



3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008 Chihuahua; Chih. México Del 12 al 14 de Noviembre



USO DE PUZOLANAS NATURALES PARA RETARDAR EL INICIO DE LA CORROSIÓN DEL ACERO DE REFUERZO

J. Pacheco¹, G. Fajardo², P. Valdez²

¹Estudiante de la Facultad de Ingeniería Civil, UANL, Av. Universidad s/n, Cd. Universitaria, CP. 66450, San Nicolás de los Garza, N.L. México.

²Profesor-Investigador de la Facultad de Ingeniería Civil-UANL, Av. Universidad s/n, Cd. Universitaria, CP. 66450, San Nicolás de los Garza, N.L. México.

RESUMEN

Puentes, túneles y edificios son particularmente susceptibles a la corrosión del acero debida a la presencia de cloruros o bien a la carbonatación ocasionada por la alta concentración de CO₂. Una cultura de prevención podría revertir la situación. En este sentido, el empleo de materiales alternativos con propiedades puzolánicas ha sido propuesto con el objetivo de mejorar el efecto barrera del concreto. En este trabajo se evaluó un tipo de puzolana natural (PN) mexicana bajo condiciones aceleradas de exposición a cloruros y CO₂. Se fabricaron probetas de mortero utilizando 0, 10 y 20% de PN en sustitución de cemento portland ordinario (CPO). Medidas de la resistencia a la compresión, E_{corr} , i_{corr} , resistividad, contenido de cloruros y profundidad de carbonatación fueron obtenidas. En exposición a cloruros, el uso de PN se constituye como una opción de prevención de la corrosión provocada por estos iones. No obstante, en condiciones de exposición a carbonatación, parece no ofrecer las mismas ventajas, salvo en las primeras etapas de progresión del fenómeno.

Palabras clave: Carbonatación; Cloruros; Durabilidad; Puzolana Natural; Prevención

ABSTRACT

Bridges, tunnels and buildings are susceptible to corrosion due to chlorides (which may be contained in sea water and/or deicing salts) or carbonation because high concentration of CO₂ in industrial cities. In this sense, the use of supplementary cementitious materials has been proposed in order to improve the durability of concrete against these agents. In this work, a NP was used in reinforced mortar specimens in 0%, 10% and 20% substitution of ordinary portland cement (OPC), in order to evaluate the behavior of the steel protection of the mortar cover against chlorides and carbonation environments. The compressive strength, electrochemical tests (corrosion potential, linear polarization resistance and EIS), chloride content were measured on the specimens exposed to chlorides; for carbonation, only the carbonation depth was determined. The use of NP has led into increasing the activation time of corrosion; decreasing the corrosion rate and the chloride content. Meanwhile, the use of NP has not shown a significant reduction of mortar durability against carbonation environments.

Keywords: Carbonation; Chlorides; Durability, Natural Pozzolan; Prevention



3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008

Chihuahua; Chih. México
Del 12 al 14 de Noviembre



INTRODUCCIÓN

El concreto reforzado es uno de los materiales de construcción más ampliamente utilizado en la ingeniería civil. No obstante, la corrosión del acero de refuerzo es uno de los principales problemas de durabilidad que aquejan actualmente a este tipo de estructuras. La durabilidad es asegurada, más allá del alto pH de la solución intersticial (~ 13)¹⁻⁵, por la protección física que el concreto le confiere al acero contra el ingreso de agentes agresivos que pueden iniciar el mecanismo de corrosión. Esta protección depende principalmente del espesor del recubrimiento de concreto (el cual se intenta especificar por el diseño y la calidad de los constituyentes) y del efectivo cuidado y supervisión llevado al cabo durante el colado y curado de la estructura.

El daño causado por el proceso de corrosión resulta en pérdidas económicas cuantificadas en aproximadamente \$276 billones de dólares por año⁶. Debido a la cada vez creciente necesidad por incrementar la durabilidad de las estructuras de concreto reforzado, el uso de alternativas por mejorar el efecto barrera ha sido propuesto. Una de estas alternativas involucra la utilización de materiales cementantes suplementarios, que adicionalmente mejoran las propiedades mecánicas y reducen el consumo de cemento por metro cúbico de concreto. Por efecto de su morfología, composición química y mineralógica, algunos materiales poseen propiedades puzolánicas⁷ (es decir, son capaces de reaccionar con el hidróxido de calcio en presencia de agua y producir un material cementante^{7,8}). Bajo estas condiciones pueden ser utilizados efectivamente en adición o en sustitución parcial del cemento portland.

La corrosión del acero de refuerzo embebido en concreto ocurre principalmente bajo dos mecanismos (cloruros y carbonatación), invariablemente en presencia de determinadas condiciones de humedad y temperatura. Los cloruros presentes en las zonas costeras y sales de deshielo penetran a través del concreto disolviendo la capa pasiva protectora creando la picadura de la superficie del acero. La carbonatación del concreto ocurre cuando el CO₂ reacciona con el Ca(OH)₂ contenido en el concreto, reduciendo el pH del concreto. Cuando el pH < 9, las condiciones de estabilidad de la capa pasiva se ven comprometidas y el proceso de corrosión es iniciado sobre la superficie del refuerzo.

Pocos han sido los trabajos que han analizado el efecto de las puzolanas naturales para controlar la cinética de corrosión⁹. Se puede citar como relevante el trabajo de Koulombi et al.⁹, quien analizó una PN griega en combinación con un CPO y obtuvo una reducción de 40% en la pérdida de masa en aceros embebidos en mortero. En contraste, otros trabajos¹⁰ han mencionado que la actividad puzolánica no siempre mejora las propiedades del concreto ya que dependen de la composición química y mineralógica de la PN utilizada. En este sentido, el objetivo de este trabajo es analizar el efecto sobre las propiedades protectoras del recubrimiento de una PN mexicana utilizada en probetas de mortero reforzado. Pruebas electroquímicas de potencial de corrosión, resistencia de polarización e impedancia electroquímica fueron realizadas para evaluar la durabilidad.



3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008
Chihuahua; Chih. México
Del 12 al 14 de Noviembre



También, la resistencia a la compresión, el contenido de cloruros y la profundidad de carbonatación fueron determinadas.



3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008

Chihuahua; Chih. México
Del 12 al 14 de Noviembre



DESARROLLO EXPERIMENTAL

Materiales

Un cemento portland ordinario (CPO40R, tipo I de acuerdo con ASTM C 150¹¹) y una PN mexicana (tipo F según ASTM C 618¹²) fueron usados en las formulaciones de mortero en una dosificación de 0, 10 y 20% en sustitución de una parte de CPO. La puzolana fue caracterizada como una andesita con textura piroclástica con matriz criptocrystalina y vidrio de composición ácida, tiene fragmentos de feldespatos e hidróxido de hierro¹³. También, un cemento grado comercial (CPC, CPCP30R según NMX-C-414-ONNCCE¹⁴) fue usado para efectos comparativos. Para este último caso, no se realizó la sustitución de PN. De acuerdo con NMX-C-414-ONNCCE¹⁴, el CPC está constituido de clínker, yeso y varias adiciones minerales. Las composiciones químicas de estos materiales son presentadas en la Tabla 1. Para todos los casos se utilizó una relación a/Cm de 0.65 (Cm: material cementante, p ej. cemento + puzolana), agregado fino calizo con tamaño de partícula <5 mm y una consistencia de 50 mm utilizando un cono truncado teniendo la mitad de las dimensiones (minirrevenimiento para morteros) de aquel descrito en ASTM 143/C143M-05. Se diseñaron cuatro composiciones de mortero las cuales son mostradas en la Tabla 2. Un acero industrial G40 según NMX-C-407-ONNCCE¹⁶ fue usado como acero de refuerzo (A60 de acuerdo con ASTM A370¹⁵).

Tabla 1. Composición química de los cementos y la puzolana.

%	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	Mn ₂ O ₃	PI
CPO	18.88	4.35	1.86	64.46	1.24	3.35	0.31	0.60	0.20	0.11	0.04	2.6
CPC	17.6	4.70	1.77	64.74	1.23	3.26	0.37	0.80	0.19	0.13	0.02	4.6
PN	59.48	17.03	4.70	4.70	1.85	0.00	1.64	1.11	0.67	0.03	0.09	7.7

Tabla 2. Dosificación de las composiciones utilizadas.

Mortero	a/Cm	Cemento, kg/m ³	Arena/Cm	Puzolana, %
CPO	0.65	401	4:1	0
CPC	0.65	401	4:1	0
CPO10P	0.65	372	4:1	10
CPO20P	0.65	321	4:1	20

Fabricación de probetas

Se fabricaron probetas cilíndricas de 50 mm de diámetro y 130 mm de altura con una varilla de acero colocada en el centro de las mismas. La superficie del acero (con diámetro de 9.5 mm y una longitud de 170 mm) fue preparada como se muestra la Figura 1a. En la

Figura 1b se muestra un esquema de la configuración de las probetas. Las mezclas fueron realizadas según la norma ASTM C 192/C92. Las probetas fueron coladas y mantenidas a 20°C durante 24h sin intercambio de humedad. Después, fueron desmoldadas y curadas a $20 \pm 1^\circ\text{C}$ y 100 de HR durante 28 y 56 días.

Para las pruebas de resistencia a la compresión, cilindros de mortero de 100 mm de diámetro y 200mm de altura fueron colados siguiendo la misma normativa. Estas probetas fueron ensayadas de acuerdo con ASTM C39/C39M-05 después de 28 y 56 días de curado.

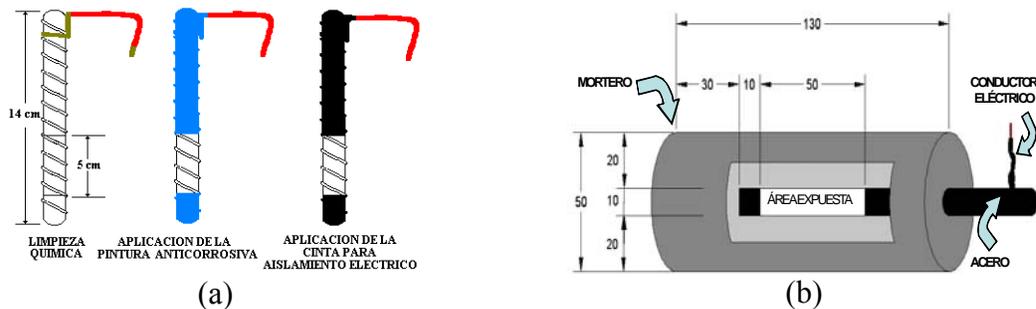


Figura 1. Preparación del acero, a) fijación del conductor eléctrico, delimitación del área de estudio, aplicación de pintura anticorrosiva y aislamiento eléctrico. b) Representación esquemática de la probeta de mortero. Acotaciones en mm.

Medios de exposición

En condiciones normales la cinética de corrosión suele ser lenta y con un tiempo de desarrollo medido en años. Para acelerar dicho proceso, una serie de probetas fue sometida a ciclos de 3 días de inmersión parcial en una solución de NaCl a 35 g/L y 4 días de secado a 40°C. Bajo estas condiciones, la corrosión será inducida solamente por los cloruros, debido a que el contenido de agua en la matriz de mortero impide su carbonatación¹⁹. Otra serie de probetas fue expuesta a carbonatación acelerada mediante la utilización de una cámara ambiental con control automático de temperatura, concentración de CO₂ y HR. De acuerdo con condiciones favorables para la carbonatación²⁰, los parámetros preestablecidos fueron 30°C, 65% de HR y 5% de CO₂, siendo esta última 150 veces mayor que la concentración de este agente en la atmósfera.

Ensayos físicos, químicos y electroquímicos

Exposición a cloruros. Medidas del potencial de corrosión (E_{corr}), la de R_p y de la resistividad (ρ), fueron llevadas al cabo con un sistema VoltaLab PGZ-301. Para la obtención de ésta última, la respuesta de las probetas fue observada en el rango de 1 Hz a 100 kHz con una polarización de 10 mV pico a pico a partir de E_{corr} , utilizando la ecuación 1.



3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008

Chihuahua; Chih. México
Del 12 al 14 de Noviembre



$$\rho = \frac{2\pi LR_e}{\ln\left(\frac{r_s}{r_m}\right)} \quad (1)$$

Siendo, L la longitud de exposición, R_e la intersección a altas frecuencias en el diagrama de Nyquist, r_s el radio del acero y r_m el radio de la probeta. Los diagramas fueron tratados usando Zview 2.0. Por otro lado, la R_p fue obtenida utilizando una velocidad de barrido de 12 mV/min, disminuyendo a 6 mV/min para un estado pasivo del acero. La polarización aplicada fue de ± 20 mV a partir de E_{corr} . Los resultados fueron transformados a i_{corr} con la relación $i_{corr} = B / R_p^{21}$. Se tomaron en cuenta diferentes valores de B^{22} : acero pasivo (si $E_{corr} > -250$ mV vs SCE, $B = 52$ mV) o activo (si $E_{corr} < -250$ mV vs SCE, $B = 26$ mV). Para minimizar la contribución de la caída óhmica del mortero, las pruebas fueron conducidas al final del periodo de inmersión. Se utilizó una configuración a tres electrodos, empleando un electrodo de referencia de calomel saturado (SCE, por sus siglas en inglés) y un electrodo auxiliar de acero inoxidable 304. Para todas las pruebas se utilizaron 4 probetas por composición.

El contenido de cloruros (solubles en ácido= cloruros totales) fue determinado en muestras de mortero tomadas después realizar el ensayo de tensión por compresión diametral sobre probetas cuyo comportamiento electroquímico evidenciaba cambios significativos. Las muestras fueron obtenidas en zonas cercanas a la interface acero – mortero.

Exposición en ambiente rico en CO₂. Las probetas fueron ensayadas periódicamente para medir la el avance de la carbonatación, reportado como un promedio del radio carbonatado.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Resistencia a la compresión

Los resultados de resistencia a la compresión son mostrados en la Tabla 3. Se puede constatar que los morteros conteniendo PN presentan una ligera reducción (10% en promedio) comparados con morteros de CPO y CPC. Este efecto podría ser atribuido a la cinética de reacción más lenta que presentan algunos materiales puzolánicos. Para este tipo de material²⁴, temperaturas favorables y un curado prolongado podrían ser necesarios, con el objetivo de mejorar la resistencia a la compresión de los morteros.

Tabla 3. Resultados de resistencia a la compresión, MPa, por composición.

Composición	28 días	56 días
-------------	---------	---------

CPC	36.0	36.5
CPO	41.6	41.0
CPO10P	34.5	37.0
CPO20P	39.0	38.0

Exposición a cloruros

La evolución de E_{corr} e i_{corr} de los diferentes morteros es mostrada en la Fig. 2. Según Andrade²², el acero permanece en un estado pasivo si $E_{corr} > -250$ mV vs. SCE, y en un estado activo si $E_{corr} < -250$ mV vs. SCE. En el mismo sentido, la activación del refuerzo ocurre cuando el i_{corr} es más alto que $0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ y cuando alcanza valores superiores a $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, el refuerzo es localizado en un estado de alta velocidad de corrosión.

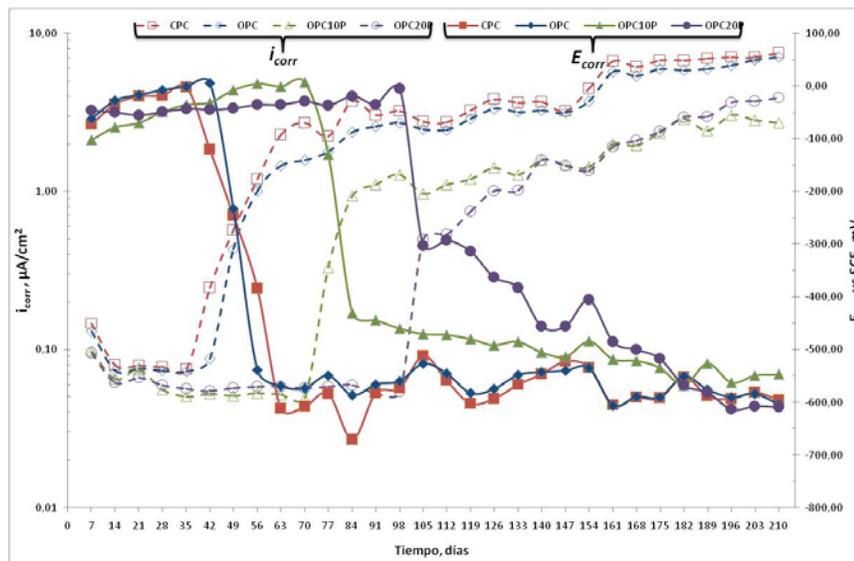


Fig. 2. Evolución de E_{corr} e i_{corr} por formulación de mortero.

Las condiciones de exposición evidenciaron, a través de los valores de E_{corr} e i_{corr} , cuatro etapas. La primera etapa, observada durante los primeros 30 días, es caracterizada por valores representativos de un estado pasivo del acero para las cuatro composiciones. La segunda etapa fue caracterizada por una zona de transición entre el estado pasivo al activo, teniendo diferentes intervalos. En esta etapa, los valores de i_{corr} para los morteros conteniendo PN son más bajos que aquellos obtenidos con CPO y CPC. El uso de 10% de PN incrementó el tiempo necesario para que el refuerzo entre en la zona de corrosión activa. La tercera etapa está relacionada con la permanencia de las cuatro composiciones en el estado activo, evidenciada por valores de i_{corr} superiores a $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. Dentro de la cuarta etapa (posterior a los 160 días), mientras todas las composiciones están en un estado avanzado de corrosión, los morteros con PN presentan valores de i_{corr} inferiores

(aproximadamente 50% menos) que aquellos sin PN. Es decir, las propiedades relacionadas con la resistencia al ataque de cloruros son mejoradas con el uso de la PN. Estos resultados son similares a aquellos obtenidos in otros trabajos²⁵⁻²⁷ en los cuales se utilizó ceniza volante. La correlación entre los valores de E_{corr} e i_{corr} permiten descartar los problemas de polarización por concentración (como reportado en otros trabajos²⁸⁻³⁰) provocada por la reducción en la difusión de oxígeno en matrices cementantes saturadas²⁹.

En la Fig. 3 se muestra el comportamiento de la ρ para cada tipo de probeta. La línea punteada indica el umbral donde la ρ puede ser el factor que controla la corrosión del acero³¹. Desde el inicio los valores registrados permanecen prácticamente constantes durante los primeros 140 días, se observan ligeras variaciones que podrían ser atribuidas a los cambios en la temperatura y humedad, factores que influyen de una manera importante la resistividad de los materiales cementantes. En este periodo, se observa que la ρ de las probetas CPO20P es hasta 2 veces superior que aquellas CPO10P y hasta 5 veces mayor que las CPO y CPC. Mientras que para CPO y CPC ($\rho < 10 \text{ k}\Omega\text{cm}$) ésta no controla la cinética de corrosión, para CPO20P (valores cercanos a $20 \text{ k}\Omega\text{cm}$ durante 154 días) se constituye en el parámetro importante para controlar la corrosión. Este comportamiento corrobora el menor tiempo de activación de las probetas fabricadas sin PN y la mayor velocidad de corrosión obtenida, comparados ambos con CPO20P. Considerando que la ρ de los materiales cementantes es un parámetro que está influenciado directamente por la porosidad y por la concentración iónica en la solución de poro, se puede inferir que la porosidad de las probetas $\text{CPO20P} < \text{CPO10P} < \text{CPO} = \text{CPC}$.

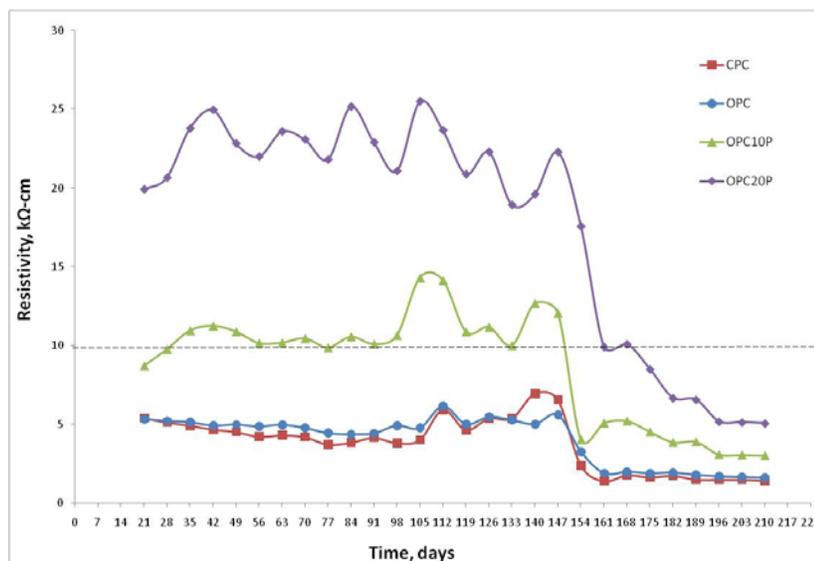


Fig. 3. Resultados de ρ por composición.



3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008

Chihuahua; Chih. México
Del 12 al 14 de Noviembre



Después de 160 días de exposición se observa una caída de los valores de ρ para CPO20P y en menor medida para CPO10P. Este suceso, puede atribuirse a probables agrietamientos no observados a simple vista, pero que posteriormente, hacia el final del periodo de prueba, fueron detectados en estas probetas. En contraste, la disminución de la ρ fue menor para CPO y CPC, en las cuales no se encontraron agrietamientos. En este caso, la presión generada por los productos de corrosión se vio aliviada al encontrar una ruta en la matriz cementante (más abierta en este caso) por donde pudieron salir al exterior. Efecto evidenciado por las manchas encontradas en la superficie de dichas probetas. Lo anterior, podría sugerir que si bien la PN incrementa la resistividad de manera importante debido a la reducción de la porosidad, las presiones generadas por los productos de oxidación podrían conducir a un agrietamiento prematuro comparado con las composiciones sin PN. Experimentos adecuados podrían ser realizados para probar dicha hipótesis, que estuvieron fuera del alcance de este trabajo.

El contenido de cloruros totales obtenido en la interface acero-mortero a 80, 126 y 210 días de exposición se muestra en la Fig. 4. Se considera un valor de 0.4% por peso de material cementante, como el límite máximo de cloruros totales permisible para las estructuras de concreto reforzado expuestas en zonas agresivas o costeras^{32,33}. Después de 77 días de exposición, todas las composiciones presentaron una concentración mayor de cloruros que la permitida en ACI 318S-05³⁴. En este tiempo, aún, cuando las composiciones cuentan con el nivel mínimo de cloruros necesario para el inicio de la corrosión, éste no determina por sí solo la certeza de riesgos de corrosión o en su defecto la severidad del ataque³⁵. El uso de PN produce un aporte adicional de aluminatos³⁶ que podrían reaccionar con los cloruros, disminuyendo el coeficiente de difusión a través de estas matrices cementantes. A los 126 y a los 210 días, el contenido de cloruros en las probetas CPO10P y CPO20P fue inferior al contenido de las probetas sin PN. Este comportamiento está relacionado con el tiempo de activación de las probetas de CPO10P y CPO20P evidenciado por E_{corr} e i_{corr} . Papadakis et al.³⁷ encontró que para un ataque por cloruros, los morteros con cementante suplementario registraron contenido de cloruros más bajos además de incrementar el tiempo de inducción para la despasivación.

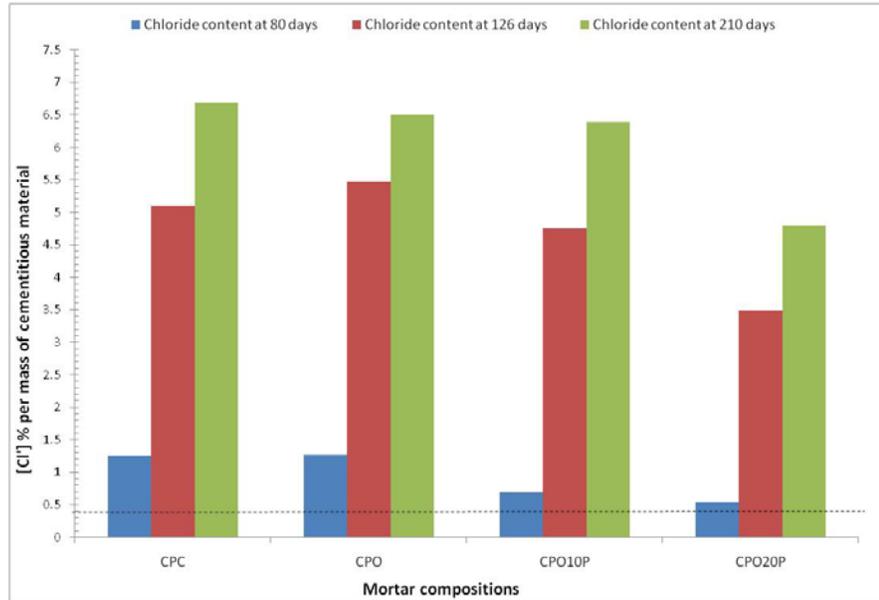


Fig. 4. Contenido de cloruros totales por composición.

Exposición a CO₂

Los resultados obtenidos del avance de la carbonatación son mostrados en la Fig. 5. De manera general, el avance de carbonatación fue menor para CPO y CPO20P con respecto a las demás composiciones. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Papadakis et al.³⁷ quienes encontraron, que la sustitución de cemento por materiales cementantes suplementarios (humo de sílice y ceniza volante de bajo y alto contenido de cal) en probetas expuestas a condiciones aceleradas de carbonatación, produjo un incremento en el espesor carbonatado. Este comportamiento fue atribuido a que los compuestos potencialmente carbonatables disminuyen por la reducción del CaO total.

El comportamiento de las probetas que contienen PN podría atribuirse a dos efectos principalmente. Por una parte, la reacción puzolánica que tiene lugar entre las partículas de PN y el Ca(OH)₂ redujo el contenido de materia carbonatable lo que favoreció el avance de la carbonatación en las primeras etapas de la exposición. Por otro lado, mientras que para CPO10P el espesor carbonatado fue mayor, con respecto a la composición de referencia (CPO), para CPO20P fue prácticamente similar. En este sentido, la reducción de la porosidad fue más pronunciada en las probetas fabricadas con CPO20P (corroborado por los resultados iniciales de la resistividad). Debido a esto, conforme el tiempo de exposición aumenta, tanto el CO₂ como la humedad necesaria penetran con mayor dificultad retardando así el avance de la carbonatación en estas probetas. Este comportamiento confirma que la reducción de la porosidad en CPO20P influye directamente en el comportamiento del mortero frente a la carbonatación. Así, podemos

aseverar que la sustitución de cemento por 20% de PN prácticamente permanece con la misma resistencia a la carbonatación en comparación con CPO.

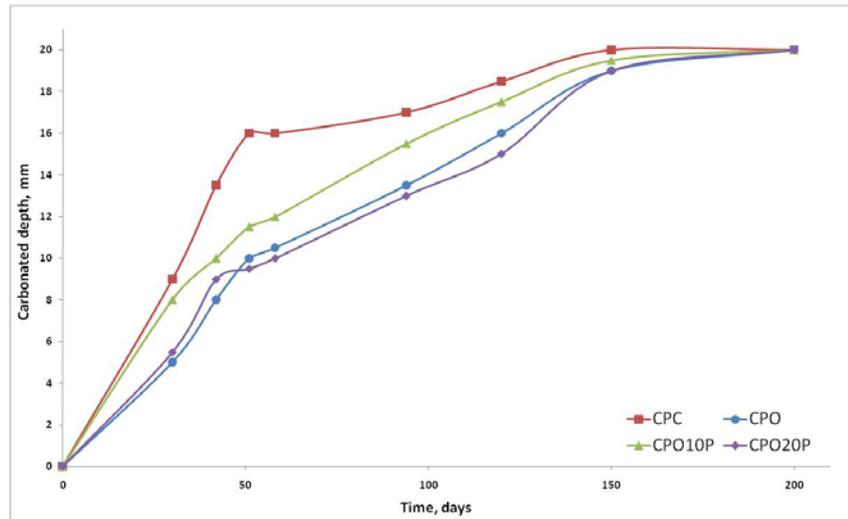


Fig. 5. Promedio de la profundidad de carbonatación.

CONCLUSIONES

La utilización de PN en probetas de mortero expuestas a cloruros ha conducido a:

- una disminución de la porosidad, que condujo a una elevada resistividad inicial,
- un incremento en el tiempo de iniciación de la corrosión,
- una reducción de la velocidad de corrosión y del contenido de cloruros en el mortero.
- Un incremento en el umbral de cloruros necesario para el inicio del proceso de corrosión.

Por otro lado, la utilización de PN en probetas de mortero expuestas a carbonatación acelerada resultó en:

- Un incremento en la cinética inicial de avance de la carbonatación debida a la pérdida de alcalinidad. No obstante, para un 20% de PN, este comportamiento es compensado con la reducción de la porosidad del mortero.
- La durabilidad frente a la carbonatación entre CPO y OPC20P es similar, sin embargo la reducción en el consumo de cemento podría justificar su utilización.

Bajo las condiciones experimentales de este trabajo, el uso de PN podría ser una alternativa de prevención de la corrosión de acero de refuerzo. Sin embargo, para generalizar las conclusiones obtenidas es necesario incrementar el número de formulaciones de mortero, modificar la relación A/Cm, utilizar aditivos, etc.



3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008

Chihuahua; Chih. México
Del 12 al 14 de Noviembre



Adicionalmente, ha sido probado que el uso de materiales cementantes suplementarios, como las puzolanas naturales, reduce el consumo de cemento por lo que se constituye como un material que aporta una solución sustentable.

AGRADECIMIENTOS

Los trabajos descritos en este artículo fueron desarrollados en el Instituto de Ingeniería Civil de la FIC-UANL. Los autores expresan su más profundo agradecimiento al PROVERICYT, PAICYT y SEP por los apoyos financieros otorgados a los proyectos CA-1294-06, 1499-07, PROMEP/103.5/05/1697 y /103.5/07/0293.

REFERENCES

1. H. A. Berman, Sodium chloride, "Corrosion of reinforcement steel and the pH of calcium hydroxide solution", ACI Journal, title 72, 16, p. 159, 1975.
2. O. E. Gjory and Ø. Vannesland, "Sea salts and alkalinity of concrete", ACI Journal, title 73, 42, p. 512, 1976.
3. P. Penguin, M. Rubaud, P. Longuet and A. Zelwer, « L'étude de la corrosion des aciers et métaux dans le béton », Cahiers du CSTB, 130, cahier 1109, Juin 1972.
4. P. Longuet, L. Burglen and A. Zelwer, « La phase liquide du ciment hydraté », Revue des Matériaux de construction, 1, 35, Janvier 1973.
5. C. Hanin, "Corrosion resistant design guidelines for Portland cement concrete", Materials Performance, 42, April 1984.
6. Corrosion Costs and Preventive Strategies in the United States, Supplement to Materials Performance, July 2002.
7. A. Fraay, J. M. Bijen and Y. M. de Haan, "The Reaction of Fly Ash in Concrete a Critical Examination", Cement and Concrete Research, Volume 19, (1989), pp. 235-246
8. Use of fly ash in concrete, ACI Committee 226 Report, ACI Materials Journal, September/October, (1987), pp. 81
9. Kouloumbi N., Batis G., Pantazopolou P., "Efficiency of Natural Greek Pozzolan in Chloride-Induced Corrosion of Steel Reinforcement", Cement, Concrete and Aggregates, 1995.
10. Rengaswamy N.S., Srinivasan S. and Mohan P.S., "Durability of Portland-Pozzolana concrete compared with ordinary Portland cement concrete", Ferrocement Corrosion, Proceedings of the International Correspondence Symposium, Bangkok, Thailand 1987.
11. ASTM C150-07: Standard Specification for Portland Cement, Book of Standards Volume: 04.01, 2007.
12. ASTM C618-03 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, Book of Standards Volume: 04.02, 2003.



3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008

Chihuahua; Chih. México
Del 12 al 14 de Noviembre



13. Valdez P., PhD Thesis, “Desarrollo de un método para evaluar materiales naturales con potencial puzolánico para su uso en cemento”, Universidad Autónoma de Nuevo León, 2002.
14. NMX-C-414-ONNCE-2004: Industria de la construcción – cementos hidráulicos - especificaciones y métodos de prueba, Normas Mexicanas, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. p. 1-2.
15. ASTM A370-07b Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products, Book of Standards Volume: 01.01, 2007.
16. NMX-C-407-ONNCE-2001: Industria de la construcción – varilla corrugada de acero proveniente de lingote y palanquilla para refuerzo de concreto - especificaciones y métodos de prueba, Normas Mexicanas, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. p. 1-3.
17. ASTM C192/C192M-07 Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory, Book of Standards Volume: 04.02, 2007.
18. ASTM C39/C39M-05e1 Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, Book of Standards Volume: 04.02, 2005
19. Tutti K, editor. “Corrosion of steel in Concrete”, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Sweden, Stockholm, 1982.
20. Baron Jacques, Ollivier Jean-Pierre, La durabilité des bétons, L’École Nationale des Ponts et Chaussées, 2 édition 1992. pp 185.
21. Stern M. and Geary A. L., A theoretical analysis of the shape of polarization curves. J. Electrochem. Soc 1957. 104, p. 56.
22. Andrade C., Alonso C., “Corrosion rate monitoring in the laboratory and on-site”, Construction and Building Materials, Vol. 10, No. 5, pp 315-328, 1996.
23. Broomfield J.P, “Corrosion of steel in concrete”, E & FN Spon, 1997, pp. 21.
24. Portland Cement Association, Diseño y Control de Mezclas de Concreto, Portland Cement Association, 1a edición, Capítulo 3, Pagina 77-91
25. Choi Y., Kim J., Lee K., “Corrosion behavior of steel bar embedded in fly ash concrete”, Corrosion Science 48, pp. 1733-1745.
26. Montemor M.F., Simões A.M.P., Salta M.M., “Effect of fly ash on concrete reinforcement corrosion studied by EIS”, Cement & Concrete Composites 22, pp. 175-185.
27. Pfeifer D. W. et al., “A critique of the ACI 318 Chloride Limits”, PCI Journal, March-April (1992), pp. 68-71.
28. Arup, In: Crane A.P., editor, “Corrosion of reinforcement in concrete construction”, U.K. London, p. 151, 1983.
29. Elsener B. and Böhni H., Potential mapping and corrosion of steel in concrete, Corrosion rates of steel in concrete, ASTM STP 1065, N.S. Berke, V. Charker and D. Whiting, Eds. ASTM, Philadelphia 1990, p. 143-156.
30. Thomas M., Chloride thresholds in marine concrete, Cement and Concrete Research, 1996, Vol. 26, No. 4, p. 513-518.
31. Polder R., Andrade C., Elsener B., Vennesland Ø., Gulikers J., Widert R., Raupach M., Test methods for on-site measurement of resistivity in concrete, RILEM TC 154-



3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008

Chihuahua; Chih. México
Del 12 al 14 de Noviembre



- EMC: Electrochemical techniques for measuring metallic corrosion, Vol. 33, December 2000, pp. 603-611.
32. Andrade C., Sanjuán M. A., “Chloride diffusion coefficient obtained from migration tests of high performance concrete”, in: Proceedings of Rebar International Workshop on Durability of High Performance Concrete, Viena 1994, ed.: H. Sommer, published by RILEM, pp. 208-218.
 33. Trocónis O., Romero A., Andrade C., Helene P., Díaz I., “Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado”, Red DURAR 1998 CYTED pp. 111.
 34. ACI 318S-05: Spanish Edition Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary / Requisitos De Reglamento Para Concreto Estructural y Comentario, Committee 318, 2005, p. 59.
 35. K. Ampadu, K Torii, Chloride ingress and steel corrosion in cement mortars incorporating low-quality fly ashes, Cement and Concrete Research, 2002.
 36. Arya C., Buenfeld N.R. and Newman J.B., Factors influencing chloride binding in concrete, Cement and Concrete Research, Vol. 20, (2), 1990, pp. 291-300.
 37. Papadakis V.G., “Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress”, Cement and Concrete Research Vol. 30, pp. 291-299.