

CEMENTO PÓRTLAND PUZOLÁNICO CARACTERÍSTICAS Y RECOMENDACIONES DE USO

Ing. Edgardo Becker
Líder de Asesoría Técnica
LOMA NEGRA C.I.A.S.A.

La puzolana natural fue el siguiente material de construcción más antiguo luego que la cal y la piedra caliza fueran utilizadas por el hombre prehistórico. Los romanos y griegos utilizaban una combinación de cal y una puzolana natural (ceniza volcánica) proveniente del Mediterráneo –erupciones volcánicas entre los años 1600 y 1500 AC en Santorin (Grecia) y en el año 79 DC en Vesuvio, bahía de Nápoles (Italia)- para fabricar un cemento de gran durabilidad. Según el ingeniero romano *Vitruvius Pollio* (siglo 1° DC), los hormigones elaborados con este material resultaban de tan buena calidad que “ninguna ola puede romperlo, ni hay agua que pueda disolverlo” [1]. Esta concepción continúa plenamente vigente siendo el CPP (cemento pórtland puzolánico) el cemento más utilizado en grandes obras de ingeniería de la actualidad debido a la larga vida útil para la cual están diseñadas.

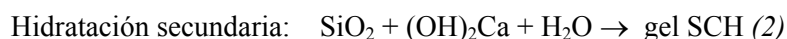
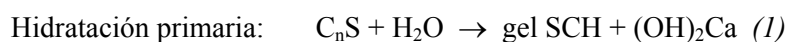
El ACI 116R define la puzolana como: “material silíceo o silicoaluminoso, que en si mismo puede poseer un pequeño o nulo valor cementante, pero finamente dividido y en presencia de humedad reacciona químicamente con hidróxido de calcio a temperatura normal formando compuestos con propiedades cementicias”.

De acuerdo a la norma para cementos de uso general, IRAM 50.000 [2]: “los materiales puzolánicos son sustancias naturales o industriales silíceas o silicoaluminosas, o una combinación de ambas” y, continúa: “en la elaboración de los cementos definidos por esta norma, se utilizarán las puzolanas que cumplan con los requisitos establecidos en la IRAM 1668”, destacándose -además de los requerimientos químicos- los requisitos físicos de actividad puzolánica, requerimiento de agua y reducción de expansión por RRAA entre otros.

Mecanismo de Hidratación

Las propiedades de las puzolanas (incluso las naturales) varían considerablemente, dependiendo de su origen. En la zona cordillerana de nuestro país existen yacimientos de puzolana natural proveniente de erupciones volcánicas que poseen una adecuada actividad puzolánica.

Las puzolanas, incorporadas dentro del CPP (cemento pórtland puzolánico) tienen la capacidad de formar productos de hidratación a través de una reacción secundaria [3] donde se combinan con el $(OH)_2Ca$ formado durante la hidratación de los compuestos sílico-calcáreos (C_3S y C_2S) denominada primaria (1), resultando compuestos SCH (sílico-calcáreos-hidratados):



El SiO_2 es aportado por la puzolana y el $(OH)_2Ca$ –hidróxido de calcio- es el subproducto generado durante la hidratación primaria. Podrá observarse que durante la hidratación de las puzolanas no hay generación de $(OH)_2Ca$. En el mismo sentido, la figura N° 1 muestra que a medida que avanza el proceso de hidratación, la cal libre disminuye, lo que indica la formación de productos de hidratación (en su mayor parte SCH y aluminosilicatos de calcio en menor medida) a partir de la puzolana. Es evidente que el uso de una puzolana de buena calidad asegura, no solamente una menor cantidad de

cal libre en la pasta de cemento sino que además se obtiene un mayor volumen de productos SCH por lo cual se obtiene –a igual relación a/c- una menor porosidad de la pasta debido a un refinamiento de poros y, consecuentemente, menor permeabilidad respecto del CPN (cemento pórtland normal) producido a partir del mismo clinker pórtland. Esto significa la obtención de una pasta de cemento más compacta, resistente y durable.

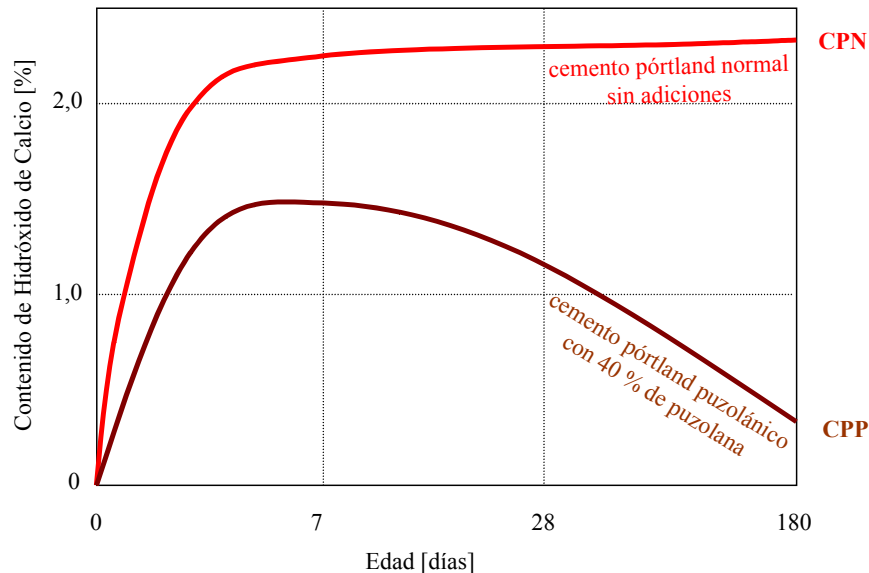


Figura N° 1: Cambios en el contenido de $(OH)_2Ca$ durante la hidratación del CPP - cemento pórtland puzolánico (Lea 1971).

Fuente: ACI 232.1R-94: Use of Natural Pozzolans in Concrete

PROPIEDADES DE LOS HORMIGONES ELABORADOS A PARTIR DE CPP

Propiedades en Estado Fresco

Las propiedades del hormigón en estado fresco dependen fundamentalmente de las características de los materiales componentes y las proporciones utilizadas, destacándose la influencia de los agregados (forma, tamaño y distribución) que suelen ocupar más del 70 % del volumen del hormigón. En un segundo plano, se pueden mencionar algunas características del CPP que pueden influir en el comportamiento del hormigón. En general, el CPP ($400 \text{ m}^2/\text{kg} < \text{Blaine} < 500 \text{ m}^2/\text{kg}$) es más fino que el CPN ($300 \text{ m}^2/\text{kg} < \text{Blaine} < 350 \text{ m}^2/\text{kg}$) debido a su alta molturabilidad, lo que se suele traducir en una mayor demanda de agua. La experiencia indica que utilizando similares materiales componentes y proporciones, para obtener el mismo asentamiento se necesita incrementar el contenido de agua de la mezcla en alrededor de 12 a 20 litros/ m^3 cuando se utiliza CPP respecto del CPN. Por consiguiente, se recomienda el uso de aditivos plastificantes –o adaptar su dosis- de manera de mantener una cierta relación a/c sin necesidad de incrementar o minimizando el aumento del CUC (contenido unitario de cemento). De esta manera, puede ser aprovechada al máximo la alta capacidad de retención de agua que poseen los hormigones elaborados con CPP, minimizando la exudación que junto al curado son los parámetros fundamentales para obtener un hormigón de recubrimiento de calidad adecuada.

Propiedades en Estado Endurecido

Los hormigones elaborados a partir de CPP son conocidos por su alta resistencia final, baja permeabilidad, reducido calor de hidratación y gran durabilidad.

a) Resistencia Mecánica

Ya se explicó anteriormente el mecanismo de hidratación del CPP, por lo cual resulta evidente que el desarrollo de resistencia depende –entre otros aspectos- de la velocidad de hidratación de las partículas de clinker p rtland -donde intervienen fundamentalmente su composición química y tamaño- y del tipo, contenido y finura de la puzolana. Generalmente, el uso de CPP supone un desarrollo de resistencia más “lento” que el CPN debido a que la puzolana se hidrata en forma retardada respecto del clinker. En la figura N  2 puede observarse el desarrollo de resistencia de tres (3) hormigones de similares características elaborados a partir de CPN40 (cemento p rtland normal, categoría 40), CPF40 (cemento p rtland con “filler” calcáreo, categoría 40) y CPP30 (cemento p rtland puzolánico, categoría 30). El hormigón elaborado a partir de CPP presenta un desarrollo de resistencia más “lento” que las otras opciones, no obstante luego de 56 días de edad, iguala la resistencia del CPF y la superar  a partir de esa edad. El mismo fenómeno se dará respecto del CPN a edades más avanzadas como muestra la figura N  3.

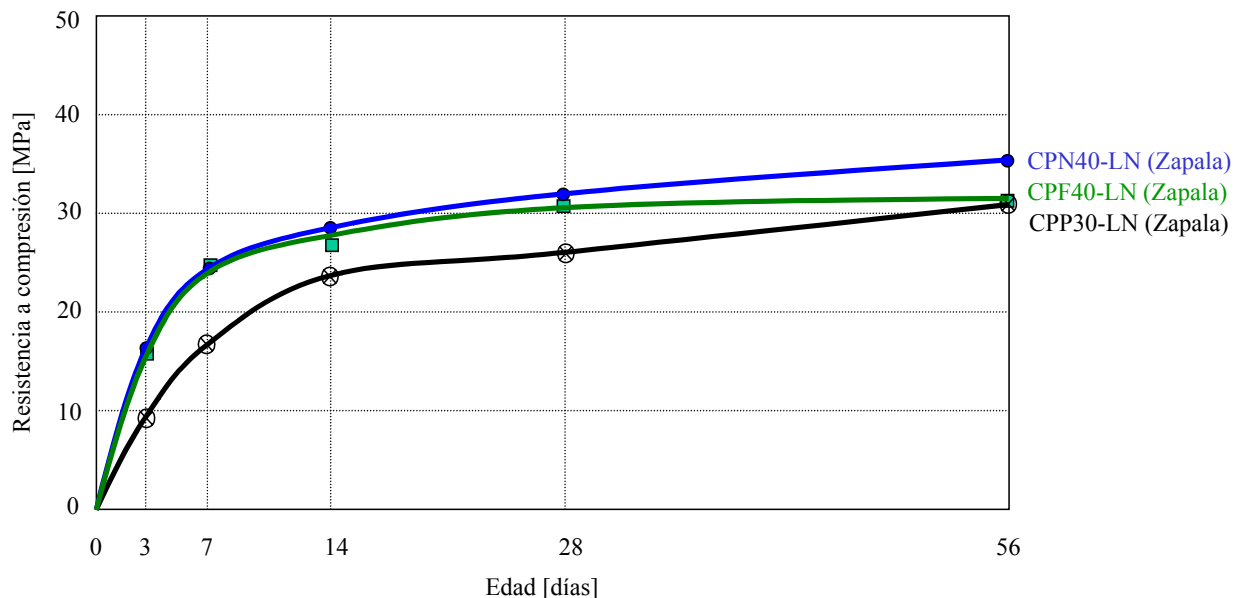
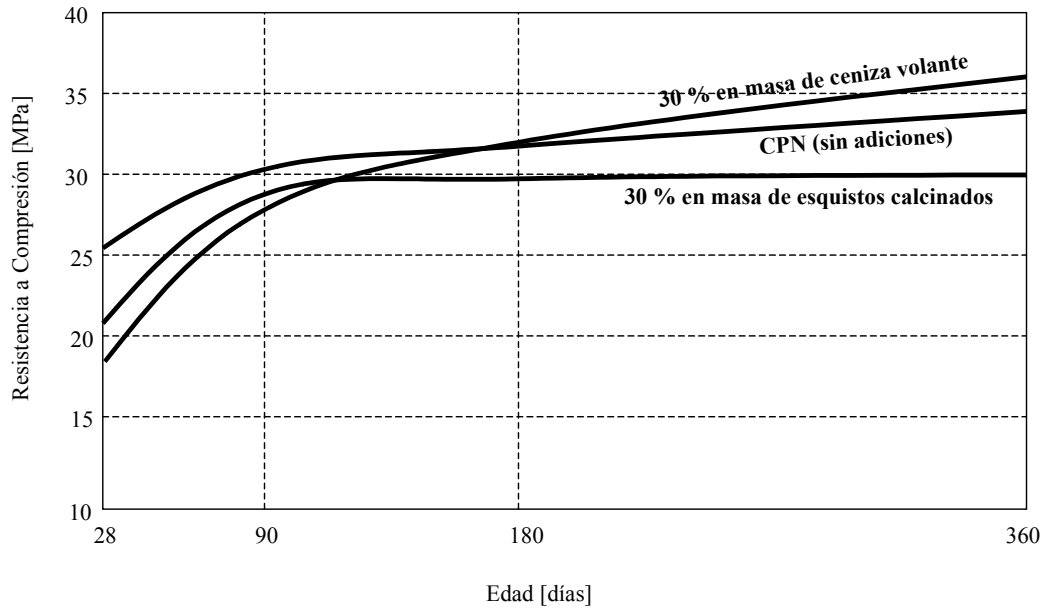


Figura N  2: Desarrollo de resistencia en el tiempo de hormigones con similar CUC (contenido unitario de cemento) y asentamiento sin aditivos. La demanda de agua se ajustó a fin de lograr un asentamiento constante.

Fuente: Centro Técnico LOMA NEGRA, 2000 - 2001

Figura N° 3: Efecto de la puzolana natural en la resistencia a compresión del hormigón (Elfert 1974).



Fuente: ACI 232.1R-94: Use of Natural Pozzolans in Concrete

Otro aspecto que se desprende de las figuras N° 2 y 3, es el real aprovechamiento de la importante resistencia final que adquieren los hormigones elaborados con CPP a través de una adecuada especificación de la edad de diseño del hormigón. Convencionalmente, los ingenieros estructuralistas están acostumbrados a especificar valores de resistencia a 28 días. En el caso del uso de CPP se recomienda especificar edades de diseño mayores (por ejemplo: 56 ó 90 días). Esta recomendación, utilizada internacionalmente para el diseño de todo tipo de hormigones (incluso los HAD), seguramente se incluirá en la nueva reglamentación CIRSOC 201.

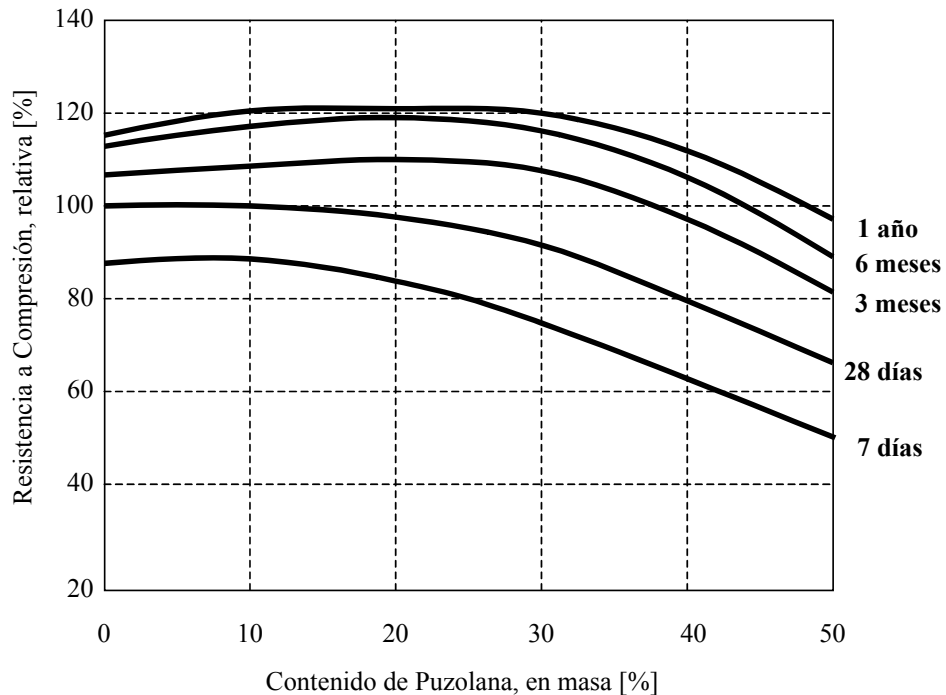


Figura N° 4: Efecto de la sustitución de cemento pórtland con puzolana natural de origen italiano en la resistencia a compresión del mortero ISO (Massazza & Acosta 1979).

Fuente: ACI 232.1R-94: Use of Natural Pozzolans in Concrete

La figura N° 4 muestra claramente que al aumentar la adición de puzolana, el desarrollo de resistencia se hace más “lento” lográndose los mejores desempeños –desde este punto de vista- con reemplazos entre 10 y 30 %.

b) Desarrollo de Temperatura

Cuando se construyen estructuras de hormigón masivo (bases, grandes plateas de fundación, diques, presas, etc.) resulta fundamental limitar la temperatura que adquirirá ese hormigón durante las primeras edades, de manera de limitar las deformaciones y tensiones que se producirán en la estructura por efectos térmicos y su consecuente riesgo de fisuración. Adicionalmente a las prácticas constructivas que pueden ayudar a disipar el calor (metodología de hormigonado, incorporación de cañerías de enfriamiento dentro de la masa del hormigón, etc.) o que permitan soportar las deformaciones / tensiones (armadura adicional) o limitar la temperatura de colocación del hormigón entre otras, resulta necesario trabajar sobre el diseño de la mezcla de hormigón de manera de minimizar el desarrollo de calor. En este aspecto, se puede trabajar limitando el CUC (contenido unitario de cemento) y el calor de hidratación del cemento pórtland. Sin duda las estructuras masivas más exigidas son las presas/diques de hormigón simple donde se utilizan cementos BCH (de bajo calor de hidratación) y/o se utilizan importantes contenidos de adiciones minerales (en general algún tipo de puzolana o escoria granulada de alto horno). La figura N° 5 muestra la influencia del reemplazo de puzolana natural en el calor de hidratación del cemento pórtland. La obtención de un CPN (BCH) – cemento pórtland normal, de bajo calor de hidratación- implica necesariamente la fabricación de un clinker pórtland “especial” (alto contenido de C_2S y bajo C_3S) bastante diferente del clinker que se produce habitualmente para hacer otros tipos de cemento, lo que incrementa su costo considerablemente. El uso de CPP (BCH) –cemento pórtland puzolánico de bajo calor de hidratación- mejora sensiblemente los costos a similares valores de calor de hidratación lo que sin duda resulta una clara ventaja y explica la altísima participación del CPP en obras de hormigón masivo.

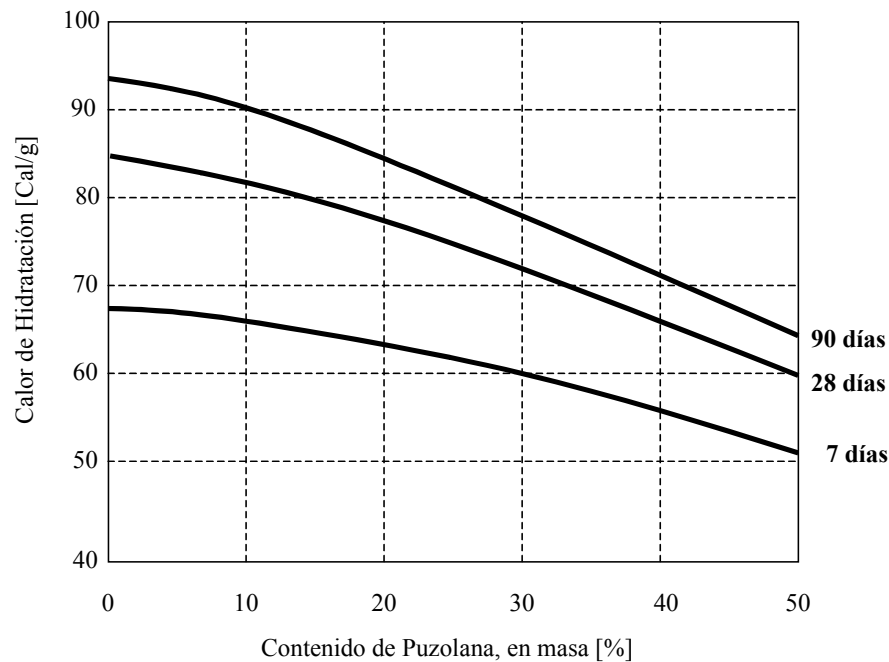


Figura N° 5: Efecto de la sustitución con puzolana natural de origen italiano en el calor de hidratación del cemento pórtland (Massazza & Acosta 1979).
Fuente: ACI 232.1R-94: Use of Natural Pozzolans in Concrete

c) Durabilidad

La durabilidad es la propiedad más importante del hormigón. El ACI 201.2R-92 [4] la define como “la habilidad de resistir la acción del medioambiente, ataque químico, abrasión o cualquier otro proceso de deterioro”. Para completar esta definición debe incluirse el concepto de mantener las condiciones de servicio por el ciclo de vida para el cual fue proyectado. De acuerdo a lo mencionado, el concepto de durabilidad es muy amplio y bastante difícil de medir. No obstante, de acuerdo al medio al cual estará sometido, existen diferentes métodos de medición que resultan útiles para evaluar el desempeño del hormigón y de qué manera contribuirá a la durabilidad de la estructura. Entre las propiedades del hormigón que contribuyen con la durabilidad se destacan la permeabilidad, resistencia a los sulfatos, reacción álcali-agregado y susceptibilidad a la fisuración.

c.1) Permeabilidad

Evidentemente la permeabilidad del hormigón depende –además de los agregados- de la calidad de la pasta de cemento, destacándose la influencia de la relación a/c (agua / cemento). En un segundo orden de magnitud, existe cierta influencia del tipo de cemento pórtland utilizado. Resulta evidente que, en general, a igual relación a/c, los hormigones elaborados con CPP presentan un mayor volumen de gel SCH produciéndose un refinamiento de poros que se traduce en una menor permeabilidad, destacándose el excelente comportamiento que presentan los hormigones elaborados con este cemento ante el ataque del agua de mar debido a su menor permeabilidad al agua y a los cloruros.

c.2) Resistencia a los Sulfatos

Es conocido que los cementos con adiciones minerales (puzolanas naturales o artificiales y escoria granulada de alto horno) son preferidos ante el ataque fuerte por sulfatos debido a su menor permeabilidad y capacidad de reducción de expansión por sulfatos incluso al utilizar clinker pórtland de contenido relativamente alto de AC_3 . La figura N° 6 muestra el efecto de la puzolana natural en la reducción de la expansión por sulfatos en prismas de mortero sometidos por más de 5 años a una solución de $MgSO_4$ al 1% [1].

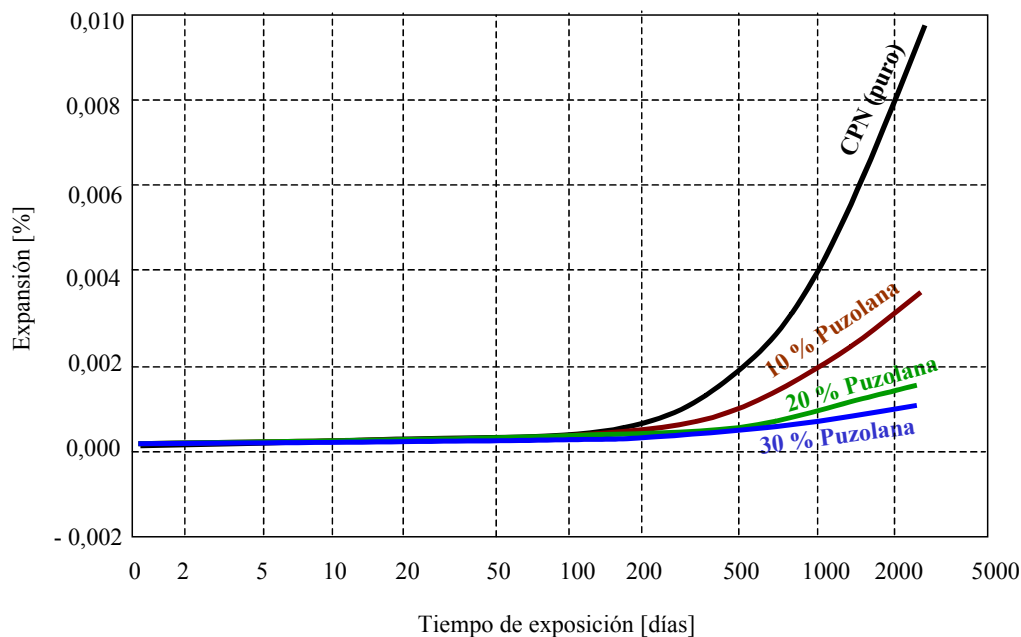


Figura N° 6: Efecto de la sustitución de cemento pórtland por puzolana natural de Italia en la expansión de morteros 1:3 (Massazza & Costa 1979).

Fuente: ACI 232.1R-94: Use of Natural Pozzolans in Conrete

En Argentina el Reglamento CIRSOC 201, en forma similar al ACI 201R (American Concrete Institute), reconoce la protección adicional brindada por las adiciones minerales, recomendando para hormigones que estarán sometidos a un ataque muy fuerte de sulfatos (suelos de contacto con $SO_4^{2-} > 20.000$ mg/kg o aguas de contacto con $SO_4^{2-} > 10.000$ mg/l), además de una baja relación a/c ($< 0,40$), la utilización de un cemento pórtland ARS con adiciones minerales activas (puzolanas o escoria granulada de alto horno), es decir CPP (ARS) –cemento pórtland puzolánico, altamente resistente a los sulfatos- ó CPE (ARS) –cemento pórtland con escoria de alto horno, altamente resistente a los sulfatos- ó CAH (ARS) –cemento de alto horno, altamente resistente a los sulfatos- y solamente permite la utilización de un CPN (ARS) cuando adicionalmente se incorpora como material cementante una puzolana que demuestre ser efectiva para la reducción de la expansión por sulfatos.

c.3) Reacción álcali-agregado

La norma IRAM 1668 (Instituto Argentino de Normalización) fija como requerimiento cierta capacidad de reducción de la reacción álcali-agregado por parte de la puzolana, por lo cual, independientemente de las propiedades especiales que pueda tener un CPP, al menos su utilización supone un mejor desempeño que un CPN fabricado a partir del mismo clinker pórtland. Esta idea se refuerza en la figura N° 7 donde se observa una importante reducción de la expansión cuando se

reemplaza un CPN de alto contenido de álcalis ($Na_{equivalente} = 1,23 \%$) combinado con arena de trituración vidrio Pyrex altamente reactiva. Cuando se necesita utilizar en la elaboración de hormigón agregados calificados como potencialmente reactivos en estructuras que estarán sometidos a humedad en forma constante, deben tomarse ciertas precauciones [5] entre las que se encuentran la utilización de un cemento p rtland de bajo álcali ($Na_{equivalente} < 0,60 \%$) cuya efectividad debe ser probada y solamente resulta válida cuando no existe la posibilidad de incorporación de álcalis a través del medio o la utilización de un cemento p rtland RRAA con adiciones: CPP (RRAA) –cemento p rtland puzolánico, resistente a la reacción álcali-agregado- o CPE (RRAA) o CAH (RRAA) cuando existe la posibilidad de incorporación de álcalis a través del agua o suelo de contacto.

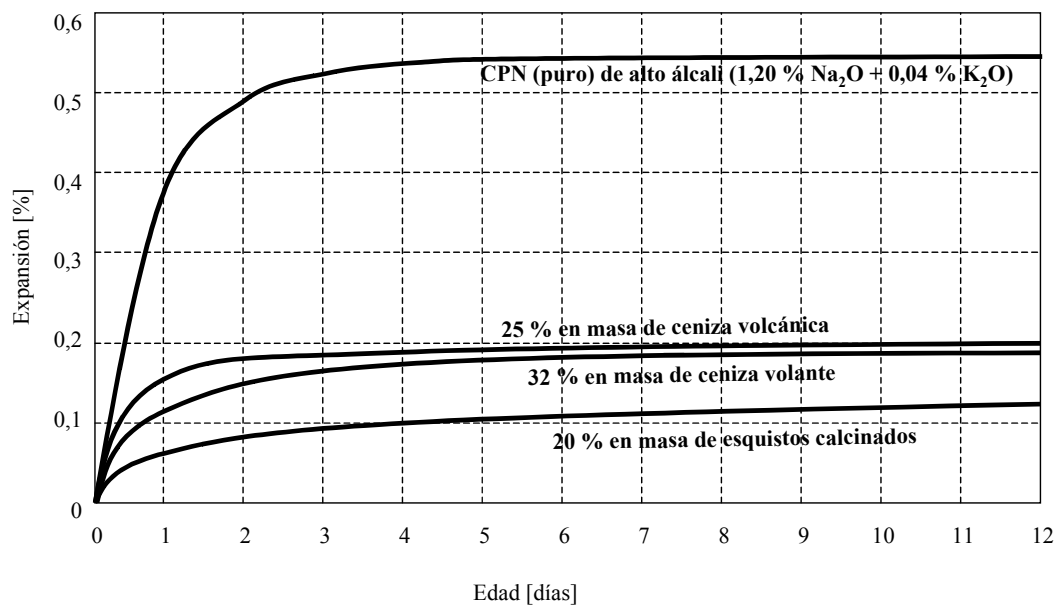


Figura N  7: Efecto de la puzolana natural en la expansión relativa de barras de mortero elaboradas con cemento p rtland de alto álcali y arena de vidrio Pyrex triturado (Elfert 1974).

Fuente: ACI 232.1R-94: Use of Natural Pozzolans in Concrete

c.4) Tendencia a la Fisuración

La tendencia a fisuración de un hormigón depende fundamentalmente de la dosificación utilizada, las dimensiones del elemento estructural y las condiciones de protección y curado. Evidentemente las losas (de edificios, pisos o pavimentos) son los elementos más sensibles a la fisuración por retracción plástica, alabeo térmico y contracción por secado, mientras que los elementos masivos est n expuestos a la fisuración térmica como se explicó anteriormente.

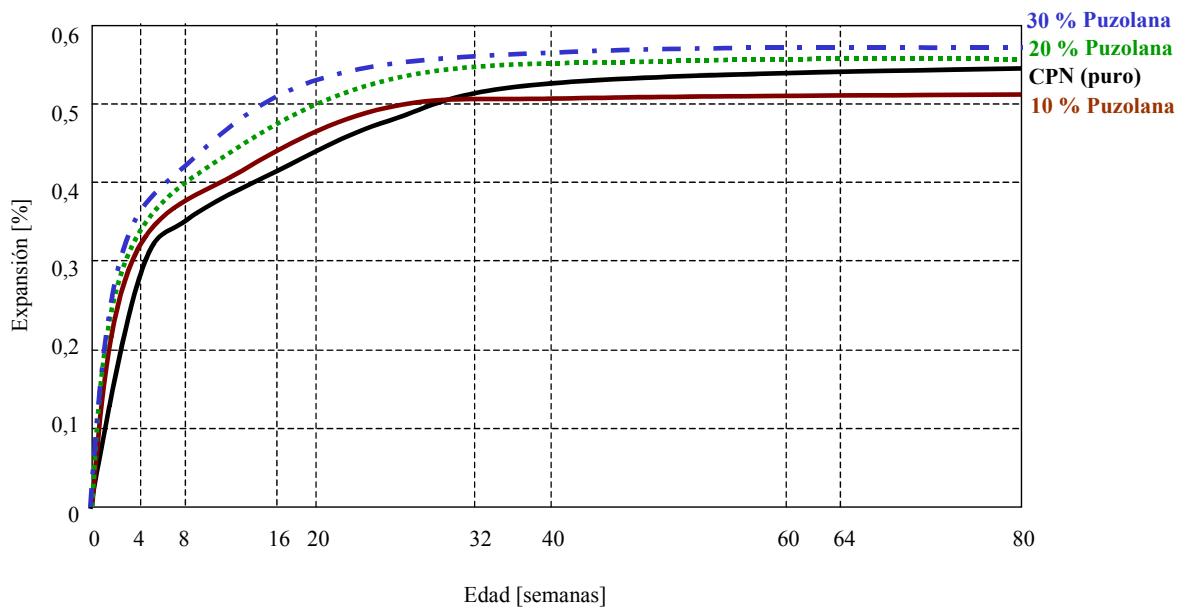


Figura N° 8: Contracción por secado en prismas de hormigón elaborados con cemento pòrtland con distintos contenidos de puzolana natural de Santorin, Italia (Mehta 1981).

Fuente: ACI 232.1R-94: Use of Natural Pozzolans in Concrete

La retracción plástica depende, en gran medida, de la relación entre la velocidad de exudación con la velocidad de evaporación superficial del hormigón [6] es evidente que la velocidad de exudación depende de las características de la mezcla, destacándose el contenido y distribución de finos. El uso de CPP hace que los hormigones tiendan a una baja velocidad de exudación, aumentándose relativamente la tendencia a la fisuración por retracción plástica. No obstante, la ejecución de una adecuada protección y curado (de acuerdo con las reglas del arte) minimizan o eliminan la posibilidad de este tipo de fisuras [se recomienda la lectura del artículo [6]].

La contracción por secado del hormigón depende de los productos de hidratación del cemento pòrtland, el contenido de pasta y, fundamentalmente, del contenido de agua de la mezcla. La figura N° 8 muestra que el uso de CPP no implica una diferencia significativa de comportamiento respecto del CPN, sin embargo, aquellos hormigones que demanden mayor cantidad de agua tienden a sufrir una mayor contracción por lo cual se recomienda, particularmente en el caso del CPP, el uso de aditivos plastificantes para aquellos elementos estructurales susceptibles a este tipo de fisuras.

CONCLUSIONES

El CPP es una excelente alternativa para la elaboración de aquellos hormigones donde resulta fundamental los requerimientos de durabilidad y no es necesaria una alta resistencia temprana. Habitualmente, y para aprovechar todo el “potencial” de este tipo de cemento pòrtland, se recomienda especificar valores de resistencia de diseño a compresión a edades no menores a los 56 días. En el caso de los cementos marca LOMA NEGRA se recomienda especialmente el uso del CPP30 (ARS, BCH, RRAA) para aquellos hormigones sometidos a ambientes altamente agresivos (sulfatos, cloruros, ácidos débiles, agua de mar, etc.) y/o con riesgo de reactividad álcali-agregado y/o masivos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] O. Werner II & P. Tikalsky, 1994. “ACI 232.1R-94: Use of Natural Pozzolans in Concrete” reported by ACI Committee 232
- [2] IRAM 50.000:2000 “Cemento. Cemento para Uso General. Composición, características, evaluación de la conformidad y condiciones de recepción
- [3] E. Becker, 2000. “Cemento Pórtland. Características y Recomendaciones de Uso”. Publicación de LOMA NEGRA C.I.A.S.A.
- [4] C. MacInnis & M. Scali, 1992. “ACI 201.2R-92: Guide to Durable Concrete” reported by ACI Committee 201
- [5] E. Becker, 2001. “Reacción Álcali-Sílice. Introducción al Conocimiento y Recomendaciones”. Publicación de LOMA NEGRA C.I.A.S.A.
- [6] E. Becker, 2001. “Fisuras de Retracción Plástica”. Publicación de LOMA NEGRA C.I.A.S.A.
- [7] R. E. Rodríguez-Camacho, 1998. “Using Natural Pozzolans to Improve the Sulfate Resistance of Cement Mortars”, SP 178-53. Sixth CONMET/ACI/JCI: Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete.
- [8] B. Meng, U. Wiens & P. Schiessl, 1998. “Significance of the Type of Cement on the Reaction Mechanisms of Pozzolans”, SP 178-7. Sixth CONMET/ACI/JCI: Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete.
- [9] M. González, V. Rahhal, E.F. Irassar & H. Donza, 1998. “Resistencia a los Sulfatos de Cementos ARS con Adición de Filler y Puzolana”, Primer Congreso Internacional de Tecnología del Hormigón y 13ª Reunión Técnica, Buenos Aires, Argentina.