

# Estudio de la adición de arcillas calcinadas en la durabilidad de hormigones

## Study of the addition of calcined clays in the durability of concrete

Rancés Castillo Lara<sup>\*1</sup>, Mathieu Antoni<sup>\*\*</sup>, Adrián Alujas Díaz<sup>\*</sup>, Karen Scrivener<sup>\*\*</sup>, José Fernando Martirena Hernández<sup>\*</sup>

\* Universidad Central de Las Villas, Santa Clara, Cuba

\*\* Escuela Politécnica Federal de Lausana (EPFL), SUIZA

Fecha de recepción: 21/ 07/ 2010  
Fecha de aceptación: 30/ 09/ 2010  
PAG. 25 - 40

### Resumen

Actualmente son bien conocidas las ventajas económicas y medioambientales de la sustitución del clínker de cemento por otros materiales cementicios suplementarios. Las arcillas calcinadas en forma de metacaolín han recibido por ejemplo especial atención en años recientes. Se conoce que estas adiciones, cuando se añaden a morteros y hormigones, mejoran tanto su resistencia mecánica como su durabilidad. El objetivo de este trabajo es evaluar el comportamiento de las propiedades físico-mecánicas y la durabilidad en microhormigones, empleando arcillas calcinadas y molidas como material sustituyente del 30% en peso del cemento Portland ordinario (CPO). Para ello se utilizó una tierra arcillosa, compuesta principalmente por mineral caolín de bajo grado de pureza, para la obtención de arcillas calcinadas como minerales cementicios suplementarios. Los mejores resultados se resistencia a la compresión a los 28 días se obtuvieron para la arcilla sedimentada y calcinada, la cual posee mayor contenido de mineral caolín debido a un proceso de purificación por sedimentación de la materia prima acometido sólo para esta adición. Sin embargo, los ensayos de absorción de agua por capilaridad arrojaron los mejores resultados para el suelo arcilloso calcinado, el cual posee una elevada finura en comparación al resto de los materiales estudiados. Los menores valores mostrados por esta adición, tanto de porosidad capilar como de sorptividad, indican que existió un predominio del fenómeno de la compactación e impermeabilidad, lograda en la matriz cementicia al usar un material tan fino, por encima del efecto de la reacción puzolánica. Estudios en la microestructura del gel de C-S-H, usando energía dispersiva por rayos-X (EDX), demostraron como el empleo de arcillas calcinadas en sustitución del CPO favorece la formación de productos de hidratación más estables, principalmente monosulfos del tipo hemicarbo y monocarbo, lo cual es conveniente para el hormigón ante la posible acción de diferentes mecanismos de degradación.

Palabras Clave: Arcillas calcinadas, durabilidad, absorción capilar, porosidad, productos de hidratación

### Abstract

Currently economical and environmental advantages of cement clinker replacement by other supplementary cementitious materials are well known. For example calcined clays, such as metakaolin, have drawn special attention during recent years. It is well known that these admixtures added to mortars and concretes improve mechanical strength as well as durability. The purpose of this study is to evaluate the behavior of physical-mechanical properties and durability in micro-concretes, by employing calcinated and grinded clays as replacement material, by 30% of ordinary Portland cement (OPC). Therefore, clay soil was employed, which is mainly composed by low-purity-kaolin mineral, so as to obtain calcined clays to be used as supplementary cementitious minerals. Best results for compressive strength at 28 days were obtained by sedimentary calcined clays, which have higher content of kaolin mineral thanks to a purification process by means of raw material sedimentation conducted on this admixture only. Nevertheless, capillary water absorption tests delivered best results for calcined clay soil, which finesse is quite high. Lower values showed by this admixture, as much for capillary porosity and sorptivity, revealed there was a predominance of compaction and impermeability phenomena achieved by cementitious matrix using such fine material, over the effect of puzzolanic reaction. Micro-structure studies on C-S-H gel, employing energy dispersive x-ray (EDX) technique, demonstrated that the use of calcined clays as replacement of RPC favors the creation of quite stable hydration products, mainly monosulfos of hemicarbo and monocarbo types, which is convenient for concrete against possible deterioration actions from different mechanisms.

Keywords: Calcined clays, durability, capillary absorption, porosity, hydration products

## 1. Introducción

La durabilidad del hormigón se ha convertido recientemente en el centro de investigación de numerosos autores y especialistas en todo el mundo.

<sup>1</sup> Autor de correspondencia / Corresponding author:  
E-mail: rancesc@uclv.edu.cu

En el caso particular de Cuba, por ser una isla con edificaciones muy cerca del ambiente marino, es de vital importancia el estudio del comportamiento durable de este material frente a los diferentes agentes agresivos externos.

La norma cubana NC 250-2005 "Requisitos de durabilidad para el diseño y construcción de edificaciones y obras civiles de hormigón estructural", define a la durabilidad como la capacidad del hormigón para soportar durante la vida útil para la que ha sido diseñado, las condiciones físicas y químicas a las que va a estar expuesto.

Varios son los factores que condicionan las propiedades durables del hormigón. Entre ellos, desde el punto de vista interno, se encuentran la composición y distribución de sus componentes o materias primas, así como las características propias de su diseño estructural. Aquellos con particularidades externas al material, como son el grado de exposición y la agresividad del medio en que se encuentra, también son determinantes de esta propiedad.

El agua, además de constituir el 71% de la corteza terrestre y ser el material más usado por el hombre a escala mundial, puede considerarse como la causa fundamental de la degradación de los materiales de construcción, en especial del hormigón. Como uno de los constituyentes de este último, un exceso de su contenido expresado en altas relaciones agua cemento, es perjudicial en la calidad del material. Producto del fenómeno de exudación aumenta la presencia de poros capilares, principalmente aquellos conectados con el exterior, además que se incrementa el volumen de agua ocluida en la masa de hormigón convirtiéndose más tarde en grandes poros internos del material. Esta alta porosidad, además de comprometer las propiedades físico mecánicas del hormigón, influye en su impermeabilidad y por ende en su protección ante las acciones del medio externo, lo que provoca un detrimento de su durabilidad. Mientras más permeable sea el hormigón, con mayor facilidad penetrarán sustancias químicas agresivas, como son los iones cloruro y los sulfatos. Todos ellos necesitan un medio para trasladarse hacia el interior de la masa de hormigón, siendo el agua quien generalmente se lo facilita.

Estudiar los mecanismos de transporte de fluidos y sustancias dentro y hacia el material es práctica habitual para evaluar las propiedades durables en los mismos. Se ha demostrado que los gradientes de contenido de humedad, presión hidrostática, esfuerzos, y la concentración de químicos, afectan el estado de equilibrio de los fluidos en un material poroso, por lo tanto la transferencia de líquidos ocurre para restablecer dicho equilibrio.

Este proceso de transporte de fluidos es generalmente descrito en términos de adsorción, difusión, permeabilidad y absorción. En el hormigón, tanto su estructura física (distribución y tamaño de poros) como el estado en que se encuentra el agua en estos poros, influye en este proceso de transporte (Muhammed Basheer, 2001).

Los mayores esfuerzos han estado encaminados hacia desarrollar las prestaciones del material, de forma tal que sea capaz de soportar los diferentes mecanismos de deterioro a los que estará expuesto. En este sentido, el uso de adiciones minerales activas en la fabricación de hormigones se ha mostrado como una alternativa viable y eficiente para incrementar las propiedades durables de dicho material. Esto se debe básicamente a que aparece un aumento del contenido de los productos de reacción, favorecido por la adicional formación de hidratados de la reacción puzolánica, lo que propicia menor porosidad capilar y por ende superior resistencia y durabilidad (Agarwal, 2006, Lawrence et al., 2005, Papadakis and Tsimas, 2002, Mehta and Monteiro, 2001).

Dentro de las puzolanas usadas para la fabricación de cementos mezclados y de hormigones, con vista a mejorar sus propiedades durables, se encuentra el metacaolín. Varios han sido los trabajos que han estudiado sus aportes favorables, al ser utilizada como sustituyente del cemento Portland ordinario. Se ha demostrado que el uso de metacaolín acelera la hidratación del cemento Portland y disminuye el contenido de hidróxido de calcio en las mezclas, mejora la permeabilidad y por tanto reduce la penetración de ión cloruro en hormigones expuestos al contacto con agua de mar, así como que aumenta la resistencia frente a ataque de sulfatos. Además, las mezclas fabricadas con esta adición muestran menores valores de porosidad, absorción de agua y sorptividad (Bai et al., 2003, Al-Akhras, 2006, Justice, 2005, Talero, 2005, Sabir et al., 2001, Gonçalves et al., 2009).

El inconveniente del uso de metacaolín se centra en la necesidad de arcillas puras en mineral caolín para su producción y los altos costos energéticos asociados a este proceso. Formas viables de disminuir estas desventajas serían el empleo de arcillas de más bajo grado de pureza, unido a un eficiente proceso energético de producción durante su calcinación. El presente trabajo emplea como materia prima un suelo arcilloso de bajo grado de pureza de mineral caolín. En un trabajo anterior (Castillo Lara et al., 2010) se demostró como las arcillas calcinadas provenientes de este suelo arcilloso poseían muy buenas propiedades puzolánicas, cuando eran empleadas como materiales sustituyentes del cemento Portland ordinario en pastas y morteros.

El presente trabajo se centra en evaluar el comportamiento de las propiedades físico-mecánicas y la durabilidad en microhormigones fabricados con arcillas calcinadas como material sustituyente del cemento Pórtland ordinario. Los estudios se realizaron en dos escalas: a nivel macroestructural se determinó la resistencia a la compresión y la absorción de agua con el correspondiente análisis de sus parámetros básicos de porosidad efectiva (masa de agua que se requiere para saturar el material) y sorptividad (grado de penetración). Mientras, a escala micro, se determinó su aporte en la formación de productos de hidratación más estables mediante la técnica de energía dispersiva por rayos-X.

## 2. Materiales y métodos experimentales

### 2.1 Materias primas

Los ensayos microestructurales realizados se desarrollaron en el Laboratorio de Materiales de Construcción (LMC), EPFL, Suiza, mientras que los estudios encaminados a evaluar la macroestructura se realizaron en el Centro de Investigación y Desarrollo de las Estructuras y los Materiales (CIDEM), UCLV, Cuba. Para la fabricación de las mezclas se usó cemento cubano P350, clasificado como tipo I según la norma americana ASTM C150-02 y con resistencia a la compresión a los 28 días de 35 MPa. La Tabla 1 contiene un resumen de su composición química y algunas de sus características físicas.

Dos tipos de arcillas calcinadas fueron estudiadas básicamente. La adición designada como T-120 consiste en un suelo arcilloso, mientras que la arcilla sedimentada, producto de la sedimentación de dicho suelo, fue designada como AS-900. La preparación de estos materiales consistió en calcinarlos a 900 °C durante 1 hora, bajo condiciones controladas de temperatura en un horno de laboratorio, y luego molerlos durante 120 minutos en un molino de bolas con capacidad de 600 litros.

Como materia prima para la producción de ambas adiciones se utilizó un suelo arcilloso, proveniente del centro montañoso del país y usado comúnmente para la producción de ladrillos y bloques cerámicos. Este se caracteriza por ser una mezcla de minerales de arcilla, básicamente caolinita y montmorillonita, todos ellos con muy bajo grado de pureza (Fernandez, 2009).

Con el fin de evaluar el aporte de las adiciones minerales activas, se introdujo una serie con igual cantidad de cemento, sustituyendo éste por un filler calcáreo (F).

Éste material fue molido durante 60 minutos para disminuir su finura hasta valores inferiores al cemento y similares al resto de las adiciones. En la Tabla 1 aparecen también mostradas las propiedades físicas y químicas de todas las adiciones usadas.

Tabla 1. Composición química y propiedades físicas del cemento y adiciones utilizadas  
Table 1. Chemical composition and physical properties of employed cements and admixtures

Propiedades/Properties	CPO	T120	AS-900	F
SiO <sub>2</sub>	22.034	57.74	43.89	0.20
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.85	18.71	24.73	0.50
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,23	7.07	11.13	0.13
CaO	60,58	1.85	1.38	54.78
MgO	1,65	1.80	2.63	0.27
SO <sub>3</sub>	3,22	0.02	0.08	0.1
K <sub>2</sub> O	0,621	0.65	1.10	0.10
MnO	0,075	0.12	0.14	0.01
Na <sub>2</sub> O	0,303	2.68	1.99	0.10
PPI	3.31	8.57	9.81	43.00
Álcalis/Alkalis % (Na <sub>2</sub> O) eq	0.71	3.11	2.70	0.17
Superficie específica/Specific surface (m <sup>2</sup> /g)	1.11	7.05	5.19	1.09
Densidad/Density (g/cm <sup>3</sup> )	3.12	2.86	2.59	2.70
Tamaño medio de grano/Average grain size (µm)	25.45	3.83	7.47	10.42

La Figura 1 muestra una comparación entre las curvas granulométricas del cemento y las adiciones empleadas en este estudio, obtenidas a partir de la técnica de granulometría láser. Puede verse como el cemento usado es el material más grueso, con 25.45 µm como tamaño medio de partícula. Todas las adiciones, a partir del tratamiento de molienda realizado, presentan valores inferiores de finura respecto al cemento.

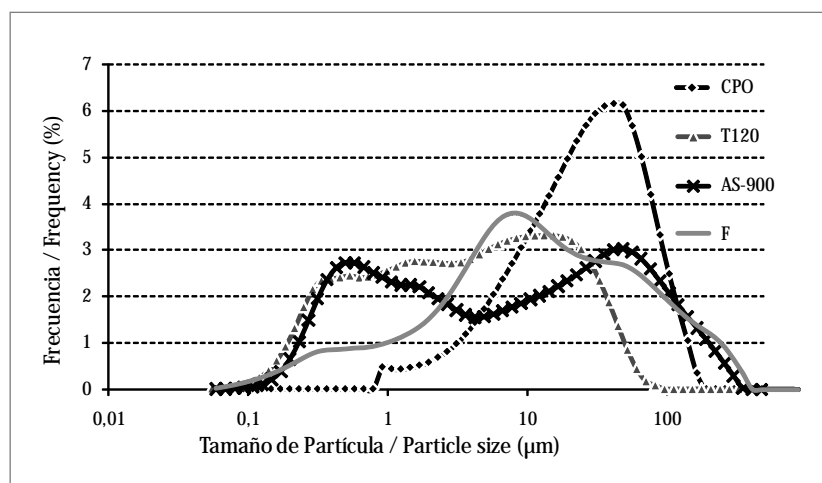


Figura 1. Distribución de tamaño de partícula de las materias primas  
Figure 1. Distribution of particles sizes from raw materials

## 2.2 Método experimental

El presente estudio se dividió en las siguientes fases experimentales:

Fase 1: Proceso de sedimentación y calcinación del suelo arcilloso y la arcilla sedimentada

El suelo arcilloso en su estado natural fue sometido a un proceso de sedimentación, obteniéndose un material arcilloso purificado. Como agente defloculante se utilizó el silicato de sodio a una concentración de 0,02%, lo cual ayudó a alcanzar los menores tamaños de grano posible y favoreció la eficiencia de dicho proceso. La calcinación se realizó en una mufla de laboratorio, en la que se colocaron los materiales en crisoles cerámicos, a una temperatura y tiempo de residencia de 900 °C y 1 hora respectivamente.

Fase 2: Activación a través de molienda de las arcillas calcinadas, ceniza de paja de caña y filler calcáreo.

Fase 3: Aplicación y estudio en microhormigones

Se fabricaron probetas de microhormigón de 40x40x160 mm, según los requerimientos de la norma cubana NC 54-207, manteniendo 30% de sustitución del cemento por las adiciones. Para ello se empleó cemento Portland ordinario P350 y agregado calcáreo, ambos usados comúnmente por la industria de la construcción en Cuba. Fue usado un aditivo químico líquido superfluidificante reductor de agua al 1% del peso total de aglomerante, lo que permitió disminuir la relación agua/aglomerante a 0.4. El agregado utilizado fue una arena artificial procedente de la trituración de rocas calizas. Esta fue tamizada para conformar tres fracciones, combinadas de forma tal que se optimizara el por ciento de vacío a ocupar por la pasta cementante. La fracción gruesa (2.5-5.0 mm) representó el 50% del peso total de agregado, mientras que la media (0.5-2.5 mm) y la fina (0-0.5 mm) correspondieron al 25% respectivamente. Estas muestras fueron ensayadas para determinar su resistencia a la compresión a 1, 7 y 28 días. Los resultados se muestran en la Figura 2.

El efecto del uso de las puzolanas sobre la durabilidad del hormigón fue evaluado a partir de comparar entre las diferentes mezclas, con o sin adición, los resultados del ensayo de absorción de agua, obtenidos según la norma cubana NC 345:2005 "Hormigón endurecido - Determinación de la absorción de agua por capilaridad".

Las muestras a ensayar se tomaron a partir de seccionar una probeta de 40 x40x160 mm en láminas de 20 a 30 mm de espesor. Seguidamente, éstas fueron pre acondicionadas a equilibrio de humedad, el cual se logró con un secado a 50 °C durante 48 horas hasta peso constante. Luego de enfriadas a temperatura ambiente, las áreas laterales de las muestras se cubrieron con parafina y se les determinó en ese momento el peso inicial (o perfectamente seco). Posterior a ello, se colocaron sobre un lecho de arena fina de no más de 10mm de espesor en un recipiente estanco que contenía una altura de agua de aproximadamente 5mm por encima del lecho de arena y se midió en el tiempo la penetración del líquido por medio de la diferencia de peso. Los intervalos de las mediciones fueron de 5, 10, 15, 30 min; 1, 2, 3, 4, 6 horas; 1, 3, 5, y 7 días a partir del inicio del ensayo. Todas las muestras de microhormigones fueron evaluadas a 1, 7 y 28 días de fabricado el material. Para la obtención de los resultados de absorción de agua por capilaridad se tomaron los valores promedios de las mediciones hechas en 5 especímenes para cada mezcla a cada edad, representados en la Figura 4. En el caso de la sorptividad se tomaron para el cálculo los 10 primeros valores de absorción de agua para cada curva y se realizó un promedio de los resultados obtenidos para 5 especímenes para cada muestra a cada edad. Estos resultados se representan en la Figura 6. La sorptividad fue obtenida, para cada muestra y edad de ensayo, según la expresión:

$$i = S\sqrt{t}$$

i: volumen de agua absorbido por unidad de sección transversal (mm) ó (mm<sup>3</sup>/mm<sup>2</sup>)/

Volume of absorbed water per transverse section unit (mm) or (mm<sup>3</sup>/mm<sup>2</sup>)

S: sorptividad/sorptivity (mm/vs)

t: tiempo/time (s)

La porosidad capilar fue determinada al relacionar porcentualmente la masa completamente seca de las muestras analizadas con sus valores de peso saturado sin humedad superficial. Las muestras, luego de concluir el ensayo de capilaridad a los 7 días, se sumergieron durante 48 horas en un recipiente con agua, tomándose los valores de su peso en el aire sin humedad superficial. Los resultados se expresan en la Figura 5.

Con vista a evaluar en los microhormigones la influencia de la arcillas calcinadas en la hidratación del cemento a escala microestructural, se realizó un análisis de energía dispersiva por rayos-X (EDX por sus siglas en inglés) mediante el uso de la microscopía electrónica de barrido (SEM por sus siglas en inglés).

Esta técnica permitió determinar las relaciones atómicas, tanto en el C-S-H interno como externo, para así poder comparar químicamente las composiciones de hidratos similares en diferentes sistemas cementicios, y de esta forma poder determinar las fases anhidras e hidratadas en las muestras estudiadas. Para ello, las muestras fueron preparadas a partir de rodajas tomadas a las probetas de microhormigón, las cuales fueron impregnadas en resina para conformar las secciones pulidas. Básicamente se comparó el sistema más puro en arcilla (AS-900) con la referencia de portland puro (CPO) a los 28 días, tanto para el C-S-H interno como el externo (Figura 8 y 9 respectivamente).

### 3. Resultados y Discusión

#### 3.1 Análisis de los resultados en microhormigones.

Los autores del presente trabajo, con vista a una aplicación práctica de los resultados obtenidos en trabajos precedentes a nivel de pastas y morteros, decidieron realizar un escalado y evaluación en microhormigones. Esto serviría como premisa de su utilización en las tecnologías existentes que emplean este tipo de mezcla. El microhormigón es un mortero estructural, el cual se fabrica con áridos de diferente granulometría, fino, grueso y medio a una escala reducida, donde el tamaño del árido no excede los 10 o 12 mm, pudiendo ser menor en algunos casos según el producto para el cual va a ser utilizado.

#### Resistencia a la compresión.

La Figura 2 muestra los resultados del ensayo de resistencia a la compresión para las muestras fabricadas de microhormigón. Todos los valores a los 28 días fueron superiores a los 45 MPa y el sistema AS-900 alcanzó el máximo de valores con aproximadamente 80 MPa, siendo esto consecuente con los resultados previos obtenidos en morteros. La gráfica muestra una tendencia del suelo arcilloso calcinado (T-120) a incrementar sus valores a mayores edades, los que posiblemente lleguen a sobrepasar los correspondientes a aquellos de Portland puro. Estos valores superiores de resistencia a la compresión pueden ser producto de la reacción puzolánica desarrollada por estas adiciones, unido al efecto de mayor compacidad que confieren a la matriz cementante debido a su alta finura.



Para poder comparar el comportamiento de las arcillas calcinadas, tanto en morteros como en microhormigones, los valores de resistencia a la compresión fueron expresados en la figura 3 de forma porcentual respecto a los valores obtenidos en el filler correspondiente en cada caso (línea punteada). Importante señalar como los resultados en microhormigones (MC) son muy consistentes con aquellos obtenidos en morteros (ver Figura 3), manteniéndose la arcilla sedimentada y calcinada (AS-900) como el material más reactivo de todos. Además puede verse como aparecen a edades tempranas (1d), en los microhormigones con 30% de sustitución del cemento por puzolanas, resistencias a la compresión superiores a la mezcla de referencia con igual cantidad de cemento (sistema Filler). Este hecho indica las potencialidades de estos materiales para ser usados como adiciones minerales activas en sustitución del cemento, sin afectar considerablemente las exigencias, en procesos tecnológicos en cuanto a resistencia a la compresión a edades tempranas.

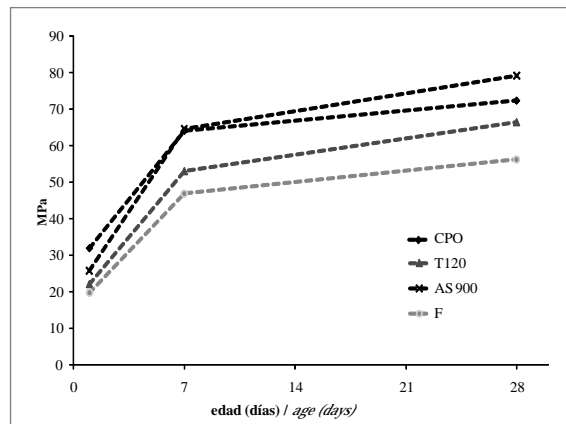


Figura 2. Resistencia a la compresión en microhormigones  
Figure 2. Compressive strength in micro-concretes

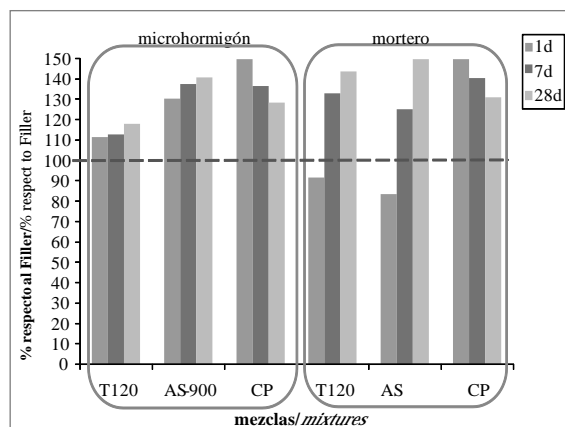


Figura 3. Comparación entre morteros y microhormigones  
Figure 3. Comparison between mortars and micro-concretes

Absorción de agua

Los cambios de la estructura de poros son determinantes en la durabilidad del hormigón. Su formación y desarrollo en el tiempo pudo evaluarse mediante un ensayo de absorción de agua por capilaridad (Figura 4), lo que permitió medir los valores de sorptividad para cada muestra (Figura 6). De esta forma pudo estudiarse el aporte de las adiciones minerales activas, como sustituyente del Cemento Portland Ordinario, en el comportamiento durable de los microhormigones fabricados.

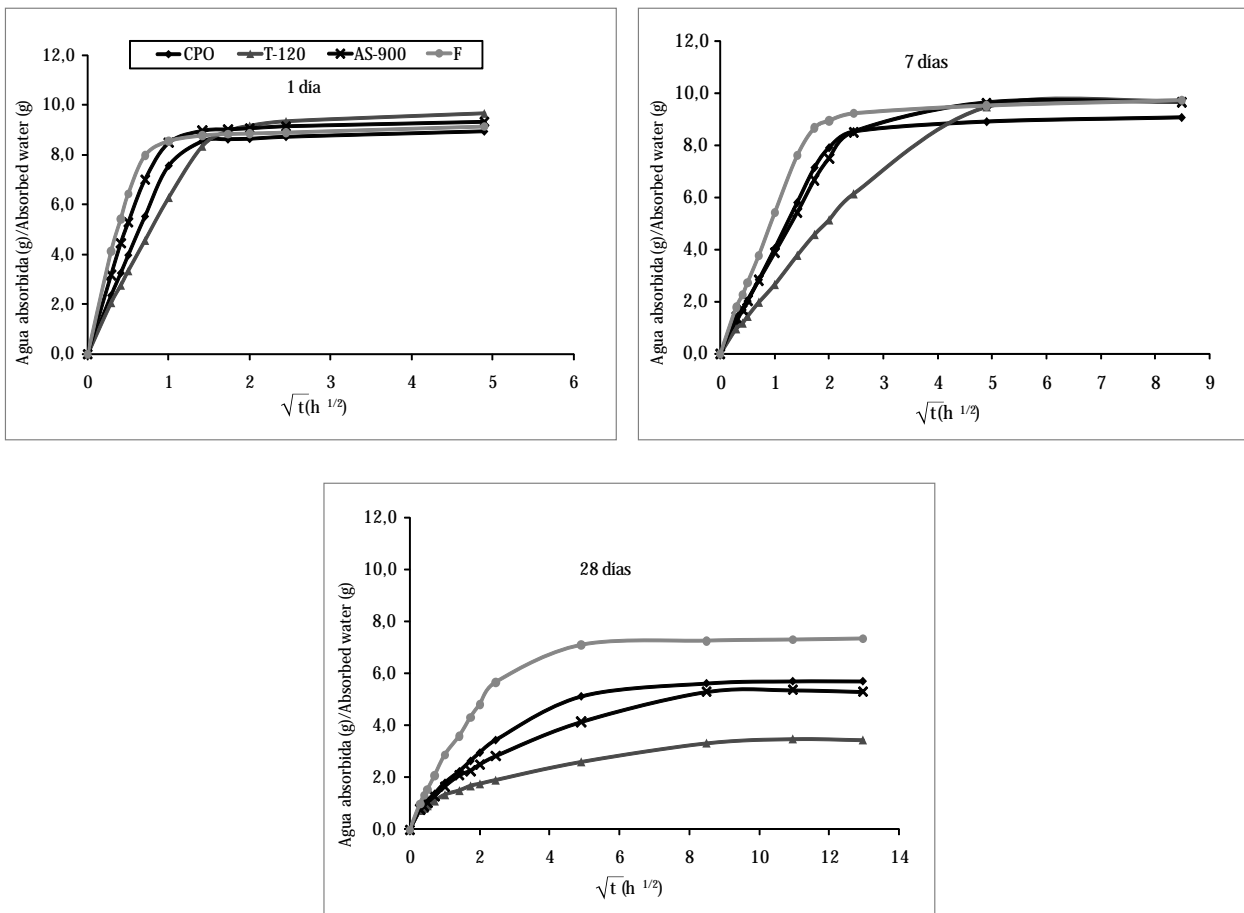


Figura 4. Absorción de agua en microhormigones  
 Figure 4. Water absorption in micro-concretes

Las curvas en la Figura 4 muestran una disminución de la absorción de agua en el tiempo para todos los especímenes, lo que indica una densificación de la microestructura debido a la formación de hidratos, ya que aumenta la compacidad y por tanto disminuye la porosidad. Este fenómeno se acentúa en el caso del suelo arcilloso calcinado (T-120), ya que a los 28 días es quien muestra los menores valores de absorción de agua. La alta finura de esta adición puede ser fundamental en los resultados para esta muestra, ya que pudiera predominar un efecto de compacidad o empaquetamiento entre las partículas.

Es importante como en las curvas de la Figura 4 para todas las edades es predominante el sistema filler (F) como el de menor valor de tiempo en el punto crítico (punto de inflexión de la curva a partir del cual no existe variaciones significativas en los valores de absorción de agua, se definirá como la intersección de dos líneas extrapolares, desde el punto de vista práctico es cuando el frente de agua ha avanzado hasta la parte superior), es decir que éste es el que presenta una saturación más rápida en el tiempo. Esto puede ser debido a que tiene menor contenido de productos de reacción, ya que se substituyó el cemento por un material casi inerte, lo que provoca un llenado insuficiente de la matriz cementante. Esto trae como consecuencia que se aumente la porosidad respecto a al resto de los sistemas, de ahí que se muestre como el de mayor absorción.

Puede verse en la misma figura como los valores totales de agua absorbida para todos los sistemas no parecen variar mucho, a diferencia de los puntos críticos para cada uno de ellos que sí muestran un desplazamiento hacia la derecha, símbolo este de consumo de mayor tiempo para alcanzar la saturación.

Otro factor importante en la durabilidad del material es la porosidad efectiva, que no es más que el volumen de agua que un hormigón podría absorber en condiciones dadas, los resultados se expresan en la Figura 5.

En esta Figura 5 puede observarse como en el transcurso del tiempo todos los materiales utilizados reducen el porcentaje de volumen de agua absorbida, ya que la estructura del hormigón es más densa, por lo que disminuye la porosidad. En el caso del suelo arcilloso calcinado T-120 se alcanza el menor porcentaje de porosidad a los 28 días, mientras que para la AS-900 se muestra muy similar al portland puro (CPO). Existe una tendencia clara a que el sistema fabricado con la arcilla sedimentada y calcinada AS-900 disminuya su porosidad a mayores edades por debajo de la muestra de microhormigón fabricada sin sustitución de cemento Portland.

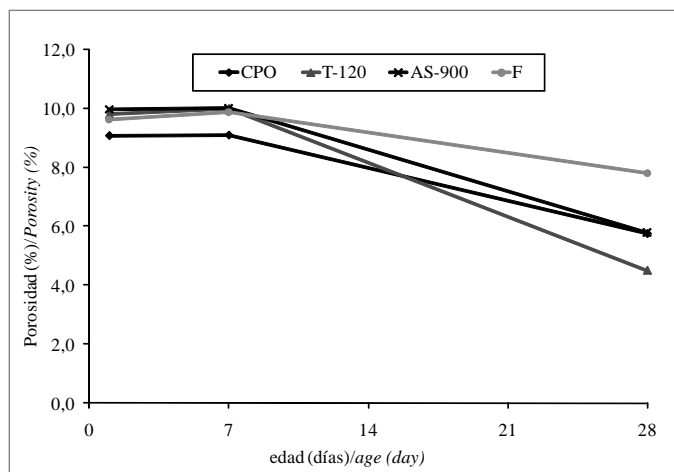


Figura 5. Porosidad efectiva  
 Figure 5. Effective porosity

Nuevamente como se muestra en la Figura 6 el suelo arcilloso calcinado (T-120) se muestra como la adición mineral de mejor comportamiento a lo largo del tiempo, siendo en este caso el que logra los valores más bajo de sorptividad a los 28 días. A esta misma edad, tanto para los microhormigones con 100% de cemento portland como en aquellos con un 30% de sustitución del mismo por arcilla sedimentada y calcinada, se muestran valores muy similares de sorptividad, los cuales indican una tendencia a alcanzar valores más inferiores para el caso del sistema AS-900, incluso pudieran llegar a sobrepasar a los de T-120 a mayores edades. Esto indica que, cuando se usa estos tipos de puzolana en sustitución del cemento pórtland, es posible disminuir el grado de penetración del agua dentro de la masa del hormigón, lo cual evita una acción más fuerte y directa de aquellos elementos agresivos que puedan afectar la durabilidad del material.

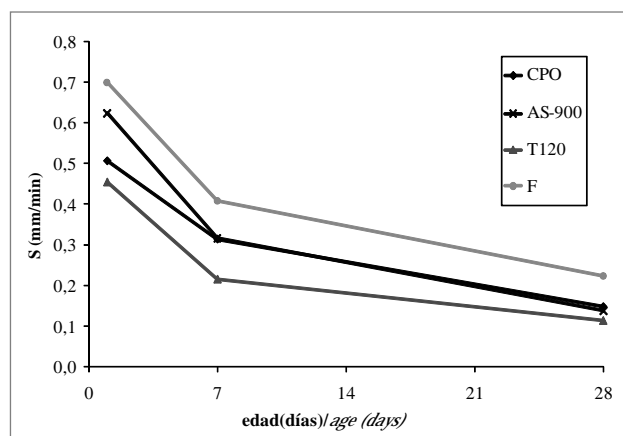


Figura 6. Sorptividad en microhormigones  
 Figure 6. Sorptivity in Micro-concretes

Análisis del C-S-H por EDX

Fueron confeccionadas secciones pulidas a las diferentes muestras de microhormigón para su estudio en EDX. Fue interés principal evaluar el aporte de las arcillas calcinadas en la microestructura cementicia del material, por lo que se comparó los resultados de la arcilla sedimentada y calcinada (AS-900) con los de portland puro (CPO). La Figura 7 muestra puntos representativos donde se realizaron los análisis, a) para el C-S-H interno y b) para el C-S-H externo.

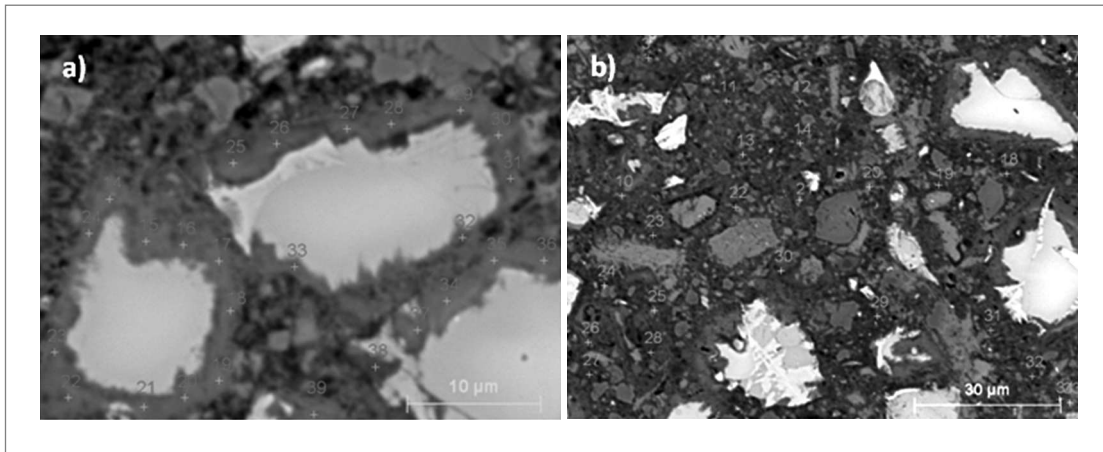


Figura 7. Ejemplo de puntos seleccionados para análisis de EDX en el a) C-S-H interno y b) C-S-H externo  
 Figure 7. Example of selected points to analyze internal C-S-H and external C-S-H by means of EDX

Las relaciones atómicas de los elementos encontrados en los puntos de análisis fueron ploteadas como Al/Ca vs. Si/Ca para el análisis de la variabilidad del C-S-H, mientras que los gráficos S/Ca vs. Al/Ca muestran la presencia y tipo de las fases de etringita (AFt) y monosulfos (AFm).

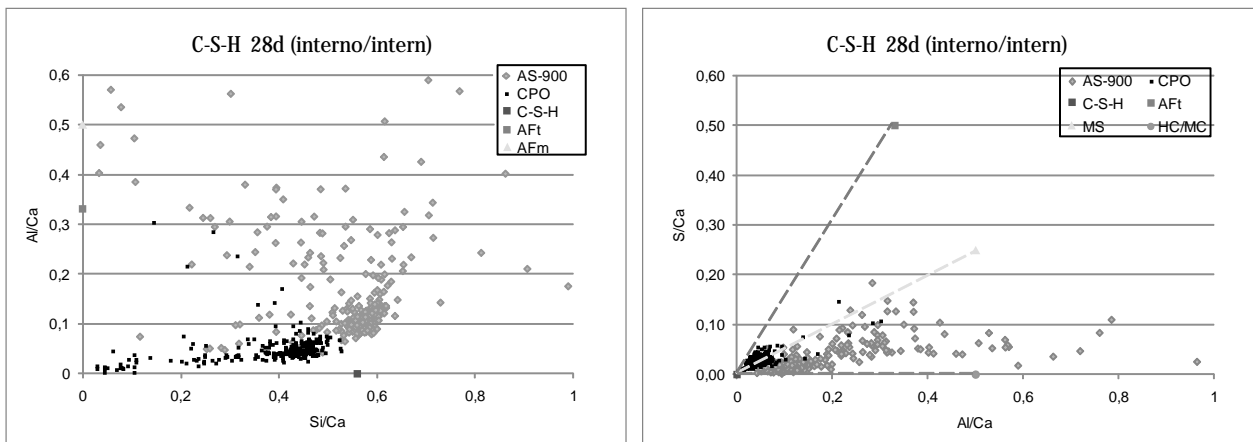


Figura 8. Análisis de EDX en C-S-H interno a los 28 días en microhormigones de AS-900 y CPO  
 Figure 8. EDX Analysis on internal C-S-H at 28 days for AS-900 and OPC micro-concretes

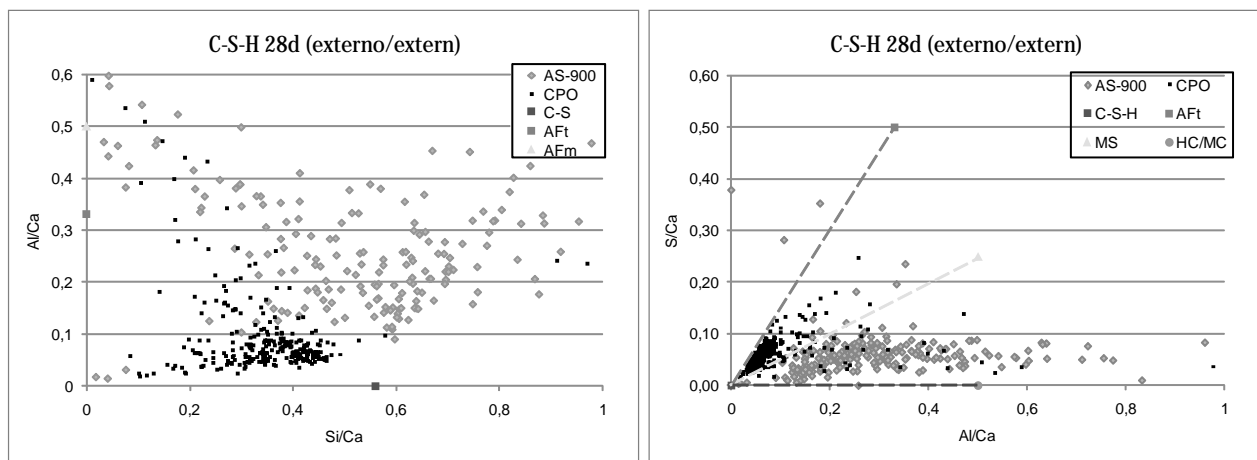


Figura 9. Análisis de EDX en C-S-H externo a los 28 días en microhormigones de AS-900 y CPO  
 Figure 9. EDX Analysis on external C-S-H at 28 days for AS-900 and OPC micro-concretes

En el gráfico de la izquierda de las Figuras 8 y 9 puede verse como existe una mayor variabilidad en las composiciones para el C-S-H externo que para el interno, debido a la coexistencia de diversas fases hidratadas y anhidras. Cuando la esfera de interacción de los electrones dentro de la muestra abarca más de una fase, la técnica de EDX ofrece un promedio de las composiciones; de ahí que en el C-S-H externo se encuentre una distribución más dispersa de los puntos.

Por otro lado, puntos ubicados a altas relaciones de Si/Ca y Al/Ca, para el C-S-H externo (Figura 9 izquierda), indican la presencia de partículas de arcilla intermezcladas con el C-S-H. Además, puede verse, tanto para el C-S-H interno como externo, que la adición de arcilla calcinada favorece la formación de fases de monosulfo (AFm), principalmente del tipo hemicarbo y monocarbo (HC/MC), tal y como ha sido referenciado en trabajos precedentes (Fernandez, 2009), y es consistente con el aporte adicional de aluminio realizado por la arcilla calcinada, que reacciona con el carbonato de calcio que se encuentra en el cemento como extensor. En resumen, la adición de arcilla calcinada como sustitución del cemento Portland provoca un desarrollo en el proceso de hidratación y en la formación de productos más estables a partir de dicha reacción.

#### 4. Conclusiones

Luego del análisis de los resultados obtenidos, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- En el ensayo de resistencia a la compresión, los mejores resultados a 28 días se encontraron para los microhormigones fabricados con la arcilla sedimentada y calcinada (AS-900). A esta edad, el incremento de la resistencia a la compresión de esta adición, producto de la reacción puzolánica, fue de aproximadamente 40% respecto al sistema con filler, el cual se comporta como un material relativamente inerte y posee igual cantidad de cemento.
- El uso en microhormigones de adiciones minerales activas reduce la porosidad capilar del material, destacándose el suelo arcilloso calcinado con una disminución de más del 20% respecto a la referencia de cemento puro a los 28 días. Al parecer, la alta finura de esta puzolana influye en la estructura interna de poros capilares, lo cual provoca una mayor impermeabilidad respecto al resto de los microhormigones fabricados.
- Los microhormigones obtenidos, al usar arcillas calcinadas en sustitución del cemento Pórtland ordinario, muestran una reducción de su sorptividad a los 28 días respecto a la referencia de Pórtland puro. Los mejores resultados se obtuvieron para el suelo arcilloso calcinado (T-120), debido a la alta finura alcanzada por esta adición después del proceso de molienda, unido al aporte de la reacción puzolánica desarrollada.
- La adición de arcilla calcinada como sustitución del cemento Pórtland favorece el proceso de hidratación del cemento, lo que provoca la formación de fases hidratadas más estables del tipo hemicarbo y monocarbo.
- Los resultados obtenidos en este estudio, a partir de los ensayos macroestructurales de absorción de agua por capilaridad y a escala micro de análisis de energía dispersiva por rayos-X (EDX), demuestran las potencialidades de los suelos arcillosos, incluso de bajo grado de pureza, en conferir un mejoramiento de la durabilidad en hormigones producidos con estos materiales cementicios suplementarios.

---

## 5. Referencias / References

- Agarwal S. K. (2006), Pozzolanic activity of various siliceous materials, *Cement and Concrete Research*, 36, 1735–1739.
- Al-Akhras N. M. (2006), Durability of metakaolin concrete to sulfate attack, *Cement and Concrete Research*, 36, 1727–1734.
- Bai J., et al. (2003), Chloride ingress and strength loss in concrete with different PC–PFA–MK binder compositions exposed to synthetic seawater, *Cement and Concrete Research*, 33, 353–362.
- Castillo Lara R., et al. (2010), Activación de arcillas de bajo grado a altas temperaturas, *Revista Ingeniería de Construcción*, 25(3), 329–352.
- Fernandez R. (2009), *Calcined Clayey Soils as a Potential Replacement for Cement in Developing Countries*. Ph. D., École Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Gonçalves J. P., et al. (2009), Performance evaluation of cement mortars modified with metakaolin or ground brick, *Construction and Building Materials*, 23, 1971–1979.
- Justice J. M. (2005), *Evaluation of metakaolins for use as Supplementary Cementitious Materials*. Master of Science in Materials Science and Engineering, Georgia Institute of Technology.
- Lawrence P., et al. (2005), Mineral admixtures in mortars effect of type, amount and fineness of fine constituents on compressive strength, *Cement and Concrete Research*, 35, 1092–1105.
- Mehta P. and Monteiro P. (2001), Chapter 8: Admixtures. *Concrete Microstructure, Properties and Materials*.
- Muhammed Basheer P. A. (2001), Permeation Analysis. In: Ramachandran, V. S. and Beaudoin, J. J. (eds.) *Handbook of Analytical Techniques in Concrete Science and Technology. Principles, Techniques, and Applications*. 685-692. Ottawa, Ontario, Canada: Noyes Publications / William Andrew Publishing, LLC Norwich, New York, U.S.A.
- Papadakis V. G. and Tsimas S. (2002), Supplementary cementing materials in concrete. Part I: efficiency and design, *Cement and Concrete Research*, 32, 1525–1532.
- Sabir B. B., et al. (2001), Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review, *Cement and Concrete Composites*, 23, 441-454.
- Talero R. (2005), Performance of metakaolin and Portland cements in ettringite formation as determined by ASTM C 452-68: kinetic and morphological differences, *Cement and Concrete Research*, 35, 1269– 1284.