



Caracterización de morteros de cemento portland substituido por metacaolín de baja pureza

J. Iván Escalante¹, A. Navarro¹, L. Y. Gómez²

¹Cinvestav IPN Unidad Saltillo, Apartado Postal 663, Saltillo, Coahuila México CP 25000.

²Univ Autónoma de Nuevo León, Fac Ing. Mecánica y Eléctrica, Programa Doctoral de Ingeniería en Materiales, Pedro de Alba, s/n, Ciudad Universitaria.

RESUMEN

Se prepararon morteros con relación arena: ligante de 2.75:1 con arena de sílice, la relación agua/ligante se fijó en 0.45. Se utilizaron dos minerales de caolín (rojo y blanco) con altos contenidos de cuarzo, los cuales se molieron en molino de bolas a una finura menor que la del cemento portland. Estos se calcinaron a temperaturas entre 550 y 1050°C para evaluar el efecto de ésta en el desarrollo de resistencia a la compresión en morteros de cemento portland con 20% de metacaolín (Mc). De tales pruebas se continuó investigando con el MC blanco (~50% de pureza), calcinado a 750°C para caracterizar el efecto del nivel de substitución de MC por cemento portland (CP) en niveles de 0, 10, 20, 30, 40 y 50%; se dio seguimiento a la resistencia a la compresión a 1, 3, 7, 14, 28 y 90 días. El uso de 10-30% de MC fue favorable. Los morteros base CP puro registraron 8 y 38 MPa a 1 y 90 días, respectivamente; mientras que aquellos con reemplazo de 10-30% del CP mostraron mejores resistencias de alrededor de 10 y 52 MPa a 1 y 90 días de curado. Por otro lado, la substitución de CP por 40 y 50% de metacaolín resultó en bajas resistencias tempranas, con 1-3 MPa a 1 día de curado; sin embargo, la resistencia creció rápidamente y después de 90 días, los morteros alcanzaron 49 y 40MPa para 40 y 50% MC, respectivamente. EL MC mostró fuerte actividad puzolánica a pesar de su baja pureza, se observó el consumo de hidróxido de calcio por análisis térmico y microscopía electrónica de barrido. Esta última técnica mostró que después de 90 días las microestructuras de todos los morteros fueron densas acorde a las propiedades mecánicas registradas.

Palabras clave: cementos substituidos; metacaolín; propiedades mecánicas; microestructuras; puzolanas.

ABSTRACT

A series of mortars were prepared with an aggregate:binder ratio of 2.75:1 using silica sand and a water/binder ratio of 0.45. Two kaolin minerals (Mk, red and white) with high quartz contents were ball milled to a fineness lower than that of ordinary portland cement (OPC). Both minerals were calcined at 550 to 1050°C to evaluate the effect of temperature on the strength development of mortars with a substitution of 20% of the OPC. After a first set of tests, only the white Mk, with a purity of 50%, fired at 750°C was used to continue investigating the effect of the level of substitution of OPC at 0, 10, 20, 30, 40 y 50%. The the compressive strength was monitored for up to 90 days. The use of 10-30% of Mk was the most favorable. Mortars of 100% OPC reached 8 and 38 MPa after 1 and 90 days, respectively, while those with substitution of 10-30% of the OPC showed enhanced strength of 10 and 52 MPa at the same ages. On the other hand, the substitution of 40 and 50% of the OPC resulted in low 1 day strengths of 1-3 MPa; nonetheless, the strength increased rapidly and after 90 days reached 49 and 40MPa for 40 y 50% MC, respectively. The white Mk showed a strong pozzolanic activity in spite of its low purity, as noted by the consumption of the calcium hydroxide measured by thermal analysis and scanning electronic microscopy. The latter technique showed that after 90 days, the microstructures of all mortars were dense in agreement with the strength registered

Key words: substituted cements, metakaolin, mechanical properties, microstructures, pozzolanas

Autor de contacto: José Iván Escalante García (ivan.escalante@cinvestav.edu.mx)

Información del artículo

DOI:

<http://dx.doi.org/10.21041/ra.v1i2.12>

Artículo recibido el 21 de Octubre de 2010, revisado bajo las políticas de publicación de la Revista ALCONPAT y aceptado el 15 de Enero de 2011. Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores se publicará en el primer número del año 2012 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del tercer número del año 2011

© 2011 Alconpat Internacional

Información Legal

Revista ALCONPAT, Año 1, No. 2, Mayo - Agosto 2011, es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A.C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat_int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org
Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges.
Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida Yucatán, C.P. 97310, fecha de publicación: 30 de mayo de 2011.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor. Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

1. INTRODUCCIÓN

El concreto es el material más ampliamente usado en el mundo, anualmente se fabrican alrededor de 20,000 millones de toneladas utilizando cerca de 2,500 millones de toneladas de cemento portland (CP). El impacto ambiental resultante del uso de cemento es considerable ya que por 1 kg de CP se emite aproximadamente 1 kg de CO₂ a la atmósfera, por descarbonatación de la materia prima (CaCO₃) y por el uso de energía en las diversas etapas del procesamiento. Así, de las más de 25,000 millones de toneladas anuales de CO₂ antropogénico [EIA, 2009] cerca del 10% corresponde a la industria del CP, lo cual debe conducir a tomar medidas para reducir tal porcentaje o evitar que se incremente con el crecimiento demográfico y económico en el mundo. El uso de fuentes de energía alternativa para producir cemento enfrenta muchas dificultades (Gartner, 2004) y no existe una fuente alternativa al CaCO₃ en la naturaleza. Considerando la urgencia de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, es evidente la necesidad de desarrollar materiales cementosos alternativos, que reduzcan el impacto medio ambiental de las actividades de construcción con cemento portland. Entre las diversas rutas posibles, está el desarrollo de cementos compósitos (Malhotra y Metha, 1996), con la substitución parcial del cemento por aditivos minerales como escorias metalúrgicas, ceniza volante, metacaolín, etc. Este tipo de cementos son considerados ya por las normas o estándares en diversos países (Norma NMX-C-114, 2003); sin embargo, hay muchos aspectos que requieren investigación para incrementar las posibilidades de utilización de dichos cementos.

Los minerales silicoaluminosos son los más abundantes en la naturaleza, existen diversos tipos de arcillas que pueden tener actividad puzolánica (He et al., 1995) y pueden reemplazar al CP; entre éstas están las arcillas caoliníticas que son las más utilizadas en estas aplicaciones. El caolín está constituido en esencia por silicatos aluminicos hidratados (Galan Huertos, 1974), las especies mineralógicas comúnmente presentes son principalmente caolinita (2SiO₂•Al₂O₃•2H₂O), alunita (KA₁₃(SO₄)₂(OH)₆), feldespato potásico (KAlSi₃O₈) y cuarzo (SiO₂) (Kakali et al., 2001). La estructura de la caolinita es 1:1, conformada de una lámina de tetraedros de sílice y una de octaedros de alumina.

El metacaolín (Mc) se obtiene de la calcinación del caolín a $\approx 750^\circ$ (Shvarzmana et al., 2003), el tiempo y temperatura de exposición son factores determinantes en la transformación (Salvador, 1995). Durante la calcinación, la caolinita pierde la lámina de OH, y transforma a metacaolinita, la red de Si-O permanece intacta y la red de Al-O se colapsa; el Mc resultante tiene una estructura altamente desordenada y su alto contenido de energía interna lo hace potencialmente reactivo como aditivo para el CP. El Mc es considerado una puzolana, reacciona con Ca(OH)₂ (CH, portlandita) para formar compuestos que poseen propiedades ligantes (Frias y Cabrera, 2001; Massaza, 2004). En combinación con CP, el CH generado por la hidratación del CP, reacciona con la puzolana formando más C-S-H (silicatos de calcio hidratados) y otros productos como aluminatos de calcio hidratados (C₄AH₁₃, C₃AH₆) y C₂ASH₈ (stratlingita) (Jones, 2001).

La utilización de arcillas calcinadas como materiales puzolánicos en morteros y concretos ha tenido una atención considerable en los últimos años (Jones, 2001). Estudios comparativos entre Mc y la microsílíce (Zhang y Malhotra, 1995; Curcio et al., 1998), han reportado el Mc es ventajoso como el uso de la microsílíce, que es una de las puzolanas más reactivas. En general se ha reportado que la adición de Mc mejora las propiedades de morteros y concretos de CP puro, tales como la resistencia mecánica, impermeabilidad, durabilidad química, etc (Jones, 2001; Zand y Malhotra, 1995; Sabir et al., 2001; Wild et al., 1996, Wild y Khatib, 1997). Esto se atribuye al efecto de reductor de porosidad (efecto rellenedor ó “filler effect”), a que acelera las reacciones de hidratación del CP y a la reacción puzolánica. Se ha reportado que el uso de Mc favorece el control

de reacción expansiva sílice-álcali (Ramlochan et al., 2000), una importante patología de concreto a nivel mundial.

Sin embargo, el Mc usado en los reportes de la literatura es generalmente de alta pureza (aunque hay reportes de minerales de baja pureza (Badogianinis et al., 2004)), de tamaño de partícula muy fino y alta área superficial de más de 10,000 m²/kg. Por otro lado, las cantidades de Mc empleadas oscilan generalmente entre 10-20% (Jones, 2001; Wild et al., 1996; Badogianinis, 2004), en sustitución de cemento pórtland, para obtener mejoras en las propiedades mecánicas. La evaluación de la reactividad puzolánica puede hacerse mediante métodos de análisis térmico dando seguimiento al consumo de CH, alternativamente existen métodos de conductividad eléctrica. En un reporte del estudio de combinado de métodos eléctricos con métodos térmicos (Gomez-Zamorano et al., 2004), los métodos eléctricos indicaban una fuerte actividad puzolánica en tiempos cortos, mientras los métodos térmicos determinaban la intensidad de la actividad puzolánica en reacciones con el medio del CP hidratado. Por tanto, ambos métodos tienen sus ventajas.

En el presente estudio se analizó el uso de minerales de caolín de tamaño de partícula grueso y de baja pureza, reemplazando el CP de hasta en 50%. Se caracterizaron el desarrollo de resistencia a la compresión, reactividad puzolánica y características microestructurales.

2. TRABAJO EXPERIMENTAL

2.1 Materiales

Se obtuvieron 2 minerales de caolín del estado de Zacatecas en México, se etiquetaron como caolín rojo (CR) y caolín blanco (CB). Se recibieron en partículas de 3-24 cm, por lo que requirieron procesamiento de trituración y molienda en molino de bolas. La Figura 1 presenta la distribución de tamaño de partícula de los caolines molidos, ambos minerales tienen partículas más grandes que el CP ordinario, y mayores que las de metacaolines reportados en la literatura cuyos promedios son de alrededor de 5-10µm. La Figura 2 presenta los patrones de difracción de rayos X de los caolines, puede notarse que ambos minerales tienen altos contenidos de cuarzo y que el caolín blanco tiene mayor contenido de caolinita; entre las fases menores están el cuarzo y hematita. Se utilizó un cemento portland compuesto del tipo CPC 30. La Tabla 1 presenta la composición química en términos de óxidos de los caolines y el CP, puede notarse el alto contenido de SiO₂ en los caolines, denotando una baja pureza

Tabla 1. Composición de las materias primas usadas, obtenidas por fluorescencia de rayos X. La composición del cemento suministrada por Cementos Apasco planta Ramos Arizpe.

	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	SO ₃
Caolín blanco	0,02	33,69	63,47	0,23	0,14	1,06	0,19	0,75
Caolín rojo	0,93	26,38	66,64	2,24	0,61	0,34	2,86	0,00
Cemento portland	1.97	4.52	18.86	0.75	62.18		2.73	2.58

*ppi = pérdidas por ignición

Se utilizó una arena de sílice (98% SiO₂) denominada arena 20-30 (ASTM 778, 1995), la denominación describe que la graduación de esta arena pasa la malla de 8µ5m0 (Nº 20) y se retiene en la malla de 600 µm (Nº 30). Se usó un agente superplastificante marca Rheobuild 1000 en todos los morteros para mejorar la fluidez y trabajabilidad de las mezclas sin comprometer el desarrollo de propiedades mecánicas.

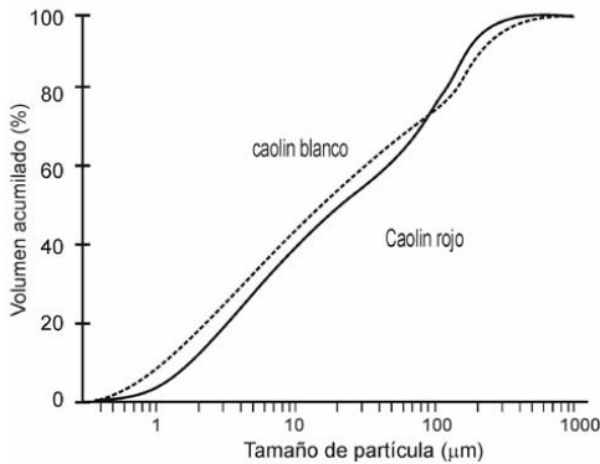


Figura 1. Distribución de tamaño de partícula de los minerales de caolín blanco y rojo

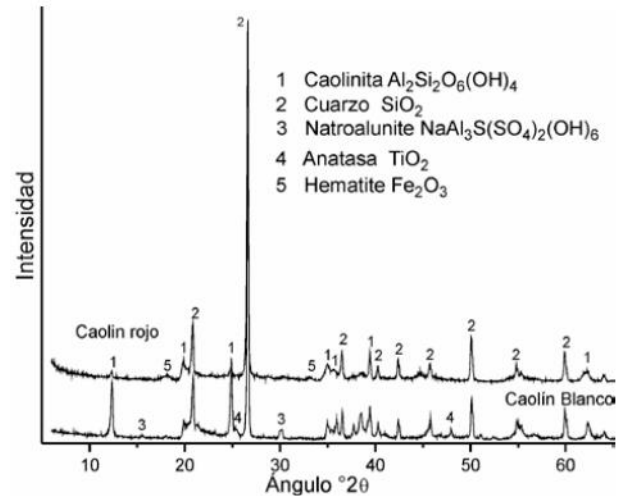


Figura 2. Patrones de difracción de los minerales de caolín blanco y rojo

2.2 Preparación de muestras y caracterización

Se prepararon morteros con una relación arena:ligante de 2.75:1. El ligante consistió de compósitos Mc-CP, con contenidos de Mc desde 0% hasta 50%. La relación agua/ligante fue de 0.45 y se agregó 1% de superplastificante, relativo a la masa de ligante. El mezclado se hizo en etapas en una mezcladora de paleta. Primero se mezcló el agua y el superplastificante por 1 minuto, luego se agregó la mezcla ligante y arena y se mezcló por 5 minutos. Los morteros se vaciaron en moldes con cavidades cúbicas de 5 cm de lado, estos se vibraron para eliminar el aire atrapado y se dejaron fraguar durante 24 horas a temperatura ambiental, recubiertas con franelas húmedas y plástico para evitar la pérdida de humedad. Los cubos desmoldados se conservaron en contenedores con agua en una cámara isotérmica a 20°C. A los periodos de tiempo seleccionados, se tomaron 4 cubos y se ensayaron mecánicamente en una máquina hidráulica (Controls con controlador SERCOMP7), se reportó el promedio y desviación estándar. Adicionalmente, se elaboraron pastas en moldes de 15x2x2 cm, procesadas igual que los morteros; las cantidades de Mc fueron entre 0% y 50%. Después de los tiempos de curado programados, se sacaron muestras de aproximadamente 30 g y se secaron por 24 horas a 35°C en una cámara de vacío para detener las reacciones de hidratación. Las muestras se molieron en un molino de bolas planetario hasta pasar la malla de 106 µm, se guardaron para caracterización posterior.

Algunas muestras de morteros se seleccionaron para análisis microestructural, estas se montaron en resina y se pulieron con pasta de diamante de 0.25micras, se recubrieron de grafito para analizarse en el microscopio. (Philips modelo XL30ESEM). Las muestras de pastas se caracterizaron mediante análisis térmico diferencial y termogravimétrico (Perkin Elmer modelo Pyris Diamond), procesando muestras de 15mg calentando una 10°C/min hasta 1250°C.

3. RESULTADOS

3.1 Comparación de resistencia a la compresión entre los metacaolines

En una primera serie de experimentos se calcinaron ambos caolines a temperaturas de 550-1050°C. Se fabricaron morteros en los que el 20% del CP se reemplazó con Mc. Los resultados se presentan en las Figuras 3 y 4. Para los morteros con Mc blanco (Figura 3) aquellos con Mc calcinado a 750°C y 850°C presentaron comportamientos similares, alcanzando alrededor de

40MPa después de 90 días. La calcinación a 550, 950 y 1050°C, resultó en resistencias menores, de alrededor de 35 MPa a los 90 días. Es importante notar que, excepto para 550 y 1050°C a los 28 días se alcanzaron 30MPa, indicando que un reemplazo del 20% del CP resultó en propiedades similares a las especificadas para morteros con 100%CP. Las curvas de morteros con Mc blanco calcinado a 650°C, 750°C y 850°C siguieron cercanamente la del mortero con 100%CP indicando que a estas temperaturas el Mc actúa satisfactoriamente como material de reemplazo.

Los resultados del Mc rojo se presentan en la Figura 4. En general el desarrollo de resistencia fue más lento que el observado para el Mc blanco (Figura 2). La calcinación a 750°C registró la más alta resistencia a la compresión a 90 días (36.9 MPa); similar al Mc blanco, las menores resistencias se observaron para la calcinación a 550, 950 y 1050°C. El desarrollo de resistencia mecánica de los morteros con Mc rojo fue similar al del mortero con 100%CP en los primeros tres días de curado, y entre 3 y 90 días la resistencias fueron menores que el mortero de referencia. Esto sugiere que la presencia del Mc acelera las reacciones de hidratación del CP y aun existiendo menos CP se lograron niveles aceptables de resistencia mecánica. Sin embargo, en tiempos posteriores la reactividad intrínseca de cada Mc rige la ganancia de resistencia mecánica.

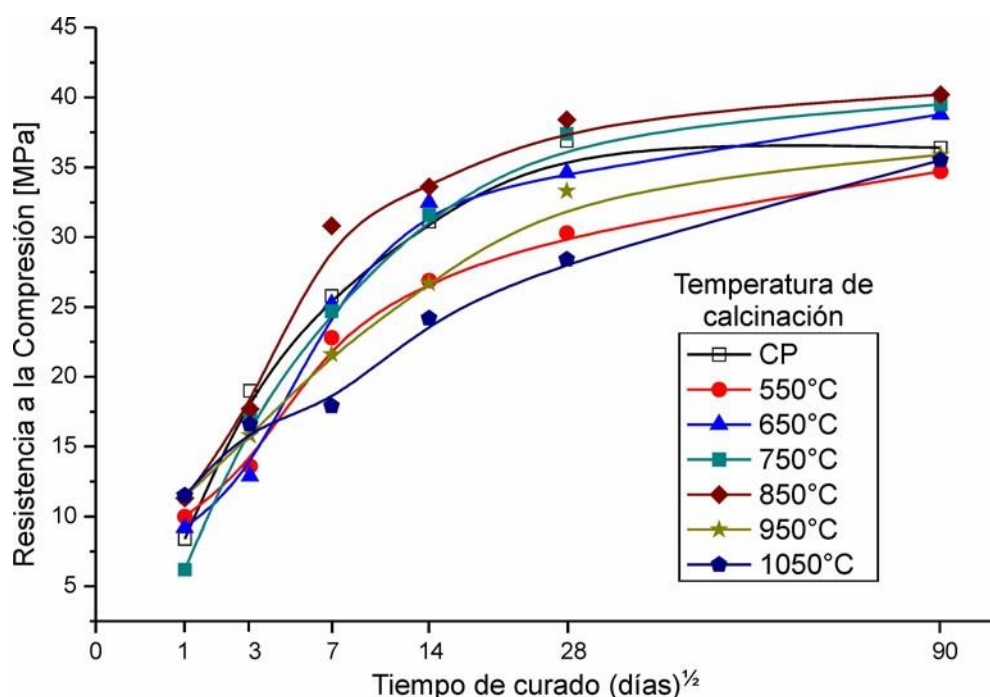


Figura 3. Resistencia a la compresión para morteros con 20% Mc blanco calcinado a 550°C, 650°C, 750°C, 850°C, 950°C y 1050°C.

Se concluyó que el Mc blanco es una mejor puzolana que el rojo. La investigación se continuó con el Mc blanco, la calcinación se realizó a 750°C. La Figura 5 presenta el patrón de difracción del Mc blanco después de la calcinación. Puede notarse la desaparición de los picos de la caolinita, los picos del cuarzo y la alunita prevalecieron. Adicionalmente aparece un halo amorfo entre 15-35°2θ, característico de los materiales silicoaluminosos amorfos. Esto indica que el material tiene potencial reactivo.

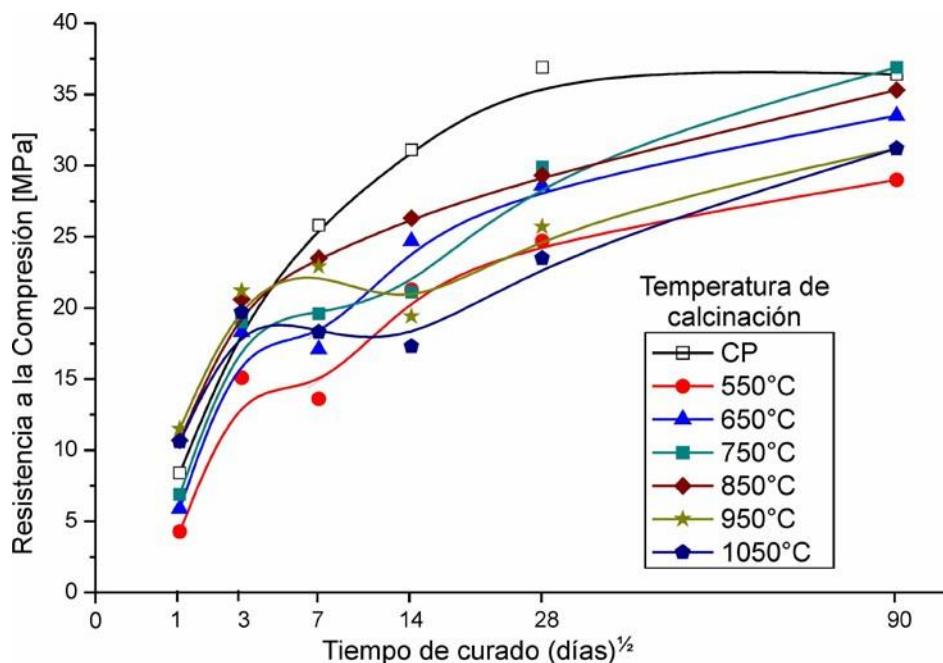


Figura 4. Resistencia a la compresión para morteros 20% Mc rojo calcinado a 550°C, 650°C, 750°C, 850°C, 950°C y 1050°C

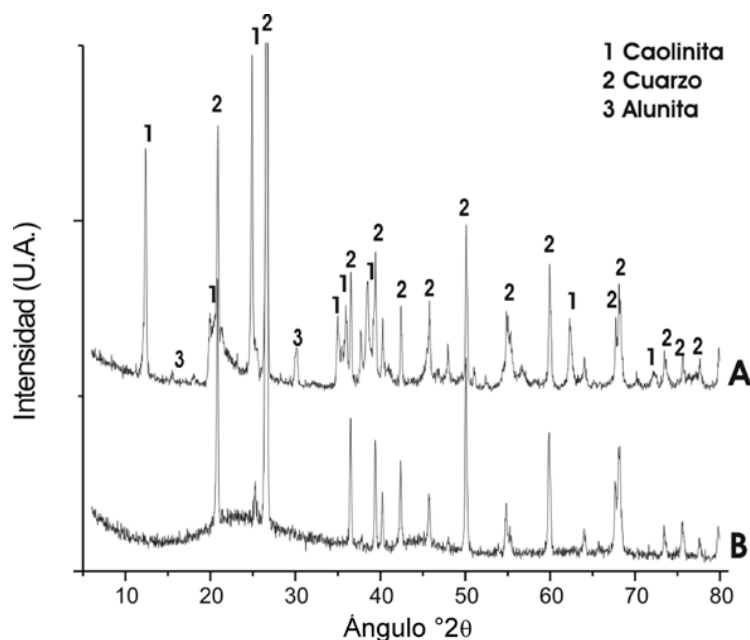


Figura 5. Patrón de difracción del Mc blanco antes y después de la calcinación a 750°C

3.2 Resistencia a la compresión con Mc blanco

La Figura 6 presenta el desarrollo de resistencia a la compresión para los morteros con 0-50% de Mc blanco, cada línea representa una fecha de curado. En todas las formulaciones la resistencia a la compresión se incrementó en función del tiempo. Durante los primeros 3 días, los morteros con 10% y 20% Mc blanco alcanzaron las mayores resistencias (incluido el mortero de 100%CP); en este periodo los morteros con 40 y 50% Mc mostraron resistencias menores que el mortero 100%CP. Después de 7 y 14 días las resistencias del mortero con 40% Mc fueron similares al de

referencia. Finalmente después de 90 y 120 días todos los morteros con Mc superaron al mortero de referencia que registró $\approx 36-38$ MPa. Las mayores resistencias fueron para morteros con 30-40% Mc con 50-53 MPa a 120 días.

En general, 10-20% de Mc blanco es favorable en edades tempranas, y en edades tardías es más favorable el remplazo de 30-40% Mc. El uso de 30% Mc tiene un desarrollo de resistencia similar al mortero de referencia en edades tempranas, pero en el largo plazo es más favorable. Los altos niveles de Mc redujeron la resistencia temprana, el desarrollo de ésta depende principalmente del avance de las reacciones de hidratación del CP y el Mc no es tan reactivo; sin embargo, en etapas posteriores, las reacciones del CP se hacen lentas y el avance de la reacción puzolánica favorece el incremento de la resistencia mecánica. En general se considera que el sacrificio de resistencia mecánica a edades tempranas es bien compensado por una reducción de costo por el uso de menor cantidad de CPO y por la obtención de mejores propiedades mecánicas en el largo plazo.

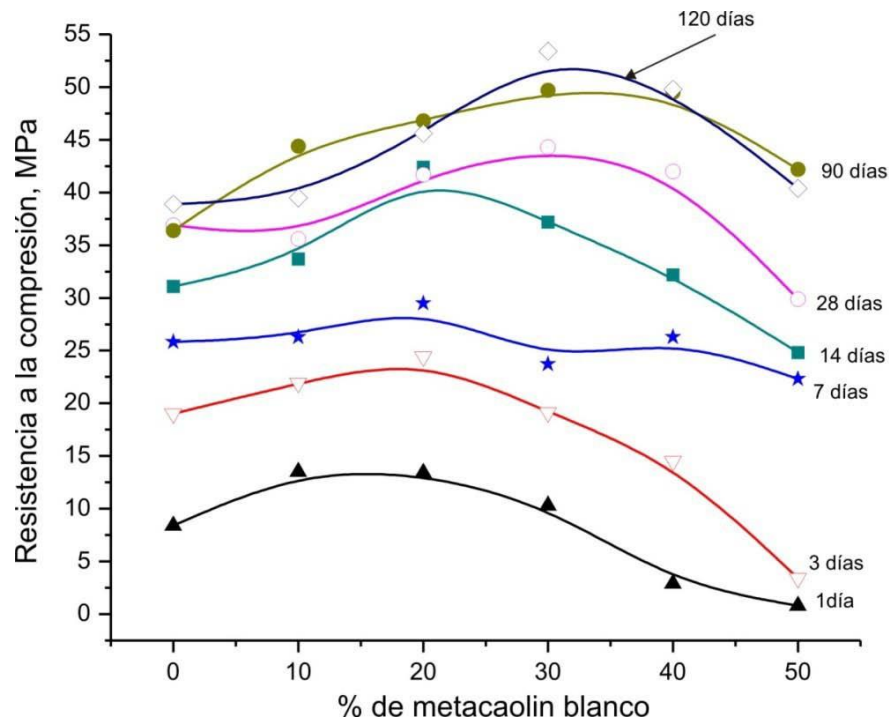


Figura 6. Resistencia a la compresión vs % Mc blanco a varios tiempos de curado a 20°C en húmedo

3.3 Análisis térmico, actividad puzolánica

La Figura 7 presenta resultados de análisis térmico diferencial para pastas de CP con diversos contenidos de Mc, Las curvas del CP mostraron desde el primero día un intenso pico endotérmico atribuido a la descomposición del CH a 400- 500°C, esto indica que el CP reacciona intensamente desde los primeros días. Para fechas posteriores el avance de las reacciones de hidratación de los silicatos de calcio causa el incremento de la intensidad del pico, aunque no tan intensamente. Las pastas con 10% y 20% Mc mostraron una ligera disminución de la intensidad de dicho pico entre 1 y 28 días de curado (en cada serie), indicando que la reacción puzolánica tuvo lugar; luego a 90 días se notó una ligera intensificación del pico, lo que podría indicar que a esta fecha ya se ha llevado a cabo gran parte de la reacción puzolánica entre Mc y el CH, y que predomina la producción de CH por la hidratación del CP. Las pastas con 30, 40 y 50% Mc mostraron un fuerte decremento de la intensidad del pico de descomposición del CH, evidenciando un efecto combinado de: (1) al incrementar %Mc se reduce la cantidad de CP, disminuyendo el CH generado por las reacciones y

(2) el consumo de CH por la reacción puzolánica. Para 50% Mc el pico del CH casi desapareció a los 90 días

En la Figura 6 se observó un pico endotérmico a $\sim 150^{\circ}\text{C}$, que puede atribuirse a fases tipo stratlingita (C_2ASH_8) (wild y Khativ, 1997) u otros hidratos cálcicos aluminicos, que son productos comúnmente reportados para este tipo de cementos compósitos. Tal pico se notó en el CP a 120 días, pudiendo originarse a partir de la reacción de la escoria de alto horno adicionada al CP en planta.

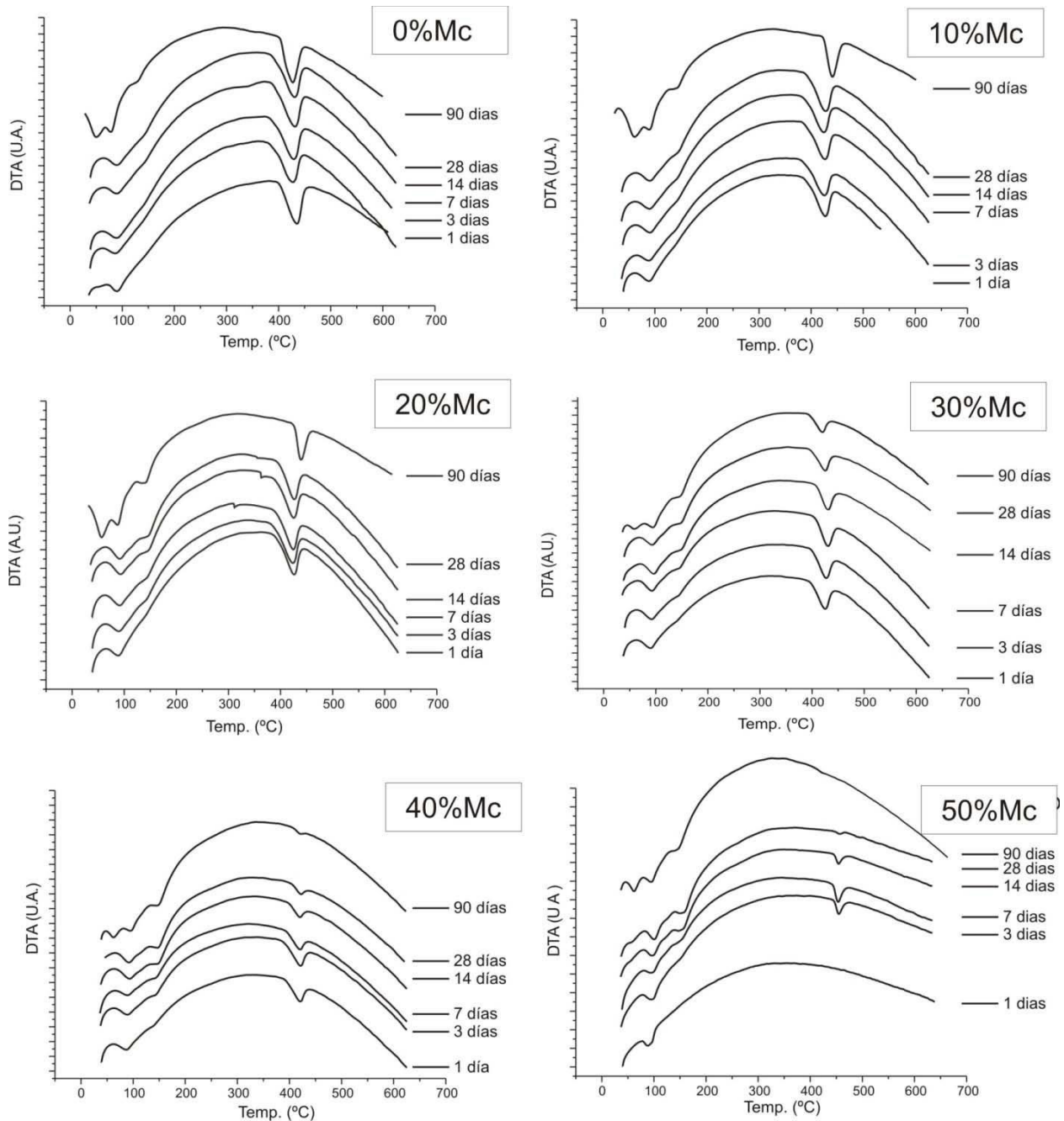


Figura 7. Curvas de análisis térmico diferencial para pastas con diversos contenidos de Mc

La Figura 8 presenta los resultados de %CH vs tiempo, derivados de los resultados de análisis termogravimétrico para las mismas pastas de la Figura 7. La cantidad CH vs tiempo se determinó

gráficamente (Gómez-Zamorano, 2004) para dar seguimiento a la reacción puzolánica mediante el uso de la pérdida en peso entre 400°-500°C registrada en las curvas de TG. Conforme aumentó el %Mc se redujo el % CH, debido a 2 factores: (1) se reduce la cantidad de CP y por ende la cantidad de CH generado y (2) la reacción puzolánica que consume CH. Las pastas con 20-40% Mc mostraron incrementos del %CH entre 1 y 3 días de curado seguida de una notable reducción hasta los 90 días. En los primeros 3 días las reacciones de hidratación del CP avanzan intensamente (incluso pueden verse aceleradas por la presencia de partículas externas (Gutteridge y Dalziel, 1990; Escalante-García y Sharp, 1998), en este periodo predomina la generación de CH sobre su consumo por la reacción puzolánica. En fechas posteriores las reacciones del CP se hacen más lentas, a 28 días alcanzan 80-90% de avance (Escalante-García y Sharp, 1998), la producción de CH se hace lenta y predomina la reacción puzolánica consumiendo CH.

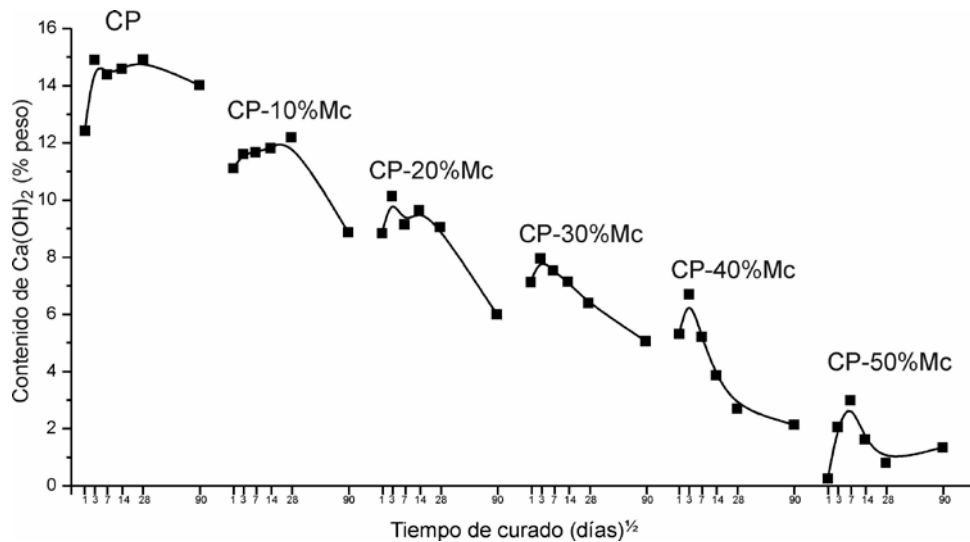


Figura 8. Resultados del %CH vs tiempo para pastas con diversos contenidos de Mc, el % de CH se determinó gráficamente por termogravimetría.

3.4 Microestructuras

Se utilizaron imágenes por electrones retrodispersados (contraste químico) para diferenciar las fases presentes. La Figura 9 presenta micrografías de morteros con 0, 10, 30 y 50% Mc curadas por 90 días. El orden de brillantez de mayor a menor es: cemento anhidro, CH, productos C-S-H, Metacaolín (la metacaolinita con brillantez similar a la de SiO₂ y se distinguen por su morfología); los poros se aprecian negros.

Para 0%Mc se observan granos de CP completamente reaccionados y muchos parcialmente reaccionados, indicando que aún después de 90 días las reacciones siguen progresando, aunque a velocidades lentas. Pueden notarse productos de C-S-H (interno y externo) y zonas de CH distribuidas en forma de aglomerados (tono gris claro), conformando una matriz relativamente densa con poros distribuidos en la microestructura, similares a las reportadas en la literatura (Escalante-García y Sharp 2001).

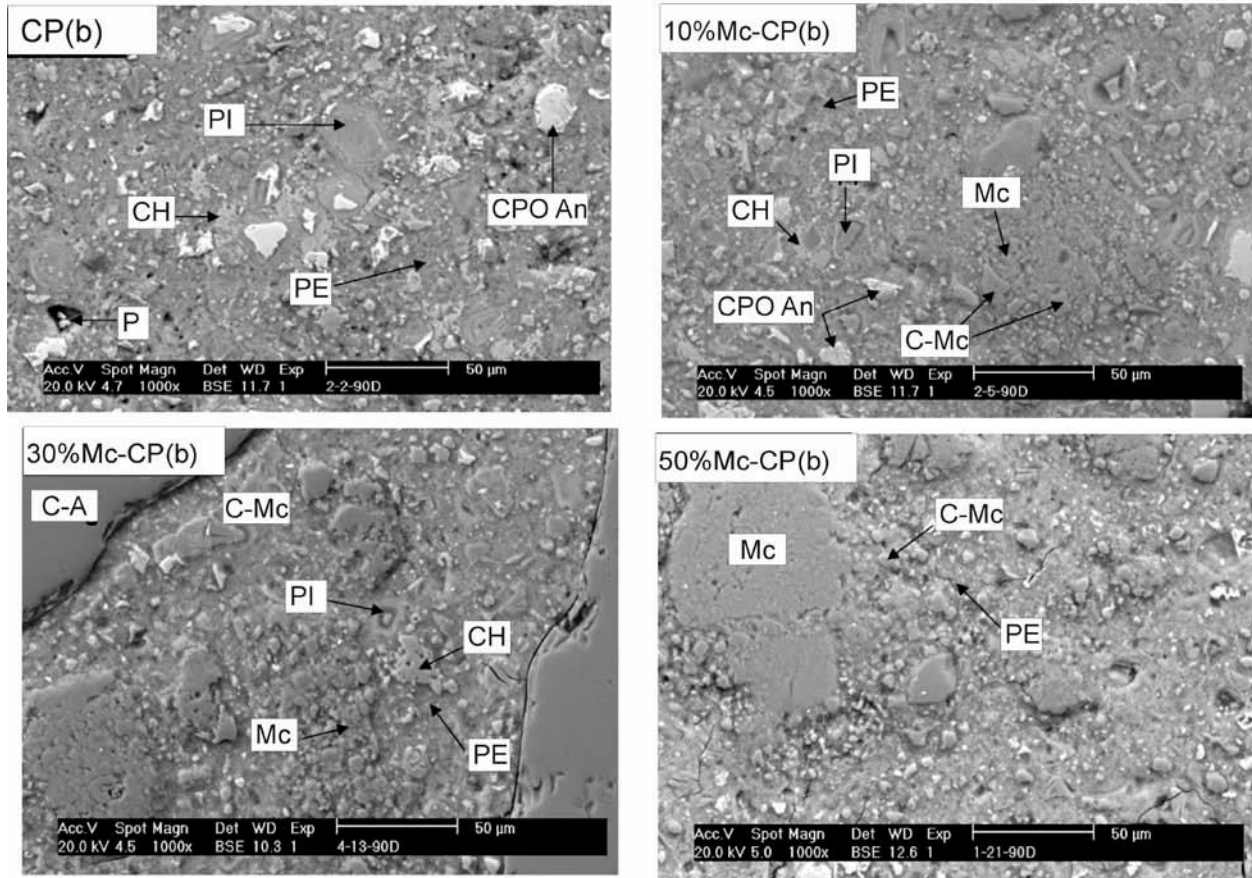


Figura 9. Microestructuras obtenidas por microscopía electrónica de barrido por imágenes retrodispersados. CPO anhidro (CP An), CH (CH), productos de hidratación internos (PI) y externos (PE), metacaolín (Mc), cuarzo de Mc (C-Mc), cuarzo de arena (C-A), poros (P).

Para 10%Mc, los granos de Mc se distinguen por su morfología característica y tono de gris. Comparado con el mortero con 0%Mc, es notable una reducción en la cantidad de granos de CP sin reaccionar, indicando que las reacciones del CP son aceleradas en presencia del Mc. Adicionalmente, mucho del CH observado para 0%Mc está ausente en presencia del Mc, esto se atribuye a la reacción puzolánica, que resulta en la formación de productos de reacción adicionales a los del CP. El CH remanente sugiere que la parte reactiva del Mc fue insuficiente en cantidad como para consumir totalmente el CH producido por el CP. Como resultado de la aceleración de las reacciones del CP y puzolánica, las microestructuras con 10%Mc son más densas que las del CP puro, en concordancia con el incremento de la resistencia a la compresión observada al comparar dichos morteros.

Las micrografías de morteros con 30% resultaron más densas que las de 0% y 50% Mc, esto es congruente con las resistencias a la compresión observadas anteriormente. Es interesante que aunque el desarrollo de resistencia de los morteros con 50% Mc fue muy lento en los primeros días, a los 90 días de curado las matrices de productos de hidratación aparecen con relativamente baja porosidad. Similar a lo descrito para 10%Mc, el consumo de CH es muy notorio, si como la ausencia de granos de CP sin reaccionar.

4. COMENTARIOS FINALES

La interacción entre el CH y el Mc ocurre es mediante la llamada reacción puzolánica (Helmuth, 1987). La red de SiO₂ o Al₂O₃-SiO₂ de la metacaolinita es destruida por el ataque de iones OH⁻. Esto conduce eventualmente a la formación de diversos productos de acuerdo a la siguiente reacción:



donde:

$x\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot (x+z)\text{H}_2\text{O}$ es la composición promedio que representa a la mezcla de C-S-H, calcio aluminatos hidratados y otros productos

El avance de la reacción depende de factores como el área superficial y tamaño de partícula de la puzolana, la relación agua/sólidos en la mezcla, nivel de sustitución de CP por puzolana, temperatura, etc. La reacción conduce a la formación de productos cementosos, que contribuyen a la resistencia mecánica de morteros y concretos. Los metacaolines investigados en este trabajo son de muy baja pureza y de tamaño de partícula relativamente grueso en comparación con los reportados en la literatura. Sin embargo, los resultados muestran que estos son viables para producir morteros de bajo impacto ambiental con propiedades similares a los de CP puro. El Mc blanco no solo reemplaza al cemento, su actividad cementosa incrementa o mejoran las propiedades físicas de los morteros

5. CONCLUSIONES

1. El caolín blanco tiene una cantidad mayor de caolinita que el rojo, por consiguiente mostró un comportamiento puzolánico superior, los morteros alcanzaron mejores resistencia a la compresión.
2. La temperatura de calcinación de 750°C es adecuada para calcinar el metacaolín blanco
3. El nivel óptimo de reemplazo de CP por metacaolín blanco es de alrededor de 30%, ya que estos niveles de reemplazo superaron las propiedades mecánicas a corto y largo plazo en relación al mortero de CP.
4. Los morteros con 40- 50% de metacaolín desarrollaron resistencia lentamente en los primeros 14 días, sin embargo en el largo plazo igualaron las resistencias de los morteros del CP puro.
5. En los primeros días las propiedades mecánicas son controladas por las reacciones de hidratación del CP, que a su vez se ven aceleradas por la presencia del metacaolín; después de 14 días la resistencia se favorece por la reacción puzolánica
6. En presencia del metacaolín se redujo la microporosidad de la matriz de productos de reacción, atribuido al consumo de CH en la reacción puzolánica en combinación con la el efecto de microrellenador; el cuarzo del metacaolín participó como relleno inerte en el refinamiento y reducción de la porosidad.
7. Es posible utilizar minerales de caolín de baja calidad para producir materiales de construcción de bajo costo y de bajo impacto ecológico.

6. AGRADECIMIENTOS

Proyecto financiado por el fondo Mixto CONACYT- Gobierno del Estado de Zacatecas, ZAC-2002-C01-4201

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM C778 (1995) “*Standard Specification for Standard Sand, Annual book of ASTM standards*”, Vol. 04.01, Section 4, 329-331.
- Energy Information Administration EIA (2009), USA Government, <http://www.eia.doe.gov/bookshelf/brochures/greenhouse/Chapter1.htm>
- Badogianinis E., Papadakis V.G., Chaniotakis E., Tsvivilis S. (2004) *Exploitation of poor Greek kaolins: Strength development of metakaolin concrete and evaluation by means of k-value*, Cement and Concrete Research 34, 1035-1041.
- Curcio F., DeAngelis B. A., Pagliolico S. (1998), *Metakaolin as a pozzolanic microfiller for high-performance mortars*, Cement and concrete research, Vol. 28, 803-809
- Escalante Garcia J. I., Sharp J. H. (1998) *Effect of temperature on the hydration of the main clinker phases in portland cements, Part II, blended cements*, Cement and Concrete Research 28, 1259-1274
- Escalante Garcia J. I., Sharp J. H. (2001), *The microstructure and mechanical properties of blended cements hydrated at various temperatures*, Cement and Concrete Research 28, 695-702
- Frias, M. Cabrera J. (2001) *Influence of MK on the reaction kinetics in MK/lime and MK-blended cement systems at 20°C*, Cement and concrete research 31, 519-527
- Galan Huertos E. (1974), *El caolín en España, características, identificación y ensayos cerámicos*, Edit. Soc. Española de cerámica y vidrio (1974).
- Gartner E. (2004) “*Industrially Interesting approaches to ‘low-CO₂’ cements*”. Cem. Conr. Res. 34, 1489-1498.
- Gómez-Zamorano L. Y., Escalante-Garcia J. I., Mendoza G. (2004), *Suárez, Geothermal waste: An alternative material to portland cement*, Journal of Materials Science 39, 4021-40025
- Gutteridge W.A. and Dalziel J.A. (1990), *The effect of a secondary component on the hydration of portland cement, Part II fine hydraulic binders*, Cement and Concrete Research, 20, 778-782
- He C., Osbaek B., Makovicky E. (1995), *Pozzolanic reactions of six principal clay minerals: Activation, reactivity assessment, and technological effects*, Cement and concrete research 25, 1691-1702
- Helmuth R. (1987), *Fly ash in cement and concrete*, Edit. Portland cement association (1987).
- Jones T.R. (2001), *Metakaolin as a pozzolanic addition to concrete*. Structure & Performance of cements, Ed. Bensted J and Barnes P, Spon Press; Chapter fifteen, pag. 372-390
- Kakali G., Perraki T., Tsvivilis S., Badogiannis E. (2001), *Thermal treatment of kaolin: the effect of mineralogy on the pozzolanic activity*, Applied Clay Science 20, 73-80.
- Malhotra V. M. and Mehta P. K. (1996), *Puzzolanic and cementitious materials*, Advances in Concrete Technology, Edit. Gordon and Brach Publishers
- Massaza F. (2004), *Pozzolana and Pozzolanic cements*, Lea’s Chemistry of cement and concrete, Chapter 10, 4^a Edición, Edit. Butterworth-Heinemann
- Norma NMX-C-114-2003 (2003), Industria de la construcción, - cementos hidráulicos-especificaciones y métodos de pruebas, ONNCCE-2003.
- Ramlochan T., Thomas M., Gruber K.A. (2000), *The effect of metakaolin on alkali-silica reaction in concrete*, Cement and concrete research 30, 339-344
- Sabir B. B., Wild S., Bai J. (2001), *Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review*, Cement and Concrete Composites, 23, 441-454.

- Salvador S. (1995), *Pozzolanic properties of flash calcined kaolinite: a comparative study with soak-calcined products*, Cement and concrete research, 25, 102-112
- Shvarzmana A., Kovler K., Grader G. S., Shter G. E. (2003), *The effect of dehydroxylation/amorphization degree on pozzolanic activity of kaolinite*, Cement and Concrete Research 33, 405–416
- Wild S., Khatib J. M. (1997), *Portlandite consumption in metacaolín cement pastes and mortars*, Cement and concrete research, 27, 137-146
- Wild S., Khatib J. M., Jones A. (1996), *Relative strength, pozzolanic activity and cement hydration in superplasticised metakaolin concrete*. Cement and Concrete Research 26, 1537-1544.
- Zhang M. H., Malhotra, V. M (1995), *Characteristics of a thermally activated alumino-silicate pozzolanic material and its use in concrete*, Cement and concrete research, 25, 1713-1725