

XI Congreso Internacional y 25° Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón

9 al 13 de septiembre de 2024

Córdoba - Argentina

Editores: Raúl Zerbino, Eva Sosa, Francisco Locati

Organizan:





Memorias del
**XI Congreso Internacional y
25° Reunión Técnica de la
Asociación Argentina de
Tecnología del Hormigón**

9 al 13 de septiembre de 2024

Córdoba – Argentina

Editores:

Dr. Raúl Luis Zerbino

Investigador Principal de CONICET, LEMIT-CIC

Dra. María Eva Sosa

Investigadora Asistente de CONICET, INTI, LEMIT-CIC

Dr. Francisco Locati

Investigador Independiente de CONICET, UCC, CICTERRA (CONICET-UNC)



Memorias del XI Congreso Internacional y 25° Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón / Editado por Raúl Luis Zerbino; María Eva Sosa; Francisco Locati - 1ª ed. - Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, 2024.

Memoria USB, PDF

ISBN 978-631-90193-1-5

1. Hormigón. 2. Materiales de Construcción. 3. Propiedades. I. Zerbino, Raúl Luis, ed. II. Sosa, María Eva, ed. III. Locati, Francisco, ed.
CDD 693.5007

Primera Edición en Argentina: septiembre de 2024

Edición Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón

Avda. Corrientes 2438, 4º Piso, oficina D.

TE 54 11 4952 6975

e-mail: aath@aath.org.ar

Foto de tapa y contratapa: Edificio de la UTN-FRC (Dra. Belén Raggiotti, UTN-FRC, Argentina).

Todos los derechos reservados.

Ninguna parte de esta publicación puede ser reproducida por algún medio gráfico, electrónico o mecánico, incluyendo los sistemas de fotocopias, registro magnetofónico o de alimentación de datos sin expreso consentimiento de la editorial.

Las contribuciones técnicas de esta edición fueron evaluadas por el Comité Científico-Tecnológico.

All rights reserved.

No part of this publication may be reproduced in any form or by any means graphic, electronic or mechanical, including photocopying systems, tape recording or data retrieval systems without the express permissions of the publisher.

Technical contributions of this edition were evaluated by the Scientific-Technological Committee.

Queda hecho el depósito que establece la ley N° 11723.

© Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, 2024.

ISBN 978-631-90193-1-5



ÍNDICE

Ciencia de materiales constituyentes	1
<hr/>	
Cuantificación de la emisión de polvo al ambiente en cal hidráulica y arcillas calcinadas	
ARISTARÁN L., PAULO C. y TIRONI A.	2
Disposición final del lodo residual de la remediación del lixiviado sanitario en matrices cementicias y calcáreas	
TIRONI A., VITALE P. y DELLETESSE M.I.	10
Efectos de la temperatura y la adición de aceite residual en la elaboración y las propiedades de agregados livianos	
MARTINEFSKY C., MOCCIARO A., IRASSAR E.F. y TIRONI A.	18
Evaluación de polvos obtenidos de la calcinación de arcillas para su uso como puzolanas	
MOCCIARO A., BERGER J., MARTINEFSKY C., CORDOBA G., IRASSAR F., BEUNTNER N., THIENEL K.-C. y TIRONI A.	26
Evaluación del deterioro de un pavimento de hormigón en la ciudad de Bahía Blanca. Estudios microestructurales y texturales-composicionales	
LOCATI F., BOURNOD C.N., BEREZOSKY J.J. y MARFIL S.A.	34
Influencia del área de proveniencia de los agregados de la cuenca del río Salí para la RAS	
TOMO F., FOGLIATA A.S., FALCONE D., ANAYA D., MARFIL S. y LOCATI F.	42
Morteros elaborados con cal hidráulica y elevado porcentaje de arcillas calcinadas	
ARISTARÁN L., TIRONI A., IRAPORDA C., CORDOBA G., y PAULO C.	50
Diseño de mezclas de hormigones	58
<hr/>	
Caracterización del comportamiento mecánico de mezclas de hormigón celular espumado simple y reforzado con fibras de polipropileno	
RETAMAL F.A. y ROUGIER V.C.	59
Influencia de las características de la pasta de cemento sobre las propiedades del hormigón drenante	
FOGLIATTI F.L., GODDIO R.C., NOGUERA VIVAS S.A., CARRASCO M.F., AVENDAÑO M.B. y PUGA R.E.	67
Método de ajuste de pastas y esqueleto granular para el diseño de hormigones livianos autocompactantes reforzados con fibra de acero	
PALACIO A.J., RAGGIOTTI B.B. y ROUGIER V.C.	75



EVALUACIÓN DE POLVOS OBTENIDOS DE LA CALCINACIÓN DE ARCILLAS PARA SU USO COMO PUZOLANAS

MOCCIARO, Anabella¹, BERGER, Johannes², MARTINEFSKY, Cecilia³, CORDOBA, Gisela³, IRASSAR, Fabián³, BEUNTNER, Nancy², THIENEL, Karl-Christian² y TIRONI, Alejandra³

¹ Centro de Tecnología de recursos Minerales y Cerámica CETMIC (CONICET-UNLP-CICPBA), Manuel B. Gonnet, Argentina, anamocciaro@cetmic.unlp.edu.ar

² Instituto de Materiales de Construcción (IWB), Neubiberg, Alemania

³ Facultad de Ingeniería, CIFICEN (CONICET, CICPBA, UNCPBA), Olavarría, Argentina, cmartinefsky@fio.unicen.edu.ar, gjp.cordoba@gmail.com, firassar@fio.unicen.edu.ar, atironi@fio.unicen.edu.ar

RESUMEN

En la producción industrial de arcillas calcinadas se generan polvos que deben ser recolectados para evitar su emisión al ambiente. En este trabajo se analiza el uso de estos polvos como material cementicio suplementario. Inicialmente se evalúa el comportamiento térmico de los mismos para identificar el grado de deshidroxilación de las arcillas. A partir de esto se fijan temperaturas de tratamiento térmico y se realiza un seguimiento por difracción de rayos X y por espectroscopia de infrarrojo de la ruptura de la estructura cristalina de las arcillas. También se determina la distribución de tamaño de partícula, la densidad y la superficie específica. Para estudiar su potencial uso como MCS se mide la reactividad por el método de Frattini y por el método rápido, relevante y confiable (R³ por sus siglas en inglés) por sus dos vías, calorimetría y agua combinada.

Palabras claves arcillas calcinadas industriales, polvos de arcillas, actividad puzolánica.

INTRODUCCIÓN

Los materiales cementicios suplementarios (MCS) son de amplio interés tecnológico porque al utilizarse como reemplazo del clinker Portland en la elaboración de cementos mezcla reducen el impacto ambiental, debido a la disminución de dióxido de carbono emitido por tonelada de producto cementicio [1]. Dentro de los MCS se encuentran las puzolanas que según la norma IRAM 1668 se definen como compuestos silicoaluminosos carentes de propiedades cementicias por si solos, que reaccionan con el hidróxido de calcio producido durante la hidratación del cemento y forman compuestos insolubles y estables que actúan como conglomerantes hidráulicos. Además, el agregado de puzolanas puede mejorar las propiedades mecánicas y durables de los morteros y hormigones [2]. En particular las arcillas calcinadas, debido a su alto contenido de sílice (SiO₂) y de alúmina (Al₂O₃) amorfa como resultado de la deshidroxilación de los minerales arcillosos durante la activación térmica, presentan gran potencial para su uso como puzolanas [3-5]. La calcinación de arcillas a escala industrial se realiza comúnmente en hornos rotatorios generando gran cantidad de polvo. Actualmente estos polvos son solamente recolectados para evitar su emisión al ambiente y se presenta como un desafío su recuperación y reciclado. La utilización de estos polvos como puzolanas aumentaría la eficiencia del uso de un recurso natural no renovable como son las arcillas.

En este sentido en el presente trabajo se estudian dos polvos provenientes de la calcinación a escala industrial de arcillas (uno proveniente de Argentina y otro de Alemania), y se evalúan sus propiedades para uso como puzolanas. Para ello se estudió el grado de calcinación de los polvos por análisis termo gravimétrico, complementado por difracción de rayos X y FTIR. Se evaluaron propiedades físicas como son la distribución de tamaño de partícula, la densidad y la superficie específica. Por último, se analizó la reactividad puzolánica por el método de Frattini y por las dos vías del método R³ (calorimetría y agua combinada).

MATERIAS PRIMAS Y METODOLOGÍA

Los polvos estudiados se obtuvieron como residuo del proceso de calcinación industrial de las arcillas. Uno de los materiales denominado PACI generado durante la producción industrial de arcilla calcinada en Argentina, y el otro OFS-CT generado en Alemania. La composición del polvo argentino y el polvo alemán se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1: Composición química de los polvos estudiados (g/100g).

	PACI	OFS-CT
SiO ₂	53,9	50,6
Al ₂ O ₃	16,3	18,3
CaO	3,9	5,2
Fe ₂ O ₃	6,8	10,3
K ₂ O	4,3	2,4
MgO	2,2	2,2
Na ₂ O	4,8	0,9
TiO ₂	0,8	1,3
SO ₃	0,2	3,1
Pérdida por calcinación	6,7	5,5

Inicialmente se estudió el comportamiento térmico de los dos polvos para determinar el estado de calcinación de los mismos por medio de análisis termo gravimétrico (TG) en un equipo Netzsch STA 449 F3 Jupiter desde temperatura ambiente hasta 1000 °C, con una velocidad de calentamiento de 10 °C/min. Luego del análisis de las curvas de TG se fijaron dos temperaturas de activación para cada polvo. Una temperatura anterior y otra posterior al punto de inflexión de la pérdida de masa asociada a la deshidroxilación de los minerales arcillosos presentes en cada material. La calcinación de los polvos se realizó en horno eléctrico con atmósfera de aire con una hora de meseta en la temperatura máxima.

Luego de las calcinaciones los polvos se caracterizaron por difracción de rayos X (DRX), en un difractómetro Bruker D8 phaser con radiación Cu-K α ($\lambda = 0,154$ nm) a 30 kV y 10 mA. Se realizó espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) utilizando un espectrómetro Nicolet Magna 500. Se determinó la distribución de tamaño de partículas y los parámetros d₉₀, d₅₀ y d₁₀ utilizando un analizador de difracción láser, Bettersizer, S3 Plus. La densidad se midió por picnometría de helio bajo lineamiento de la norma DIN ISO 17892-3. La superficie específica se evaluó con el método BET (Brunauer, Emmett, Teller) de acuerdo a la norma DIN ISO 9277.

Se analizó la reactividad de los polvos y polvos calcinados por diferentes técnicas. Se utilizó el método rápido, robusto y relevante (R³). Este ensayo se realizó por sus dos vías definidas en la norma ASTM C1897-20. Por calorimetría se utilizó un calorímetro

TAM Air I a 40 °C durante 168 h y por el método de agua combinada se calcinaron las pastas en horno eléctrico a 350 °C durante una hora. También se analizó la actividad puzolánica por el método de Frattini, según la norma EN 196-5, a las edades de 14 y 28 días, utilizando un 20 % reemplazo del cemento por el material a estudiar. Este ensayo depende del tipo de cemento utilizado por lo que se utilizó cemento producido en Argentina para las muestras argentinas y cemento producido en Alemania para las muestras alemanas. A las dos edades de ensayo, se determinó la concentración de OH⁻ y CaO en la solución acuosa en contacto con la mezcla polvo-cemento estacionadas a 40 °C.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Comportamiento térmico de los polvos

Las curvas del análisis termo gravimétrico (TG) y su derivada (DTG) se presentan en la Figura 1. Diferentes comportamientos térmicos se observan para los dos polvos.

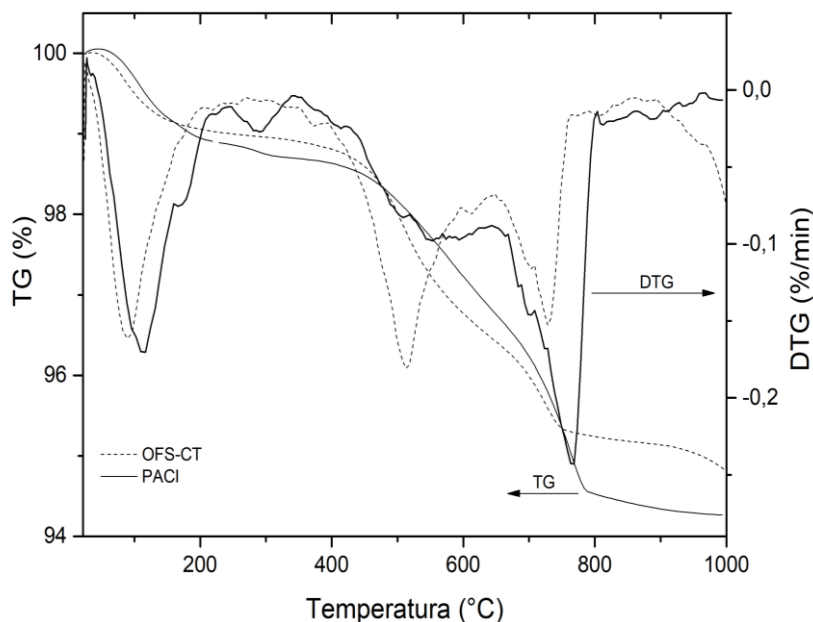


Figura 1: Curvas de TG y DTG de los polvos OFS-CT y PACI.

En el caso de la muestra PACI se identifican cuatro cambios de masa. Un primer escalón desde temperatura ambiente hasta los 250 °C, con el pico de la curva de DTG a 106,8 °C que se asocia al agua adsorbida. En el rango 250-350 °C hay una segunda pérdida de masa de 0,19 % asociada a la pérdida de agua de las interláminas de los minerales arcillosos que poseen una estructura compuesta por láminas tetraédricas de sílice (T) y octaédricas de alúmina (O) dispuestas en forma T-O-T, luego entre 350-650 °C y 650-1000 °C está la tercera y cuarta pérdida de masa que se relacionan con la deshidroxilación de la illita y la clorita que ocurre en dos pasos y son de 1,93 % y 2,50 % respectivamente [6]. En el caso de la muestra OFS-CT se observa tres pérdidas de masa. La primera por debajo de los 300 °C que se relaciona con el agua adsorbida, la segunda de 2,55 % entre 300-650 °C con su pico de DTG a 505,5 °C asociada a la deshidroxilación de la caolinita [7]. Por último, después de los 650 °C la deshidroxilación de la illita con una pérdida de masa de 1,6 %.

Caracterización de los polvos

Considerando las curvas de TG de ambos polvos se determinaron las temperaturas de activación. Las muestras OFS-CT 650 y OFS-CT 750 corresponden al polvo alemán calcinado a 650 °C y 750 °C respectivamente. Por otro lado, las muestras PACI 750 y PACI 850 corresponden al polvo argentino calcinado a 750 °C y 850 °C respectivamente. Esta diferencia en las temperaturas de calcinación se puede asociar a una diferente composición mineralógica de los polvos, por lo que la deshidroxilación de los minerales arcillosos se producirá a distintas temperaturas. La Figura 2 muestra los patrones de difracción de rayos X de los polvos calcinados y sin calcinar. En la muestra PACI se identificaron picos de illita, clorita, como minerales arcillosos. Además, se observa la presencia de cuarzo, feldespato y calcita. En el caso de la muestra OFS-CT caolinita e illita se identificaron como las fases cristalinas asociadas a arcillas. Además, se observa la presencia de cuarzo, calcita, hematita, feldespato y rutilo.

La presencia de picos de los minerales arcillosos illita, caolinita y clorita evidencia que los polvos no alcanzaron en su procesamiento un grado de activación térmica completa, en consistencia con lo observado en los análisis TG (Figura 1). Los picos de la clorita y de la caolinita desaparecen luego de la calcinación a 750 °C y 650 °C, respectivamente. En el caso de la calcita, ésta no se identifica luego de la calcinación a 750 °C. Por otra parte, se observa que el pico principal de la illita ($2\theta = 8,79^\circ$) en ambos polvos continúa presente después de las calcinaciones; sin embargo, su intensidad decrece y la base del pico aumenta, este cambio podría asociarse a una pérdida de cristalinidad de la illita [8].

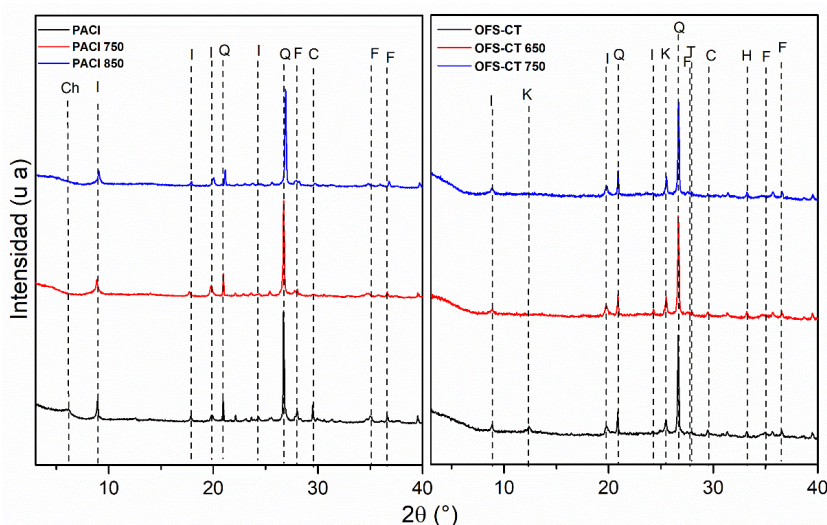


Figura 2: Patrones de difracción de rayos X de los polvos PACI (izquierda) y OFS-CT (derecha) sin calcinar y calcinados (Ch: clorita; I: illita; K: caolinita; Q: cuarzo; C: calcita; F: feldespato, H: hematita; T: rutilo).

Los espectros FTIR de los polvos y polvos calcinados se muestran en la Figura 3. Se identifican las bandas correspondientes a las vibraciones de los grupos Si-O-Al presente en los minerales arcillosos y Si-O presente en los minerales arcillosos y cuarzo. La activación térmica produce la deshidroxilación de los minerales arcillosos, por lo que se modifica las bandas asignadas a la vibración de los grupos -OH [9].

Se observa la deshidroxilación de los minerales caolinita y clorita a 650 °C y 750 °C respectivamente, esta transformación a una fase amorfa reactiva se confirma al no identificarse los picos de las fases cristalinas en los DRX y la modificación de la banda de vibración de los grupos -OH en los FTIR. En el caso del mineral arcilloso illita, por FTIR

se observa una modificación en la banda asignada a los grupos OH después de las calcinaciones, y considerando lo observado por DRX sería necesario elevar la temperatura de la activación térmica. La banda asignada al CO_3^{2-} presente en la calcita no se identifica después de la calcinación a 750 °C en los FTIR, lo cual tiene concordancia con lo determinado por DRX.

Considerando lo analizado en las curvas de TG de los polvos y las caracterizaciones realizadas por DRX y FTIR se puede estimar que tanto el polvo argentino como el polvo alemán no han estado expuesto en el procesamiento industrial a temperaturas superiores de 500 °C.

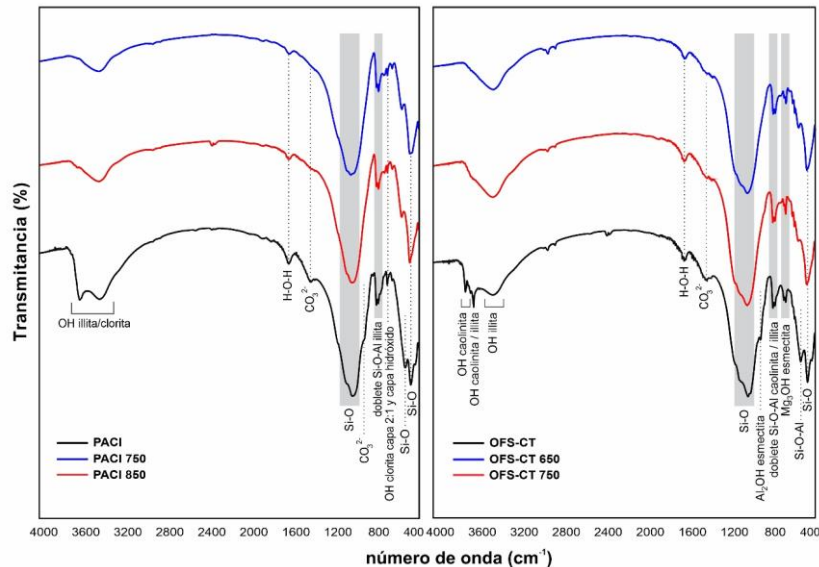


Figura 3: FTIR OFS-CT y PACI sin calcinar y calcinados.

En la Tabla 2 se presentan los resultados de las caracterizaciones respecto a la distribución de tamaño de partícula, la densidad y la superficie específica de los polvos calcinados y sin calcinar. Los valores d_{10} , d_{50} y d_{90} indican que el 10 %, el 50 % y el 90 % de las partículas medidas eran menores o iguales al tamaño indicado. Considerando ambos polvos la muestra PACI presenta el menor tamaño de partícula medio teniendo un valor de $d_{50} = 19,7 \mu\text{m}$ y la distribución más estrecha de tamaño (menor diferencia entre los valores d_{90} y d_{10}). A medida que se calcina el polvo argentino los valores de d_{50} aumentan. En el caso del polvo alemán el menor tamaño medio de partícula y la distribución más estrecha presenta la muestra calcinada a 750 °C (OFS-CT 750).

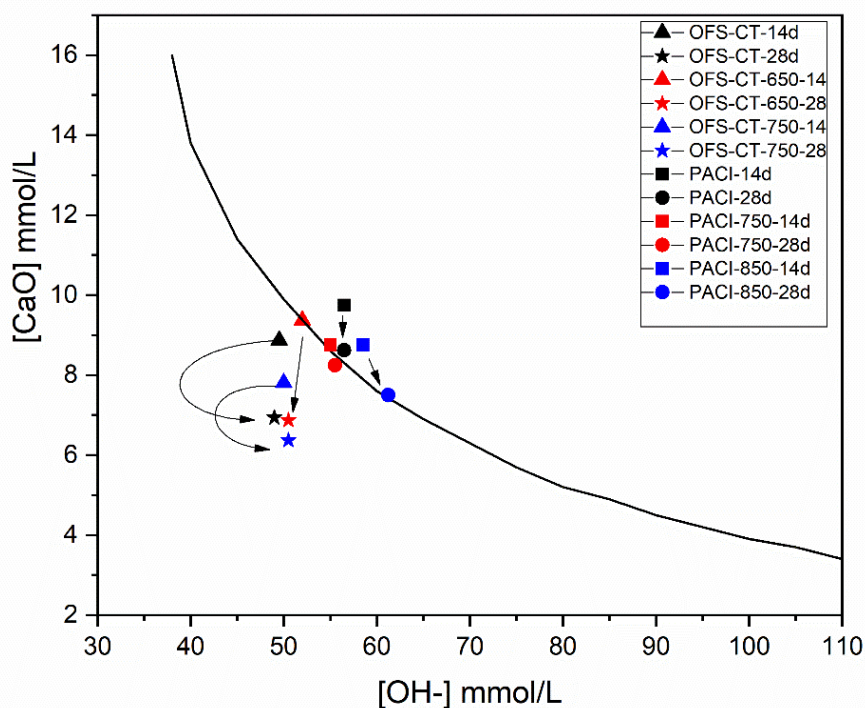
Todas las muestras presentaron un valor de densidad similar que se encuentran en el rango entre $2,66\text{-}2,75 \text{ g/cm}^3$. Se observa que el polvo OFS-CT presenta una mayor superficie específica que el polvo PACI y que en ambos casos esta propiedad disminuye a medida que aumenta la temperatura de calcinación. Estas propiedades físicas son útiles cuando se formulan morteros con estas muestras como MCS ya que se relacionan con la demanda de agua y por ende con la consistencia de la pasta [10].

Tabla 2: Propiedades físicas de los polvos calcinados y sin calcinar.

		PACI	PACI-750	PACI-850	OFS-CT	OFS-CT-650	OFS-CT-750
Tamaño de partícula (μm)	d ₁₀	2,4	3,0	3,9	2,3	2,4	2,2
	d ₅₀	19,7	21,8	22,8	19,1	21,7	16,7
	d ₉₀	55,8	93,8	88,2	77,2	88,6	61,9
Densidad (g/cm ³)		2,75	2,71	2,69	2,65	2,66	2,66
Superficie específica (m ² /g)		13,9	9,3	3,4	18,5	17,8	14,3

Ensayos de reactividad

En la Figura 4 se muestran los resultados del ensayo de Frattini y la curva de solubilidad isotérmica que marca el límite de reactividad. Cualquier punto por debajo de esta curva indica la existencia de actividad puzolánica y esta actividad es mayor cuanto mayor sea la distancia con la curva. Con el avance del tiempo de hidratación todas las muestras presentan mayor consumo de hidróxido de calcio. El polvo argentino presenta una actividad puzolánica menor que el alemán y se observa que la calcinación del primero mejora levemente su reactividad. En el caso del polvo alemán el tratamiento térmico no modifica sustancialmente su actividad puzolánica.

**Figura 4:** Resultados del ensayo de Frattini a 14 y 28 días.

En la Figura 5 se presenta el calor acumulado liberado de las muestras según el ensayo R³ en función del tiempo. Para las muestras OFS-CT la mayor cantidad de calor acumulado liberado ocurrió en las primeras 48 h, mientras que en las muestras PACI esto ocurre en las primeras 24 h. Este análisis surge de observar a que tiempo ocurre una inflexión en la curva. El polvo alemán presenta mayor calor liberado que el polvo argentino, y a su vez, se observa que la calcinación de los polvos produce una mayor liberación de calor lo que indica que el tratamiento térmico mejora la reactividad [11].

Los resultados obtenidos al evaluar la reactividad de los materiales con el método R³ por las dos vías se muestran en la Tabla 3. Para su comparación en el caso del método por

calorimetría se tomó el calor acumulado a las 168 h y en el caso de agua químicamente combinada se tomó el porcentaje de agua luego del mismo tiempo. A diferencia del ensayo de Frattini, el método R³ simula las condiciones de una mezcla cementicia con compuestos químicos independizándose del tipo de cemento utilizado.

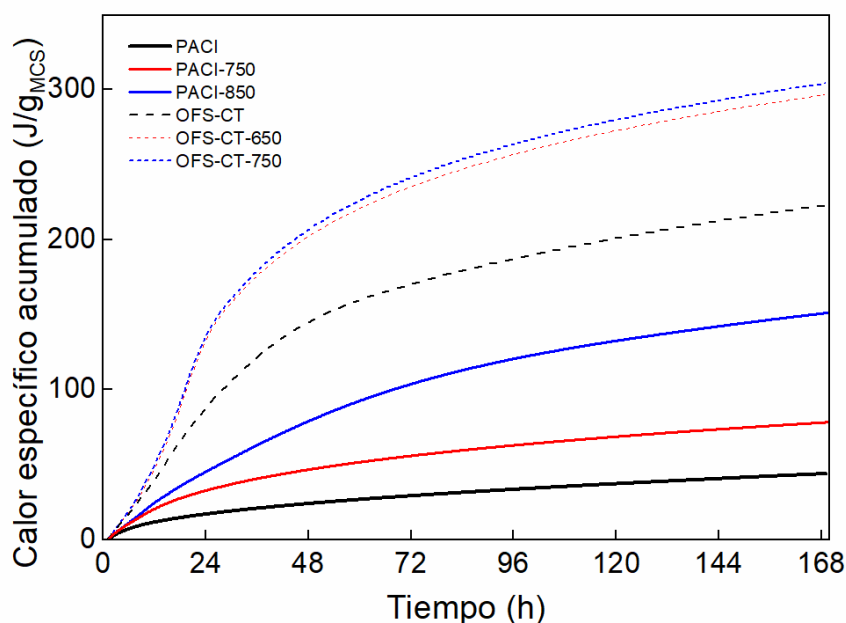


Figura 5: Calor liberado en función del tiempo de los polvos sin calcinar y calcinados (PACI: línea continua; OFS-CT: línea punteada).

Tabla 3: Valores obtenidos con el método R³ luego de 168 h.

Muestra	R ³ -Calorimetría. <i>Calor específico acumulado (J/g_{MCS}) a las 168 h.</i>	R ³ - agua químicamente combinada. % a las 168 h.
PACI	43,7	2,00
PACI 750	78,6	2,40
PACI 850	150,2	3,70
OFS-CT	221,8	5,21
OFS-CT-650	295,4	6,71
OFS-CT-750	303,9	6,71

En ambos métodos de R³ se observa la misma tendencia, los polvos después de activación térmica presentan mayor reactividad. En el caso de OFS-CT después de calcinarse a 650 °C y a 750 °C no se observan diferencias significativas a las 168 h, como también en la curva de liberación de calor de la Figura 5. Esto es favorable debido a que los rangos de operación de los hornos industriales suelen ser más amplios que en el laboratorio. En el caso del polvo argentino, el polvo calcinado a 850 °C presenta mayor reactividad y esto se podría relacionar con la composición mineralógica de los minerales arcillosos y su deshidroxilación explicada anteriormente.

CONCLUSIONES

- Los polvos generados durante la calcinación de arcilla en ambos países no están activados completamente, por lo que un tratamiento térmico mejora la actividad puzolánica, quedando a criterio de cada empresa su realización. La temperatura de activación dependerá de la composición mineralógica. En el polvo OFS-CT se observa que la deshidroxilación de los minerales arcillosos ocurre a menor temperatura que en el polvo PACI, por lo que su activación térmica deberá ser a menor temperatura. La muestra OFS-CT calcinada presentó mejor reactividad entre todas las muestras estudiadas, y no se observaron diferencias significativas en la actividad puzolánica de esta muestra calcinada a 650 °C y 750 °C.

- Si se comparan los valores de reactividad obtenidos por los métodos de R³ se observa que en el polvo argentino calcinado a 850 °C (PACI-850) aumenta su reactividad con respecto al calcinado a 750 °C (PACI-750) debido a una mayor desestructuración de la illita presente.

AGRADECIMIENTOS

Los investigadores agradecen a CONICET (Argentina) y DAAD (Alemania) por el financiamiento otorgado para la realización de este proyecto de cooperación bilateral y a Cementos Avellaneda SA y Liapor por la provisión de los materiales para realizar este estudio.

REFERENCIAS

- [1] Juenger M.C.G, Snellings R., Bernal S.A., "Supplementary cementitious materials: New sources, characterization, and performance insights". *Cement and Concrete Research*. 122(2019), 257-273.
- [2] Dhandapani Y., Sakthivel T., Santhanam M., Gettu R., Pillai R.G., "Mechanical properties and durability performance of concretes with Limestone Calcined Clay Cement (LC3)." *Cement and Concrete Research*. 107 (2018), 136–151.
- [3] Tironi A, Trezza M.A, Scian A.N, Irassar E.F., "Assessment of pozzolanic activity of different calcined clays". *Cement and Concrete Composites*, 37(2013), 319-327.
- [4] Maier M., Beuntner N., Thienel K.C., "Mineralogical characterization and reactivity test of common clays suitable as supplementary cementitious material". *Applied Clay Science*, 202 (2021), 105990,
- [5] Jaskulski R., Józwiak-Niedźwiedzka D., Yakymchko Y., "Calcined Clay as Supplementary Cementitious Material". *Materials*. 13 (2020), 4734.
- [6] Irassar E.F., Bonavetti V.L., Castellano C.C., Trezza M.A., Rahhal V.F., Cordoba G., Lemma R., "Calcined illite-chlorite shale as supplementary cementing material: Thermal treatment, grinding, color and pozzolanic activity". *Applied Clay Science*, 179(2019), 105143.
- [7] Shvarzman A., Kovler K., Grader G.S., Shter G.E., "The effect of dehydroxylation/amorphization degree on pozzolanic activity of kaolinite". *Cement and Concrete Research*. 33, 3(2003), 405-416.
- [8] Mañosa J., Alvarez-Coscojuela A., Marco-Gibert J., Maldonado-Alameda A., Maria Chimenos J., "Enhancing reactivity in muscovitic clays: Mechanical activation as a sustainable alternative to thermal activation for cement production". *Applied Clay Science*, 250 (2024), 107266.
- [9] Madejová J., "FTIR techniques in clay mineral studies, *Vibrational Spectroscopy*" 31-1(2003) 1-10.
- [10] Simonsen A.M.T., Solismaa S., Hansen H.K., Jensen P.E., "Evaluation of mine tailings' potential as supplementary cementitious materials based on chemical, mineralogical and physical characteristics". *Waste Management*, 102(2020), 710-721.
- [11] Elyasigorji F., Farajiani F., Hajipour Manjili M., Lin Q., Elyasigorji S., Farhangi V., Tabatabai H., "Comprehensive Review of Direct and Indirect Pozzolanic Reactivity Testing Methods". *Buildings* 13 (2023), 2789.