomerante y los áridos, que quedarán así mejor envueltos.

1.3.5. Aumenta la adherencia con las armaduras

Bajo este aspecto destacamos la importancia que el mayor contenido de tobermorita tiene en la adherencia. El crecimiento de ésta en los cementos puzolánicos mejorará la de hormigón-armadura.

1.3.6. Evita la reacción árido-álcali

Esta reacción, bien conocida, transcurre con formación de productos de carácter expansivo que perturban la trabazón entre los áridos y el cemento y merman, por ello, las condiciones mecánico-resistentes de los conglomerados. La puzolana existente junto al clínker en un cemento puzolánico, fija los álcalis de aquél e impide el proceso expansivo que comentamos.

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es

1.4. CONSECUENCIAS RESUMIDAS DE LOS EFECTOS ESTUDIADOS

Como consecuencia de los efectos comentados, podemos resumir las cualidades de los cementos puzolánicos y afirmar, comparándolas con el portland de igual designación, que se pueden ejecutar con ellos hormigones y morteros más impermeables, menos solubles por más resistentes químicamente, con menos contracciones, de adherencia acrecida, de resistencias a corto plazo equiparables y a largo plazo bastante superiores. También destacaremos su mayor plasticidad o mejor manejabilidad y su más elevado coeficiente de elasticidad.

2 Formas de incorporación de la puzolana

Si tenemos en cuenta que un hormigón denominado puzolánico está compuesto por cuatro elementos, que son

áridos, cemento portland, puzolana y agua,

cada uno de los cuales tiene un origen diferente, concluiremos que todos ellos pueden adquirirse por separado y ser mezclados en la hormigonera. Si se procede de esta forma, a la puzolana debe de exigírsele una finura de molido superior a la del cemento portland, es decir, que sobrepase los 4.200 cm^2/g de superficie específica Blaine.

Mas la adición de puzolana en la hormigonera es sólo recomendable en instalaciones rigurosamente planteadas y con un análisis previo de su comportamiento con el cemento portland elegido. El manejo de la planta de preparación del hormigón ha de estar encomendado a personal cualificado. En esas condiciones se puede llegar a una fabricación, técnicamente perfecta, con ventaja económica.

No obstante las dificultades que el estudio inicial representa para la adopción generalizada del método, en muchos casos puede ser el más adecuado por la libertad en que queda el usuario para incrementar la típica acción de la puzolana. Unos ejemplos los podemos tener en la ejecución de pilotajes, inyecciones y prefabricados.

Pero la forma habitual de hacer intervenir a la puzolana es la de dejar su manejo a las fábricas de cemento y solicitar de ellas el suministro de cemento puzolánico, con lo que en las obras se sigue disponiendo de sólo tres variables en la confección del hormigón:

áridos, cemento puzolánico y agua.

3 Aplicaciones

3.1. APLICACIONES CONCRETAS DEL CEMENTO PUZOLANICO

Por último, hemos confeccionado una lista de unidades de obra y prefabricados, en las que es nuestra opinión que debe ser preferido el cemento puzolánico; y otra de aquéllas, en las que puede emplearse indistintamente portland o puzolánico.

3.1.1. Unidades en las que ha de ser preferido el empleo de cemento puzolánico

EN TODA CLASE DE CIMENTACIONES;

EN LOS HORMIGONES EN MASA EN GENERAL Y, ESPECIALMENTE, EN PRESAS Y CANALES;

EN LOS HORMIGONES EN CONTACTO CON TERRENOS YESIFEROS;

EN LOS SUMERGIDOS EN AGUAS ACIDAS, SELENITOSAS O PURAS;

EN LOS HORMIGONES Y MORTEROS EXPUESTOS A LA ACCION DEL AGUA DE MAR O EN AMBIENTES MARINOS;

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc) http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es

EN LAS UNIDADES DE SANEAMIENTO Y, FUNDAMENTALMENTE, EN LAS CANALIZACIONES;

TAMBIEN EN LAS TUBERIAS DE LOS ABASTECIMIENTOS DE AGUA;

EN LOS MORTEROS DE LAS FABRICAS DE LADRILLO, MAMPOSTERIA, SOLADOS O ALICATADOS;

EN LOS MORTEROS PARA ENFOSCADOS Y ENLUCIDOS;

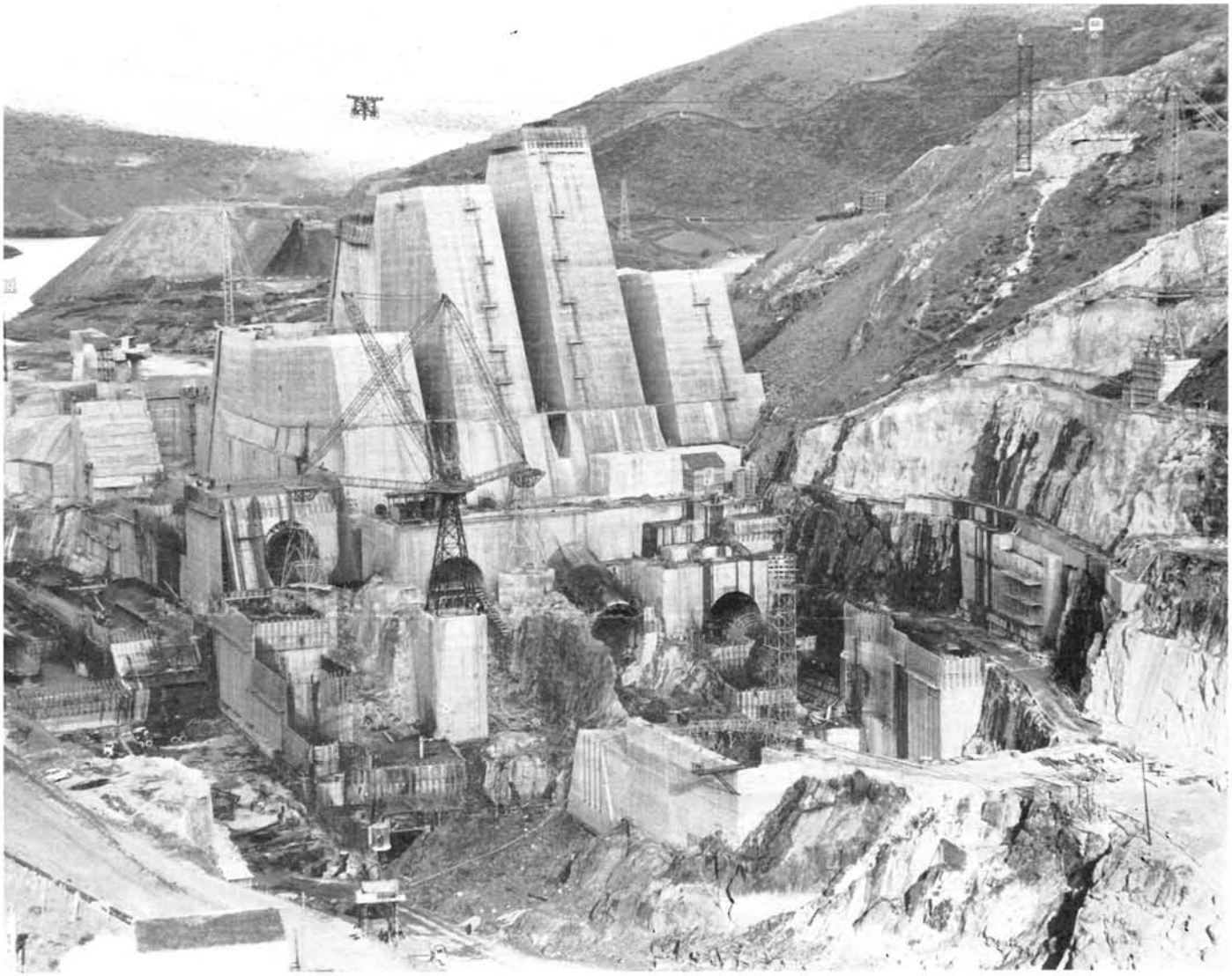
EN LA FABRICACION DE BALDOSINES O LOSETAS HIDRAULICAS;

ASI COMO EN LA DE BLOQUES LIGEROS O NORMALES, DE CIERRE O DE FORJADO.

3.1.2. Unidades de empleo indistinto de cemento portland o puzolánico

Podrán emplearse indistintamente conglomerantes de tipo portland o puzolánico, en todas aquellas unidades en las que se requiera sólo resistencia, como pueden ser las estructuras de hormigón armado, con sólo tomar la precaución de elegir los de igual designación en el Pliego de Recepción de Conglomerantes Hidráulicos vigente. A estos efectos, tendrán igual estimación los P-250 que los PUZ-250 y los P-350 que los PUZ-350.

PRESA DE ALCANTARA EN EL RIO TAJO: En la totalidad del hormigonado se está empleando cemento puzolánico.



© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)

3.1.3. Será preferido el cemento portland

Opinamos que el conglomerante de tipo portland sólo puede ser preferido cuando se necesite utilizar el de designación P-450.

3.1.4. Observación

No se nos oculta que las designaciones comerciales de los cementos no son rigurosas y que, en muchas ocasiones, un portland entregado como P-350 es, en realidad, un P-450 o, por lo menos, lo es a los 7 y 28 días. Son precisamente estas resistencias, superiores a las que señala el Pliego de Recepción de Conglomerantes Hidráulicos, proporcionadas en muchos casos por los fabricantes y reconocidas como habituales por los consumidores, las que pueden confundir al lector de este trabajo, que hemos basado en una clasificación de los cementos con estricta sujeción al Pliego citado.

4 Conclusión

El usuario de cemento puzolánico debe saber que cuando emplea un PUZ-250 está usando un cemento de propiedades cambiantes, que inicialmente tiene como correlativo, en el aspecto de resistencia bajo carga, a un P-250, pero que al cabo de un plazo largo, quizá de 1 año, con quien ha de compararse en este mismo aspecto es con un P-350.

Con el concepto de designación del Pliego, los cementos puzolánicos no permanecen estacionarios, y cuando se utiliza un PUZ-250, al cabo del tiempo se comportará como un PUZ-350, el cual, a su vez, lo hará como un PUZ-450.

Las modernas plantas de producción de clínker de portland encuentran dificultades para conseguir que éste pueda emplearse, sin aditivos, en la fabricación de cemento P-250 y lo normal es que el obtenido merezca la denominación de P-350.

Poco extendido aún el consumo del cemento puzolánico y persuadidos del gran papel que le corresponde desempeñar en una mejora de la calidad de gran número de obras, quedaría satisfecho nuestro sentido profesional si, con cuanto dejamos expuesto, consiguiéramos despertar una inquietud de selección del conglomerante entre los técnicos, proyectistas y constructores españoles. Que éstos se dieran cuenta siempre de que el nombre cemento tiene un apellido y que la familia de mayor abolengo histórico es la de los puzolánicos. A ellos podemos asegurar que la solvencia científica de nuestros fabricantes de cemento está en condiciones de garantizarles cualidades constantes, en una producción aceptada de conglomerante puzolánico.

Bibliografía

La Química del Cemento.—Wolfgang Czernin. Ediciones Palestra.

Prontuario del Hormigón.—Alfred Hummel. Editores Técnicos Asociados, S. A.

Contribución al estudio de los cementos portland resistentes a los sulfatos.—Dr. Francisco Soria Santamaría. Publicaciones del Instituto Eduardo Torroja.

Apología de los conglomerantes puzolánicos.—Dr. José Calleja Carrete. "Cemento-Hormigón", núm. 386, mayo 1966.

Aplicaciones de los conglomerantes puzolánicos.—Dr. Manuel López Blázquez, Dr. Manuel de Luxán Baquero. "Arte y Cemento", núm. 774, 20 marzo 1967.

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc) http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es

Liants pouzzolaniques, propriétés et applications

M. de Luxán Baquero, Dr. Ing. des Ponts et Chaussées.

Dans ce travail l'auteur tente de mettre en évidence l'importance de l'adoption d'un liant de type pouzzolanique, pour améliorer la durabilité de bon nombre d'ouvrages.

Seulement lorsqu'il sera nécessaire d'employer un liant qui devra assurer una haute résistance mécanique en un très court délai, c'est-à-dire, lorsque nous nous verrons obligés à employer un P-450, il ne nous sera pas possible de remplacer le portland par un ciment pouzzolanique. Par contre, nous pouvons très bien remplacer un P-250 ou un P-350 par un PUZ-250 ou par un PUZ-350, respectivement. Avec ce choix nous aurons obtenu l'équivalent à un portland amélioré, du sein hydraté duquel a disparu la chaux éteinte, substance nocive que le portland produit toujours au cours de son durcissement.

Le P-450 n'a pas un PUZ comparable, mais nous devons nous efforcer de ne pas envahir de ciments portland l'ample domaine qui correspond aux pouzzolaniques. Ainsi nous nous en tiendrons convenablement au concept réel de qualité.

Puzzolanic cements, their properties and applications

M. de Luxán Baquero, Dr. civil engineer.

This paper seeks to emphasize the importance of making use of puzzolanic type cements to improve the durability of many kinds of structures.

Only in cases when it is necessary to use a cement which must become very strong within a very short time, such as P-450, will it not be possible to substitute a Portland by a puzzolanic cement. But on the other hand, if we can substitute a P-250 or a P-350 by a PUZ-250 or by a PUZ-350, respectively, we shall have suceeded in obtaining the equivalent of an improved Portland cement, from whose hydrated content the quench lime has disappeared. This lime is a harmful material, which portland cement always produces when it hardens.

P-450 has not an equivalent PUZ cement, but in the range where there are suitable equivalents, we should attempt to substitute Portland by the corresponding puzzolanic cements. In this way we shall help to meet the true requirements of high quality in this field.

Puzzolanbinder, Eigenschaften und Anwendungsarten

M. de Luxán Baquero, Dr. Ing.

In der vorliegenden Arbeit ist versucht worden, die Bedeutung der Verwendung von Puzzolanbindern zur erhöhten Haltbarkeit zahlreicher Bauarten darzulegen.

Nur wenn man einen Binder mit höchstem mechanischem Widerstand in kürzester Zeit benötigt, d.h. wenn wir uns gezwungen sehen, P-450 zu verwenden, ist es nicht möglich, Portlandzement durch Puzzolanzement zu ersetzen. Dagegen können P-250 oder P-350 jeweils durch PUZ-250 oder PUZ-350 ersetzt werden. Hierdurch erhält man das dem verbesserten Portlandzement entsprechende Material, in dessen Hydratsubstanz kein gelöschter Kalk — eine schädliche Substanz, die der Portlandzement immer beim Erhärten produziert — anzufinden ist.

Da P-450 also keinen entsprechenden PUZ aufweist, muss der Portlandzement in das grosse Gebiet der Puzzolane eindringen. Auf diese Weise können wir den tatsächlichen Qualitätsbegriff gebührend beachten.

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc) http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es