

ESTUDIO SOBRE PASTAS Y MORTEROS DE CEMENTO PORTLAND CON REEMPLAZO POR LOZA SANITARIA

STUDY ON PASTES AND MORTARS OF PORTLAND CEMENT WITH REPLACEMENT BY SANITARY WARE

Silvina Zito¹, Edgardo Irassar¹, Viviana Rahhal¹

(1) Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería, Av. del Valle 3757,
7400 Olavarría, Buenos Aires – Argentina
(e-mail: silvina.zito@gmail.com)

Recibido: 30/12/2015 - Evaluado: 19/02/2016 - Aceptado: 08/03/2016

RESUMEN

En este trabajo se analiza el uso de Loza Sanitaria como reemplazo del cemento portland. Los reemplazos utilizados fueron 8, 24 y 40 % en peso; los ensayos empleados contemplaron la evolución de la hidratación desde los primeros minutos (hasta 48 horas) a través de la calorimetría, y a partir de los dos días (hasta 28 días) por medio de la velocidad de fijación del hidróxido de calcio, el agua químicamente combinada, la resistencia mecánica a flexión y a compresión y la porosidad. Los resultados mostraron que a medida que aumenta el porcentaje de reemplazo, a las primeras edades del efecto de dilución solapa y se contraponen con el de estimulación física; y a la edad de 28 días todas las mezclas presentan además de la estimulación física también la química, por la reactividad puzolánica.

ABSTRACT

In this paper the Sanitary Faience, use as a replacement for portland cement is analyzed. Replacements used were 8, 24 and 40% by weight; the assays used contemplated the evolution of hydration from the first minutes (up to 48 hours) by calorimetry, and from 2 days (to 28 days) by the fixing of calcium hydroxide, water chemically combined, mechanical flexural and compression and porosity. The results showed that with increasing the percentage of replacement, at the earliest ages the effect of dilution overlaps and contrasts with the physical stimulation; and at the 28 days all blends showed, as well as physical stimulation, chemistry stimulation, trough of pozzolanic reactivity.

Palabras claves: loza sanitaria, calorimetría, puzolanidad, resistencia mecánica

Keywords: sanitary faience, calorimetry, pozzolanicity, mechanical strength

INTRODUCCIÓN

El cemento y su principal aplicación, el hormigón, son componentes vitales para la industria de las construcciones civiles. La sociedad moderna, se ha desarrollado en base al uso creciente del hormigón a nivel mundial, a través de las más variadas formas de aplicación, convirtiéndose en un material que después del agua, es el de mayor consumo (Brunatti, 2014). La producción mundial de cemento en el año 2014 fue de 4180 millones de toneladas (Hendrik, 2015) y se debe esperar aún un aumento, sobre todo en los países cuyas economías se encuentran en crecimiento.

La industria del cemento afecta en gran medida al medio ambiente. Por un lado, por el gran volumen de materia prima no renovable necesario para producir el clinker (la fabricación de cemento implica la extracción de 1,7 toneladas de roca para producir 1 tonelada de clinker) y por otro lado por las emisiones de CO₂ generadas durante la producción de cemento portland (la producción de 1 tonelada de cemento para la industria del hormigón genera 0,55 toneladas de CO₂ y requiere un adicional de 0,39 toneladas de CO₂ por las emisiones del combustible, lo que representa un total de alrededor de 0,94 toneladas de CO₂ por cada tonelada de cemento) (Gartner, 2004). El sector de la producción del cemento a nivel mundial, es responsable del 5% de las emisiones de CO₂ (Brunatti, 2014). Para mejorar esta situación desde hace unas décadas la normativa mundial contempla el uso de adiciones minerales activas, entre ellas: filler calcáreo, puzolanas (de origen natural o resultantes de un proceso de calcinación), cenizas volantes, humo de sílice, escorias granuladas de alto horno.

Por otra parte en el proceso de fabricación de materiales cerámicos sanitarios, se genera un porcentaje de productos no aptos para su comercialización, que se vierten directamente como residuos. De acuerdo con los datos proporcionados por la industria de la cerámica, más de 300 millones de unidades de productos de cerámica sanitarios fueron producidas en todo el mundo en el año 2011 (Reig *et al.*, 2016). El porcentaje de producto rechazado a la venta depende del tipo de planta, de los requerimientos del producto y otras consideraciones técnicas (Medina *et al.*, 2011). Si a esto se le suman los artefactos sanitarios, provenientes de las demoliciones, entonces, se generan grandes cantidades de residuos cerámicos sanitarios tanto procedentes de la industria cerámica como de las demoliciones, que son crecientes y que necesitan una disposición, pudiendo ser reconsiderados como "nuevos" materiales de construcción.

La base de la cerámica blanca son las arcillas caolínicas y los caolines. El caolín es el que le imparte la blancura y transparencia, así como la plasticidad para su moldeo. La cerámica fabricada con caolín se cuece a altas temperaturas (1200 - 1400°C); estas temperaturas son menores a la temperatura de clinkerización (1450 °C), por lo tanto la cocción de los cerámicos sanitarios implica un menor consumo de energía con la consecuente disminución en la emisión de CO₂. La composición química de los caolines tiene cierta variabilidad pero siempre cuenta con un alto contenido de SiO₂, Al₂O₃ y un bajo contenido en hierro y álcalis (Galán & Aparicio, 2006).

En las últimas décadas se han propuesto alternativas a estos materiales aprovechando los residuos de la industria cerámica, los cuales ya han pasado por un proceso a altas temperatura, en particular los artefactos sanitarios. Autores como Medina *et al.* (2011, 2012a, 2012b, 2013a) y Halicka *et al.* (2013), analizaron el uso de residuos de cerámica sanitaria como agregado grueso en la producción de hormigón reciclado. Medina *et al.* (2013b), también estudiaron el efecto de la sustitución parcial de cerámicos sanitarios y residuos de la construcción y de la demolición sobre las propiedades reológicas y la cinética de hidratación de pastas cementíceas. Otros autores como Reig *et al.* (2016), analizaron la actividad puzolánica de los residuos sanitarios en sistemas de cemento portland para investigar el potencial uso de estos residuos para formar nuevos aglutinantes por medio de activación alcalina.

Con el fin de contribuir a la preservación del medio ambiente, a la conservación de los recursos naturales no renovables y a un aprovechamiento racional y ahorro de energía, en este trabajo se analiza el reemplazo de cemento por residuos de artefactos sanitarios provenientes de las demoliciones y de las industrias cerámicas.

Los porcentajes de reemplazo utilizados fueron 8, 24 y 40 en peso; los ensayos en pastas contemplaron la evolución de la hidratación desde los primeros minutos (y hasta las primeras 48 horas) a través de la calorimetría permitiendo detectar los efectos tempranos de interacción en las reacciones; y a partir de los dos días (y hasta los 28 días) por medio de la evolución del hidróxido de calcio, y la determinación de la pérdida de masa hasta los 950°C. En morteros los ensayos empleados fueron resistencia mecánica a flexión y a compresión, con medición de la fluidez y la porosidad.

MATERIALES Y METODOS

Los materiales seleccionados para realizar las experiencias fueron, un cemento portland normal (CP40), un residuo proveniente de la trituración de Loza Sanitaria y arena normalizada. Como agua de mezclado se utilizó agua potable de red, excepto para evaluar la evolución del hidróxido de calcio empleándose en este caso agua destilada. La composición química, densidad y superficie específica Blaine del cemento y del residuo se presentan en la Tabla 1. A partir de los resultados de la composición química, se obtuvo, mediante las ecuaciones de Bogue, la composición potencial del cemento portland: 60.0 % C₃S, 16.4 % C₂S, 3.8 % C₃A, 11.5 % C₄AF, con una cantidad de yeso de 5.5 %. Con respecto a los minerales componentes de la Loza Sanitaria se obtuvieron por difracción de rayos X (Figura 1) y fueron cuarzo (SiO₂) y mullita (Al₆Si₂O₁₃); también se pudo apreciar un halo amorfo aproximadamente entre 15 y 35° de 2θ representativo de la fase hidráulicamente reactiva de cualquier adición puzolánica. Las muestras de ensayo se prepararon a partir del reemplazo en peso de cemento por 0, 8, 24 y 40 % de Loza Sanitaria.

La evolución de la velocidad de liberación de calor, fue realizada por medio de un calorímetro de conducción para pastas. La temperatura de base para las mediciones fue de 25°C. Los registros se completaron durante las primeras 48 horas de hidratación, la relación agua/material cementíceo (a/mc) empleada fue de 0.5.

La evolución del hidróxido de calcio (HC) (actividad puzolánica) se determinó mediante el ensayo de Frattini. El método consiste en la determinación de la cantidad de CaO y OH⁻ en el agua de contacto con las muestras almacenadas a 40°C a una determinada edad, en este caso se consideraron las edades de 2, 7 y 28 días. La preparación del ensayo consiste en el acondicionamiento tanto del agua destilada como de las muestras de material a 40°C, la mezcla se realiza con una relación a/mc de 5. El principio del método radica en que una vez iniciada la hidratación del cemento el hidróxido de calcio liberado durante la misma es lixiviado a la solución acuosa que se sobresatura en HC, entonces el punto representativo se ubica por encima de la curva de solubilidad del HC en disolución alcalina. Cuando el cemento tiene incorporada una adición con actividad puzolánica, ésta consume el HC y el punto representativo se ubica debajo de la curva de solubilidad mostrando así, actividad puzolánica.

También se determinó a través de la pérdida de masa, el agua químicamente combinada de acuerdo al procedimiento propuesto por Powers (Powers, 1949), para esto fue necesario triturar fragmentos de pastas, elaborados con una relación a/mc de 0,5, y calcinarlos entre 105 y 950°C. Cuando la muestra se seca a 105°C se pierde el agua libre, mientras que el agua no evaporable, o sea químicamente combinada, es la que se obtiene cuando se calcina a 950°C.

Tabla 1: Composición química y características físicas del cemento y la Loza Sanitaria.

Composición química (%)										Características físicas		
Óxidos	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	PPC	Característica	Densidad, kg/m ³	SEB, m ² /kg
Cemento	21.52	3.82	3.76	64.33	0.78	0.07	1.06	-	2.11	Cemento	3150	315
Loza	70.78	19.02	0.87	0.68	0.29	2.67	4.61	0.29	0.55	Loza	2602	534

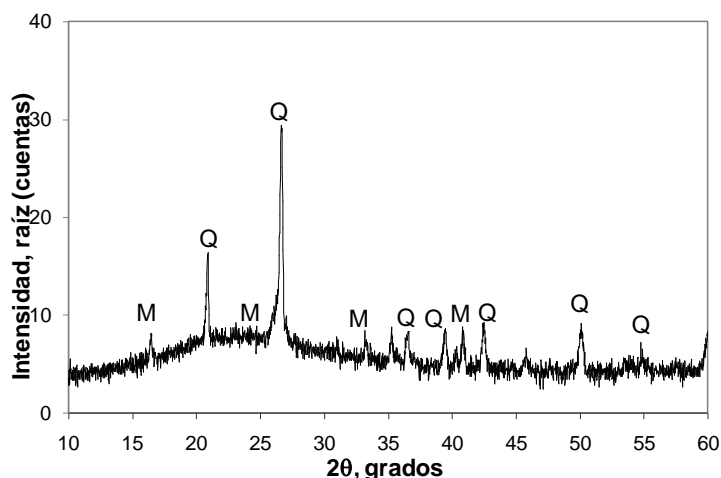


Fig. 1: DRX de la Loza Sanitaria. Q: cuarzo, M: mullita.

Los morteros se elaboraron con una relación arena/material cementíceo de 3 y una relación a/mc de 0.5, previo al moldeo de las probetas prismáticas de 40x40x160 mm³ se determinó la fluidez (IRAM 1634, 1963); luego del moldeo (IRAM 1622, 2006) las probetas permanecieron en sus moldes en cámara húmeda durante 24 horas y se estacionaron envueltas en film de polietileno a temperatura de laboratorio hasta las edades de ensayo. La resistencia a flexión se determinó sobre 3 probetas por edad, mientras que la resistencia a compresión resultó del promedio de 6 valores (IRAM 1622, 2006). Para la realización de los ensayos de resistencia se utilizó una prensa Instron 33R4485. Luego del ensayo a compresión, se utilizaron fragmentos de los morteros que se trituraron a un tamaño menor a 4,75 mm para obtener las muestras para determinar la porosidad. La misma se obtuvo por diferencia del peso entre la muestra húmeda y la muestra seca a 100°C, hasta peso constante, en relación con el peso seco, expresándose en porcentaje.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se exponen y analizan los resultados obtenidos en la parte experimental sobre las series de mezclas estudiadas.

Pastas

En la Figura 2 se presentan las curvas calorimétricas realizadas durante las primeras 48 horas, para la muestra patrón y para las muestras con 8, 24 y 40 % de reemplazo de cemento por Loza Sanitaria. En las mismas se puede observar una primera etapa con una elevada velocidad de liberación de calor, producto de la hidrólisis inicial de los componentes del cemento, que posteriormente disminuye para registrarse el primer mínimo. En el caso de la muestra patrón el primer mínimo se registró aproximadamente a los 70 min y con una velocidad 0,21W/g. Por otra parte en las muestras con Loza Sanitaria y a medida que el porcentaje de reemplazo aumentó se observó un retraso en el tiempo del primer mínimo, así como también una disminución de la velocidad (75 min con 0,24 W/g, 80 min con 0,20 W/g y 135 min con 0,14 W/g para 8, 24 y 40 % de reemplazo, respectivamente), evidenciando el efecto de la dilución del cemento.

Luego el período durmiente, se caracteriza por la baja velocidad de liberación de calor pues la formación de ettringita sobre los granos de cemento retarda el progreso de la hidratación. En este período las pastas permanecen plásticas y trabajables. A medida que aumenta el porcentaje de reemplazo el período durmiente es más largo, este hecho está asociado al tiempo necesario para alcanzar el pH que desencadene la prosecución de las reacciones, manifestándose así nuevamente el efecto de dilución y consecuentemente el efecto de estimulación dado que es necesario que la menor cantidad de cemento se hidrate más para lograr dicho pH necesario.

A continuación la formación de gel de C-S-H produce una aceleración de las reacciones de hidratación, dando origen a la etapa de aceleración, en la cual se registra el segundo máximo en la curva y se produce el fraguado de las pastas. En el caso de la muestra patrón el máximo se alcanzó a los 1010 min con una velocidad de 1,46 W/g; mientras que en las muestras con reemplazos se alcanzó después (1020 min con una velocidad de 1,19 W/g, 1040 min con 1,15 W/g y 1035 min con 0,94 W/g, para las muestras con 8, 24 y 40 % de reemplazo, respectivamente). En este segundo máximo se observa claramente la disminución en la velocidad de liberación de calor a medida que el porcentaje de reemplazo aumentó, confirmando una vez más la dilución del cemento.

A partir del segundo máximo, se produce la desaceleración de las reacciones de hidratación y en consecuencia de las velocidades de la liberación de calor, las cuales prosiguieron a baja velocidad. El final del ensayo se consideró a 48 horas.

Finalmente en la Tabla 2 se presenta el calor total desarrollado durante las primeras 48 horas de hidratación de las mezclas. Los valores obtenidos ponen de manifiesto el efecto de dilución del cemento portland por la adición de la Loza Sanitaria, por haber resultado ser siempre los valores de calor total de las mezclas menores que el del patrón, e ir disminuyendo a media que el porcentaje de reemplazo aumentó. Pero por otra parte, se evidenció la estimulación de la hidratación ejercida por la adición ya que el valor de calor total de las mezclas con 24 y 40 % de reemplazo por Loza Sanitaria fue mayor al calor total generado por el proporcional del patrón.

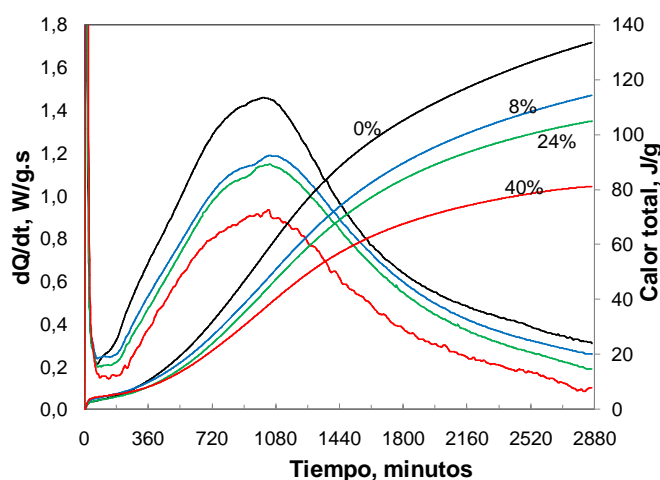


Fig. 2: Curva calorimétrica de los cementos con contenido variable de Loza Sanitaria.

Tabla 2: Calor total de hidratación liberado. Edad: 48hs.

% de reemplazo por Loza Sanitaria	0	8	24	40
Calor total (kJ/kg)	133,92	114,62	105,16	81,31
Calor total prop. patrón (kJ/kg)	-	123,20	101,78	80,35

En la Figura 3 se muestran los resultados obtenidos del ensayo de Frattini, a las diferentes edades y para los porcentajes de reemplazo estudiados. En esta figura la curva de solubilidad del hidróxido calcio demarca la zona de puzolanidad debajo de ella y la zona de no puzolanidad por encima.

A 2 días, los resultados de las muestras con Loza Sanitaria se ubican por encima de la curva de solubilidad, arriba y a la izquierda del cemento portland, dicha posición muestra por una parte el efecto de dilución que la Loza Sanitaria ejerce sobre el cemento portland, dado por la disminución de la $[OH^-]$; pero también se observa

estimulación de la hidratación debido al nivel superior de la $[CaO]$, a pesar de la dilución que causan los diferentes porcentajes de reemplazo. Ambos efectos de dilución y estimulación citados, se incrementan con el aumento del porcentaje de reemplazo.

A 7 días, todas las mezclas con Loza Sanitaria presentan un consumo de CaO , evidenciado por la disminución de la $[CaO]$, que es atribuida a la reacción puzolánica de la Loza. A medida que el porcentaje de reemplazo es mayor el consumo también lo es, la muestra con 40% de reemplazo se ubica por debajo de la isoterma de solubilidad. Por otra parte, la $[OH^-]$ se mantiene dentro del rango de valores determinados a los 2 días confirmando la dilución expresada anteriormente. Sin embargo la permanencia de los valores de $[OH^-]$ a los 7 días con respecto a los 2 días puede deberse al mecanismo combinado del consumo por parte de la reacción puzolánica y a la liberación de álcalis por parte de la propia Loza (ver Tabla 1).

Finalmente a los 28 días, las mezclas presentan una disminución de la $[CaO]$ y un aumento de la $[OH^-]$, confirmando las consideraciones realizadas a 7 días, respecto de la actividad puzolánica fundamentalmente por la disminución de la $[CaO]$ y respecto a la liberación de álcalis por parte de la Loza Sanitaria por el aumento de la $[OH^-]$. Dicha actividad puzolánica también fue detectada por medio de la resistencia mecánica entre los 28 y los 90 días por otros autores (Reig *et al.*, 2016).

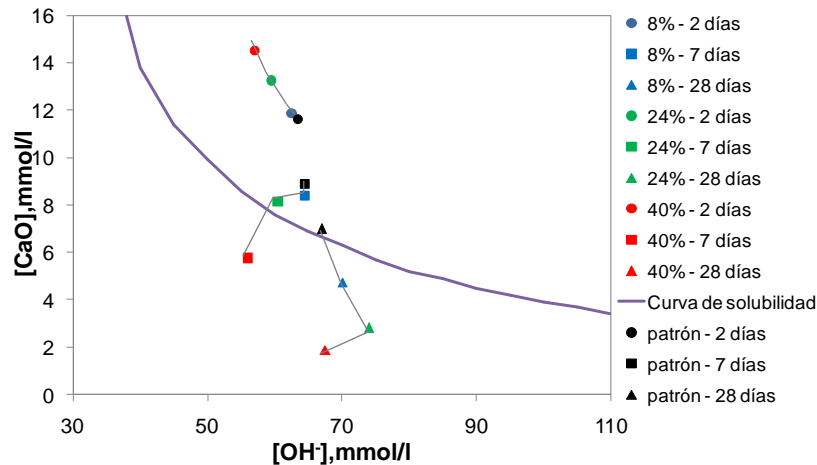


Fig. 3: Actividad puzolánica de los cementos con contenido variable de Loza Sanitaria.

En la Figura 4 se presentan los resultados de la cantidad de agua químicamente combinada total (AQC) en función del porcentaje de reemplazo para las edades de 2, 7 y 28 días. En ella se puede observar que a medida que aumenta la edad para un mismo porcentaje de reemplazo el AQC aumenta, representando el progreso de la hidratación. Además se puede apreciar que a medida que el porcentaje de reemplazo aumenta, para cualquier edad, el AQC disminuye mostrando la dilución; sin embargo para la muestra con 8% de reemplazo el AQC resulta similar o superior a la del patrón poniendo de manifiesto, simultáneamente, el efecto de estimulación de las reacciones de hidratación.

Morteros

Los resultados de los ensayos de fluidez se presentan en la Tabla 3. En la misma se observa que la fluidez se mantuvo entre el 115% y el 135%. La máxima fluidez la presenta el mortero con 8% de reemplazo, luego con el aumento del porcentaje de reemplazo, la fluidez va disminuyendo. Esto puede deberse a que los porcentajes en reemplazo son en peso y la Loza Sanitaria es menos densa y con mayor superficie específica que el cemento (ver Tabla 1). Entonces las partículas de cemento se reemplazan por una mayor cantidad de partículas más finas que

tienden a retener más el agua afectando la fluidez. En todos los casos se observa que la fluidez se mantiene con una variación de $\pm 10\%$ del patrón.

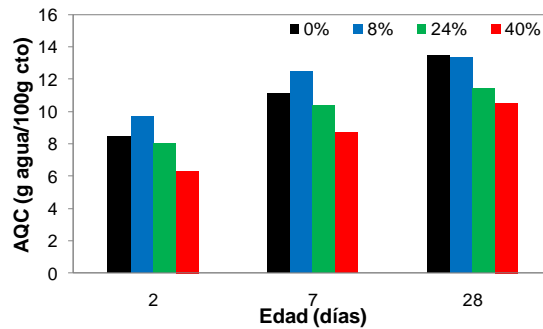


Fig. 4: Agua químicamente combinada de las pastas con contenido variable de Loza Sanitaria.

Tabla 3: Resultados de fluidez de las pastas con contenido variable de Loza Sanitaria.

% de reemplazo	0	8	24	40
Fluidez (%)	127,5	135,0	129,0	114,5

Los resultados de resistencia a flexión y a compresión se muestran en las Figuras 5 a y b. En ellas se puede observar que todas las muestras presentan un incremento de las resistencias con la edad y una disminución de las mismas con el incremento del porcentaje de reemplazo.

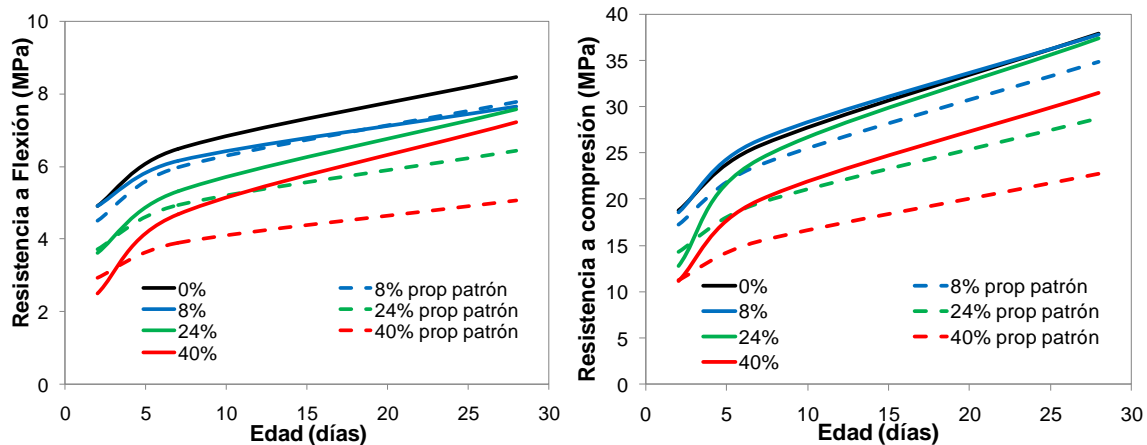


Fig. 5: a) Resistencia a flexión en morteros con reemplazo variable de Loza. b). Resistencia a compresión en morteros con reemplazo variable de Loza.

A todas las edades los morteros con residuo tuvieron una resistencia menor que la del patrón, excepto la muestra con 8% de reemplazo en resistencia a compresión que tuvo una resistencia similar a la del patrón. Ambos comportamientos pueden ser atribuidos simultáneamente a los efectos ya mencionados de dilución y estimulación física y química, respectivamente. La disminución de la resistencia está afectada por el efecto de dilución del cemento que se produce al reemplazar el mismo por Loza Sanitaria y por el aumento de la relación agua/cemento efectiva (0,54, 0,66 y 0,83 para 8, 24 y 40% de reemplazo, respectivamente). La relación agua/cemento efectiva se expresa como la cantidad de agua respecto de la cantidad de cemento sin considerar a la adición como material

cementíceo. Con respecto al efecto de estimulación, entre los 7 y los 28 días, puede observarse que todas las mezclas presentan sus resistencias superiores al proporcional del patrón (línea de trazos de las Figuras 5a y 5b); este efecto puede deberse en parte a la estimulación de la hidratación, por constituirse las partículas de la Loza en sitios de nucleación de los cristales de HC acelerando la liberación del mismo por parte del cemento y a la vez ser los sitios de nucleación para el desarrollo del gel C-S-H a partir de la sílice amorfa constitutiva de la propia Loza.

Los resultados de porosidad se presentan en la Figura 6, en la que puede verse que en todos los morteros con reemplazos por Loza, la porosidad es mayor a la del mortero patrón y aumenta a medida que el porcentaje de reemplazo se incrementa; sin embargo disminuye con la edad para cualquier mezcla. Dicha disminución es de 11.17% para el mortero patrón entre 2 y 28 días; mientras que llega al 21.60% en el mismo período para el mortero con 40% de reemplazo, esto último es otra evidencia de la reactividad puzolánica de la Loza.

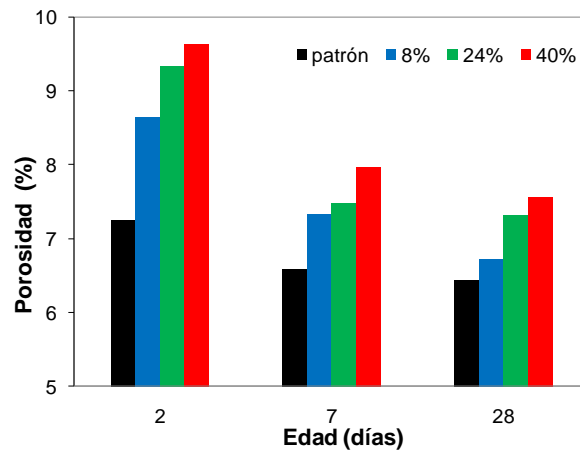


Fig. 6: Porosidad en morteros con contenido variable de Loza Sanitaria.

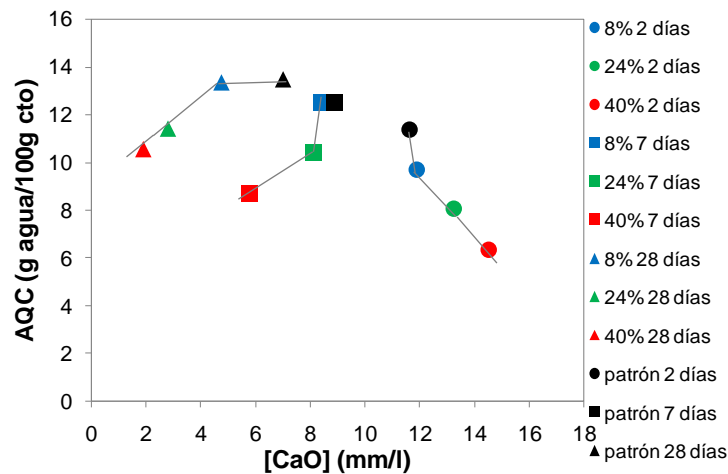


Fig. 7: AQC y [CaO] en pastas con contenido variable de Loza Sanitaria.

Del análisis conjunto de las variables estudiadas puede observarse que definitivamente la Loza Sanitaria tiene actividad puzolánica, y empieza a manifestarse entre los 2 y los 7 días como se muestra en la Figura 7 a través del consumo de CaO. También puede observarse que para cualquier porcentaje de reemplazo desde los 2 días la [CaO] disminuyó, a la vez que el agua químicamente combinada aumentó; llegando a tener las muestras con 8% de

reemplazo a 7 y 28 días la misma cantidad de AQC y menor [CaO] que el patrón. Por su parte las muestras con 24 y 40% de reemplazo a la vez que hacen más notoria la actividad puzolánica por presentar mayor consumo de CaO, también muestran la estimulación por el efecto físico de nucleación, dado que a los 2 días la [CaO] en vez de disminuir por la dilución, aumentó.

Con respecto a la evolución de los morteros (Figura 8); puede observarse que la resistencia (excepto a 2 días para 24 y 40% de reemplazo) siempre se ubica por encima del proporcional del patrón. Por otro lado la porosidad a edades menores que 28 días se presenta alternativamente con valores mayores o menores que el proporcional del patrón; pero a 28 días, siempre resulta menor que el proporcional del patrón, mostrando el refinamiento de poros provocado por la reacción puzolánica.

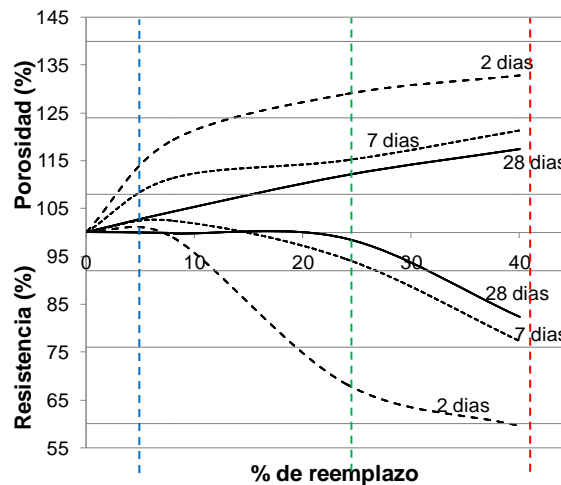


Fig. 8: Resistencia y porosidad en morteros con contenido variable de Loza Sanitaria

CONCLUSIONES

En base a los resultados obtenidos con los ensayos y materiales empleados en el presente trabajo, se puede concluir que:

- La incorporación de Loza Sanitaria durante las primeras etapas de hidratación del cemento, retrasa y alarga el período durmiente y atenúa la máxima velocidad de liberación de calor (segundo máximo) con el aumento del porcentaje de reemplazo.
- Los valores de calor de hidratación total, obtenidos al cabo de 48 horas, ponen de manifiesto los efectos de dilución del cemento portland y de estimulación de las reacciones de hidratación por la adición de la Loza Sanitaria.
- El agua químicamente combinada siempre resulta menor que el patrón, sin embargo siempre resulta mayor al proporcional del patrón mostrando la estimulación física por la nucleación y química por la aceleración de la hidratación.
- De acuerdo al ensayo de Frattini la Loza Sanitaria inicia su reacción puzolánica entre los 2 y los 7 días, dando a 28 días resultados positivos para todos los porcentajes de reemplazo.
- La Loza Sanitaria tiene incidencia sobre la fluidez ya que la fluidez disminuye con el aumento del porcentaje de reemplazo, sin embargo se mantiene para todos los casos en $\pm 10\%$ del patrón.
- La resistencia mecánica de los morteros puso en evidencia la estimulación física de nucleación y química de las reacciones de la Loza Sanitaria mostrándose sus valores en general por encima del proporcional del patrón desde las edades iniciales.

REFERENCIAS

1. Brunatti, C. (2014). *La industria del cemento y la sostenibilidad* (pp. 7-66). 1ª Edición: Editorial Asociación de Fabricantes del Cemento Portland, Buenos Aires-Argentina.
2. Galán, E. & Aparicio, P. (2006). *Materias primas para la industria cerámica*. Seminario de la Sociedad Española de Mineralogía. Utilización de Rocas y Minerales Industriales. 2, 31-48.
3. Gartner, E. (2004). Industrially interesting approaches to low-CO₂ cements. *Cement and Concrete Research*, 34, 1489-1498.
4. Halicka, A., Ogrodnik P. & Zegardlo, B. (2013). Using ceramic sanitary ware waste as concrete aggregate. *Materiales de Construcción*, 48, 295-305.
5. Hendrik G. van Oss (2015). Cement. U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January 2015, 38-39.
6. Medina, C., Juan, A., Frías, M., Sánchez de Rojas, M.I., Morán, J.M. & Guerra, M.I. (2011). Characterization of concrete made with recycled aggregate from ceramic sanitary ware. *Materiales de Construcción*, 61 (304), 533-546.
7. Medina, C., Frías, M. & Sánchez de Rojas, M.I. (2012a). Microstructure and properties of recycled concretes using ceramic sanitary ware industry waste as coarse aggregate. *Construction and Building Materials*, 31 (6), 112-118.
8. Medina, C., Frías, M., Sánchez de Rojas, M.I., Thomas, C. & Polanco, J.A. (2012b). Gas permeability in concrete containing recycled ceramic sanitary ware aggregate. *Construction and Building Materials*, 37 (12), 597-605.
9. Medina, C., Sánchez de Rojas, M.I. & Frías, M. (2013a). Properties of recycled ceramic aggregate concretes: water resistance. *Cement and Concrete Composites*, 40 (7), 21-29.
10. Medina, C., Banfill, P.F.G., Sánchez de Rojas, M.I. & Frías, M. (2013b). Rheological and calorimetric behavior of cements blended with containing ceramic sanitary ware and construction/demolition waste. *Construction and Building Materials*, 40 (3), 822-831.
11. Norma IRAM 1622 (2006). "Cemento Portland. Método de Determinación de la Resistencia a la Compresión y a la Flexión".
12. Norma IRAM 1634 (1963). "Cemento Portland. Método para la determinación de contenido de aire en morteros".
13. Powers, T.C (1949). The Non Evaporable Water Content of Hardened Portland Cement Paste. *ASTM Bulletin*, 158, 68-75.
14. Reig, L., Borrachero, M., Monzó, M., Savastro, JR., Tashima, M. & Payá, J. (2016). Use of ceramic sanitaryware as an alternative for the development of new sustainable binders. *Key Engineering Materials*, 668, 172-180.