

**ACTUALES INVESTIGACIONES**

# EN TECNOLOGÍA DEL CEMENTO Y EL HORMIGÓN **EN ARGENTINA**

**2° Edición**

Memorias de las 2° Jornada de Jovenes Investigadores  
en Tecnología del Cemento y el Hormigón - 2020



Jornada de Jóvenes Investigadores en Tecnología del Hormigón y el Cemento  
Actuales Investigaciones en Tecnología del Cemento y el Hormigón en Argentina: 2da.  
Edición Jornada de Jóvenes Investigadores en Tecnología del Hormigón y el Cemento /  
editado por Dayana P. Rautenberg; Lautaro Santillán; María Eva Sosa. - 1a ed. - Ciudad  
Autónoma de Buenos Aires: Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, 2022.  
Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga y online  
ISBN 978-987-47035-4-5

1. Materiales de Construcción. 2. Hormigón. 3. Cemento. I. Rautenberg, Dayana P., ed. II.  
Santillán, Lautaro, ed. III. Sosa, María Eva, ed. IV. Título.  
CDD 691.3

ISBN 978-987-47035-4-5



9 789874 703545

## PRÓLOGO

El hormigón es el material estructural más utilizado y con ello supone una inmensa industria asociada. Las actividades de investigación en Argentina en temas relacionados con el cemento y el hormigón son variadas en cuanto a temática y distribución geográfica. Ello involucra además una cantidad significativa de Investigadores en formación (como becarios de grado y doctorandos) cuyas actividades nutren al sistema académico y la industria.

En este contexto, desde el Centro de investigaciones viales (LEMAC) y el Centro de Investigación, Desarrollo y Transferencia de Materiales y Calidad (CINTEMAC) con apoyo de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón (AATH), International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures in Latin America (Lat-RILEM) y la Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Córdoba y La Plata, tres jóvenes investigadores afrontamos el desafío de organizar una Segunda Edición de la Jornada de Jóvenes Investigadores en Tecnología del Cemento y el Hormigón (JJI TCH).

La presente Jornada tuvo por objetivo favorecer la interacción entre Jóvenes Investigadores del país y la región trabajando en temáticas relacionadas, para promover actividades conjuntas, intercambio de ideas e información y afianzar la camaradería entre colegas.

Esta Edición se desarrolló en forma 100% virtual. En función de los trabajos enviados se organizaron bloques temáticos de exposiciones por parte de los jóvenes investigadores, a la vez que se contó con charlas magistrales a cargo de investigadores experimentados en la materia y dirigidas especialmente a quienes se estén iniciando en la carrera de la investigación. Además, se dispuso de “mesas redondas” en las que se pudo generar un intercambio directo entre los participantes de las Jornadas.

En un momento en el que el acceso al trabajo experimental está siendo complicado en las universidades, esta 2da Edición de las JJ-TCH se resumen en:

- ✓ Favoreció la interacción entre Jóvenes Investigadores del país y la región, trabajando en temáticas relacionadas, para promover actividades conjuntas, intercambio de ideas e información y afianzar la camaradería entre colegas.
- ✓ 33 resúmenes aceptados y 32 presentaciones orales, lo que muestra el compromiso de los autores con muy buen contenido e intercambio de ideas e información.
- ✓ Participantes de Argentina, Uruguay y Colombia; de grado, doctorales y posdoctorales
- ✓ Temas: innovación - nuevas tecnologías - revisión de ensayos - enfoque en el ambiente y la responsabilidad social
- ✓ 2 conferencias mostrando: que se puede realizar un trabajo conjunto sostenido tendiendo redes y obteniendo buenos productos para difusión (Pedro Castro Borges) y la necesidad de participación activa crítica para transferir a la sociedad (Carlos Milanesi).
- ✓ 2 mesas redondas con excelente introducción de Yury Villagrán-Zaccardi, Adrián Yoris, Eva Sosa, Francisco Locatti, Dayana Rautenberg y Lautaro Santillán. Con una tímida participación al principio y luego muy buenas opiniones como las necesidades de espacios para becas doctorales con mayor vinculación a la industria.

En este libro se presentan los resúmenes extendidos de los trabajos que se expusieron durante la Jornada. La diversidad de temas abordados durante la Jornada pone en evidencia la potencialidad de las investigaciones que se desarrollan en el país y vislumbran un futuro promisorio en el cual la sustentabilidad, el trabajo interdisciplinario y la transferencia de recursos humanos y materiales se presentan como el punto de partida en común de las nuevas generaciones de investigadores en formación.

Agradecimientos: a la UTN y los centros de investigación CINTEMAC y LEMAC, a RILEM y LAT RILEM, al Comité Científico y a los moderadores de mesas redondas.

*Comité Organizador JJI TCH 2021*

# ÍNDICE

<b>HORMIGONES SUSTENTABLES   USO DE RESIDUOS</b> .....	3
RECICLADO DE HORMIGÓN FRESCO MEDIANTE EL USO DE ADICIONES .....	4
BASES PARA EL ESTUDIO DE HORMIGONES SUSTENTABLES RESISTENTES A LA CARBONATACIÓN.....	7
ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE HORMIGONES ELABORADOS CON AGREGADOS NATURALES Y RECICLADOS, E INCIDENCIA DEL TRANSPORTE ASOCIADO EN LA REGIÓN METROPOLITANA DE BUENOS AIRES.....	10
EVALUACIÓN DEL USO DE ESCORIA DE ACERÍA EN LA PRODUCCIÓN DE MORTERO DE REVESTIMIENTO.....	13
CONTRACCIÓN POR SECADO EN HORMIGONES CON AGREGADO FINO RECICLADO .....	16
ACTIVACIÓN ALCALINA DE CEMENTOS HÍBRIDOS A BASE DE SUBPRODUCTOS INDUSTRIALES Y RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN UTILIZANDO ACTIVADORES ALTERNATIVOS SÓLIDOS PARA LA PRODUCCIÓN DE CONCRETOS. ....	19
ACTIVACIÓN EN SISTEMAS CEMENTÍCEOS HIBRIDOS CON ELEVADOS CONTENIDOS DE ESCORIA GRANULADA DE ALTO HORNO .....	22
APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN VÍA ACTIVACIÓN ALCALINA O GEOPOLIMERIZACIÓN.....	25
CEMENTOS ECO-EFICIENTES ELABORADOS CON RESIDUOS DE PROCEDENTES DE LA DEMOLICIÓN Y CONSTRUCCIÓN: EFECTOS EN LA HIDRATACIÓN.....	28
<b>METODOLOGÍA DE ENSAYOS</b> .....	31
APLICACIÓN DEL MÉTODO DE DISOLUCIÓN SELECTIVA PARA DETERMINAR LA REACTIVIDAD DE ESCORIA DE ALTO HORNO.....	32
CAPACIDAD DE UN MÉTODO R3 PARA PREDECIR LA REACTIVIDAD DE VIDRIOS NATURALES Y ARTIFICIALES .....	35
UTILIZACIÓN DE MACHINE LEARNING PARA MEJORAR LA PRECISIÓN DEL ENSAYO DE ESCLEROMETRÍA. ....	38
INFLUENCIA DEL RECUBRIMIENTO IMPERMEABILIZANTE EN EL SECADO DE LAS PROBETAS PARA EL ENSAYO DE SUCCIÓN CAPILAR EN HORMIGÓN .....	41
POTENCIALIDADES DE LA RADIOGRAFÍA DE NEUTRONES PARA DETERMINAR EL INGRESO DE AGUA EN MATERIALES CEMENTÍCEOS .....	44
CARACTERIZACIÓN DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE HORMIGÓN UTILIZANDO CLUSTERIZACIÓN CON ALGORITMO K- MEANS.....	47
PROTOTIPO DE CÁMARA DE CARBONATACIÓN ACELERADA.....	50
ANÁLISIS INSTRUMENTAL DE PROCESOS DE DETERIORO DE HORMIGONES ECOEFICIENTES	53
<b>MEZCLAS CON MCS Y ADITIVOS</b> .....	56
CARACTERIZACIÓN EN ESTADO FRESCO DE HORMIGONES AUTOCOMPACTANTES COLOREADOS CON ADICIÓN DE DESECHO DE PERLITA .....	57
PRIMEROS AVANCES EN LA ELABORACIÓN DE AGREGADOS POROSOS A PARTIR DE LUTITA, CALIZA Y DOLOMITA .....	60
INCORPORACION DE TAMICES MOLECULARES MOLIDOS EN MORTEROS.....	63
RESISTENCIA AL ATAQUE POR SULFATOS DE MORTEROS CON REEMPLAZO CRECIENTE DE ARCILLA ILLÍTICA CALCINADA.....	66

CARACTERIZACIÓN DE PASTAS Y MORTEROS CON FILLER CALCÁREO, PUZOLANAS NATURAL Y ARTIFICIAL .....	69
EVALUACIÓN DE CENOSFERAS COMO MATERIALES CEMENTANTES SUPLEMENTARIOS .....	72
ESTABILIDAD DEL FILLER DOLOMITICO: MODIFICANDO EL RUMBO DEL Mg .....	75
LIXIVIACIÓN DE ÁLCALIS DE UNA ROCA CON ALTO CONTENIDO DE ESMECTITA.....	78
ADSORCIÓN DE COMPUESTOS VEGETALES A LA ARMADURA COMO MÉTODO DE PROTECCIÓN FRENTE A LA CORROSIÓN .....	81

<b>CARACTERIZACIÓN DE HORMIGONES, MORTEROS Y AGREGADOS .....</b>	<b>84</b>
EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN, PENETRACIÓN DE AGUA Y PERMEABILIDAD AL AIRE DE MORTEROS REGLAMENTARIOS.....	85
HORMIGON REFORZADO CON FIBRA DE VIDRIO (GRC): APLICACIONES EN FACHADAS .....	88
POTENCIAL LIXIVIACIÓN DE ÁLCALIS DE MIGMATITAS DE LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES ...	91
EVALUACIÓN DE PROPIEDADES DEL HORMIGÓN DEBIDO AL USO DE ADITIVOS HIDRÓFUGOS	94
HORMIGON REFORZADO CON FIBRAS .....	97
EFFECTOS DE LAS FIBRAS MICRO- Y MACROSINTÉTICAS SOBRE LAS PROPIEDADES DEL HORMIGÓN DRENANTE .....	100
CARACTERIZACIÓN ESTÁTICA Y AL IMPACTO DE UN HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS PARA SOSTENIMIENTO DE TÚNELES.....	103

## **HORMIGONES SUSTENTABLES | USO DE RESIDUOS**

# RECICLADO DE HORMIGÓN FRESCO MEDIANTE EL USO DE ADICIONES

Constanza Schust <sup>1</sup>, Mariano Ramos <sup>2</sup>, Pablo Stefani <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Mar del Plata, Argentina.

<sup>2</sup> COARCO S.A., Mar del Plata, Argentina.

<sup>3</sup> Div. Materiales Sostenibles, INTEMA, CONICET, UNMdP, Mar del Plata, Argentina.

Palabras clave: impacto ambiental, hormigón fresco, áridos, reciclado.

## Introducción

La industria del hormigón es intensiva en uso de materias primas y energía. Siguiendo los principios de la economía circular, en un mundo con recursos limitados, valorizar los residuos generados por esta industria es clave para reducir su impacto negativo sobre el medioambiente [1].

La recuperación de hormigón se puede dividir en dos grandes categorías: reciclado de hormigón endurecido y reciclado de hormigón fresco. En la primera clasificación se encuentran técnicas como, triturado para la conformación de material granular de relleno de bases y sub-bases viales [2] y triturado para uso como agregado grueso de hormigones [3]. En el segundo grupo se hallan metodologías como: re-direccionamiento del hormigón sobre solicitado a clientes diferentes a los originales [4]; dosificación de nuevo hormigón sobre concreto sobrante [5]; recuperación de áridos y agua con el uso de pozos de sedimentación [6]; devolución a planta, descarga, fragüe y trituración para distintos usos [7]; y finalmente, el uso de adiciones o aditivos que permiten generar un árido reciclado a partir de hormigón en estado fresco [8]. Este último método suprime la generación de residuos de construcción a la vez que reduce el uso de áridos naturales sin requerir ningún equipamiento específico.

En el presente trabajo se estudió el reciclado de hormigón fresco mediante el uso de una adición pelletizante compuesta por: una parte A (polímero súper absorbente) que tiene la función de aumentar la viscosidad y generar la granulación del concreto, y una fase B inorgánica que favorece la formación de ettringita y consolidada los gránulos [8]. Se confeccionaron y caracterizaron áridos reciclados a partir de dosificaciones obtenidas variando la relación agua/cemento (a/c) y tamaño de los agregados gruesos. Finalmente, se fabricaron concretos con diferentes niveles de sustitución de agregados naturales por reciclados y se evaluaron sus principales propiedades.

## Procedimiento experimental

En los hormigones de partida se utilizaron como agregados arena silícea fina (ASF) provista por Arenas Verdes ruta 88 km 109, una arena cuarcítica de trituración 0-6 (ACT) y dos piedras cuarcíticas (PC) de trituración clasificables como 6-12 y 6-20 según su distribución de tamaños (Cantera Yaravi, Batán). Los valores de densidad relativa real ( $d_1$ ), porcentaje de absorción (abs) y módulo de fineza (MF) de los áridos (IRAM 1520:2002, IRAM 1505:2019) fueron:  $d_1=2,72$ , abs=0,95% y MF=2,2 para ASF;  $d_1=2,63$ , abs=1,12% y MF=4,05 para ACT;  $d_1=2,59$ , abs=3,00% y MF=6,98 para PC 6-12; y,  $d_1=2,63$ , abs=2,6y MF=7,41 para PC 6-20. Se usó Cemento Portland compuesto (CPC40, Cemento Avellaneda) que cumplió los requisitos de la norma IRAM 50000:2000. Se empleó un reductor de agua (RA) de alto rango (Sikament 90-E, Sika).

Tabla 1: Dosificaciones y propiedades para la obtención de los áridos reciclados

		D 6-12 a/c=0,45	D 6-12 a/c=0,475	D 6-12 a/c=0,5	D 6-20 a/c=0,45	D 6-20 a/c=0,475	D 6-20 a/c=0,5
Dosificación (kg/m <sup>3</sup> )	Cemento	365	365	365	365	365	365
	ASF	400	400	400	400	400	400
	ACT	400	400	400	400	400	400
	PC 6-12	900	900	900	0	0	0
	PC 6-20	0	0	0	900	900	900
	Agua	158	166	175	158	166	175
	RA	3,7	3,1	2,6	3,4	2,9	2,5
Res. compresión (MPa)		49,45±2,54	45,53±3,18	42,2±3,21	48,68±2,97	44,32±2,66	41,78±2,72

En el paso de preparación de los hormigones para la conformación de áridos reciclados se dosificaron y caracterizaron dos formulaciones de concretos, cada uno con un solo tipo de piedra (6-12 o 6-20). A su

vez, se varió la relación agua cemento (a/c) en tres niveles (0.45, 0.475, 0.50), lo que dio como resultado seis mezclas diferentes que fueron la base para conformar los áridos reciclados. Las dosificaciones se resumen en la Tabla 1. El contenido de reductor de agua fue ajustado para alcanzar un asentamiento objetivo de 15 a 18 cm (IRAM 1536:1978). Sobre todas las formulaciones se determinó la resistencia a la compresión a 28 días (IRAM 1546:2013) de muestras curadas en condiciones de laboratorio (IRAM 1534:2004). Para cada formulación se obtuvieron tres pastones, con un mínimo de cinco probetas ensayadas por pastón.

Para cada formulación descrita en la Tabla 1 se obtuvieron agregados reciclados incorporando una adición pelletizante de dos componentes (MAPEI) como se informa en la literatura [8] y las especificaciones del proveedor. Finalmente, el material granular obtenido se descargó en el piso al resguardo de la intemperie y se procedió a removerlo para evitar la aglomeración de partículas.

En la última fase de preparación y caracterización de hormigón con áridos reciclados se diseñó una dosificación con áridos gruesos natural 6-12 y 6-20 de clase resistente H30 como control y se intentó replicar su curva granulométrica reemplazando un 20%, 40% y 60% de sus agregados naturales por áridos reciclados de los dos tamaños trabajados AR 6-12 y AR 6-20, manteniendo el contenido de cemento y relación a/c constantes. El contenido de reductor de agua fue ajustado para alcanzar un asentamiento objetivo de 10 cm (IRAM 1536:1978). Sobre todas las formulaciones se determinó la resistencia a la compresión a 28 días (IRAM 1546:2013) de muestras curadas en condiciones de laboratorio (IRAM 1534:2004).

## Resultados y discusión

Los áridos reciclados obtenidos no presentaron tendencias marcadas en sus características principales con el cambio en las relaciones a/c evaluadas, como puede apreciarse en la Tabla 2. Esto se le atribuye a la dosificación de la adición pelletizante, ya que se utilizó en proporciones idénticas en todos los hormigones de partida, sin tener en cuenta su forma de trabajo con la cantidad de agua presente en la pasta.

Tabla 2: Características de los áridos reciclados

	AR 6-12 a/c=0,45	AR 6-12 a/c=0,475	AR 6-12 a/c=0,5	AR 6-20 a/c=0,45	AR 6-20 a/c=0,475	AR 6-20 a/c=0,5
<i>d</i> <sub>1</sub>	2,60	2,44	2,59	2,55	2,62	2,59
<i>Ab</i> (%)	6,55	8,09	7,43	6,29	5,84	6,38
<i>MF</i>	6,77	6,91	6,69	7,42	7,23	7,04
<i>DN</i> (mm)	19	19	19	25	25	25

A su vez, los áridos reciclados presentaron una amplia distribución granulométrica que cubre todo el espectro de tamaños de los agregados naturales, por lo que combinando dos diámetros nominales (DN) de los áridos reciclados es posible obtener una dispersión de tamaños similar a la de un hormigón convencional. Por esta característica de los agregados reciclados se decidió tomar dos de ellos de diferente DN, combinarlos en distintas proporciones de tal forma que sumen un total de reciclado de 20%, 40% y 60% e imiten la curva granulométrica del hormigón convencional (0%) con las propiedades descriptas, como se aprecia en la Figura 1.

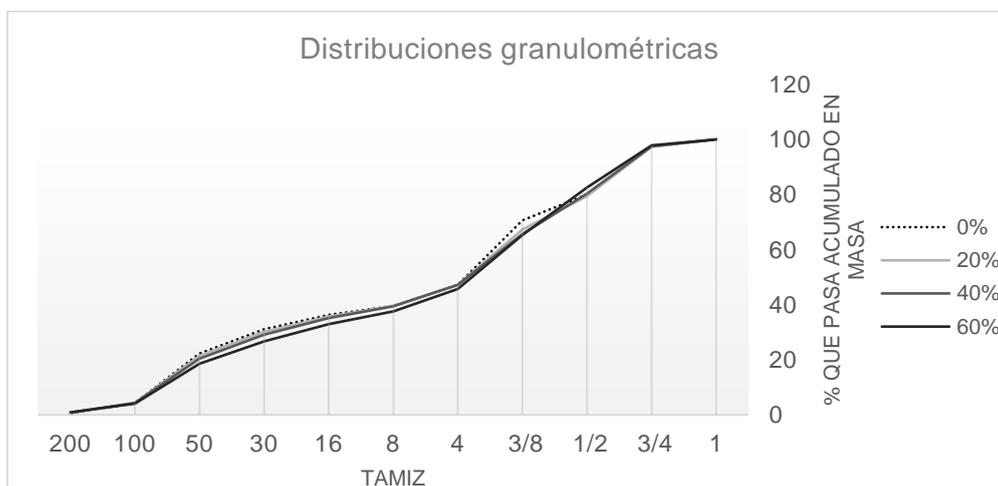


Figura 1: Distribuciones granulométricas del agregado total con diferentes niveles de reemplazo de agregados reciclados

Para el reemplazo parcial de áridos naturales por reciclados se utilizaron los agregados pelletizados fabricados con relación a/c 0,5, ya que fue la cantidad de agua que mejor respondió al uso de la adición que permite el granulado del hormigón. Las dosificaciones correspondientes a las granulometrías de la Figura 1 se encuentran en la Tabla 3, junto con sus características.

Tabla 3: Dosificación y características de los hormigones obtenidos con áridos reciclados

		0%	20%	40%	60%
<i>Dosificación (kg/m<sup>3</sup>)</i>	<i>Cemento</i>	365	365	365	365
	<i>ASF</i>	408	374	338	285
	<i>ACT</i>	408	374	338	285
	<i>PC 6-12</i>	450	249	89	0
	<i>PC 6-20</i>	515	427	303	143
	<i>AR 6-12</i>	0	267	534	802
	<i>AR 6-20</i>	0	89	178	267
	<i>Agua</i>	170	170	170	170
	<i>RA</i>	2,17	2,17	2,17	2,17
<i>Asentamiento (cm)</i>		8	10	11	11
<i>Res. Compresión (MPa)</i>		50,43±1,57	42,54±2,12	40,08±1,54	39,84±5,03

En todas las formulaciones con áridos reciclados se observó un leve aumento en el asentamiento, lo que puede atribuirse a la mayor esfericidad del agregado. Respecto de la resistencia a la compresión, se observó una reducción del orden 20%, respecto a la muestra control, aun para porcentajes muy altos de sustitución (60%).

## Conclusiones

Como era de esperar, se observó en las dosificaciones diseñadas para la confección de los áridos reciclados una leve reducción en la resistencia a la compresión al aumentar la relación a/c. Respecto de las propiedades físicas de los áridos reciclados no se observaron patrones evidentes con los diferentes valores de relación a/c, pero sí se obtuvieron en todos los casos agregados reciclados con curvas granulométricas amplias bien distribuidas y apropiadas para su uso en hormigones.

Los hormigones basados en los agregados reciclados cumplen en todos los casos con los requisitos de resistencia (H30) y permiten revalorizar un residuo de la industria favoreciendo el cuidado del medioambiente.

## Referencias

- [1] Robles, A., Arenas, G. y Stefani, P. (2020). "Light Transmitting Cement-based Material (LTCM) as a green material for building". *J Appl Res Eng Technol & Eng.*, 1, 9-14
- [2] Hein, D., Rao, S., Tayabji, S. D., y Lee, H. (2017). "Bases and subbases for concrete pavements" [Resumen técnico] (No. FHWA-HIF-16-005). Estados Unidos. Federal Highway Administration.
- [3] Ortiz, J. A., de la Fuente, A., Mena Sebastia, F., Segura, I., y Aguado, A. (2017). "Steel-fibre-reinforced self-compacting concrete with 100% recycled mixed aggregates suitable for structural applications". *Construction and Building Materials*, 156, 230–241.
- [4] World Buisness Council for Sustainable Development. (2009). "The cement sustainability initiative: recycling concrete".
- [5] Ferriz-Papi, J.A. (2014). "Recycling of fresh concrete exceeding and wash water in concrete mixing plants". *Revista de Materiales de Construcción*, 64 (313).
- [6] Wang, R. y Zhang. Y. X. (2018). "Recycling fresh concrete waste: A review". *Structural Concrete Journal*, 19, 1939-1955.
- [7] Obla, K., Kim, H. y Lobo, C. (2007). "Crushed returned concrete as aggregates for New concrete" (Proyecto 5-13). RMC Research & Education Foundation.
- [8] Ferrari, G., Miyamoto, M., Ferrari, A., Yoda, K. y Secco, M. (2014). "Performance and durability of sustainable concrete made with aggregates produced from returned concrete". *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 03(13), 179-188.

# BASES PARA EL ESTUDIO DE HORMIGONES SUSTENTABLES RESISTENTES A LA CARBONATACIÓN

Carlos Pico-Cortés<sup>1</sup>

<sup>1</sup> LEMIT, CONICET, La Plata, Argentina

Palabras Clave: carbonatación, sustentabilidad, hormigón reciclado, materiales cementíceos suplementarios.

## Introducción

Actualmente, la industria del hormigón elaborado requiere la implementación masiva de estrategias que mitiguen su impacto ambiental. Dos de ellas son: la inclusión de materias primas que favorezcan al ahorro de energía a través de procesos de producción ambientalmente eficientes y, el aprovechamiento de residuos. Las construcciones con alto desempeño durable contribuyen a reducir la generación de residuos derivados de reparación, demolición o reconstrucción. Además, estas construcciones evidencian beneficios económicos y funcionales. Puede inferirse entonces que el aumento de durabilidad es otra de las estrategias para proveer sustentabilidad al hormigón, debiendo procurarse un equilibrio con las demás estrategias. Un ejemplo de ello es el control del contenido de cemento, históricamente utilizado en la búsqueda de performance. Es conocido que el problema principal del cemento, en términos ambientales, es el alto consumo energético durante la producción de clínker, que deriva en una gran cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero.

La carbonatación del hormigón está relacionada con la sustentabilidad, tanto desde el punto de vista de la durabilidad, como desde el punto de vista de la captura y almacenamiento de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Este último punto establece una cuarta estrategia positiva para la sustentabilidad, si de hormigón no armado se trata. A pesar de que este aspecto descarta beneficios netos (la infraestructura de hormigón implica uso de cemento), es una alternativa de mitigación durante la etapa de servicio [1]. El CO<sub>2</sub> puede favorecer cambios positivos en la microestructura del hormigón con cemento Portland normal [2]. Sin embargo, la caída de pH por carbonatación causa la corrosión de las armaduras de acero, la cual a su vez es la patología más habitual en las estructuras de hormigón armado [3]. En el hormigón con materiales cementíceos suplementarios (MCS), el CO<sub>2</sub> podría ocasionar detrimento de sus propiedades, más aún cuando hay consumo de portlandita en exceso [4]. El desarrollo de la tecnología del hormigón dirigido a la utilización masiva de MCS en estructuras modernas requiere mayor estudio de los factores que desencadenan la corrosión. Se hace pertinente investigar con mayor profundidad las características del hormigón sustentable, teniendo en cuenta su exposición a sustancias agresivas como el CO<sub>2</sub>. La comprensión del equilibrio entre cada una de estas estrategias para lograr la sustentabilidad del hormigón, representado en la Figura 1, plantea las bases para la investigación: "Diseño de hormigones sustentables resistentes a la carbonatación".



Figura 1 – Equilibrio de las estrategias que aportan sustentabilidad al hormigón

La evaluación de la sustentabilidad y la cuantificación de recursos utilizados también son pertinentes. El impacto ambiental de un producto puede medirse mediante el cálculo de la huella de carbono o a través del análisis de ciclo de vida. El análisis de ciclo de vida tiene un enfoque más amplio que permite evaluar varias categorías del impacto ambiental. Es posible seguir los lineamientos de ISO 14040 y 14044 [5,6] para este fin. El hormigón sustentable está conformado por materias primas de origen diverso, genera menos emisiones en su producción y plantea una posible mitigación en la fase de uso. A partir de estas aptitudes, se plantea el análisis de ciclo de vida del material como una forma de evaluar su sustentabilidad.

## Antecedentes

La sustentabilidad del hormigón está determinada, en parte, por el uso de residuos. Los residuos de hormigón se encuentran entre los más utilizados por su practicidad. El hormigón reciclado (HR), o de agregados reciclados (AR), es un material con características distintas a las del hormigón convencional. En términos generales, éstas se derivan de: las condiciones de la(s) etapa(s) de servicio del hormigón de origen, de los tratamientos previos a la reutilización [7], del porcentaje de reemplazo de agregados naturales y de las interacciones con los componentes nuevos de la mezcla. La utilización de agregados reciclados causa alteraciones al hormigón en estados fresco y endurecido, modificando su comportamiento a niveles macro,

meso y micro estructural [8]. Ante el ingreso de CO<sub>2</sub> es importante la influencia de una mayor porosidad generalmente provocada por la debilidad de la zona de interface entre el mortero adherido a los AR y la pasta nueva [9]. La mayoría de investigaciones sugieren una mayor velocidad de carbonatación del HR con respecto al hormigón convencional [10–12] debida al factor físico. Sin embargo, concierne también la cantidad de hidróxido de calcio (portlandita) residual del mismo mortero adherido que puede contribuir a mantener la reserva alcalina [13]. Estos dos aspectos modifican la velocidad de carbonatación. A pesar de que las propiedades de transporte reflejan mayor ingreso potencial de sustancias, la corrosión en las estructuras puede prevenirse hasta por 100 años [12]. El uso de hormigones con AR sin fines estructurales ha incrementado su rango de aplicaciones. Es factible proponer la posibilidad de su uso estructural, ya que el detrimento de las propiedades mecánicas y de transporte puede ser aminorado [14,15].

El uso de MCS, entre los que se encuentran la escoria de alto horno, las puzolanas y el filler calcáreo, se ha incrementado en los últimos años. Algunos MCS han demostrado que pueden mejorar la microestructura y capacidad del hormigón para alcanzar altos niveles de durabilidad [16,17]. Sin embargo las interacciones químicas de algunos MCS, específicamente con el CO<sub>2</sub>, pueden generar resultados indeseables tanto por resistencia como por durabilidad debido a la formación de productos de carbonatación perjudiciales [4]. Por carbonatación, los MCS han presentado resultados variados. Cenizas volantes (CV) y otras puzolanas de composición química similar han presentado mayores velocidades de carbonatación [18,19], como consecuencia del consumo de portlandita en la reacción puzolánica. Leeman et al. [20] analizaron que la contribución de la portlandita y del silicato de calcio hidratado a la resistencia a la carbonatación parece ser solo dependiente de su respectivo contenido de CaO. El filler calcáreo en bajas proporciones y la escoria de alto horno han presentado mejores resultados que las adiciones puzolánicas [21–23]. En estos casos la velocidad de carbonatación aumenta proporcionalmente con el nivel de reemplazo. Las variables ambientales como concentración de CO<sub>2</sub>, temperatura y humedad relativa también son determinantes para la carbonatación del hormigón en general, y tienen afectaciones distintivas para hormigones con MCS [20,24].

La inclusión combinada de AR y MCS se ha estudiado, arrojando resultados contradictorios. En [19] CV presentaron menores profundidades de carbonatación en presencia de AR, respecto a mezclas que incluyeron ambos materiales por separado. Por su parte, en [25] se determinó que en HR con edades mayores a 3 años la influencia de CV fue negativa. En [26] se evaluó el comportamiento de humo sílice en HR, comprobándose una reducción de la velocidad de carbonatación en un 40% a 91 días.

## Metodología y objetivos

El estudio de la carbonatación de hormigones sustentables plantea los siguientes objetivos: 1. Evaluar hormigones de resistencia hasta 40 MPa con contenidos reducidos de clínker a partir de la sustitución con MCS en diversos porcentajes. Utilizar escoria de alto horno, filler calcáreo, puzolanas naturales y artificiales. 2. Utilizar agregados gruesos reciclados en el hormigón con niveles de reemplazo de hasta 75%. 3. Analizar los fenómenos que ocurren durante la carbonatación de hormigones sustentables e incrementar el desempeño durable de los mismos. 4. Analizar el ciclo de vida del material. La Figura 2 describe las etapas generales asociadas a la metodología de investigación.

## Proyección

El estudio de la carbonatación de hormigones sustentables pretende analizar cada una de las variables que influyen en la velocidad de carbonatación, especialmente las que dependen del uso de agregados gruesos reciclados y MCS. Se requiere revisar especialmente la influencia del mortero adherido y de la microestructura de las zonas de interface. Se espera verificar una compensación del detrimento que pueda causar la interacción entre MCS y CO<sub>2</sub>. El concepto de diseño por desempeño será importante en relación a los ensayos de carbonatación acelerada y su aplicabilidad en el cálculo de vida útil prevista. Además se espera una caracterización distintiva del hormigón sustentable en estados fresco y endurecido al medir propiedades adicionales a la carbonatación. Esta tarea puede conducir a establecer correlaciones entre propiedades que permitan una mayor aproximación para predecir la vida útil de las estructuras de hormigón armado. Se pretende aportar al aumento de la durabilidad pero también a la mayor comprensión



Figura 2 – Etapas de la investigación

de la captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub> en hormigones sustentables. Del análisis de ciclo de vida se espera obtener una reducción de pasivos ambientales con el uso del material, teniendo en cuenta el ahorro energético y el aprovechamiento de recursos.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado parcialmente por ANPCyT a través de PICT 2017-0091. El autor agradece especialmente a Yury A. Villagrán Z., Claudio J. Zega y Ruby Mejía de G. por su dirección.

## Referencias

- [1] Galán I, Andrade C, Mora P, Sanjuan MA. "Sequestration of CO<sub>2</sub> by concrete carbonation". *Environ Sci Technol*. (2010).
- [2] Villagrán-Zaccardi YA, Pico-Cortés CM, Zega CJ. "Incidencia del árido reciclado sobre la durabilidad del hormigón armado frente a la corrosión". In: XV Congreso Latinoamericano de Patología de Construcción y XVII Congreso de Control de Calidad en la Construcción CONPAT 2019, Vol 1. (2019). p. 12.
- [3] Traversa LP, Villagrán-Zaccardi YA. "Introducción a la durabilidad y patología de las estructuras de hormigón armado" [Internet]. IX Jornada Técnicas de restauración y conservación del patrimonio. La Plata, Argentina: Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CICPBA); (2010). p. 1–20. Available from: <http://digital.cic.gba.gov.ar/handle/11746/428>
- [4] von Greve-Dierfeld S, Lothenbach B, Vollpracht A, Wu B, Huet B, Andrade C, et al. "Understanding the carbonation of concrete with supplementary cementitious materials": a critical review by RILEM TC 281-CCC. *Mater Struct Constr*. (2020);
- [5] The International Standards Organisation. ISO 14040:2006. Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework. ISO 14040, Int Organ Stand. 2006;2006(7).
- [6] The International Standards Organisation. ISO 14044:2006. Environ Manag - Life cycle assesement - Requir Guidel ISO 14044, Int Organ Stand. 2006;2006(7).
- [7] Gonzalez-Corominas A, Etxeberria M, Poon C sun. "Influence of the Quality of Recycled Aggregates on the Mechanical and Durability Properties of High Performance Concrete". *Waste and Biomass Valorization*. (2017);
- [8] Rao A, Jha KN, Misra S. "Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete". *Resour Conserv Recycl*. (2007);
- [9] Otsuki N, Miyazato SI, Yodsudjai W. "Influence of recycled aggregate on interfacial transition zone, strength, chloride penetration and carbonation of concrete". *J Mater Civ Eng*. (2003)
- [10] Silva R V., Neves R, De Brito J, Dhir RK. "Carbonation behaviour of recycled aggregate concrete". *Cem Concr Compos*. (2015).
- [11] Bravo M, De Brito J, Pontes J, Evangelista L. "Durability performance of concrete with recycled aggregates from construction and demolition waste plants". *Constr Build Mater*. (2015)
- [12] Sáez del Bosque IF, Van den Heede P, De Belie N, Sánchez de Rojas MI, Medina C. "Carbonation of concrete with construction and demolition waste based recycled aggregates and cement with recycled content". *Cons Build Mater*. (2020).
- [13] Zega CJ, Santillán LR, Sosa ME, Villagrán Zaccardi YA. "Durable Performance of Recycled Aggregate Concrete in Aggressive Environments". *J Mater Civ Eng*. (2020);32(7):03120002.
- [14] Zega CJ, Villagrán-Zaccardi YA, Di Maio AA. "Effect of natural coarse aggregate type on the physical and mechanical properties of recycled coarse aggregates". *Mater Struct Constr*. (2010).
- [15] Cantero B, Sáez del Bosque IF, Matías A, Sánchez de Rojas MI, Medina C. "Water transport mechanisms in concretes bearing mixed recycled aggregates". *Cem Concr Compos* [Internet]. (2020);107:103486. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946519313290>.
- [16] Duan P, Shui Z, Chen W, Shen C. "Enhancing microstructure and durability of concrete from ground granulated blast furnace slag and metakaolin as cement replacement materials". *J Mater Res Technol* [Internet]. (2013);2(1):52–9. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785413000112>.
- [17] Khan MI, Siddique R. "Utilization of silica fume in concrete: Review of durability properties". *Resour Conserv Recycl* [Internet]. 2011;57:30–5. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344911001960>
- [18] Ribeiro AB, Santos T, Gonçalves A. "Performance of concrete exposed to natural carbonation: Use of the k-value concept". *Constr Build Mater*. (2018).
- [19] Kurda R, De Brito J, Silvestre JD. "Carbonation of concrete made with high amount of fly ash and recycled concrete aggregates for utilization of CO<sub>2</sub>". *J CO<sub>2</sub> Util*. (2019).
- [20] Leemann A, Nygaard P, Kaufmann J, Loser R. "Relation between carbonation resistance, mix design and exposure of mortar and concrete". *Cem Concr Compos*. (2015).
- [21] Elgalhud AA, Dhir RK, Ghataora GS. "Carbonation resistance of concrete: Limestone addition effect". *Mag Concr Res*. (2017);69(2):84–106.
- [22] Gruyaert E, Van Den Heede P, De Belie N. "Carbonation of slag concrete: Effect of the cement replacement level and curing on the carbonation coefficient - Effect of carbonation on the pore structure". *Cem Concr Compos* [Internet]. 2013;35(1):39–48. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.08.024>
- [23] Miyazawa S, Yokomuro T, Sakai E, Yatagai A, Nito N, Koibuchi K. "Properties of concrete using high C3S cement with ground granulated blast-furnace slag". *Constr Build Mater* [Internet]. (2014);61:90–6. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061814002554>
- [24] Chen Y, Liu P, Yu Z. "Effects of environmental factors on concrete carbonation depth and compressive strength". *Materials*, Basel. (2018);11(2167):1–11.
- [25] Kou SC, Poon CS. "Long-term mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete prepared with the incorporation of fly ash". *Cem Concr Compos*. (2013).
- [26] Pedro D, de Brito J, Evangelista L. "Durability performance of high-performance concrete made with recycled aggregates, fly ash and densified silica fume". *Cem Concr Compos*. (2018).

# ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE HORMIGONES ELABORADOS CON AGREGADOS NATURALES Y RECICLADOS, E INCIDENCIA DEL TRANSPORTE ASOCIADO EN LA REGIÓN METROPOLITANA DE BUENOS AIRES

Lucio Maselli<sup>1</sup>

1 LEMIT-CICPBA, B1900AYB, La Plata, Argentina, lucio.maselli@cyt.cic.gba.gob.ar

Palabras Clave: hormigón reciclado, análisis de ciclo de vida.

## Introducción

El presente trabajo inicia una serie de estudios de análisis de ciclo de vida (ACV) sobre hormigones, estructuras y sistemas técnicos que utilizan hormigón reciclado. Se busca analizar trayectorias que mejoren el desempeño ambiental del ciclo de vida del hormigón. El ACV es la herramienta metodológica estandarizada a nivel internacional mediante las normas ISO 14040 [1] e ISO 14044 [2], para evaluar el desempeño ambiental de un determinado producto. El presente trabajo es un primer paso para indagar sobre los inventarios disponibles en las bases de datos internacionales y abordar metodológicamente la mejora de la eco-eficiencia del hormigón. Se evaluaron las cargas ambientales de 9 alternativas. Se trabajó con el programa *openLCA v. 1.10.3* [3], y la base de datos *ecoinvent v. 3.7.1* [4]. Como punto de partida se tomaron los datos de *ecoinvent*, revisando los procesos para compararlos con la información primaria recabada en el mercado local. Las fuentes de información primaria fueron consultas a distintos actores de la industria.

## Objetivo y alcance

El objetivo del presente estudio es comparar los impactos ambientales asociados a la producción de 3 tipos de hormigones que varían en su contenido de agregados gruesos naturales (AGN) y su contenido de agregados gruesos reciclados (AGR), combinando con 3 escenarios de transporte de los materiales constituyentes hasta las plantas hormigoneras, en el ámbito de la Región Metropolitana de Buenos Aires (RMBA). El alcance en cuanto a las fases del ciclo de vida es desde la producción de las materias primas hasta el despacho en la planta hormigonera (de la cuna a la puerta), etapas A1-A3 (etapa de producto) según norma ISO 15804 [5]. La unidad funcional de referencia se estableció en 1 m<sup>3</sup> de hormigón elaborado en planta, sin poner en obra. Se tomaron 3 hormigones de la tesis "Propiedades Físico - Mecánicas y Durables de Hormigones Reciclados" de Zega [6]. El primario, HG45, y los secundarios HRG45-25 y HRG45-75, con 25 y 75 % de AGR del primario en reemplazo de los AGN.

Según la bibliografía, la incidencia del transporte en la eco-eficiencia del hormigón se ubica en 2º lugar luego de la producción del cemento. En la RMBA, el cemento y los AGN son transportados más de 300 km en camiones con bateas de 30 t, generalmente sin carga en el trayecto de vuelta. Por esto se analizaron 2 escenarios de optimización del transporte, los cuales se listan en la tabla 1, según trabajos anteriores del autor [10, 11]. Para los AGN se tomó una distancia favorable. Para los AGR se tomaron dos plantas que el autor relevó y se fijó distancia para alcanzar los puntos más distantes, Zárate y La Plata, para comparar las situaciones más desfavorables para el AGR frente al AGN. Para el transporte del hormigón de demolición se tomaron 10 km por provenir de zonas cercanas. El resto de las distancias, si bien pueden ser ajustadas, no varían de un escenario a otro, por lo que, al margen del resultado absoluto, no interfieren en el análisis de resultados relativos de la comparación. Debido a la ausencia de norma local, se utilizó la norma europea EN 16258:2012[9], que atribuye para los viajes con vuelta vacía de camión, un factor de 0,64 sobre la distancia completa de ida y vuelta considerada.

## Análisis del inventario de ciclo de vida (AICV)

Como se mencionó anteriormente, se editaron los procesos de la base de datos con datos locales. Cabe señalar que este estudio es una instancia preliminar, ya que en estudios futuros se elaborarán ICV de proveedores locales de los materiales constituyentes para estudios detallados.

- Electricidad: Se editó la electricidad de los procesos de principal importancia con los datos de CAMMESSA de la matriz energética argentina actualizada al 2017.
- Cemento: Zega utilizó cemento Portland compuesto CPC40. Se tomó como base un proceso de producción de cemento brasileiro de características similares, CP II-E, según ABNT NBR 11578:1991, con 6-34% de escoria, similar al 6-35% del CPC 40. Se observaron combustibles relativamente análogos a los usados en los hornos de Clinker locales.

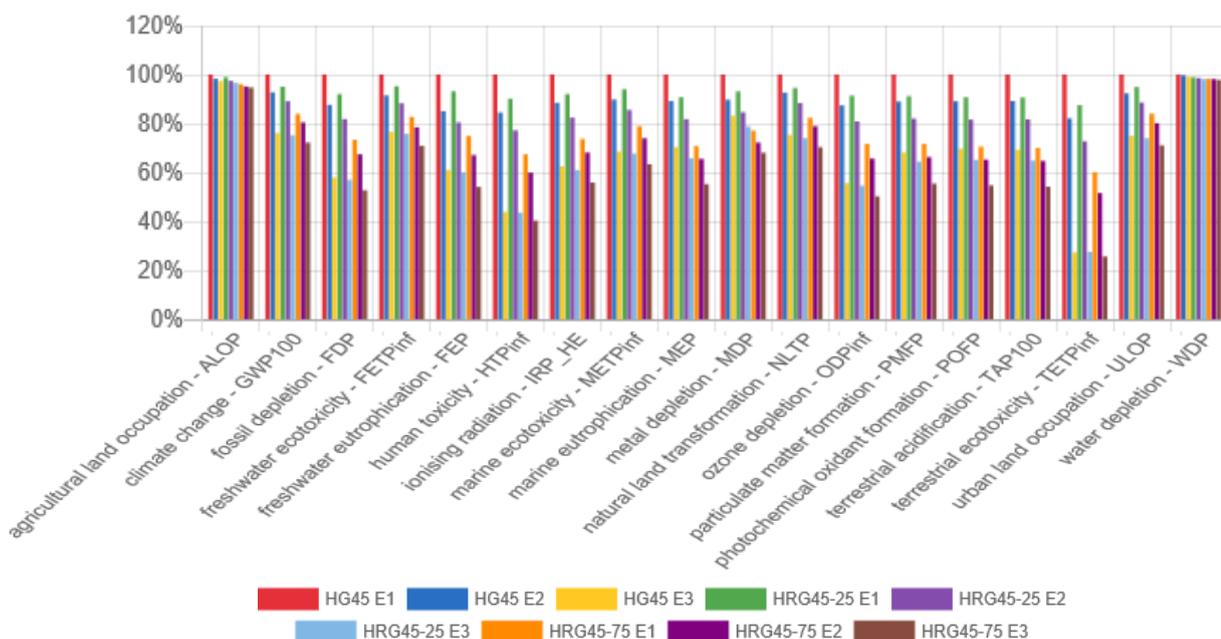
**Tabla 1:** Escenarios de transporte evaluados para cada material constituyente.

Material	E1	E2	E3
AGN y cemento	Camión 30 t vuelve vacío - 335 km	Camión 30 t vuelve lleno - 335 km	Tren - Camión 30 t 335-15 km
AGR	Camión 15 t - 10 km Camión 30 t - 50 km vuelven vacíos	Camión 15 t - 10 km Camión 30 t - 50 km vuelven vacíos	Camión 15 t - 10 km Camión 30 t - 50 km vuelven vacíos
Agregado fino	Camión 30 t - 40 km vuelve vacío	Camión 30 t - 40 km vuelve vacío	Camión 30 t - 40 km vuelve vacío

- Arena: argentina y oriental, del Río Paraná. Se tomó como base el proceso “sand quarry operation, extraction from river bed | sand | Cutoff, U”, que tiene características similares.
- AGN: Se tomó “gravel production, crushed | gravel, crushed | Cutoff, U”, de características similares a las locales, con explosivos para extracción, y trituración y cribado *in situ*.
- AGR: Se tomó en cuenta un caso de reciclado directo de hormigón de demolición separado en origen, proveniente principalmente de pavimentos, compatible con las plantas de reciclado de hormigón de Fenomix en San Fernando, y de la Ciudad de Buenos Aires (CABA) gestionada por EVASA. Por este motivo se consideró la demolición (energía y emisiones aéreas), el transporte de la obra de demolición a la planta de reciclado, y la trituración y cribado. Fueron modelados según “treatment of waste concrete gravel, recycling | waste concrete gravel | Cutoff, U” y “treatment of waste concrete gravel, sorting plant | waste concrete gravel | Cutoff, U”.

### Evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV)

Para la EICV se usó el método *ReCiPe 2016 Midpoint (H)* [10], porque contiene el potencial de calentamiento global y el material particulado (polvos de distintas granulometrías), que son importantes en el caso. En la figura 1 se presentan los resultados relativos, asignando un 100% a la variante con mayor impacto de cada indicador y comparando al resto en relación a ella. Puede observarse como la variante HG45 E1 es la que mayores impactos presenta en las 18 categorías. Si bien no se desglosarán los resultados, son evidentes las variaciones a favor del uso de AGR. En este caso, se seleccionó para analizar el indicador de potencial de calentamiento global (GWP100), en las figuras 2 y 3, se enumeran los resultados para cada hormigón, en cada escenario de transporte, otorgando los resultados de las 9 variantes estudiadas, en un rango que va de los 380 kg CO<sub>2</sub>eq para la variante HG45 E1, a 274 kg CO<sub>2</sub>eq para la HRG45-75 E3. Esto significa una reducción de 106 kg CO<sub>2</sub>eq.



**Figura 1:** Resultados relativos de la EICV, del reporte de *openLCA*.

## Interpretación

Las 9 alternativas se agruparon según el hormigón, variando el escenario, en la figura 2. Por otro lado, en la figura 3, se presentan los resultados ordenando de mayor a menor impacto del indicador, incluyendo el GWP100 evitado y la reducción porcentual del impacto de cada variante. Del análisis puede extraerse como primera observación, que todas las variantes reducen el impacto del primario, HG45, tal como se observó en la figura 3, por lo que son situaciones deseables, en cualquiera de sus versiones. En segundo lugar, que la mayor incidencia está dada por el escenario de transporte E3, ya que las 3 variantes de hormigones de dicho escenario son las que más reducen el impacto. Como tercera observación, que un reemplazo del 75% de los AGN implica, en el E1, es decir, sin hacer ninguna optimización de las planteadas del transporte, mayor reducción que el reemplazo de 25% en el E2. Esto se debe a la reducción de las distancias de transporte que implica el uso de los AGR, cuyos puntos de origen se hallan dentro del AMBA, en las zonas más urbanizadas o construidas. Por último, puede afirmarse que a mayor reemplazo del AGN, menor es la brecha que plantean los E2 y E3 en cada hormigón, según puede observarse en la figura 4, ya que inciden a través de la cantidad de AGN. De este modo, en caso de darse el uso de hormigones con un 75 % de AGR, no sería prioritaria la mejora del transporte de AGN.

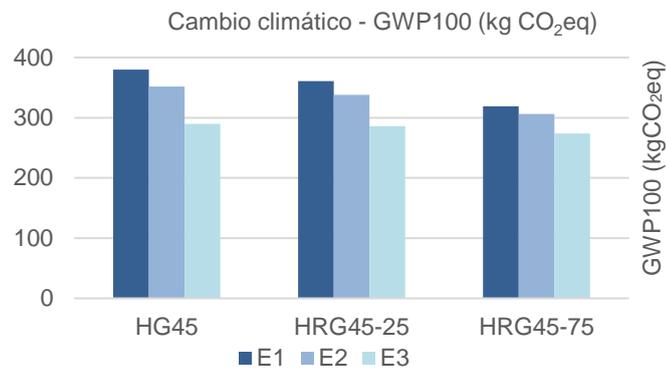


Figura 2: GWP100 por tipo de hormigón.

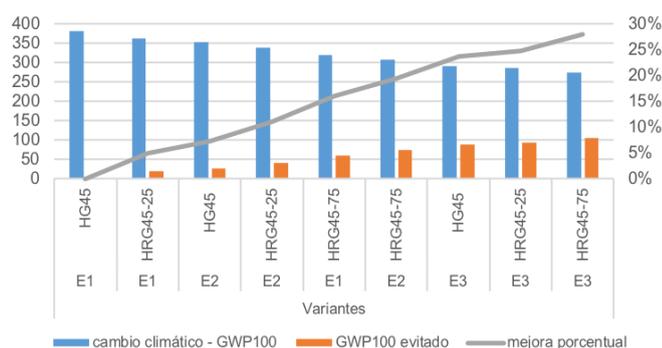


Figura 3: GWP100 de mayor a menor impacto.

## Agradecimientos

Esta publicación ha sido financiada por la Agencia Nacional para la promoción de la Investigación, el Desarrollo Tecnológico y la Innovación, mediante FONCyT, PICT 2017-0091 Préstamo BID. El autor agradece al Dr. Ing. Yury Villagrán por la exigencia planteada en el primer tramo de esta investigación. Al Dr. Arq. Gustavo San Juan, y a la Dra. Ing. Roxana Piastrellini por la etapa venidera. A su vez agradece al Jefe del Área de Tecnología del Hormigón del LEMIT-CICPBA, Dr. Ing. Claudio Zega, y a los colegas Dr. Ing. Lautaro Santillán y Dra. Ing. Eva Sosa, por haber colaborado innumerables veces con el autor. Por último, agradece a los colaboradores de la industria, Pablo Carreño y Rafael Verna de Fenomix por su predisposición, y a Eduardo Franchi de EVASA.

## Referencias

- [1] ISO, «ISO 14040: Environmental management—life cycle assessment—Principles and framework», *Int. Organ. Stand.*, vol. 2006, 2006.
- [2] ISO, *ISO 14044:2006 Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines Management*. Ginebra: ISO, 2006.
- [3] «OpenLCA download section». [En línea]. Disponible en: <https://www.openlca.org/download/>. [Accedido: 15-jul-2021].
- [4] «ecoinvent». [En línea]. Disponible en: <https://www.ecoinvent.org/>. [Accedido: 15-jul-2021].
- [5] UNE-EN, «UNE-EN 15804:2012+A1:2014 Sostenibilidad en la construcción. Declaraciones ambientales de producto. Reglas de categoría de producto básicas para productos de construcción.» 2014.
- [6] C. J. Zega, «Propiedades Físico - Mecánicas y Durables de Hormigones Reciclados», p. 190, 2010.
- [7] L. Maselli, Y. A. Villagrán Zaccardi, y G. San Juan, «Consideraciones preliminares al análisis de ciclo de vida de estructuras de hormigón elaborado con agregados reciclados en Provincia de Buenos Aires», *Cienc. y Tecnol. los Mater.*, vol. 10, 2020.
- [8] A. González, M. C. Montero, L. Maselli, y D. P. Rautenberg, «Incidencia del transporte en la eco-eficiencia de la producción de hormigón elaborado en Argentina», *Ingenio Tecnológico*, vol. 3, n.º 17, 2021.
- [9] E. Norm, «European Norm EN 16258:2012 "Methodology for calculation and declaration of energy consumption and GHG emissions of transport services.» .
- [10] National Institute for Public Health and the Environment. The Netherlands., *ReCiPe 2016 v1.1*. 2017.

# EVALUACIÓN DEL USO DE ESCORIA DE ACERÍA EN LA PRODUCCIÓN DE MORTERO DE REVESTIMIENTO

Wanner Kelly Damasceno da Silva<sup>1</sup>, Leonaria Araujo Silva<sup>1</sup>, Antônio Eduardo Bezerra Cabral<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Estudiante de posgrado – Programa de Ingeniería Civil: Estructuras y Construcción Civil, Universidad Federal de Ceará / Brasil

<sup>2</sup> Profesor Doctor – Programa de Ingeniería Civil: Estructuras y Construcción Civil, Universidad Federal de Ceará / Brasil

Palabras Clave: mortero, industria siderúrgica, escoria de acería, reutilización de residuos, materiales.

## Introducción

La industria del acero es un importante proveedor de insumos para la construcción civil, con su producción mundial, en 2020, equivalente a aproximadamente 1,9 mil millones de toneladas de acero bruto y la producción nacional de 31,0 millones de toneladas [1]. Sin embargo, la industria del acero produce un volumen significativo de residuos, incluida la escoria de acero, representada por el 26% del total de coproductos y residuos directos producidos en Brasil en 2019, es decir, 4,68 millones de toneladas [2]. La mayoría de estos residuos se utilizan actualmente para aplicaciones en bases y sub-bases de carreteras (50%), así como en nivelación de terrenos y rellenos sanitarios (42%).

Se realizaron numerosos estudios con el objetivo de minimizar los impactos derivados de la inadecuada disposición de la escoria de acería, como evaluaron el uso de escoria en rellenos sanitarios y encontraron que este residuo tiene potencial para ser utilizado, presentando un costo reducido en comparación con otros materiales [3] y reemplazaron los agregados gruesos y finos del hormigón convencional por escoria, concluyendo que este residuo mejora las propiedades del hormigón [4]. Sin embargo, existe una escasez de estudios, principalmente en el escenario nacional, para evaluar la reutilización de escoria de acería como agregado en mortero para la construcción civil. Este es un sector que tiene un papel importante en la economía brasileña, correspondiente al 3,7% del PIB nacional, en 2019, [5] y que requiere una gran cantidad de materiales, una vez que demanda el 60% de las materias primas extraídas de la litosfera, representando el 32% de los recursos mundiales, incluso el 12% del agua y hasta el 40% de la energía consumida a nivel mundial [6] [7].

Los retos que enfrentan las siderúrgicas brasileñas en relación con las acerías de conversión LD, que originan entre el 75% y el 80% de la producción brasileña de acero crudo, son similares a los observados en las multinacionales. En términos de comportamiento medioambiental, el gas de la acería LD está muy lleno de monóxido de carbono, teniendo un amplio margen para mejorar su uso, tanto en la generación de electricidad como en la generación de energía para el propio proceso [8]. Además, es necesario desarrollar usos más nobles para la escoria de acero, como sus aplicaciones en capa base o sub-base del pavimento de asfalto recuperado [9] y en morteros cementosos [10].

## Materiales y Métodos

Fueron producidos morteros similares a la mezcla habitual en obras brasileñas en la proporción de cemento, cal hidratada y arena mojada 1:1:6 recomendado para fachadas exteriores, dada la agresividad inherente a la exposición del revestimiento. Así, cuatro proporciones fueron realizados con 0% (valor de referencia); 10%; 20% y 30% de escoria de acero, sustituyendo, en volumen, al agregado fino natural. La Tabla 1 expone el consumo de material por metro cúbico de mortero, suponiendo, por intento y error, la relación agua/cemento descubierta para cada porcentaje de reposición de escoria en la mezcla, mediante la prueba de índice de consistencia.

Tabla 1: Consumo de materiales por metro cúbico de mortero.

Proporción	Porcentaje de sustitución (%)	Cemento (kg/m <sup>3</sup> )	Cal (kg/m <sup>3</sup> )	Arena (kg/m <sup>3</sup> )	Escoria de acero (kg/m <sup>3</sup> )	Água (l/m <sup>3</sup> )
P1	0	293	117	1396	-	325
P2	10	292	117	1252	205	327
P3	20	285	114	1088	401	342
P4	30	284	113	947	598	346

Se utilizó cemento CP V ARI de fabricación local, considerando que tiene un bajo contenido de adiciones, reduciendo las variables que posiblemente puedan interferir en las propiedades analizadas, además de ser uno de los cementos más utilizados en la región de Brasil. La cal hidratada utilizada fue CH I, dado el mejor desempeño de esta categoría de cal, de acuerdo con sus características químicas y físicas observadas en el estándar brasileño NBR 7175: 2003.

La arena utilizada para producir el mortero en estudio provino de un río y se realizaron ensayos de caracterización, tales como la determinación de masa específica (NBR NM 52: 2009), densidad a granel (NBR NM 45: 2006), absorción de agua (NBR NM 30: 2001), tamaño de partícula (NBR NM 248: 2003) y contenido de material fino que pasa a través del tamiz 75  $\mu\text{m}$ , por lavado (NM 46: 2003). Se seleccionó la escoria de acero de convertidor de oxígeno, tratada por el proceso *BSSF* (*Baosteel Slag Short Flow*), con un tamaño de partícula equivalente al agregado fino. Este residuo de acero se recogió en una siderúrgica brasileña. Después de la recolección y selección de los agregados, se llevó a cabo el ajuste de la distribución del tamaño de partícula del residuo de acero para igualar la curva de tamaño de partícula del agregado natural, con el fin de igualar el tamaño de los granos.

Con el objetivo de verificar la viabilidad técnica de la escoria de acería por el proceso *BSSF* como agregado fino en mortero mixto para revestimiento, se realizaron los ensayos de resistencia a la tracción por flexión; resistencia a la compresión axial; resistencia a la adherencia, con los resultados comparados estadísticamente mediante análisis de varianza (ANOVA), con un 95% de confiabilidad.

## Resultados y Discusión

La Tabla 2 presenta los resultados de la caracterización del agregado fino natural y de la escoria de acero *BSSF* en términos de masa específica (NBR NM 52: 2009), densidad a granel (NBR NM 45: 2006), absorción de agua (NBR NM 30: 2001), tamaño de partícula (NBR NM 248: 2003) y contenido de material fino que pasa a través del tamiz 75  $\mu\text{m}$ , por lavado (NM 46: 2003).

Tabla 2: Caracterización física de arena y escoria *BSSF* para aplicación en mortero mixto.

Propiedades	Agregado fino natural (arena)	Agregado de acero (Escoria <i>BSSF</i> )
Masa específica ( $\text{g/cm}^3$ )	2,62	3,86
Densidad a granel ( $\text{g/cm}^3$ )	1,61	2,08
Absorción (%)	0,4	2,1
Módulo de finura	2,26	2,26
Dimensión característica máxima (mm)	1,18	1,18
Material fino que pasa a través del tamiz 75 $\mu\text{m}$ , por lavado (%)	0,5	1,3

Se analizaron tres muestras prismáticas en cada edad (7 días y 28 días), para verificar la resistencia a la tracción por flexión, y seis muestras en estas edades, para analizar la resistencia a la compresión axial, donde los resultados se ven en la Tabla 3.

Tabla 3: Resultados medios obtenidos de los ensayos de resistencia de flexión y compresión ( $\text{N/mm}^2$ ).

Proporción	Porcentaje de sustitución (%)	Flexión		Compresión	
		7 días	28 días	7 días	28 días
P1	0	3,7	4,1	11,8	14,6
P2	10	4,7	3,9	11,0	13,4
P3	20	3,6	3,5	9,5	12,2
P4	30	3,1	4,4	10,5	12,9

Mediante el análisis estadístico (ANOVA), se encontró que, para las edades de 7 días y 28 días, el contenido de escoria de acero *BSSF* no influye en la propiedad de resistencia a la tracción por flexión, siendo la diferencia entre los grupos no significativa, según la evaluación de Tukey. Se observa que los morteros mixtos con sustitución de arena por escoria de acero *BSSF*, en porcentajes del 10%, 20% y 30%, presentan un comportamiento equivalente al mortero convencional.

Para la resistencia a la compresión axial, los morteros mixtos con 10% y 30% de escoria *BSSF* indicaron una diferencia no significativa entre ellos. Sin embargo, para los otros grupos sí hubo diferencia significativa a la edad de 7 días. A los 28 días, nuevamente, hubo una diferencia no significativa entre los grupos del 10% y el 30%, así como entre el 0% y el 10%; 20% y 30%. El mortero de revestimiento con 10% de escoria *BSSF* es equivalente al mortero mixto convencional, en cuanto a resistencia a la compresión axial a los 28 días de curado al aire.

Se observó, para la resistencia a la adherencia, que el uso de escoria de acero *BSSF* en morteros mixtos presenta un comportamiento similar al mortero compuesto por agregado fino natural (arena). En los resultados, se observó que todos los morteros mixtos fueron aprobados, ya que se obtuvieron más de ocho muestras con valores arriba del establecido para el límite de resistencia a la adherencia para muros interiores con acabado de pintura, es decir, resistencia promedio superior a 0,20 MPa para todas las proporciones estudiadas. A partir del análisis de varianza, se encontró que aumentar el contenido de agregado de acero hasta 30% no conduce a una disminución significativa en los promedios, a causa de los resultados de 0,28 MPa para las proporciones P1 y P2; 0,27 MPa (P3) y 0,22 MPa (P4).

## Conclusiones

De los análisis anteriores se puede concluir que la escoria de acero *BSSF* es técnicamente viable para ser utilizada como agregado fino en sustitución parcial del agregado natural en la ejecución de revestimientos de mortero para muros interiores con acabado de pintura. Para garantizar una resistencia a la tracción por flexión, compresión axial y adherencia similar al mortero de referencia, se recomienda sustituir hasta 10% de arena por escoria *BSSF*, que es el contenido óptimo indicado, ya que desde este porcentaje se obtuvo una disminución de la resistencia a la compresión axial a los 7 y 28 días de curado.

## Referencias

### Páginas Web:

- [1] Worldsteel Association, "World Steel in Figures 2021 now available", disponible Online en: <https://www.worldsteel.org/media-centre/press-releases/2021/world-steel-in-figures-2021.html>, (25/06/2021).
- [2] Instituto Aço Brasil. "Aço & sustentabilidade 2020", disponible Online en: [https://acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2019/08/SUSTENTAB\\_digital\\_2020-1.pdf](https://acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2019/08/SUSTENTAB_digital_2020-1.pdf), (25/06/2021).
- [5] DIEESE - Departamento Intersindical de Estatística e Estudos Socioeconômicos, "A Construção Civil e os Trabalhadores: panorama dos anos recentes", disponible Online en: <https://www.dieese.org.br/estudosepesquisas/2020/estPesq95trabconstrucaocivil.pdf>, (25/06/2021).
- [8] Centro de Gestão de Estudos Estratégicos (CGEE). "Siderurgia en Brasil 2010-2025: Subsídios para la toma de decisiones. Brasília", disponible Online en: [https://www.cgee.org.br/documents/10195/734063/Siderurgia\\_no\\_Brasil\\_\\_9567.pdf/893da7ee-8608-4251-adc1-10c2bf95b009?version=1.0](https://www.cgee.org.br/documents/10195/734063/Siderurgia_no_Brasil__9567.pdf/893da7ee-8608-4251-adc1-10c2bf95b009?version=1.0), (25/06/2021).

### Revistas Electrónicas:

- [3] Xiao, B.; Wen, Z.; Miao, S.; Gao, Q. "Utilization of steel slag for cemented tailings backfill: Hydration, strength, pore structure, and cost analysis", *Case Studies in Construction Materials*, Vol., 15, (2021), p. e00621. Disponible Online en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509521001364>, (25/06/2021).
- [4] Lai, M. H.; Zou, J.; Yao, B.; Ho, J. C. M.; Zhuang, X.; Wang, Q. "Improving mechanical behavior and microstructure of concrete by using BOF steel slag aggregate", *Construction and Building Materials*, Vol., 277 (2021), p. 122269. Disponible Online en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061821000295>, (25/06/2021).
- [6] Xu, J.; Deng, Y.; Shi, Y.; Huang, Y. "A bi-level optimization approach for sustainable development and carbon emissions reduction towards construction materials industry: a case study from China", *Sustainable Cities and Society*, Vol. 53, (2020), p. 101828. Disponible Online en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670719315975#bib0025>
- [7] Martins, A. C. P.; Carvalho, J. M. F.; Costa L. C. B.; Andrade, H. D.; Melo, T. V.; Ribeiro, J. C. L.; Pedroti, L. G.; Peixoto, R. A. F. "Steel slags in cement-based composites: An ultimate review on characterization, applications and performance", *Construction and Building Materials*, Vol. 291, (2021), p. 123265. Disponible Online en: [https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061821010254?casa\\_token=6FPLzdgiUqgAAAAA:dG13X0m0XKARepvajAQbAhCvG7Eid3K66Af5xs9-JJ5MPh0oEtB8E7-IB7c92BFfcopErfasDA](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061821010254?casa_token=6FPLzdgiUqgAAAAA:dG13X0m0XKARepvajAQbAhCvG7Eid3K66Af5xs9-JJ5MPh0oEtB8E7-IB7c92BFfcopErfasDA)
- [9] Chen, S. H.; Lin, D. F.; Luo, H. L.; Lin, Z. Y. "Application of reclaimed basic oxygen furnace slag asphalt pavement in road base aggregate", *Construction and Building Materials*, Vol. 157, (2017), p. 647-653. Disponible Online en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061817319621>
- [10] Campos, S. A.; Rafael, M. F. C.; Cabral, A. E. B. "Evaluation of steel slag of Companhia Siderúrgica do Pecém replacing fine aggregate on mortars", *Procedia Structural Integrity*, Vol. 11, (2018), p. 145-152. Disponible Online en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452321618301215>

# CONTRACCIÓN POR SECADO EN HORMIGONES CON AGREGADO FINO RECICLADO

María E. Sosa<sup>1</sup>, Claudio J. Zega<sup>2</sup>, Ángel A. Di Maio<sup>3</sup>

<sup>1</sup> CITEMA-CONICET; LEMaC centro de investigaciones viales UTN-FRLP

<sup>2</sup> LEMIT, CONICET

<sup>3</sup> LEMIT

Palabras Clave: Agregado fino reciclado, contracción por secado, absorción de agua.

## Introducción

Los agregados finos reciclados (AFR) provenientes de la trituración de hormigones de desecho presentan en su composición contenidos variables de pasta de cemento endurecida. Esta pasta es la responsable de la menor densidad y durabilidad y mayor absorción, porosidad y contenido de material menor a 75  $\mu\text{m}$  en comparación con los agregados finos naturales (AFN) [1-2]. Estas propiedades distintivas junto con el contenido adicional de pasta, pueden modificar la respuesta mecánica, elástica y durable de los hormigones en los que son empleados.

En particular, estudios realizados décadas atrás desaconsejaban el empleo de AFR debido precisamente al incremento potencial de la contracción por secado [3-4] como consecuencia de las mencionadas características del AFR. Dicho incremento se atribuía a la influencia del menor módulo de elasticidad de los AFR en comparación con los AFN, y al mayor contenido de pasta y porosidad del hormigón elaborado con AFR. Sin embargo, en estudios más actuales pueden encontrarse, en igual número, trabajos que coinciden con lo reportado por [3-4] así como también otros [5-6] que concluyen que se obtienen similares niveles de contracción por secado en hormigones patrones y reciclados al utilizar AFR en reemplazo del AFN. Entre las variables más importantes que determinan la influencia del AFR sobre la contracción por secado del hormigón se señala su calidad y la forma en que se compensa la absorción del AFR en la dosificación [7-8].

El objetivo de este trabajo es evaluar la influencia que ejerce en la contracción por secado distintas variables del AFR tales como la calidad del hormigón de origen del cual proviene el AFR, la forma de considerar su absorción en la dosificación y el nivel resistente del hormigón producido.

## Metodología

Para cumplir con el objetivo planteado se elaboraron dos hormigones patrones con 30% (en volumen) de arena de trituración granítica (ATG), de relaciones a/c 0,40 y 0,55. Para los hormigones reciclados se utilizaron dos AFR (RG1 y RG2) provenientes de hormigones con distintos niveles resistentes. Cada AFR fue empleado en reemplazo del ATG para la elaboración de dos series de hormigones. En la serie I, los AFR se emplearon en estado secos al aire y no se compensó la absorción de agua de los mismos, en tanto que en la serie II, el 80% del agua correspondiente a la absorción de los AFR se adicionó al agua de mezclado. En la Tabla 1 se presentan las propiedades de los AFR y ATG, indicándose la resistencia a compresión de los hormigones de origen. En la Tabla 2 se presenta las dosificaciones de los hormigones elaborados. La nomenclatura utilizada para los hormigones reciclados se compone en primer lugar del número de serie, un número que refiere a la relación a/c utilizada (4 y 6 para a/c 0,40 y 0,55 respectivamente) y el AFR utilizado. Los hormigones patrones se identifican con la letra P seguida del número que refiere a la relación a/c utilizada.

Tabla 1: Propiedades de los agregados finos utilizados.

Agregado fino	Densidad	Absorción (%)	Pasa tamiz 75 $\mu\text{m}$	Contenido de pasta (%)	Resistencia del hormigón de origen (MPa)
RG1	2,48	5,2	5,0	31,0	45,1
RG2	2,41	6,2	7,2	30,5	28,6
ATG	2,69	0,6	4,0	---	---

Tabla 2: Dosificación de los hormigones kg/m<sup>3</sup>.

Hormigón	agua	Cemento	Agregado grueso	Arena silícea	ATG	AFR
P4	152	381	981	610	255	---
I-4-RG1	152	381	981	610	---	246
I-4-RG2	152	381	981	610	---	238
II-4-RG1	162	381	981	610	---	246
II-4-RG2	162	381	981	610	---	238
P6	174	315	981	610	---	---
I-6-RG1	174	315	981	610	---	246
I-6-RG2	174	315	981	610	---	238
II-6-RG1	184	315	981	610	---	246
II-6-RG2	186	315	981	610	---	238

## Resultados y discusión

En la Figura 1 se presenta la contracción por secado en función del tiempo para los hormigones bajo estudio. La forma de las curvas contracción-edad es similar en todos los hormigones, con un rápido aumento de la contracción en las primeras edades y una disminución gradual posterior. La contracción última (a 365 días) para los hormigones de relación  $a/c=0,40$  (Fig. 1 a) fue similar en los hormigones patrones y reciclados, aunque la calidad del AFR ejerce cierta influencia en los valores de contracción obtenidos. Para RG1, la contracción a los 365 días fue un 5% menor que la obtenida con RG2 en la serie I y un 10% menor en la serie II. En los hormigones de relación  $a/c=0,55$  (Fig. 1 b) la contracción última del hormigón patrón y reciclado fue similar solo para la serie I, en tanto que para la serie II la contracción final fue aproximadamente un 10% mayor que la del hormigón patrón.

Con respecto a la calidad del AFR, la diferencia en el nivel de resistencia a la compresión del hormigón de origen es un 57% (16,5 MPa) más alto para RG1 en comparación con RG2. Esta diferencia produce diferencias menores al 10% en los valores de contracción final. Sin embargo, esta contracción relativamente más alta en los hormigones de la serie II podría estar relacionada con la mayor cantidad total de agua de mezclado empleada en los mismos.

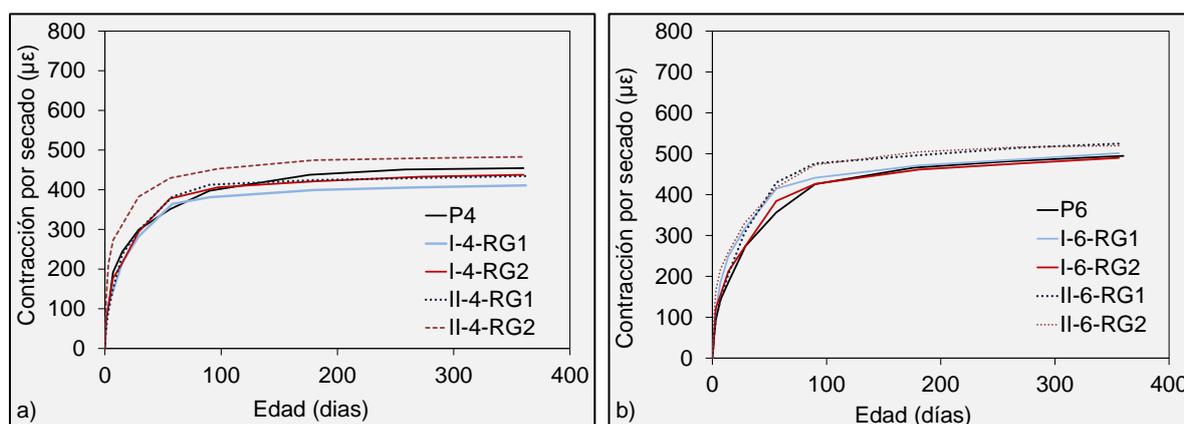


Figura 1 – Contracción por secado

En la Figura 2 se presenta la contracción por secado relativa al patrón. Hasta la edad de 56 días todos los hormigones presentan inestabilidad en la contracción por secado con valores hasta 200% superiores al del correspondiente patrón. Después de dicha edad todos los hormigones presentan una pendiente negativa de la curva lo que indica que el aumento de la contracción es mayor en los hormigones patrones que en los reciclados. Esta diferencia entre el patrón y reciclados podría deberse al agua almacenada en los AFR, ya que tiene una mayor porosidad que los agregados naturales. Entonces, es posible que almacenen agua en sus poros capilares y su liberación sea más lenta que en los hormigones patrones compensando la pérdida de agua en la pasta de cemento, generando que la estabilidad de la contracción se logre a edades más cortas para los hormigones con AFR.

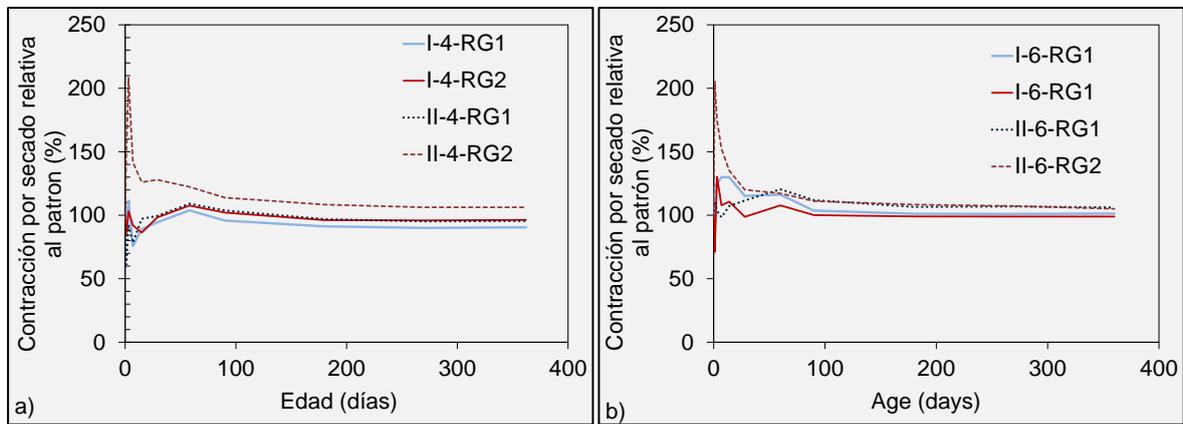


Figura 2 – Contracción por secado relativa al patrón

## Conclusiones

De los estudios realizados sobre la influencia del AFR sobre la contracción por secado de hormigones de dos niveles resistentes, puede señalarse que:

- El desarrollo de contracción se modifica cuando se usa AFR. Se observó un aumento rápido y mayor de la contracción a edades tempranas en los hormigones reciclados en comparación con los patrones. Después de 56 días, esta tendencia se invierte y el aumento de la contracción es mayor en el patrón que en los hormigones reciclados. Este comportamiento podría deberse al almacenamiento de agua en los poros del AFR que se libera lentamente permitiendo compensar parcialmente la pérdida de humedad de la probeta.
- La contracción de los hormigones está influenciada mayormente por la relación a/c y el contenido de agua total del nuevo hormigón que por el uso de AFR en sí mismo. Así, variables como la calidad de los AFR y la forma de compensar la absorción de agua de los mismos tienen una influencia secundaria sobre la contracción por secado.

## Referencias

- [1] Kou, S., "Reusing recycled aggregates in structural concrete". PhD Thesis, Polytechnic University Hong Kong, Hong Kong, Japan. (2006). 206p.
- [2] Cartuxo, F., de Brito, J., Evangelista, L., Jiménez, J.R. and Ledesma, E.F., "Rheological behaviour of concrete with fine recycled concrete aggregates – Influence of the superplasticizer". *Construction and Building Materials*, 89, (2015), 36-47.
- [3] Hansen, T. C. "Recycled aggregate and recycled aggregate concrete. Second state of-the-art. Report developments". *Materials and Structures*. 19 (3), (1986), 1845-1985
- [4] Ravindrarajah, S.R., Tam, T.C., "Recycling concrete as fine aggregate in concrete". *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*. 4 (9), (1987), 235-241.
- [5] Zega, C.J., Di Maio, A.A., "Use of recycled fine aggregate in concretes with durable requirements". *Waste Management*. 31, (2011), 2336-2340.
- [6] Evangelista, L., de Brito, J., "Criteria for the use of fine recycled concrete aggregates in concrete production". In: Vázquez, E., Hendriks, C.F., Jansen, G.M.T. (Eds.), *Proc. Int. RILEM Conference: The Use of Recycled Materials in Building and Structures*, RILEM., (2004) 503-510. Barcelona, Spain
- [7] Zhang, H., Wang, Y., Lheman, D.E., Geng, Y., Kuder, K., "Time-dependent drying shrinkage model for concrete with coarse and fine recycled aggregate". *Cement and Concrete Composite*. 105, (2020) 103426.
- [8] Yildirim, S.T., Meyer, C., Herfellner, S., "Effects of internal curing on the strength, drying shrinkage and freeze–thaw resistance of concrete containing recycled concrete aggregates". *Construction and Building materials*. 91, (2015), 288-296.

# ACTIVACIÓN ALCALINA DE CEMENTOS HÍBRIDOS A BASE DE SUBPRODUCTOS INDUSTRIALES Y RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN UTILIZANDO ACTIVADORES ALTERNATIVOS SÓLIDOS PARA LA PRODUCCIÓN DE CONCRETOS.

William Gustavo-Valencia, Rafael Robayo-Salazar , Ruby Mejía de Gutiérrez  
Grupo Materiales Compuestos (CENM), Universidad del Valle, Cali-Colombia

Palabras claves: Activación alcalina, Cenizas Volantes, residuos de construcción y demolición, sulfato de sodio, propiedades mecánicas.

## Introducción

Durante los últimos años han surgido diferentes cementantes alternativos dentro de los que se encuentran los denominados cementos de activación alcalina o geopolímeros, estos nuevos materiales presentan un excelente desempeño mecánico, incluso a edades cortas, reducida permeabilidad, estabilidad química y térmica, constituyéndose así en materiales de alto desempeño. Pero se ha determinado que los cementos de activación alcalina pueden tener durante su ciclo de vida problemas ambientales similares a los del cemento Portland en cuanto a la emisión de CO<sub>2</sub> y requisitos de energía, la mayor parte de las emisiones de los sistemas de activación alcalina se pueden atribuir a las soluciones activadoras debido al consumo de energía asociado a su producción (silicatos e hidróxidos). Una estrategia para mitigar estos efectos negativos del cemento de activación alcalina es utilizar activadores de menor impacto ambiental como lo es el sulfato de sodio (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>).

## Metodología

Como materias primas para la producción de los sistemas híbridos de activación alcalina, se utilizó ceniza volante colombiana (CV), residuos de construcción y demolición (concreto, cerámica roja y mampostería) (RCD) y cemento portland de uso general (OPC). La producción de los materiales de activación alcalina a partir del aprovechamiento de CV y los RCD se resume en la figura 1. A partir de la combinación de los precursores CV y RCD, con el activador alcalino (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) fue posible obtener sistemas "Cementantes de activación alcalina". La adición de OPC en pequeñas proporciones (10-30% en peso) hizo posible la obtención de un "Cemento Híbrido" (binder), el cual endureció y desarrolló resistencias a temperatura ambiente.



Figura 1. Resumen esquemático de la metodología desarrollada para la obtención de los *materiales de activación alcalina* basados en CV y RCD

Para la optimización del Cemento Híbrido se evaluó el efecto del contenido de activador alcalino (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> en 2, 4 y 6%) y el contenido de cemento portland en 10, 20 y 30%. Se evaluó la resistencia a la compresión a edades de curado de 3, 7, 28 y 90 días a nivel de pastas. A partir de los cementos híbridos óptimos se produjo concretos de activación alcalina activados, utilizando agregados reciclados (fino y grueso).

## Resultados

La figura 2 presenta la optimización de los sistemas de activación alcalina y resistencia a la compresión a partir de diferentes residuos industriales CV y RCD, cemento portland (10-30%) y Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (2-6%), se observa que a mayores contenidos de cemento, se presentaba los mejores resultados de resistencia a la compresión a las diferentes edades de curado, lo cual coincide con lo reportado por otros autores [1], los cuales informan que mayores contenidos de OPC en sistemas híbridos de activación alcalina, genera mayores resistencias a los diferentes edades de curado.

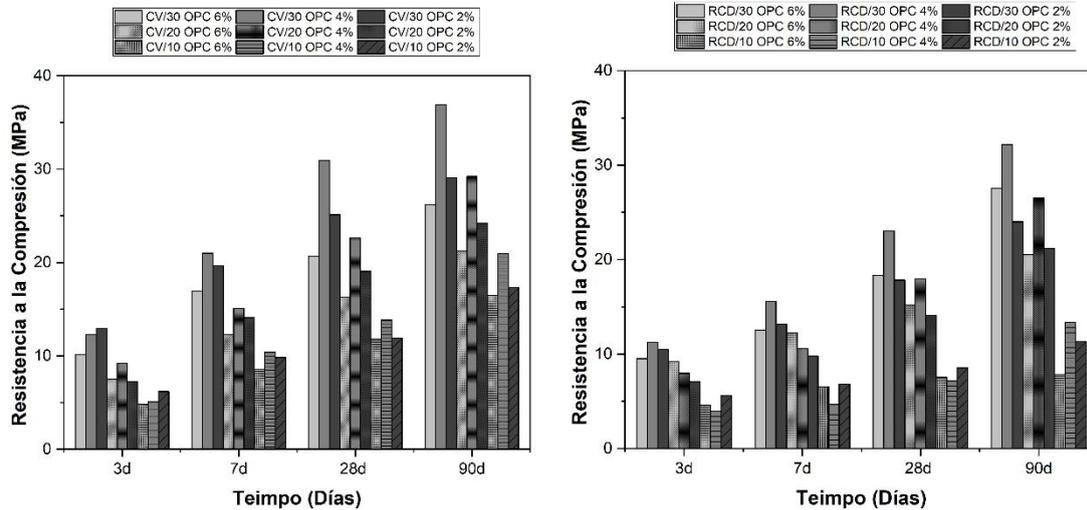


Figura 2. Resistencia a la compresión de los cementos de activación alcalina híbridos activados con Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Para los diferentes sistemas híbridos de activación alcalina activados con Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, se observa que hasta un 4% presenta un efecto positivo en la resistencia a la compresión, lo cual coincide con lo reportado en la literatura, donde se ha encontrado que contenidos máximos del 4%, genera las mejores resistencias, si se compara con muestras fabricadas con menores contenidos de sulfato de sodio [2], [3]. Los resultados indican que la presencia de elevados contenidos de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (6%) provoca una disminución en la resistencia a la compresión de los diferentes sistemas híbridos de activación alcalina, a las diferentes edades de curado, esto resultados coincide con lo reportado por Zhao et al [4], quienes encontraron que en sistemas de activación alcalina con elevados contenidos de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> tiende a disminuir la resistencias a la compresión. Por lo anterior se seleccionaron como mezclas óptimas CV/30OPC-4% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y RCD/30OPC-4% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, en los cuales se obtiene los mejores comportamientos mecánicos.

La figura 3 presenta la resistencia a la compresión alcanzada por los concretos híbridos álcali-activados con contenidos de cementante de 500 kg/m<sup>3</sup> basados en el CV/30OPC-4% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y RCD/30OPC-4% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. En general, se observa una ganancia de resistencia en función de la edad de curado (25 °C) y de forma proporcional al comportamiento obtenido en la optimización de los cementante, donde los mejores resultados fueron para CV/30OPC-4% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. A los 28 días de curado, los concretos CV/30OPC-4% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y RCD/30OPC-4% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> alcanzaron resistencias a la compresión de 23 y 18 MPa, respectivamente; demostrando la posibilidad de obtener concretos de activación alcalina a partir de la utilización de activadores alternativos (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) de características estructurales, utilizando agregados reciclados.

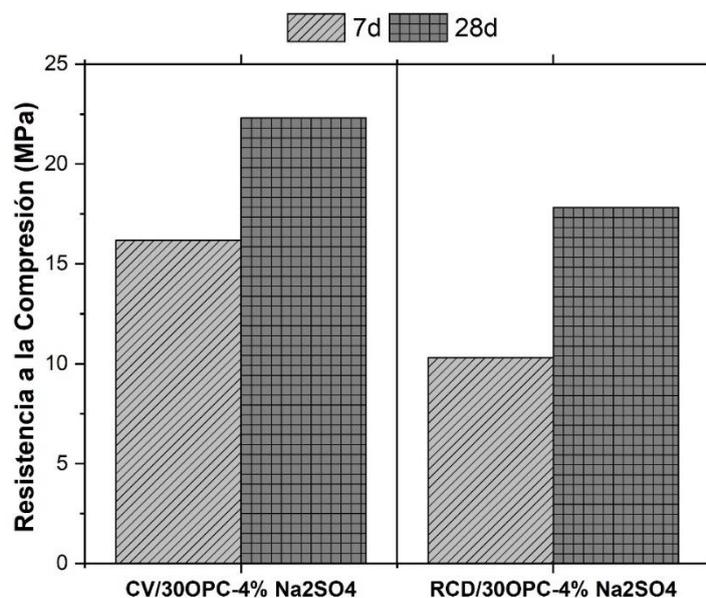


Figura 3: Resistencia a la compresión de concreto híbrido de actuación alcalina.

## Conclusiones

Con los resultados obtenidos en el estudio se puede concluir que:

Es posible producir cementos híbridos de activación alcalina (CV/RCD) utilizando activadores alternativos ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) y obtener resistencias cercanas a 35 MPa a los 90 días de curado a temperatura ambiente.

Se logró la producción de concretos híbridos de activación alcalina CV/30OPC-4%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  y RCD/30OPC-4%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , utilizando agregados reciclados, alcanzando valores de resistencia de 23 y 18 MPa, respectivamente, lo cual abre la posibilidad de realizar un reciclaje integral de subproductos industriales y de residuos de construcción y demolición, para la generación de concretos alternativos.

## Referencias

- [1] S. Joseph, R. Snellings, y Ö. Cizer, «Activation of Portland cement blended with high volume of fly ash using  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ », *Cem. Concr. Compos.*, vol. 104, p. 103417, nov. 2019, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2019.103417.
- [2] J. I. E. García, K. Campos-Venegas, A. Gorokhovskiy, y A. Fernández, «Cementitious composites of pulverised fuel ash and blast furnace slag activated by sodium silicate: effect of  $\text{Na}_2\text{O}$  concentration and modulus», *Adv. Appl. Ceram.*, vol. 105, n.º 4, pp. 201-208, ago. 2006, doi: 10.1179/174367606X120151.
- [3] A. M. Rashad, Y. Bai, P. A. M. Basheer, N. B. Milestone, y N. C. Collier, «Hydration and properties of sodium sulfate activated slag», *Cem. Concr. Compos.*, vol. 37, pp. 20-29, mar. 2013, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2012.12.010.
- [4] Y. Zhao *et al.*, «Effect of sodium sulfate on the hydration and mechanical properties of lime-slag based eco-friendly binders», *Constr. Build. Mater.*, vol. 250, p. 118603, jul. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118603.

# ACTIVACIÓN EN SISTEMAS CEMENTÍCEOS HÍBRIDOS CON ELEVADOS CONTENIDOS DE ESCORIA GRANULADA DE ALTO HORNO

Juan Manuel Etcheverry<sup>1</sup>, Yury A. Villagrán-Zaccardi<sup>1</sup>, Nele De Belie<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Magnel-Vandepitte Laboratory for Structural Engineering and Building Materials, Ghent University, Technologiepark-Zwijnaarde 60, 9052 Ghent, Belgium.

Palabras Clave: Ligantes híbridos, activación alcalina, sulfato de sodio, escoria granulada de alto horno.

## Introducción

Desde hace un tiempo a esta parte se ha estado hablando de la necesidad de reducir las emisiones de dióxido de carbono a nivel global para cumplir con las metas establecidas en el acuerdo de París de 2015. De hecho, el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) ha informado en su reporte más reciente que en todos los escenarios de emisiones considerados el calentamiento global de 1,5°C y 2°C se superará durante el siglo XXI a menos que se produzcan en las próximas décadas considerables reducciones en las emisiones [1]. Si bien la industria del cemento es una de las que más ha innovado, ofreciendo materiales con una de las más bajas huellas de carbono por tonelada producida en comparación a otros material de construcción, también se debe destacar que, debido al alto consumo per cápita, es la responsable de una gran parte de las emisiones antropogénicas de dióxido de carbono [2]. Estos hechos llevan a una búsqueda de mejora continua para brindar materiales más eco-eficientes con menor factor de clínquer, asegurando la durabilidad y manteniendo un precio asequible, lo cual representa sin lugar a dudas uno de los desafíos más grandes del sector.

Entre las soluciones más directas que se han planteado [3], la incorporación de materiales cementicios suplementarios (MCSs) para producir hormigones con menores cantidades de cemento Portland es una de las más efectivas. Es necesario avanzar aún más en el desarrollo de sistemas cementíceos con porcentajes aún mayores de reemplazo de clínquer. Pero sobrepasado cierto umbral de reemplazo (el cual varía según la adición en cuestión), la trabajabilidad, propiedades resistentes e incluso la durabilidad se ven comprometidas. Para acelerar el desarrollo de microestructura, una solución que ha surgido es la activación alcalina en sistemas híbridos. Los sistemas de activación alcalina demuestran una potencialidad enorme en términos de brindar soluciones con huellas de carbono muy reducidas [4]. Sin embargo, su aplicación a gran escala, en el corto plazo, parece representar un desafío [5]. Por otro lado, diversos estudios han reportado que la cantidad de MCSs es insuficiente para suplir completamente la demanda de cemento Portland [3]. Es por ello que los sistemas híbridos surgen como una alternativa intermedia que permite aumentar el contenido de adiciones sin las desventajas de un desarrollo demasiado lento de la microestructura [6]–[8].

Ahora bien, ¿qué es exactamente un sistema híbrido? Estos sistemas están conformados por cantidades elevadas de MCSs, cemento Portland y la novedad es la adición de un activador alcalino para acelerar y fomentar la reacción de las adiciones y del cemento. Así se logra lidiar con dos de los problemas más reportados usualmente; la ganancia lenta de resistencia y los tiempos de fraguado muy elevados. En el presente trabajo se estudian sistemas híbridos formados por 70% de escoria granulada de alto horno, 30% de cemento Portland y la adición de sulfato de sodio como activador alcalino en porcentajes de entre 0 y 10% en peso con respecto al peso de la escoria. Se realizaron morteros para dicho propósito. La resistencia a flexión y compresión se evalúa a edades de 2, 7 y 28 días. Así mismo, se observa la influencia de la dosis de sulfato en la trabajabilidad de las mezclas y diversos parámetros en estado endurecido, como absorción, densidad y volumen de poros accesibles.

## Metodología

Se realizaron morteros con 70% de escoria granulada de alto horno, 30 % de cemento portland normal y dosis de sulfato de sodio de 0%, 3% 8% y 10% en peso, con respecto al peso de la escoria. Se empleó agua sin impurezas y arena estándar. La relación agua ligante fue 0,45 y la relación arena ligante fue de 1:3.

Se procedió al mezclado del ligante, agua y sulfato de sodio durante 30 segundos a baja velocidad. (140 rpm), se añadió arena en 30 segundos y se aumentó la velocidad (285 rpm) por 30 segundos. Se realizó una pausa de 1 minuto y luego se completó el mezclado con 90 segundos a alta velocidad. Se determinó el extendido haciendo uso de la mesa de caída libre. Se llenaron moldes prismáticos de 40x40x160 mm<sup>3</sup> y se llevaron inmediatamente a cámara húmeda a 20 oC y >95 % de humedad relativa, donde permanecieron

cubiertos durante el primer día. Transcurrido este período se desmoldaron y se mantuvieron en la cámara hasta las edades de ensayo de 2, 7 y 28 días.

Transcurridos dichos plazos, los morteros fueron ensayados a flexión y las mitades resultantes a compresión. Asimismo, para la determinación de la absorción, densidad y ensayos de porosimetría de intrusión de mercurio se tomaron muestras de núcleo de las probetas. La hidratación se detuvo mediante dos ciclos de inmersión en isopropanol por 15 minutos. Posteriormente, las muestras se secan en horno a  $40\pm 5$  °C por  $10\pm 5$  minutos y se mantienen en cámara de vacío hasta la realización de los ensayos. El período transcurrido entre la detención de la hidratación y la realización de los ensayos nunca superó los 15 días.

## Resultados

La Figura 1 muestra los resultados de (a) fluidez, (b) densidad y (c) absorción de agua de los morteros con diferentes cantidades de sulfato de sodio. En términos generales no se observan diferencias en el extendido debido a la incorporación de sulfato de sodio. Asimismo, se notan leves diferencias en la densidad, la cual se incrementa debido a la adición del activador. Un comportamiento similar se observa para la absorción, la cual disminuye de un 10% hasta un 8% cuando se incorpora sulfato de sodio a los morteros.

La Tabla 1 muestra el volumen total de poros accesibles a edades de 7 y 28 días determinado por la técnica de intrusión de mercurio. Por un lado, se revela una disminución en el volumen total de poros accesibles debido a la adición del activador. Además, se destaca que tanto a 7 como a 28 días, las muestras con adición de 8% de activador presentan una disminución de poros bastante más marcada que aquellos con 3%, diferencia que no es tan apreciable en los valores presentados de absorción de agua o densidad.

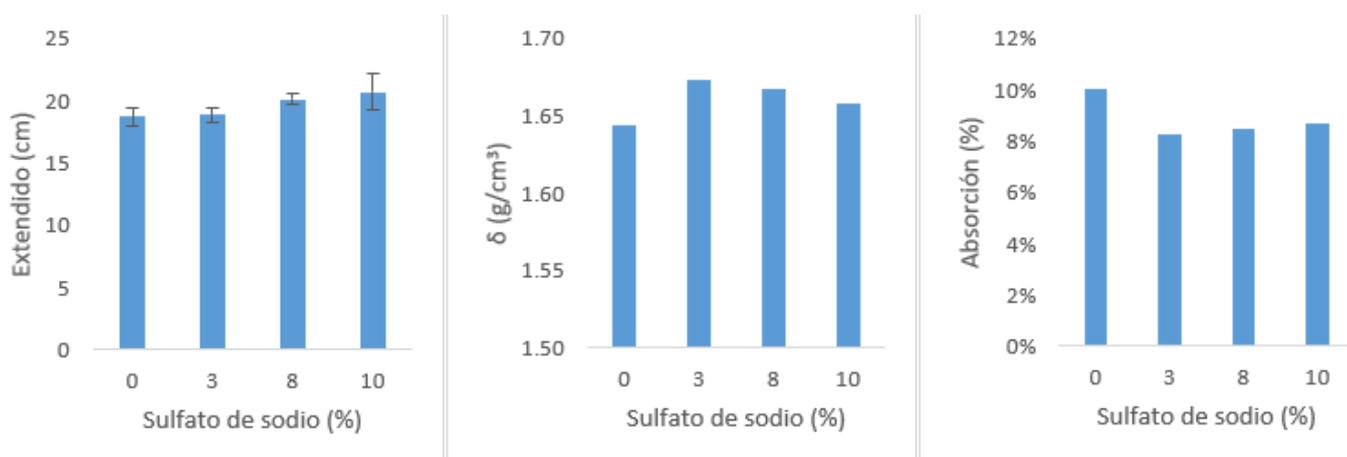


Figura 1 – Extendido (a), densidad (b) y absorción de agua (c) para morteros con contenidos de sulfato de sodio de 0% 3% 8% y 10%.

Tabla 1: Volumen de poros accesibles ( $\text{mm}^3/\text{g}$  muestra).

$\text{Na}_2\text{SO}_4$ (g/g ligante)	7 días	28 días
0	52,7	47,4
3	51,5	46,9
8	44,0	40,4
10	37,3	36,3

La Figura 2 muestran los resultados de (a) resistencia a compresión y (b) flexión. Se puede notar en primer término un importante incremento en la resistencia a compresión a 2 días al incorporar el activador. Asimismo, se destaca que incrementar la dosis de 3% a 8% produce una duplicación de la resistencia aproximadamente. Sin embargo, leves mejoras se notan al incrementar de 8% a 10%. A edades de 7 y 28 días la ganancia de resistencia absoluta (respecto a 2 días) de los morteros es bastante similar, independientemente de la presencia o dosis de sulfato de sodio. En términos de resistencia a flexión se puede notar la misma tendencia, es decir, la diferencia en el incremento de resistencia producto de la adición de sulfato de sodio se manifiesta durante los primeros días de hidratación. Posteriormente, las muestras parecen tener un desarrollo bastante similar entre ellas.

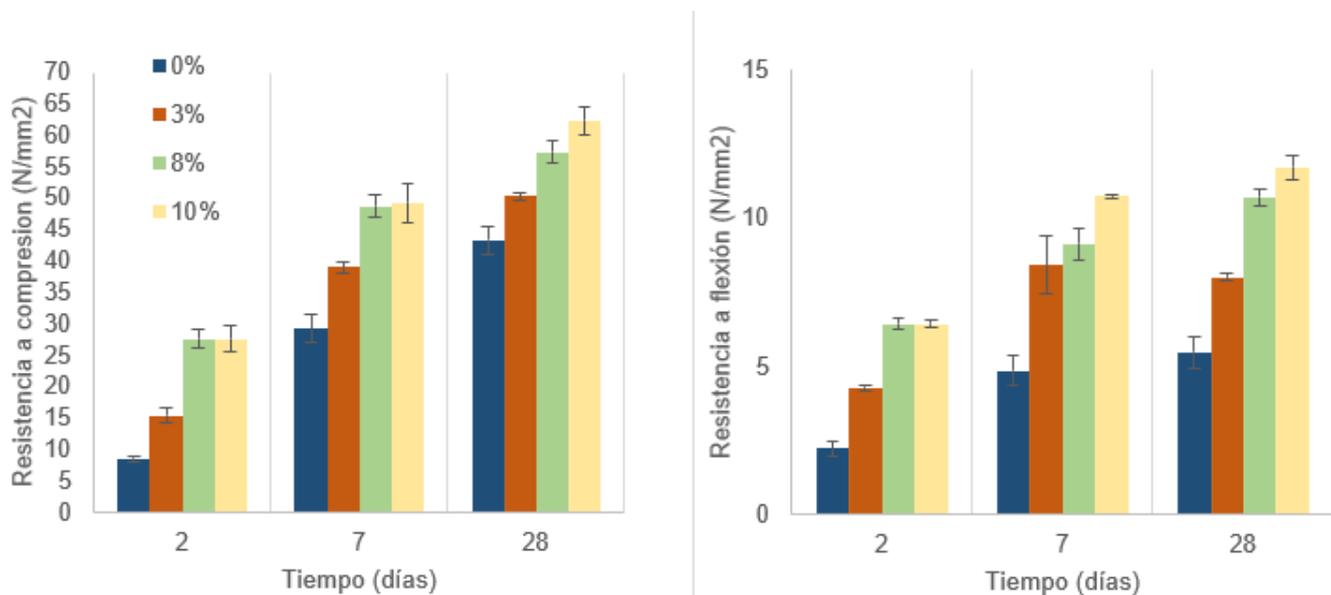


Figura 2 – Resistencia a compresión (a) y a flexión (b) a edades de 2, 7 y 28 días en morteros realizados con contenidos de sulfato de sodio de 0% 3% y 8%.

## Conclusiones

Con la adición de sulfato de sodio la fluidez de los morteros se ve levemente afectada. Ligeras mejoras en términos de absorción son observados así como también en la densidad. Se notan mejoras importantes en las resistencias a compresión y flexión a edades tempranas, las cuales se incrementan con la adición de dosis mayores de sulfato de sodio hasta 8% respecto al peso de la escoria. Luego de dos días no se observan diferencias significativas en términos de ganancia de resistencia para diferentes contenidos de activador. Se observa además una reducción considerable en el volumen poros accesible debido a la adición de sulfato de sodio.

## Agradecimientos

Los autores agradecen a la Research Foundation-Flanders (FWO-Vlaanderen) por la financiación en la presente investigación (J.M. Etcheverry: G062720N, Y. Villagrán-Zaccardi: MSCA-SoE 12ZZD21N LV).

## Referencias

- [1] V. Gray, "Climate change 2007: The physical science basis summary for policymakers," *Energy Environ.*, vol. 18, no. 3–4, pp. 433–440, 2007, doi: 10.1260/095830507781076194.
- [2] F. Krausmann, S. Gingrich, N. Eisenmenger, K. H. Erb, H. Haberl, and M. Fischer-Kowalski, "Growth in global materials use, GDP and population during the 20th century," *Ecol. Econ.*, vol. 68, no. 10, pp. 2696–2705, 2009, doi: 10.1016/j.ecolecon.2009.05.007.
- [3] K. L. Scrivener, V. M. John, and E. M. Gartner, "Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO<sub>2</sub> cement-based materials industry," *Cem. Concr. Res.*, vol. 114, no. June, pp. 2–26, 2018, doi: 10.1016/j.cemconres.2018.03.015.
- [4] J. L. Provis, "Geopolymers and other alkali activated materials: Why, how, and what?," *Mater. Struct. Constr.*, vol. 47, no. 1–2, pp. 11–25, 2014, doi: 10.1617/s11527-013-0211-5.
- [5] J. L. Provis and J. S. J. van Deventer, *Alkali Activated Materials -State-of-the-Art Report*, RILEM TC 224-AAM, 1st ed. Springer, Dordrecht, 2013.
- [6] B. Mota, T. Matschei, and K. Scrivener, "Impact of sodium gluconate on white cement-slag systems with Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>," *Cem. Concr. Res.*, vol. 122, no. August 2018, pp. 59–71, 2019, doi: 10.1016/j.cemconres.2019.04.008.
- [7] E. Acevedo-Martinez, L. Y. Gomez-Zamorano, and J. I. Escalante-Garcia, "Portland cement-blast furnace slag mortars activated using waterglass: - Part 1: Effect of slag replacement and alkali concentration," *Constr. Build. Mater.*, vol. 37, pp. 462–469, 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.07.041.
- [8] D. E. Angulo-Ramírez, R. Mejía de Gutiérrez, and F. Puertas, "Alkali-activated Portland blast-furnace slag cement: Mechanical properties and hydration," *Constr. Build. Mater.*, vol. 140, pp. 119–128, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.02.092.

# APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN VÍA ACTIVACIÓN ALCALINA O GEOPOLIMERIZACIÓN

Rafael Robayo-Salazar, William Gustavo-Saavedra, Ruby Mejía de Gutiérrez

Grupo Materiales Compuestos (CENM), Universidad del Valle, Cali-Colombia

Palabras Clave: residuos de construcción y demolición, materiales álcali-activados, geopolímeros, cementos híbridos, materiales sustentables.

## Introducción

Los residuos de la construcción y demolición (RCDs) constituyen una severa problemática ambiental en países como Colombia, en gran parte debido a su inadecuada disposición final y a la falta de alternativas sostenibles para su aprovechamiento. En Colombia, la generación de RCDs supera las 22 millones de toneladas/año [1]. A nivel mundial la cifra es alarmante, alcanzando un valor de 3 billones de toneladas por año [2] y representando el 25–30% del total de residuos sólidos [3]. Uno de los usos más comunes para una fracción de los RCDs (los residuos de concreto) ha sido la producción de agregados finos y gruesos aptos para ser usados en nuevas mezclas de morteros y concretos. A pesar de esta posibilidad, la búsqueda de aplicaciones de mayor valor agregado, que a su vez promuevan el aprovechamiento integral de las fracciones mayoritarias de cerámica y mampostería, ha sido una constante para la academia y el sector de la construcción. Recientemente, la activación alcalina (o geopolimerización) de los materiales aluminosilicatos que componen los RCDs ha surgido como alternativa, reportando resultados que se consideran promisorios [4]. Este estudio presenta el aprovechamiento de las fracciones gruesas, finas y ultra-finas (sub-producto tipo polvo) obtenidas a partir de la trituración de residuos de concreto (Co), cerámica (Ce) y mampostería (M) en la obtención de concretos activados alcalinamente. Esta investigación fue financiada por la Convocatoria Programa de Estancias Postdoctorales No. 848 del 2019 del Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación COLCIENCIAS y el Proyecto SICOP CI 21104 de la Universidad del Valle.

## Metodología

Una muestra real de RCDs provenientes del sitio de disposición final de la ciudad de Cali (Colombia) fue utilizada como fuente de los residuos de Co, Ce y M. Estos residuos fueron triturados y se seleccionaron las fracciones gruesas, finas y ultra-finas (sub-producto tipo polvo) (figura 1) para cada tipo de residuo. Un residuo mixto (MIX) fue obtenido a partir de la combinación (en partes iguales) de Co, Ce y M. La figura 2 muestra el proceso de activación alcalina ( $\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) al cual fueron sometidos los RCDs. El MIX fue utilizado como precursor geopolimérico (cementante) y las fracciones gruesas y finas fueron utilizadas como grava y arena en la producción de concretos. Adiciones de tan solo el 10% (con respecto al peso del MIX) de cemento Portland (OPC) fueron utilizadas para promover el curado a temperatura ambiente ( $25\text{ }^\circ\text{C}$ ) de los concretos híbridos álcali-activados.



Figura 1 – Procesamiento de los RCDs y obtención de materias primas: 1) fracción gruesa, 2) fracción fina y 3) fracción ultra-fina (sub-producto tipo polvo).



Figura 2 – Proceso de activación alcalina de los RCDs.

## Resultados

La figura 3 presenta la resistencia a la compresión alcanzada por los concretos híbridos álcali-activados con contenidos de cementante de 450, 550 y 650  $\text{kg}/\text{m}^3$  basados en el MIX (30%Co+30%Ce+30%M) y OPC (10%). En general, se observa una ganancia de resistencia en función de la edad de curado (25 °C) y de forma proporcional al contenido de cementante. A los 28 días de curado, los concretos 450  $\text{kg}/\text{m}^3$ , 550  $\text{kg}/\text{m}^3$  y 650  $\text{kg}/\text{m}^3$  alcanzaron resistencias a la compresión de 15.7, 21.1 y 28.0 MPa, respectivamente; demostrando la posibilidad de obtener concretos de características estructurales con altos contenidos de RCDs, presentes tanto en el cementante (fracción ultra fina) como en los agregados (fracciones gruesas y finas).

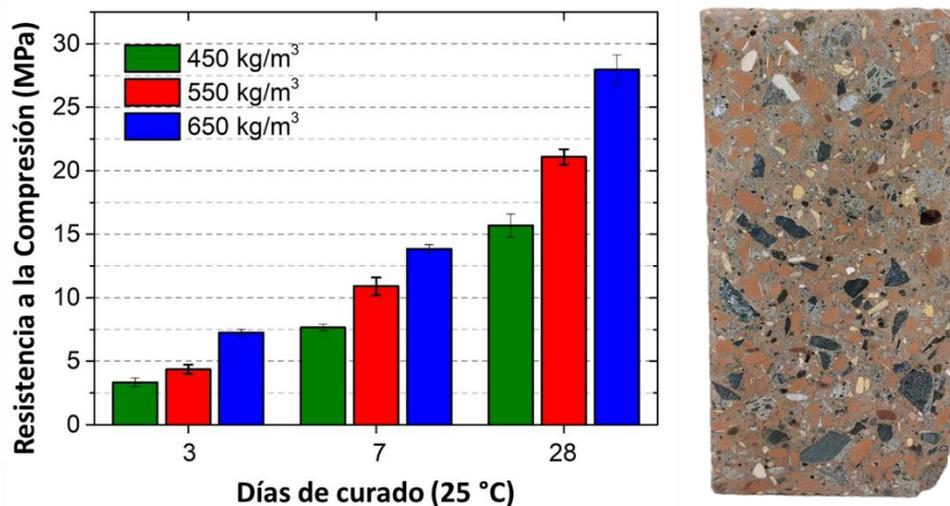


Figura 3 – Grafico de resistencia a la compresión del concreto híbrido álcali-activado basado en RCDs.

## Conclusiones

Los resultados obtenidos validan la posibilidad de utilizar la tecnología de activación alcalina o geopolimerización en el aprovechamiento de las fracciones gruesas, finas y ultra finas (sub-productos tipo polvo) obtenidas a partir de la trituración de los residuos de concreto (Co), cerámica (Ce) y mampostería (M).

La obtención de concretos estructurales basados en la activación alcalina de combinaciones de residuos de Co, Ce y M (residuos mixtos) abre la posibilidad de realizar un reciclaje integral de los residuos

de construcción y demolición en escenarios en donde no es posible su separación o la obtención de residuos limpios.

La tecnología de activación alcalina permite el reciclaje, como precursor geopolimérico o cementante, de la fracción ultra-fina (tipo polvo) que se obtiene como sub-producto ( $\approx 5-30\%$ ) durante la trituración de los RCDs y la cual posee características poco atractivas para ser usada como agregado o filler; principalmente su elevada capacidad de absorción de agua.

## Referencias

- [1] MINAMBIENTE, *Resolución No. 0472 de 2017, Reglamento para la gestión integral de los residuos generados en las actividades de construcción y demolición - RCD*. 2017, pp. 1–17.
- [2] A. Akhtar and A. K. Sarmah, "Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective," *J. Clean. Prod.*, vol. 186, pp. 262–281, Jun. 2018, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2018.03.085.
- [3] European Commission, "Construction and demolition waste (CDW)," 2016. [http://ec.europa.eu/environment/waste/construction\\_demolition.htm](http://ec.europa.eu/environment/waste/construction_demolition.htm) (accessed Mar. 13, 2018).
- [4] R. A. Robayo-salazar, W. Valencia-saavedra, and R. Mejía de Gutiérrez, "Construction and Demolition Waste ( CDW ) Recycling — As Both Binder and Aggregates — In Alkali-Activated Materials : A Novel Re-Use Concept," *Sustainability*, vol. 12, p. 5775, 2020, doi: 10.3390/su12145775.

# CEMENTOS ECO-EFICIENTES ELABORADOS CON RESIDUOS DE PROCEDENTES DE LA DEMOLICIÓN Y CONSTRUCCIÓN: EFECTOS EN LA HIDRATACIÓN

Silvina V. Zito<sup>1</sup>, Edgardo F. Irassar<sup>1</sup>, Viviana F. Rahhal<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería, CIFICEN (UNCPBA-CONICET-CICPBA), Av. del Valle 5737. (B7400JWI) Olavarría. Argentina. Tel/Fax 02284 451055

Palabras Clave: RCD, cemento, hidratación, actividad puzolánica

## Introducción

En la actualidad son conocidas las ventajas económicas y medioambientales que provoca la sustitución de cemento por materiales cementíceos suplementarios (SCM). Una de las alternativas en vías de experimentación es la utilización de residuos cerámicos provenientes del descarte de la industria y de las demoliciones, como SCM. Los residuos cerámicos son un candidato ideal, ya que por ser arcillas sometidas a un tratamiento térmico, tienen un grado de activación y son una fuente rica en alúmina y sílice, que pueden conducir a la reacción puzolánica. Además, son abundantes ya que se generan por un lado en las diferentes etapas de producción de cerámicas y por otro, como resultado de las demoliciones. La reutilización de estos residuos contribuye a la preservación del medio ambiente, a la conservación de los recursos naturales no renovables y a un aprovechamiento racional y un ahorro de la energía.

En este trabajo se analiza la evolución de la hidratación de pastas elaboradas a partir del reemplazo (25% en peso) de cemento por un residuo proveniente de la demolición de una mampostería completa (bloque cerámico, mortero de asiento y revoques fino y grueso).

## Materiales y metodología

Se utilizó un cemento portland normal (CPN, IRAM 50000) clase resistente CP40 cuyo clinker tiene una composición mineralógica determinada según Bogue de 63,6% C<sub>3</sub>S, 15,1% C<sub>2</sub>S, 2,8% C<sub>3</sub>A y 14,3% C<sub>4</sub>AF. Como SCM se empleó un residuo proveniente de una demolición (RD) de una mampostería de bloque cerámico de un edificio emplazado en la ciudad de Olavarría. El residuo fue, en principio, triturado manualmente hasta lograr que el mismo pase por el tamiz N°4 (abertura 4,75 mm), luego se trituró en un molino de bolas hasta que el 100% pasó a través del tamiz N° 200 (abertura 75 µm). En todos los casos se verificó, el requisito para puzolanas, según la norma IRAM 1654, que el retenido en el tamiz N° 325 (abertura 45 µm) fuera inferior al 12%. En la Tabla 1 se presentan las características físicas y químicas del cemento y del residuo. En la misma se observa que la composición química del RD es altamente ácida, el porcentaje en peso de sílice y alúmina es mayor al 70%, que es el valor que normalmente se observa en adiciones puzolánicas naturales y artificiales [1]. También se observa que el RD tiene mayor superficie específica Blaine (SEB) y menor densidad en comparación al CPN, esto provoca que a la hora de realizar el reemplazo en peso, los mismos estén constituidos por un volumen mayor que el que reemplazan y a su vez el tamaño de sus partículas sea menor. La composición mineralógica del residuo obtenida por DRX es de cuarzo (SiO<sub>2</sub>), plagioclasas ((Na,Ca)(Si,Al)<sub>3</sub>O<sub>8</sub>) y hematita (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

Tabla 1: Características químicas y físicas del cemento y el residuo.

Material	Composición química, % en peso									
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	PxC
CPN	63,60	20,50	4,10	4,70	0,70	2,50	1,20	<0,03	-	2,40
RD	8,36	62,36	12,03	4,19	0,93	0,15	3,34	1,44	0,56	6,01
Características físicas										
	Densidad, g/cm <sup>3</sup>	Absorción, %	SEB, m <sup>2</sup> /kg	Distribución de tamaño de partículas, µm						
				D10	D50	D90				
CPN	3,12	-	370	3,30	20,51	86,36				
RD	2,58	5,10	660	1,11	6,58	44,23				

Se preparó la muestra patrón (CP) y la muestra a partir del reemplazo de 25% en peso del residuo RD por el cemento (25RD). La evolución de los productos de hidratación se analizó por medio de DRX a 2, 7 y 28 días.

Las determinaciones se realizaron con un difractómetro Philips X'Pert equipado con monocromador de grafito, usando radiación  $\text{CuK}\alpha$ , y operando a 40 kV y 20 mA. El registro se realizó a una velocidad de  $2^\circ/\text{min}$  y el intervalo de paso fue de 0,02. Las pastas se elaboraron utilizando una relación agua material cementíceo (a/mc) de 0,50. La cantidad de agua químicamente combinada total (AQC) y el agua químicamente combinada atribuida al hidróxido de calcio (AHC) se determinó de acuerdo al procedimiento propuesto por Powers [2]. Este valor se utilizó como estimador del progreso de la hidratación, asumiendo que la totalidad de la adición incorporada es capaz de reaccionar para producir CSH. Para esto fue necesario triturar fragmentos de pastas y calcinarlos entre  $105^\circ\text{C}$  y  $950^\circ\text{C}$ . Cuando la muestra se seca a  $105^\circ\text{C}$  se pierde el agua libre, mientras que el agua no evaporable, o sea químicamente combinada, es la que se obtiene cuando se calina a  $950^\circ\text{C}$ . Se evaluó la actividad puzolánica por vía química a los 2, 7 y 28 días [3]. La preparación del ensayo consiste en el acondicionamiento tanto del agua destilada como de las muestras de material a  $40^\circ\text{C}$ , 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 hidróxido de calcio (CH), entonces el punto representativo se ubica por encima de la curva de solubilidad del CH en disolución alcalina. Cuando el cemento tiene incorporada una adición con actividad puzolánica, ésta consume el CH y el punto representativo se ubica debajo de la curva de solubilidad mostrando así, actividad puzolánica.

## Resultados y discusión

En las Figura 1 se presentan los difractogramas de las pastas CP y 25RD, a los 2, 7 y 28 días. En la Figura 1(a) se observa el progreso de la hidratación, ya que los compuestos del cemento anhidro ( $\text{C}_3\text{S}$ ,  $\text{C}_2\text{S}$ ) disminuyeron con la edad, mientras las fases hidratadas evolucionaron. A los 2 días, se observó ettringita (Ett) e CH como principales productos de hidratación. Desde los 7 a los 28 días, el progreso de la hidratación de los silicatos puede verse claramente por la intensidad de los picos de CH. También se observó la formación de hemicarboaluminato de calcio hidratado (Hc) y su paulatina transformación a monocarboaluminato de calcio hidratado (Mc), junto con la disminución del carbonato de calcio (CC) presente en el cemento, como constituyente minoritario. Por otra parte, en la pasta 25RD se detectaron los mismos compuestos que en la pasta CP, además de cuarzo (Q) proveniente del residuo y su evolución fue similar, excepto la del CH que disminuyó a los 7 días y permanece a los 28 días.

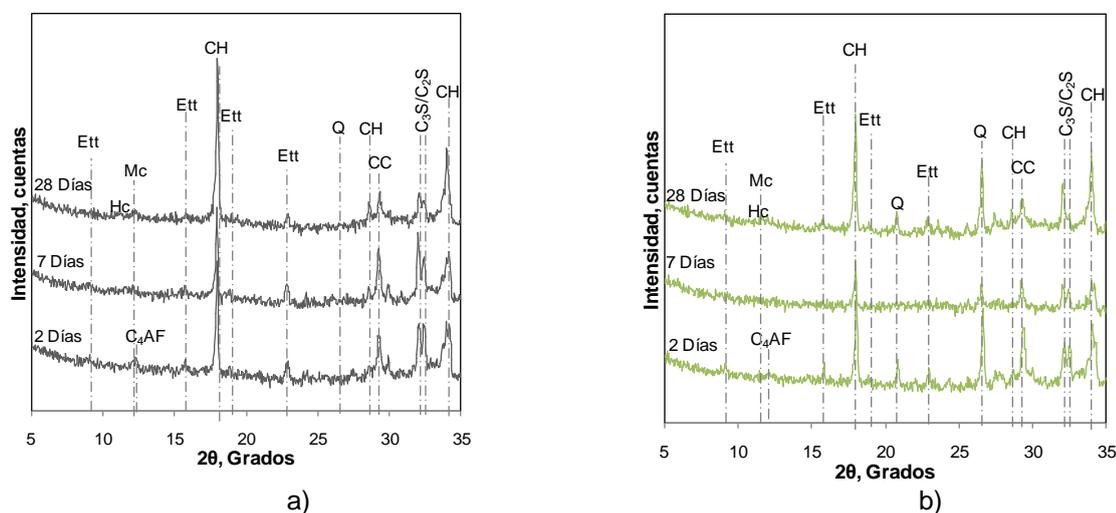


Figura 1: Difractograma de las pastas: a) CP y b) 25RD. Ett: ettringita, Mc: monocarboaluminato de calcio hidratado, Hc: hemicarboaluminato de calcio hidratado, CH: hidróxido de calcio, Q: cuarzo, CC: carbonato de calcio,  $\text{C}_3\text{S}$ ,  $\text{C}_2\text{S}$ ,  $\text{C}_4\text{AF}$ .

En la Figura 2a se presentan los resultados obtenidos del ensayo de Fratini para las muestras CP y 25RD. A 2 y 7 días, la pasta 25RD se ubicó por encima de la isoterma de solubilidad del CH, debajo y a la izquierda de la muestra CP, siendo la disminución de la  $[\text{CaO}]$  (entre 2 y 7 días) menor para la muestra 25RD que para la CP. A los 28 días, la pasta 25RD se ubicó por debajo de la isoterma de solubilidad del CH, presentando una disminución de la  $[\text{CaO}]$  y un leve aumento de la  $[\text{OH}^-]$ , mostrando actividad puzolánica.

En la Figura 2b se presentan los resultados de la cantidad de AQC y AHC en función de la edad para las pastas CP y 25RD. En ella se observa un crecimiento del AQC y del AHC con la edad. Ambos parámetros referidos a la pasta 25RD, a todas las edades siempre se ubicaron por debajo del patrón pero por encima al

proporcional del mismo (línea discontinua). Se puede destacar el mayor crecimiento entre los 7 y 28 días del AQC de la pasta 25RD, ya que a los 28 días alcanzó al patrón.

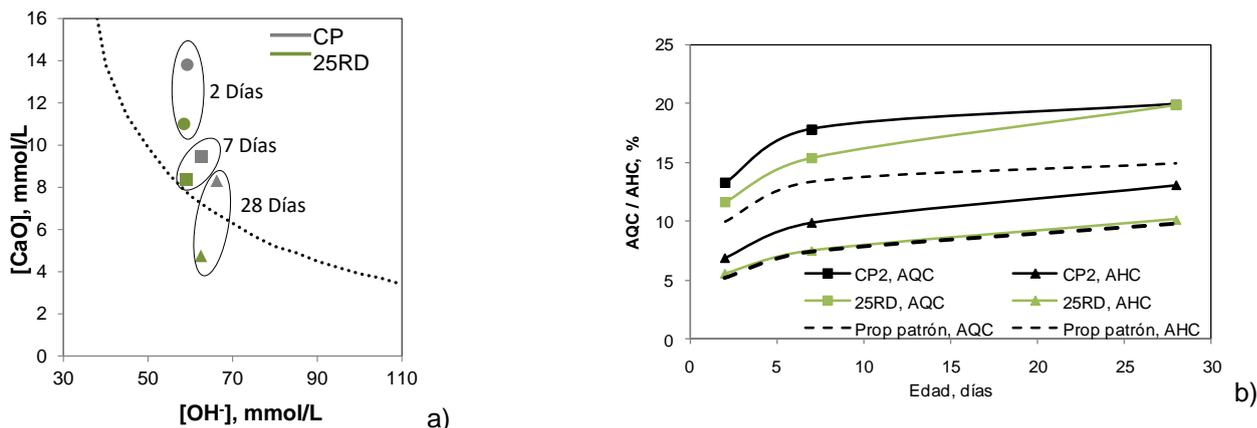


Figura 2: a) Actividad puzolánica y b) AQC y AHC, de las muestras CP y 25RD a 2, 7 y 28 días.

En base a los resultados de los diferentes ensayos se revelaron los efectos de dilución y estimulación en la pasta 25RD. La dilución fue producto de la incorporación del residuo y del aumento de la relación a/c efectiva (de 0,50 a 0,66 para 25% de reemplazo). La estimulación de la hidratación del CPN se produjo por el efecto de relleno, la nucleación heterogénea y la gran cantidad de agua libre en el sistema [4].

A los 2 días, se observaron ambos efectos (dilución y estimulación), debido a la incorporación de RD. La dilución por las menores [CaO] y [OH-] de la pasta 25RD respecto de la CP y fundamentalmente por resultar los valores de AQC y AHC de la pasta 25RD menores a los de la CP. La estimulación por la mayor cantidad de AQC, con respecto al proporcional del patrón.

La estimulación también se observó entre los 7 y 28 días, ya que la curva del AQC de la pasta 25RD tuvo una mayor velocidad de crecimiento, alcanzado a los 28 días los valores de la pasta CP. Esto último, se atribuye a la reacción puzolánica que fue comprobada por Fratini a los 28 días. La intensidad y la evolución de los productos de hidratación (seguida por DRX) confirmaron los hechos.

## Conclusiones

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

El residuo de demolición provocó estimulación de la hidratación de la pasta cementícea a las primeras edades, en forma física (efecto filler) y a edades tardías, en forma química (reacción puzolánica). Los productos de hidratación revelaron que los mecanismos de hidratación del cemento con el RD son similares a los del cemento puro.

El aprovechamiento de este recurso produciría un doble beneficio en el cuidado del medio ambiente: por un lado, no sería necesario disponer de los residuos en vertederos y por el otro, se ahorrarían materias primas para la fabricación de cemento, reduciéndose además el consumo de energía y las emisiones de CO<sub>2</sub>.

## Referencias

- [1] ASTM C618-19, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019, [www.astm.org](http://www.astm.org).
- [2] Powers TC. The non-evaporable water content of hardened Portland cement paste. ASTM Bull. 1949;158:68–75.
- [3] UNE-EN 196-5. 2011. Methods of testing cement. Pozzolanicity test for pozzolanic cement. London: British Standard Institution
- [4] Zhang, C., Wang, A., Tang, M., & Liu, X. "The filling role of pozzolanic material". Cement and Concrete Research, 26(6), (1996). 943-947.

# **METODOLOGÍA DE ENSAYOS**

# APLICACIÓN DEL MÉTODO DE DISOLUCIÓN SELECTIVA PARA DETERMINAR LA REACTIVIDAD DE ESCORIA DE ALTO HORNO

Nadia Belén Scarponi <sup>1</sup>, Carlos Pico-Cortés<sup>1,3</sup>, Yury Villagrán-Zaccardi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> LEMIT, La Plata, Argentina

<sup>2</sup> Magnel-Vandepitte Laboratory for Structural Engineering and Building Materials, Ghent University, 9052, Zwijnaarde, Bélgica

<sup>3</sup> CONICET, La Plata, Argentina

Palabras Clave: grado de reacción, materiales cementicios suplementarios,

## Introducción

Las adiciones minerales han cobrado vital importancia en la formulación de mezclas cementíceas debido a la necesidad de reducción del consumo de energía, la protección de los recursos minerales naturales y la disminución de emisiones de gases que contribuyen al efecto invernadero. Para proveer sostenibilidad, también es pertinente que la mezcla formulada contribuya a una mayor durabilidad del hormigón del cual formará parte. Durante las últimas décadas, los esfuerzos para conocer el comportamiento del cemento Pórtland con adiciones minerales naturales o subproductos industriales se han incrementado [1]. En la actualidad, este tipo de materiales también son conocidos como materiales cementíceos suplementarios (MSC), como forma de resaltar su finalidad de actuar en reemplazo parcial del cemento Pórtland. La tendencia a abandonar su denominación tradicional como adiciones minerales es cada vez mayor. La utilización de MSC ofrece importantes beneficios económicos y medioambientales, ya que su uso en el hormigón se ha convertido en práctica común. Desde finales del siglo XX, la importancia de este último beneficio se ha hecho aún más evidente. Debido a la gran aplicación mundial de este material, incluso pequeñas reducciones en las emisiones de gases de efecto invernadero por tonelada de cemento producida pueden hacer una gran diferencia [2]

Las propiedades de una mezcla y su evolución en el tiempo dependen en gran medida del avance de la hidratación del cemento que determina la evolución de la porosidad de la matriz [1]. En los cementos ternarios compuestos por filler y escoria este proceso depende en gran medida de las proporciones relativas de los componentes. El filler contribuye a la hidratación en la etapa inicial y la escoria contribuye al desarrollo de microestructura en el mediano plazo. Las propiedades de la mezcla constituida varían de acuerdo a la evolución de estos procesos.

Un aspecto fundamental de los MCS es su finura. A mayor finura se obtiene mayor reactividad del material y también mayor afectación de las propiedades de la mezcla en estado fresco y de la velocidad de hidratación. La reactividad de las adiciones es un aspecto fundamental de su evaluación respecto a la efectividad de su acción dentro del material cementíceo. La determinación de la reactividad es una cuestión aún no completamente resuelta en la literatura. Existen muchos trabajos de investigación en curso respecto a los métodos experimentales posibles que sean suficientemente reproducibles y repetibles. Los métodos para determinar la reactividad puzolánica de MCS pueden ser directos o indirectos. Los directos cuantifican porcentajes no reactivos en mezclas y los indirectos se basan en la medición del consumo de portlandita (CH) en fases posteriores a la hidratación en estado endurecido. Sin embargo, varios autores han señalado que el consumo de portlandita puede implicar algunas fallas difíciles de superar. Entre los métodos directos se encuentran la disolución selectiva que ha sido originalmente diseñado para cenizas volantes y escorias [3,4]. La principal ventaja de la disolución selectiva es la cuantificación directa de la cantidad de adición que no ha reaccionado en una muestra pasta hidratada, mediante la aplicación de un ataque ácido selectivo. El grado de reacción se define como la relación entre el contenido de MCS que ha reaccionado y el total inicialmente incluido en la mezcla.

Estrictamente hablando, se trata de un método de disolución preferencial, ya que existe siempre un pequeño porcentaje de adición que será disuelto, así como un pequeño porcentaje de cemento que no se disolverá tras el ataque. Se recomienda evitar la aplicación en MCS con relaciones de solubilidad del material virgen superiores al 10% [5] y tener en cuenta la pérdida por calcinación. Estos factores generan cierta variabilidad en el grado de reacción determinado.

En este trabajo se presenta la aplicación de un método de disolución selectiva sobre una escoria de alto horno como reemplazo del cemento en pastas, teniendo en cuenta la corrección estudiada en [5] para incluir la presencia de magnesio en la adición.

## Metodología y Resultados

En primera instancia, se procedió a realizar el acondicionamiento de la finura de la escoria para su uso como MCS. Para molerla se utilizó un molino de bolas reemplazando parte de estas por cypebs (relación 10/1 de cypebs-bolas/material). A continuación, se procedió a caracterizar la escoria a utilizar. Para ello se determinó su composición química, su pérdida por calcinación, densidad y finura (Tabla 1).

El método de disolución selectiva se describe en detalle en CEN/TR 196-4:2007 [6]. Primeramente, los materiales cementíceos fueron sometidos a la disolución selectiva para determinar los correspondientes residuos insolubles. El método es recomendado para MCS con una solubilidad inferior al 10% para evitar alta dispersión de los resultados. En el caso ideal, este porcentaje sería 0% para el MCS, mientras que para el cemento Portland sería 100% [5][7].

Para el ataque se utilizó la solución compuesta por DEA+TEA+EDTA (dietilamina + trietanolamina + ácido etilendiaminotetraacético) de la cual se tomaron 50 ml con pipeta y se los colocó en un vaso de precipitado, donde se llevó su volumen hasta 800 ml aproximadamente con agua destilada.

Se colocó el buzo y se encendió el agitador magnético a 300 rpm a una temperatura de  $20 \pm 0,5$  °C. A continuación, se pesaron 0.5 g de escoria de alto horno (EAH), se los introdujo en el vaso precipitado de manera progresiva para evitar aglomeraciones y se dejó agitando durante 120 minutos. Mientras tanto, el papel de filtro limpio se acondicionó mediante secado en estufa y posteriormente se pesó. Una vez transcurrido el tiempo de ataque, se detuvo la agitación y se comenzó el filtrado bajo vacío. Este proceso se realizó con suficiente cuidado para evitar la pérdida de material durante el proceso. Una vez completada la etapa de filtrado, el retenido en el filtro fue lavado tres veces con metanol y luego retirado con cuidado del embudo Büchner para ser secado a 100 °C durante 2h. El residuo sobre el papel fue determinado mediante diferencias de pesado.

Se realizaron tres pastas, una pasta patrón con 100% de CPN, otra con 60% de reemplazo de CPN por EAH, y la tercera con un reemplazo del 50% del CPN (40% EAH+10% filler calizo). Se definen como 0EAH al patrón, 60EAH y 40EAH respectivamente según el porcentaje de escoria incorporado.

Con estas dosificaciones se procedió a conformar las probetas cúbicas de 2,5 cm de lado. Se conformaron y desmoldaron a las 24 h. El curado se realizó según la Norma IRAM 1622 bajo agua saturada con cal a  $23 \pm 2$  °C.

Después de conformadas las pastas a las edades de 7, 28 y 450 días, se analizaron y se realizaron las primeras determinaciones para lograr obtener su grado de reacción.

Una vez extraídas del curado, fueron llevados a estufa a 100 °C por una hora. Luego se realizó la molienda manual en mortero de ágata hasta alcanzar un tamaño máximo de partícula de 125  $\mu\text{m}$ . Las determinaciones sobre la muestra patrón de CPN en cada edad también son necesarias para determinar el grado de reacción en las pastas con reemplazo de MCS. El método de disolución selectiva aplicado fue de acuerdo al descripto anteriormente.

A continuación, se procedió a realizar el cálculo del grado de reacción a partir de la formula (1), la cual incluye la corrección debido a la presencia de magnesio en la escoria. Los resultados se presentan en la Tabla 2.

$$\alpha_{EAH} = \frac{100fp - R_b + R_{pc}(1-f)}{f(100p - hM_S)} * 100\% \quad (1)$$

Tabla 1: Composición química y propiedades físicas de EAH

Fluorescencia	%
Na <sub>2</sub> O	1,65
MgO	13,88
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,9
SiO <sub>2</sub>	31,38
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,04
SO <sub>3</sub>	1,43
Cl	0,03
K <sub>2</sub> O	0,53
CaO	41,96
TiO <sub>2</sub>	0,39
MnO	0,3
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,66
PxC	0,54 %
Densidad	2,9 gr/cm <sup>3</sup>
Pasa T200	0,70%



Figura 1 – Disolución con solución de EDTA+TEA+DEA

Donde:  $f$  es la fracción de masa de escoria respecto al ligante anhidro inicial,  $p$  es la fracción de masa de escoria original no disuelta por EDTA+DEA+TEA,  $R_b$  es la masa relativa de residuo de la pasta con escoria (en g/100 g de aglutinante anhidro),  $R_{pc}$  es la masa relativa de residuo de la pasta patrón sin escoria (en g/100 g de aglutinante anhidro) y  $h$  es la masa de hidrotalcita seca formada a partir de 1 g de MgO (en la escoria equivale a 2,35 g para hidrotalcita pura con relación Mg: Al es igual a 3: 1).  $M_s$  es la masa de MgO en la escoria en g/100 g de escoria.

Tabla 2 – Grado de reacción de 60EAH y 40EAH a 7, 28 y 450 días

Edad	Pasta	Grado de reacción	Desvío estándar
7 Días	60EAH	23,37 %	2,81
28 Días	60EAH	40,90 %	0,56
450 Días	60EAH	47,90 %	1,28
7 Días	40EAH	15,91 %	3,36
28 Días	40EAH	31,81 %	2,54
450 Días	40EAH	48,37 %	3,72

## Conclusiones

Son destacables los porcentajes obtenidos a 7 y 28 días para todas las muestras. A los 450 días los resultados muestran una evolución muy limitada en comparación con los 28 días, aunque es importante a futuro determinar qué factores pueden influenciar estos resultados. Un estudio más extenso al respecto se encuentra en curso con el objetivo de lograr una mejor correlación de los datos obtenidos mediante la disolución selectiva y el grado de reacción alcanzado por la escoria de alto horno en medio cementantes.

La desviación estándar en el grado de reacción mostró valores por debajo de las diferencias de acuerdo a la evolución con la edad del grado de reacción medido para la EAH. En esta ocasión los resultados han presentado una cierta variabilidad, mayor en cuanto menor es la proporción de MSC en la pasta debido al menor contenido de EAH original.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado parcialmente por ANPCyT a través de PICT 2017-0091 y PICT 2015-3339.

## Referencias

- [1] Irassar EF, Bonavetti VL, Menéndez G, Carrasco MF. "Hidratación y propiedades de cemento ternarios con filler calcáreo y escoria". *Revista ALCONPAT*. 2015;5(2):83-95. doi:10.21041/ra.v5i2.79
- [2] van den Heede P, Gruyaert E, de Belie N. "Transport properties of high-volume fly ash concrete: Capillary water sorption, water sorption under vacuum and gas permeability". *Cement and Concrete Composites*. 2010;32(10):749-756. doi:10.1016/j.cemconcomp.2010.08.006
- [3] N. Alderete, Y. A Villagran Zaccardi ADM. "Procesos de caracterización de las adiciones minerales y su influencia en materiales cementicios". In: Yuri Villagran Zaccardi; Claudio Zega, ed. *Anales LEMIT. Serie III, Año 3 - N° 8*. ; 2017:7-13.
- [4] Scarponi NB, Carlos Pico-Cortés, Villagrán-Zaccardi Y. "Método de disolución selectiva para cuantificar el grado de reacción de puzolana natural y ceniza volante en pasta cementícea". *Congreso AATH*. Published online 2020:21-25.
- [5] Villagrán Zaccardi YA, Vollpracht A, Gruyaert E, de Belie N. "Recommendation of RILEM TC 238-SCM: determination of the degree of reaction of siliceous fly ash and slag in hydrated cement paste by the selective dissolution method". *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*. 2018;51(1). doi:10.1617/s11527-017-1134-3
- [6] CEN/TC 51. "CEN/TR 196-4 - Methods of testing cement - Part 4: Quantitative determination of constituents". Published online 2007:34.
- [7] Lumley JS, Gollop RS, Moir GK. "Degrees of reaction of the slag in some blends with portland cements". *Cem Concr Res*. 1996;26. doi:10.1016/0008-8846(95)00190-5

# CAPACIDAD DE UN MÉTODO R3 PARA PREDECIR LA REACTIVIDAD DE VIDRIOS NATURALES Y ARTIFICIALES

Agustin Laveglia<sup>1,2</sup>, Mónica A. Trezza<sup>2</sup>, Edgardo F. Irassar<sup>2</sup>, Viviana F. Rahhal<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Construction and Building Materials, Technical University of Darmstadt

<sup>2</sup> Centro de Investigaciones en Física e Ingeniería del Centro de la Provincia de Buenos Aires (CIFICEN: CONICET-CICPBA-UNICEN)

Palabras Clave: vidrios, reactividad, puzolanicidad, ensayos R3

## Introducción

Un vidrio puede ser definido como un sólido amorfo que carece completamente de una estructura atómica periódica de largo alcance. Su estructura es una amplia cadena de átomos de sílice y/o aluminio y/o boro como formadores de red, enlazados con oxígenos e interrumpida aleatoriamente por cationes alcalinos y alcalinotérreos que actúan como modificadores de red [1]. Éstos últimos son responsables de las propiedades fisicoquímicas de los vidrios y de su potencial reactividad. Por su procedencia, los vidrios se clasifican en: artificial o natural. Entre los vidrios artificiales, los vidrios de sílice de tipo sódicos-cálcicos ocupan la mayor proporción del mercado, con usos que cubren desde la industria alimenticia (envases) hasta la industria de la construcción y automotriz (ventanas y parabrisas) [2]. Para propósitos especiales, se emplean vidrios borosilicatados [3]. Otros vidrios son las escorias granuladas de alto horno o las cenizas volantes obtenidas durante la producción de electricidad [4]. Desde el punto de vista geológico, los vidrios naturales tienen su origen en la actividad volcánica y se denominan piroclastos [5]. Distintos vidrios han sido estudiados para ser utilizados como material cementíceo suplementario (SCM) en los materiales de construcción, y actualmente se ha renovado el interés para generar alternativas ecoeficientes al cemento portland. Su eficacia como SCM depende de su capacidad de formar fases hidráulicas estables, y de hacerlo en un período de tiempo razonable. Por estos motivos, en la búsqueda de posibles SCMs, es de interés evaluar rápidamente su reactividad a edad temprana; que depende de varios parámetros (composición química, proporción de fase amorfa y superficie específica). Ante la complejidad de estos materiales, es habitual el uso simultáneo de distintos métodos para juzgar integralmente un SCM, tales como ensayos de resistencia a compresión de morteros o ensayos estandarizados de consumo de  $\text{Ca(OH)}_2$  durante la hidratación del SCM (Ensayo de Frattini, Ensayo de Chapelle). Otros métodos involucran técnicas de SEM-IA, XRD o NMR ( $^{27}\text{Al}$  o  $^{29}\text{Si}$ ) que demandan un tiempo considerable y su precisión a edad temprana es moderada [6]. Recientemente ha sido normalizado (ASTM C1897-20) un método para medir la reactividad química de los SCM que permitiría obtener resultados rápidos, relevantes y confiables (R3 por sus siglas en inglés) a 7 días de edad, empleando una medida del agua químicamente combinada (AQC) por el SCM. El objetivo de este trabajo es evaluar el método en cuanto a su capacidad para predecir la reactividad de 6 vidrios de diferente procedencia con amplia variación de su composición química, comparándolo con el método de Frattini y la resistencia a compresión de morteros con 25% de reemplazo.

## Materiales y métodos

En este trabajo se utilizó un cemento portland (CP) provisto por una empresa local, cuya composición mineralógica es 63,8% de C3S, 19,7% de C2S, 3,0% de C3A y 12,8% de C4AF y su superficie específica Blaine es 337 m<sup>2</sup>/kg. Como SCM se utilizaron: puzolana natural (PZ), ceniza volante (CV), vidrio de borosilicato (PX), vidrio de parabrisas (P), vidrio de contenedores (B) y una escoria granulada de alto horno (E). La composición química se determinó por fluorescencia de rayos X: La composición equivalente (Figura 1a) se obtuvo a partir de su composición química, expresando el contenido de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{B}_2\text{O}_3$  como  $\text{SiO}_2\text{eq}$  (%), todos los óxidos provenientes de cationes alcalinos como equivalentes  $\text{Na}_2\text{Oeq}$  (%) y todos los óxidos provenientes de cationes alcalinotérreos como  $\text{CaOeq}$  (%). Los vidrios fueron triturados y molidos en un molino de bolas de laboratorio. Su distribución granulométrica se presenta en la Figura 1b. La actividad puzolánica de los SCM se midió a 7 y 28 días, utilizando el método de AQC ( $\text{H}_2\text{O}$  combinada (%)) propuesto por ASTM C1897-20. Se prepararon los cementos mezcla con un reemplazo de 25% en peso por cada SCM (PZ25, CV25, PX25, P25, B25, E25), los cuales fueron testeados empleando el método de Frattini (EN 196-5:2011) y se determinó la resistencia a compresión sobre tres probetas prismáticas (EN 196-1:2016) de un mortero normalizado (arena:cemento:agua 3:1:0,5) a los 7 y 28 días. Los resultados del ensayo de Frattini fueron cuantificados considerando el consumo de  $\text{Ca(OH)}_2$  como la distancia de cada punto a la isoterma de solubilidad, que constituye la máxima cantidad teórica para una determinada  $[\text{OH}^-]$ . El valor máximo se calcula a partir de la Ecuación de la curva de solubilidad (EN 196-5). Así se puede comparar la cantidad

teórica máxima y el resultado medido, cuantificado como la diferencia entre los dos valores. Finalmente, se expresa como un porcentaje de la cantidad máxima teórica removida ( $\Delta\text{CaO}(\%)$ ) [7].

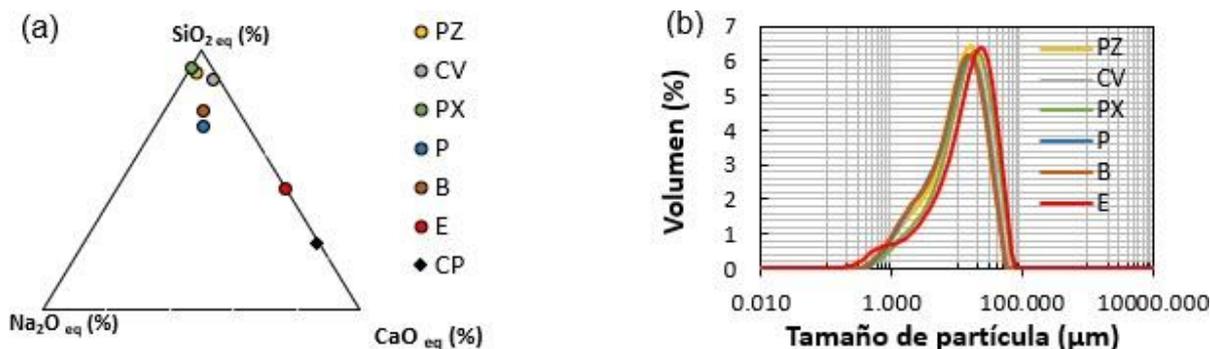


Figura 1. (a) Diagrama triangular de composición química equivalente de los materiales utilizados y (b) Distribución de tamaño de partícula de las adiciones utilizadas

## Resultados y discusión

En la Figura 2 se presentan los resultados del ensayo de Frattini. A los 7 días, todos los cementos mezclas se ubican por debajo de la curva de solubilidad, indicando puzolanicidad positiva.

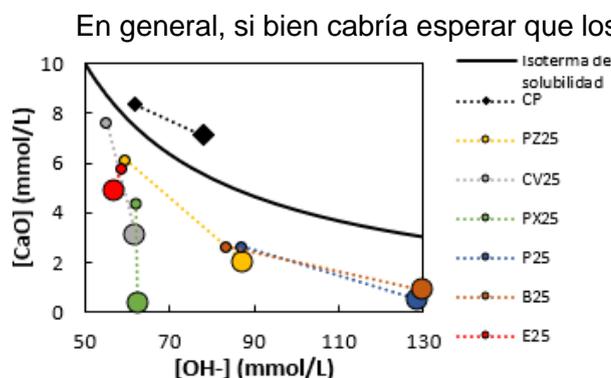


Figura 2. Ensayo de Frattini de las adiciones utilizadas a 7 días (pequeño) y a 28 días (grande) las reacciones de hidratación [8].

En la Figura 3 se muestra la correlación entre los resultados del ensayo de Frattini y la  $\text{CSratio}(\%)$  a 7 y 28 días. En general, los resultados de  $\text{CSratio}(\%)$  siguen la tendencia mostrada por el consumo de hidróxido de calcio en el ensayo de Frattini (Figura 3). Sin considerar el cemento mezcla con reemplazo parcial de escoria, ambos parámetros muestran un elevado coeficiente de correlación, y en ambos casos la ecuación muestra que el  $\text{CSratio}(\%)$  tiene un coeficiente inferior al reemplazo (63 y 68,5% a 7 y 28 días, respectivamente) para un consumo nulo de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  y la tasa de crecimiento fue similar para ambas edades. Para el cemento con escoria (ES), el  $\text{CSratio}(\%)$  fue mayor que 100 a los 28 días indicando el fenómeno simultáneo de disolución/fijación de calcio para producir compuestos hidráulicos que contribuyen a mejorar el comportamiento mecánico a pesar de poseer menor cantidad de cemento [9].

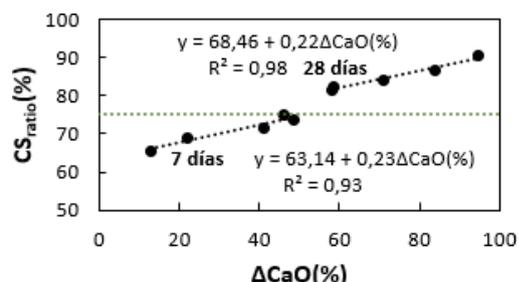


Figura 3. Correlación entre  $\text{CSratio}(\%)$  y  $\Delta\text{CaO}(\%)$  a 7 y 28 días

Para cuantificar el acuerdo experimental entre los ensayos mencionados, se efectuaron regresiones lineales simples. Los resultados se muestran en la Figura 4a y b. A 7 días se observa una buena correlación entre  $\text{H}_2\text{O combinada}(\%)$  y  $\Delta\text{CaO}(\%)$  (excluyendo E). A su vez,  $\text{CSratio}$  y  $\text{H}_2\text{O combinada}$  están bien correlacionados. A los 28 días se obtuvo un  $R^2$  inferior a 0,01 para las mencionadas correlaciones, indicando las limitaciones de esta técnica para evaluar comparativamente la reactividad de los vidrios a tardía edad.

Una explicación probable es que el medio de reacción propuesto por el ensayo R3 no ofrece las condiciones suficientes para favorecer que vidrios continúen disolviéndose y reaccionando a partir de 7 días.

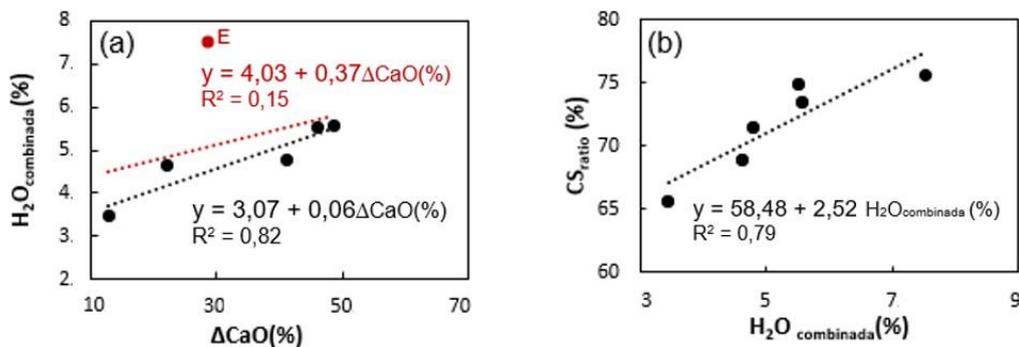


Figura 4. (a) Correlación entre H<sub>2</sub>O combinada (%) y ΔCaO(%) a 7 días y (b) Correlación entre CSratio(%) y H<sub>2</sub>O combinada (%) a 7 días.

## Conclusiones

En base a los resultados de este trabajo se pueden establecer las siguientes conclusiones:

- De acuerdo con el ensayo de Frattini, todas las adiciones presentan actividad puzolánica a partir de 7 días. Sin embargo, la reactividad puzolánica se confirma con el ratio de resistencia a compresión superior a 75% a los 28 días. Excluyendo la escoria, los resultados del ensayo de Frattini y el ratio de resistencia a compresión presentan una correlación.
- El consumo de hidróxido de calcio y el desarrollo de la resistencia de los morteros se corrobora mediante el ensayo de agua químicamente combinada. A 7 días, existe una elevada correlación ( $R^2 > 0,85$ ) entre el agua combinada y el hidróxido de calcio consumido excluyendo el cemento mezcla con escoria (comportamiento autopuzolanico); y el agua químicamente combinada, explica en un 80% la variación de la resistencia a compresión de los morteros. A partir de 28 días no existe correlación entre las variables analizadas. La técnica R3 presenta un límite para evaluar la puzolanicidad de los SCMs a partir a 28 días, lo cual es una dificultad al estudiar adiciones de reactividad más lenta.
- Estos resultados son promisorios para emplear vidrios de amplia variabilidad química como adiciones puzolánicas.

## Referencias

- [1] J. Skibsted and R. Snellings, "Reactivity of supplementary cementitious materials (SCMs) in cement blends," *Cem. Concr. Res.*, vol. 124, no. June, p. 105799, 2019, doi: 10.1016/j.cemconres.2019.105799.
- [2] L. Cormier, G. Calas, and B. Beuneu, "Structural changes between soda-lime silicate glass and melt," *J. Non. Cryst. Solids*, vol. 357, no. 3, pp. 926–931, 2011, doi: 10.1016/j.jnoncrysol.2010.10.014.
- [3] M. K. Moradillo, C. W. Chung, M. H. Keys, A. Choudhary, S. R. Reese, and W. J. Weiss, "Use of borosilicate glass powder in cementitious materials: Pozzolanic reactivity and neutron shielding properties," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 112, p. 103640, 2020, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103640.
- [4] B. Lothenbach, K. Scrivener, and R. D. Hooton, "Supplementary cementitious materials," *Cem. Concr. Res.*, vol. 41, no. 12, pp. 1244–1256, 2011, doi: 10.1016/j.cemconres.2010.12.001.
- [5] R. Snellings, G. Mertens, and J. Elsen, "Supplementary cementitious materials," *Rev. Mineral. Geochemistry*, vol. 74, no. December 2013, pp. 211–278, 2012, doi: 10.2138/rmg.2012.74.6.
- [6] V. Kocaba, E. Gallucci, and K. L. Scrivener, "Methods for determination of degree of reaction of slag in blended cement pastes," *Cem. Concr. Res.*, vol. 42, no. 3, pp. 511–525, 2012, doi: 10.1016/j.cemconres.2011.11.010.
- [7] S. Yoon, P. J. M. Monteiro, D. E. Macphee, F. P. Glasser, and M. S. E. Imbabi, "Statistical evaluation of the mechanical properties of high-volume class F fly ash concretes," *Constr. Build. Mater.*, vol. 54, pp. 432–442, 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.12.077.
- [8] A. Laveglia, M. A. Trezza, and V. F. Rahhal, "Does the colour of the waste glass affect their efficiency as supplementary cementitious material?," *Int. J. Constr. Manag.*, pp. 1–11, 2020, doi: 10.1080/15623599.2020.1842959.
- [9] Y. Wang and P. Suraneni, "Experimental methods to determine the feasibility of steel slags as supplementary cementitious materials," *Constr. Build. Mater.*, vol. 204, pp. 458–467, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.196.

# UTILIZACIÓN DE MACHINE LEARNING PARA MEJORAR LA PRECISIÓN DEL ENSAYO DE ESCLEROMETRÍA.

Matías Benjamín Baudino<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ingeniero Civil. Hormi-Block S.A.

Palabras Clave: Esclerometría, Predicción, Machine Learning.

## Introducción

El ensayo de esclerometría es el ensayo más sencillo, rápido y barato que existe hoy para obtener una estimación de la resistencia de un elemento estructural. Sus limitaciones son ampliamente conocidas y el objetivo de este trabajo es realizar un análisis del modelo de predicción que se utiliza en el ensayo (regresión lineal) e intentar desde ahí plantear una propuesta de mejora para este. Esta mejora consistirá en utilizar una mayor cantidad de variables para intentar predecir con un modelo alternativo la resistencia del hormigón disminuyendo las incertidumbres asociadas a los modelos actuales.

## Modelo actual

En la figura 2, se puede observar cómo evolucionan los valores de  $R^2$  a medida que se aumenta el número de muestras utilizadas para definir los parámetros que le dan forma al modelo. Como se puede apreciar, el comportamiento del test set converge a 0,8 de  $R^2$  (aproximadamente) pero sin embargo la medición de la performance que se obtiene de los valores utilizados para calibrar el modelo (train set) demora en converger, lo que hace que por momentos se sobreestime la capacidad de predicción del método (y por momentos se subestime). Este fenómeno también depende de las muestras utilizadas para realizar la calibración en primer lugar, pero la convergencia en 0,8 sucede dejando de lado la posible aleatoriedad inicial. El valor de  $R^2$  entonces que deberíamos utilizar para definir el comportamiento de nuestro modelo es el del train set, a diferencia de lo que se realiza habitualmente de definir la performance del modelo sobre los valores utilizados para calibrarlo.

Con esto se ha definido que el método de la esclerometría actualmente planteado tiene un techo para su precisión de 0,7936359 en el  $R^2$  y un desvío del  $R^2$  de 0,07164. Este límite superior se alcanzó sobre hormigones perfectamente lisos y sin carbonatación por lo que la precisión real en obra suele ser inferior. Además, este trabajo fue realizado con un único esclerómetro y estas conclusiones podrían variar con un dispositivo diferente.

En lo que respecta a la distribución de los residuales (la diferencia entre el valor predicho y el valor real de rotura) se puede observar en la figura 5 que el histograma se asemeja a un comportamiento normal con un promedio que tiende a cero para las dos distribuciones (a medida que el tamaño de muestra aumente seguramente tenderá a cero y las dos distribuciones estarían alineadas en sus promedios). Esto nos indica que a medida que el número de ensayos aumente, los errores se irán compensando y el resultado final estará considerablemente cerca del valor real de la resistencia.

Con el fin de disminuir las incertidumbres asociadas a la medición de este tipo de ensayo no destructivo, en este trabajo se confecciona un modelo de predicción de mayor complejidad utilizando además un mayor número de variables para realizar la predicción de la resistencia.

Las variables seleccionadas para incluir en el nuevo modelo con el fin de mejorar la capacidad predictiva del ensayo de la esclerometría fueron:

- **Edad del hormigón:** este parámetro se eligió ya que la resistencia está en función de la edad, y la fecha de colado de los elementos es de fácil acceso;
- **Tamaño máximo nominal:** la bibliografía parece coincidir en que este parámetro afecta el número de rebote;
- **Tenor cemento por fórmula:** este parámetro fue seleccionado ya que el proveedor debería poder proporcionar este dato y según la bibliografía este dato junto con el tipo de cemento parecen influir en el rebote;

- **Tipo de cemento:** se utilizaron tres cementos diferentes para generar los datos de la calibración.
- **Asentamiento objetivo:** este parámetro junto con el tenor nos permitiría conocer hacia donde se espera que apuntase la cantidad de agua de la mezcla;
- **Resistencia especificada de la mezcla original.**
- **Si la probeta para realizar la calibración proviene de un pastón de laboratorio o no:** este parámetro fue incluido luego de analizar los datos ya que se observó que los pastones de laboratorio reflejaban desvíos menores y las predicciones de la esclerometría por el método convencional eran más acertadas sobre probetas extraídas en pastones de laboratorio.

```

Rebote                0.701140
Tenor                 0.443123
Paston_Si             0.238266
Paston_No             0.233568
Edad                  0.179675
Especificada_21       0.171388
As. Obj. 18.0         0.153542
Especificada_30       0.143703
As. Obj. 12.5         0.102384
TMN_12                0.080279
Cemento_Holcim        0.079170
TMN_19                0.047240
TMN_30                0.045864
Especificada_35        0.036669
Cemento_Avellaneda    0.034822
As. Obj. 8.0          0.031026
Cemento_Loma Negra    0.015602
Especificada_25        0.012636
Especificada_17        0.010156
Especificada_13        0.008611
As. Obj. 5.0          0.000000
TMN_25                0.000000
dtype: float64

```

Vale la aclaración de que el dataset utilizado no estaba debidamente balanceado y que la gran mayoría de las probetas eran de uno de los cementos (este hecho quedará para ser corregido en futuros trabajos).

Se analizaron mediante la herramienta de información mutua [1] (cuanto de incertidumbre disminuye en un parámetro al conocer información sobre otro) y se obtuvo que para la resistencia todas las variables propuestas parecían no ser independientes sino que aportaban algo de información. Los parámetros que mayor información aportan son la edad, el rebote, el tenor cemento y si la probeta proviene de un pastón o no. Detalles sobre la fórmula para el cálculo y la definición de Mutual Information y la teoría de la información podrán ser encontradas en la referencia [1] de páginas webs. En la figura 3 se detallan los resultados obtenidos.

Figura 1 - Información mutua de las variables.

## Nuevo Modelo.

Para establecer un nuevo modelo que permita disminuir las incertidumbres para predecir la resistencia a través del ensayo de esclerometría se probaron diferentes alternativas pero en este trabajo solo se detallara la que mejor resultado dió denominada XGBoost [2] (se comparan también los resultados del segundo mejor modelo denominado Random Forest). Si bien el modelo de random forest dio un resultado similar al de XGBoost, la mayor diferencia entre el test set y el set de validación, es decir un mayor overfitting, hizo que el modelo final fuese el anteriormente mencionado (ver tabla 1) (además de un mayor valor de  $R^2$  para el set de validación).

Tabla 1: Detalles de resultados de modelos.

Modelo	R2 test	R2 validación
Regresión lineal	0,81	0,79
Random Forest	0,973	0,877
XGBoost	0,931	0,882

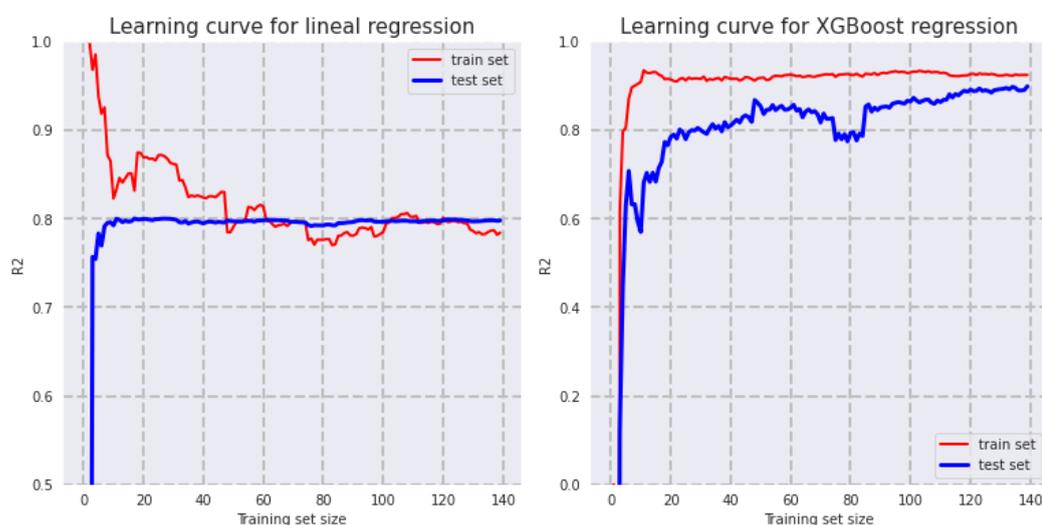


Figura 2 - Evolución de la medición de performance de los modelos de Regresión lineal y XGBoost.

Como se puede observar en la siguiente figura (figura 2), en las curvas de aprendizaje del modelo de Regresión lineal y el del modelo XGBoost (extreme gradient boosting), respectivamente, se muestran mejoras significativas con respecto a la regresión lineal ( $R^2$  que están por encima del 10% de los resultados iniciales). Además, parece que con una mayor cantidad de muestras para realizar la calibración estos modelos terminarían convergiendo con incluso mayores precisiones.

En la figura siguiente (figura 3) se puede apreciar la distribución de residuales obtenida por el modelo de XGBoost en comparación con lo obtenido por la práctica habitual, en donde claramente se observa una disminución en las incertidumbres de las predicciones de resistencia, habiendo utilizado las mismas probetas para calibrar los dos modelos.

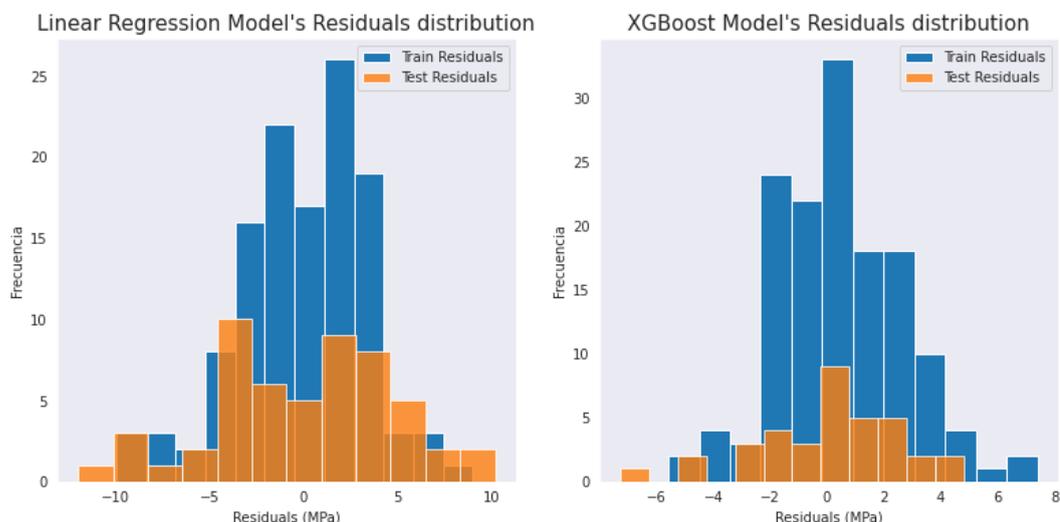


Figura 3 - Distribución de residuales para el test set y el train set del modelo actual vs XGBoost.

## Conclusiones finales

En vista a los resultados obtenidos se concluye que mediante una modificación en el proceso de calibración se pueden disminuir las incertidumbres y así obtener valores más confiables con el ensayo de esclerometría. Si bien muchas de las variables no tienen la influencia que en un principio se creía (en función de lo obtenido midiendo la información mutua), introducirlas a la calibración reduce la incertidumbre de la resistencia.

En función de analizar los residuales se observa que si se realizan varios ensayos esclerométricos en una estructura el promedio final de los residuales (o sea el error final de la predicción) tenderá a cero. Queda por definirse estadísticamente el número mínimo de ensayos para lograr esto con suficiente confianza.

Muchas mejoras y muchos avances aún quedan por realizarse en este campo, pudiendo introducirse la influencia de la carbonatación en el proceso de calibración por citar un ejemplo de una de las variables que se sabe que tienen influencia en este ensayo y no fueron incorporadas en el proceso de calibración.

Este procedimiento puede repetirse para todos los métodos de ensayos no destructivos y mejorar así las capacidades para estimar la resistencia del hormigón en una estructura. En adición, métodos combinados como el SONREB podrían verse beneficiados con este tipo de análisis, otorgando mejores resultados de los que actualmente se están obteniendo.

## Referencias

### Libros:

[1] V.M. Malhotra, M.J. Carino, "HandBook on Nondestructive testing of Concrete", Second Edition, CRC Press LLC, (2004), 386.

[2] Gerón A., "Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow", Second Edition, O'Reilly, (2019), 1150.

### Páginas Web:

[1] [https://en.wikipedia.org/wiki/Mutual\\_information](https://en.wikipedia.org/wiki/Mutual_information).

[2] <https://xgboost.readthedocs.io/en/latest/index.html>.

# INFLUENCIA DEL RECUBRIMIENTO IMPERMEABILIZANTE EN EL SECADO DE LAS PROBETAS PARA EL ENSAYO DE SUCCIÓN CAPILAR EN HORMIGÓN

Leandro Carrizo <sup>1</sup>

<sup>1</sup> LEMIT

Palabras Clave: succión capilar, recubrimiento, IRAM 1871

## Introducción

El ensayo de succión capilar sirve como indicador cualitativo de la capacidad que tiene el hormigón de resistir la acción de procesos que tiendan a deteriorarlo, principalmente mediante el ingreso de agua. El procedimiento de ensayo se detalla en la norma IRAM 1871 [1]. El reglamento CIRSOC 201-05 [2] establece, entre otros criterios, valores límite para los resultados de este ensayo en el caso de estructuras que estén destinadas al transporte o contención de agua. Antecedentes bibliográficos muestran una alta dispersión en los resultados del ensayo, lo cual ha impedido establecer una relación directa entre los resultados del mismo y la porosidad del hormigón o su relación a/c [3]. En trabajos anteriores [4] se estudió la influencia del tipo de recubrimiento en los resultados de ensayo. En este trabajo se profundizan esos estudios y se analiza en particular la influencia que las propiedades del material impermeabilizante ejercen durante el secado de las probetas.

## Materiales y mezclas

Para la realización de este estudio se empleó un hormigón de nivel resistente H-30 producido en una planta elaboradora de hormigón, cuya dosificación se muestra en la Tabla 1. Con dicho hormigón se moldearon 3 probetas de 15x30 cm, para determinación de la resistencia a compresión a 28 días, y 18 probetas cilíndricas de 10x20 cm, destinadas a la realización del presente estudio. Todas las probetas fueron desmoldadas a las 24 horas de su moldeo y luego mantenidas en cámara húmeda (T: (23±2) °C; HR>95%) hasta la edad de 28 días.

Tabla 1: Dosificación del hormigón

Materiales	Kg/m <sup>3</sup>
Cemento (kg)	350
Agua (kg)	158
Arena fina (kg)	665
Arena gruesa (kg)	199
Piedra 6/20 (kg)	995
Ad Plastificante (kg)	3.2
a/c	0,45

## Procedimiento

Las probetas fueron aserradas a 3 y 8 cm desde su base a fin de obtener el disco que indica la norma IRAM 1871. De los 18 discos obtenidos, 6 fueron impermeabilizados con pintura de caucho clorado (Caucho), 6 se impermeabilizaron utilizando cinta de aluminio autoadhesiva (Cinta) y las 6 restantes se impermeabilizaron con una pintura a base de resina epoxídica (Epoxi). La mitad de las probetas de cada grupo fueron impermeabilizadas antes del secado (IAS) y la mitad restante se impermeabilizó después del secado (IDS).

## Resultados

En la Figura 1 se presentan los coeficientes de succión capilar para cada grupo de muestras. Analizando las muestras IAS se observa que el grupo de muestras con caucho obtuvo el mayor coeficiente (114 g/m<sup>2</sup>\*s<sup>1/4</sup>) quedando las muestras con cinta de aluminio autoadhesiva y las muestras con resina epoxídica un 3,5% y un 20% por debajo, respectivamente. En cuanto a las diferencias obtenidas para un mismo tipo de recubrimiento aplicándolo luego del secado se observa lo siguiente: En el caso de la pintura de caucho clorado, el coeficiente S aumentó un 23% cuando las probetas fueron impermeabilizadas una vez finalizado el secado. En el caso de la cinta de aluminio este aumento del coeficiente S fue de 38%.

Finalmente, el aumento del coeficiente S para las muestras impermeabilizadas con resina epoxídica fue de 47%.

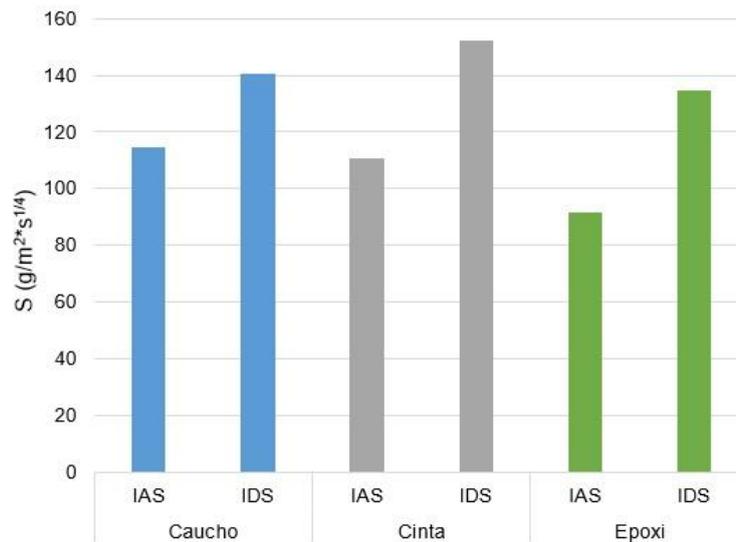


Figura 1: Coeficientes de succión capilar.

Comparando los resultados de los grupos IDS, se observa que el grupo Cinta presentó el mayor coeficiente ( $152 \text{ g/m}^2 \cdot \text{s}^{1/4}$ ), quedando el grupo Caucho y Epoxi un 8% y un 12% por debajo respectivamente.

Estos resultados sugieren que las propiedades del material impermeabilizante son determinantes durante el secado de las muestras. Ya que al poner todos los grupos en igualdad de condiciones durante el secado, los coeficientes resultantes se mostraron más homogéneos.

En la Figura 2 pueden observarse las capacidades de succión capilar resultantes para cada grupo de probetas. En el grupo de probetas IAS las recubiertas con caucho presentaron la mayor capacidad ( $2895 \text{ g/m}^2$ ). La capacidad del grupo recubierto con cinta estuvo apenas un 1,5% por debajo, mientras que la capacidad del grupo Epoxi estuvo un 17% por debajo del grupo Caucho. Respecto al grupo IDS, las probetas impermeabilizadas con cinta obtuvieron la mayor capacidad alcanzando los  $3598 \text{ g/m}^2$ . Las capacidades de los grupos Caucho y Epoxi se ubicaron 7 y 17% por debajo del grupo Cinta respectivamente.

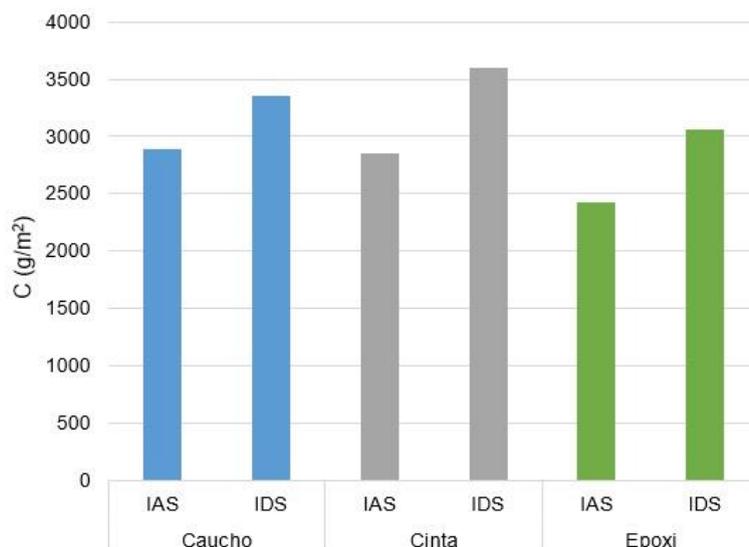


Figura 2: Capacidades de succión capilar

En la Figura 3 se muestran las curvas de secado promedio de cada grupo de probetas. Observando los grupos de probetas IAS, puede notarse que el grupo Epoxi es el que perdió menor cantidad de peso, seguido por el grupo Cinta y el grupo Caucho. Este resultado se relaciona directamente con los coeficientes de succión capilar obtenidos, a menor pérdida de peso durante de secado, menor coeficiente.

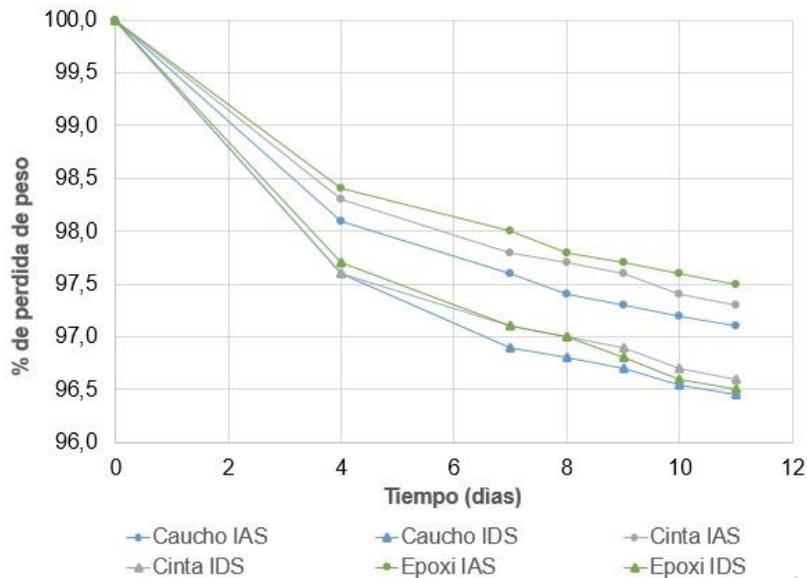


Figura 3: Porcentajes de pérdida de peso durante el secado.

## Conclusiones

De los resultados obtenidos en la evaluación de los parámetros de succión capilar empleando tres tipos diferentes de recubrimientos impermeabilizantes (Caucho, Epoxi y Cinta de Aluminio), considerando además el momento de aplicación del recubrimiento (antes o después del secado), para el hormigón evaluado se desprende que:

-La tendencia de trabajos anteriores se mantiene: Las probetas recubiertas con pintura a base de resina epoxídica presentan los menores coeficientes y capacidades de succión capilar. Los coeficientes y capacidades de las probetas impermeabilizadas con pintura de caucho clorado y con cinta de aluminio dan los valores ligeramente más altos.

- Los resultados del coeficiente de succión capilar y capacidad de succión capilar están fuertemente condicionados por el contenido de humedad de las probetas al momento de iniciar el ensayo. A su vez, queda en evidencia que las propiedades del material impermeabilizante ejercen su mayor influencia durante el secado en estufa a 50°C de las probetas. En cambio, su influencia es considerablemente menor durante la etapa final del ensayo. Es decir, las diferencias entre los métodos de impermeabilización disminuyen cuando son aplicados una vez finalizado el secado.

## Referencias

- [1] IRAM 1871, "Hormigón. Método de ensayo para la determinación de la capacidad y el coeficiente de succión capilar de agua del hormigón endurecido", IRAM, Argentina, (2021).
- [2] CIRSOC 201-2005, "Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón", INTI, Buenos Aires, Argentina, (2005), p. 452.
- [3] Mattio, M.E., Ichaso, A., Irigoien, P., López, R., "La permeabilidad al agua como parámetro para evaluar la durabilidad del hormigón", VI Congreso Internacional y 20ª Reunión Técnica de la AATH, (2014), pp. 247-254.
- [4] Carrizo, L.E., Villagrán-Zaccardi, Y., Zega, C.J., "Evaluación de la influencia del tipo de recubrimiento en el ensayo de succión capilar en hormigón", IX Congreso Internacional y 23ª Reunión Técnica de la AATH, (2020), pp..

# POTENCIALIDADES DE LA RADIOGRAFÍA DE NEUTRONES PARA DETERMINAR EL INGRESO DE AGUA EN MATERIALES CEMENTÍCEOS

Natalia Alderete<sup>1</sup>, Yury Villagrán<sup>1</sup>, Nele De Belie<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Labo Magnel-Vandepitte for Structural Engineering and Building Materials, Ghent University, Bélgica*

Palabras Clave: radiografía de neutrones, capilaridad, durabilidad.

## Introducción

La visualización del ingreso de agua en materiales cementíceos resulta de particular interés para estudiar fenómenos de durabilidad y su conexión con el transporte de agua. Entre todos los diferentes métodos disponibles (con radiación de diferentes niveles de energía), una técnica no destructiva competente es la radiografía de neutrones. Debido a la fuerte interacción con el hidrógeno, la radiografía de neutrones es una excelente técnica para visualizar la distribución de humedad en materiales cementíceos. Los neutrones reaccionan principalmente con el núcleo de elementos; como tal, el haz de neutrones que atraviesa una muestra es una señal con información sobre la composición y estructura de la muestra. Así, la radiografía de neutrones permite el análisis cuantitativo no destructivo de material hidrogenado midiendo perfiles de atenuación de neutrones contrastantes dentro del material bajo investigación. De hecho, la atenuación de los neutrones por el agua es aproximadamente 10 veces mayor que la de los componentes químicos más comunes (Si, Ca, Al) en los materiales de construcción como el hormigón [1]. Teniendo en cuenta esa diferencia, la porosidad del hormigón fue evaluada indirectamente mediante esta técnica por De Beer et al. [2], evaluando muestras con diferente agua/ligante y diferente tiempo de curado.

La evaluación de materiales cementíceos mediante radiografía de neutrones comenzó hace alrededor de 50 años, cuando en 1972 Reijonen y Pihlajavaara [3] utilizaron esta técnica para controlar la carbonatación en el hormigón. Desde entonces varios estudios han utilizado esta técnica para evaluar materiales cementíceos.

Para evaluar el contenido de agua en las muestras, es necesario procesar las radiografías de neutrones para obtener una cuantificación confiable. Para ello, se necesitan radiografías de haz abierto, haz cerrado y de cuerpo negro [4]. Las radiografías de haz abierto muestran la distribución espacial de la intensidad del haz de neutrones y están destinadas a eliminar la heterogeneidad del haz. También son necesarias radiografías de haz cerrado (corriente oscura) que se utilizan como corrección del nivel de ruido de fondo de la cámara. Finalmente, las radiografías de cuerpo negro se obtienen colocando bloques de polietileno boronado que absorben neutrones frente a las muestras escaneadas. Esto se utiliza normalmente como corrección de la dispersión de fondo. Todas estas correcciones se realizan utilizando el software de procesamiento de imágenes (por ejemplo ImageJ [5]) para poder cuantificar el contenido de agua.

## Perspectivas y consideraciones finales

La potencialidad de la radiografía de neutrones radica en que permite ver 'en vivo' el progreso del frente húmedo y cuantificar el contenido de agua dentro de la muestra. La radiografía de neutrones es particularmente interesante para la visualización del frente húmedo en imbibición capilar de agua en hormigón o mortero [6–8]. Para el caso de muestras fisuradas, se puede identificar y estudiar claramente la trayectoria del agua que ingresa a través de las fisuras [9–11]. Sin embargo, para el caso de muestras no fisuradas, el agua no tiene una única ruta preferencial y, por lo tanto, su movimiento a través de la muestra está condicionado por la estructura de los poros. En la Figura 1 se muestra un ejemplo de la cuantificación del perfil vertical de humedad en una muestra de mortero después de 6 horas en contacto con agua [12]. La secuencia de escaneo (después de haber tomado las radiografías de haz abierto, haz cerrado y cuerpo negro) fue la siguiente: primero, se tomó una "imagen de referencia" de las muestras secas. Posteriormente, se añadió agua manualmente a las bandejas mediante una jeringa, hasta que la superficie inferior de las muestras se sumergió  $3 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$  en agua. Luego, comenzó el escaneo del proceso de absorción de agua y continuó sin parar durante 6 h. Posteriormente, las muestras se retiraron y pesaron, y se dejaron sumergidas en  $3 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$  de agua hasta que se volvieron a escanear, a las 24 h. Este procedimiento se repitió para las siguientes mediciones a las 72 h y 96 h. Las radiografías se tomaron con un tiempo de exposición de 3 s, lo que resultó en un intervalo de tiempo de 4,6 s debido a la preparación necesaria del proceso. El tamaño de píxel fue de 0,273 mm para todas las imágenes para un buen balance entre resolución y tiempo de procesamiento y en función de los parámetros del dispositivo utilizado.

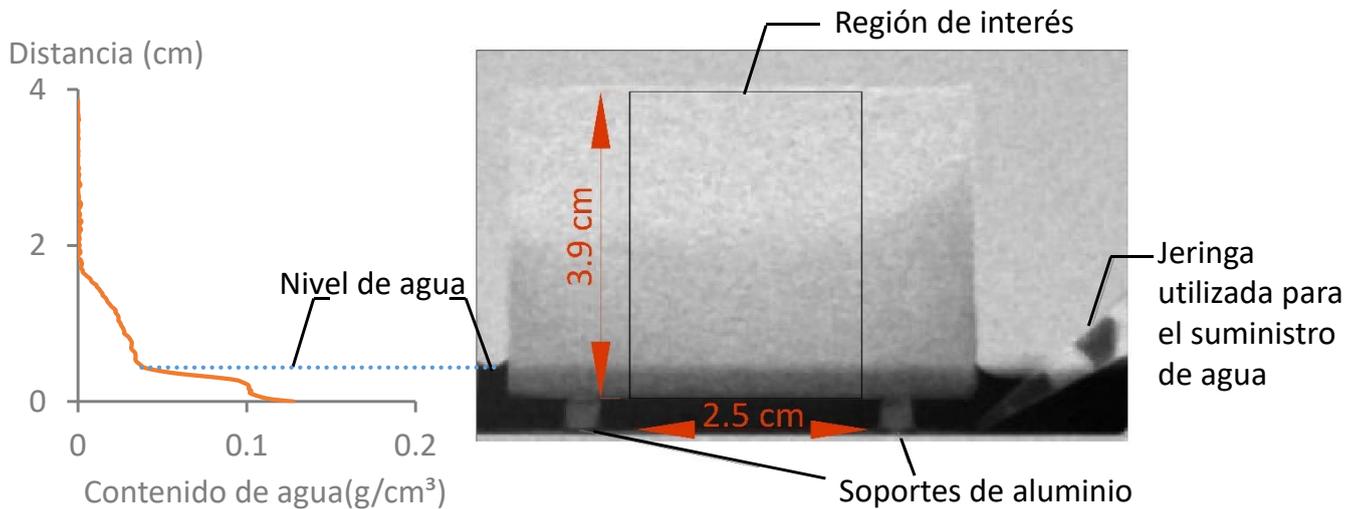


Figura 1 – Visualización del contenido de agua mediante análisis de imágenes de radiografías de neutrones. El rectángulo marcado en el medio del espécimen muestra el área considerada para la cuantificación de los perfiles de humedad en las muestras (Región de interés). A la izquierda se muestra un ejemplo de dicha cuantificación.

Un tema particularmente interesante para analizar es la forma del frente de penetración y el grado de coincidencia con el frente uniforme teórico. Si la tasa de absorción de agua capilar es lo suficientemente lenta, puede haber una disminución gradual del contenido de humedad con la altura. Esto sería cierto cuando el componente difusivo del flujo adquiere una importancia relativa. Los resultados muestran un perfil gradual en vez de un frente homogéneo. En este caso, no se debe descartar la contribución al proceso de las deformaciones sufridas debido a la deformación de la muestra. Se ha demostrado que hay expansión [13] en morteros y hormigones durante imbibición capilar y esto podría afectar el flujo de agua. A medida que el agua entra en la muestra, provoca el inicio de la expansión y esto interfiere en el proceso. Así, la variación en la difusividad hidráulica podría contribuir a un frente de agua más gradual (descrito en detalle en [13]). Esta información todavía no está presente en la literatura científica y resulta de gran interés visualizar como las deformaciones modifican el fenómeno de transporte.

Otros potenciales temas de investigación mediante el uso de neutrones podrían ser la evaluación de la contribución de la zona de interface (ZI) sirve como una ruta preferencial para la entrada de agua. Aunque probablemente con tomografía (3D) en vez de radiografías (2D), ya que la tomografía de neutrones puede proporcionar información sobre la estructura interior de las muestras. Así, el comportamiento del transporte de humedad en la ZI alrededor de los agregados gruesos puede estudiarse en el futuro utilizando tomografía de neutrones con resoluciones temporales y espaciales equilibradas. También podría estudiarse hormigón reciclado, como el hormigón con áridos reciclados tiene dos interfaces: la interfaz entre el mortero adherido y el árido original y la nueva IZ entre el nuevo mortero y el árido reciclado. Por lo tanto, se podría evaluar el transporte de agua en estas dos interfaces diferentes.

En conclusión, la radiografía (y la tomografía) de neutrones permiten estudiar en detalle fenómenos de transporte en los materiales cementíceos. Estas técnicas aún se están desarrollando y, sin duda, se lograrán más avances en estas aplicaciones en un futuro próximo. Cabe destacar que las mediciones de radiografía de neutrones se realizaron utilizando la instalación NEUTRA, parte de la fuente de neutrones de espalación SINQ del Instituto Paul Scherrer (PSI) en Suiza. En dicho instituto se pueden pedir becas para realizar estancias de hasta 8 días, donde investigadores de todo el mundo pueden aplicar para utilizar el equipamiento.

## Agradecimientos

Los autores agradecen especialmente al Instituto Paul Scherrer (PSI, Suiza) por brindar la posibilidad de hacer uso de su instalación NEUTRA, y especialmente a Pavel Trtik por el apoyo en las tareas experimentales y de análisis de imágenes.

## Referencias

- [1] H. Pleinert, H. Sadouki, F.H. Wittmann, "Determination of moisture distributions in porous building materials by neutron transmission analysis", *Mater. Struct.* 31 (1998) 218–224.
- [2] F.C. De Beer, J.J. Le Roux, E.P. Kearsley, "Testing the durability of concrete with neutron radiography", *Nucl.*

- Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip. 542 (2005) 226–231.
- [3] H. Reijonen, S.E. Pihlajavaara, "On the determination by neutron radiography of the thickness of the carbonated layer of concrete based upon changes in water content", *Cem. Concr. Res.* 2 (1972) 607–615.
- [4] R. Hassanein, H.O. Meyer, A. Carminati, M. Estermann, E. Lehmann, P. Vontobel, "Investigation of water imbibition in porous stone by thermal neutron radiography", *J. Phys. D. Appl. Phys.* 39 (2006) 4284.
- [5] W.S. Rasband, Image J, (n.d.) U. S. National Institutes of Health, Bethesda, Mar.
- [6] M. Kanematsu, I. Maruyama, T. Noguchi, H. Iikura, N. Tsuchiya, "Quantification of water penetration into concrete through cracks by neutron radiography", in: *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, 2009: pp. 154–158.
- [7] P. Zhang, F.H. Wittmann, T. Zhao, E. Lehmann, Z. Jin, "Visualization and quantification of water movement in porous cement-based materials by real time thermal neutron radiography: Theoretical analysis and experimental study", *Sci. China Technol. Sci.* 53 (2010) 1198–1207.
- [8] D. Snoeck, S. Steuperaert, K. Van Tittelboom, P. Dubruel, N. De Belie, "Visualization of water penetration in cementitious materials with superabsorbent polymers by means of neutron radiography", *Cem. Concr. Res.* 42 (2012) 1113–1121.
- [9] P. Van den Heede, B. Van Belleghem, N.M. Alderete, K. Van Tittelboom, N. De Belie, "Neutron radiography based visualization and profiling of water uptake in (Un)cracked and autonomously healed cementitious materials", *Materials (Basel)*. 9 (2016).
- [10] K. Van Tittelboom, D. Snoeck, P. Vontobel, F.H. Wittmann, N. De Belie, "Use of neutron radiography and tomography to visualize the autonomous crack sealing efficiency in cementitious materials", *Mater. Struct.* 46 (2013) 105–121.
- [11] P. Zhang, F.H. Wittmann, T. Zhao, E.H. Lehmann, "Neutron imaging of water penetration into cracked steel reinforced concrete", *Phys. B Condens. Matter.* 405 (2010) 1866–1871.
- [12] N.M. Alderete, Y.A. Villagrán Zaccardi, D. Snoeck, B. Van Belleghem, P. Van Den Heede, K. Van Tittelboom, N. De Belie, "Capillary imbibition in mortars with natural pozzolan, limestone powder and slag evaluated through neutron radiography, electrical conductivity, and gravimetric analysis", *Cem. Concr. Res.* 118 (2019) 57–68.
- [13] N.M. Alderete, Y.A. Villagrán Zaccardi, N. De Belie, "Physical evidence of swelling as the cause of anomalous capillary water uptake by cementitious materials", *Cem. Concr. Res.* 120 (2019) 256–266.

# CARACTERIZACIÓN DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE HORMIGÓN UTILIZANDO CLUSTERIZACIÓN CON ALGORITMO K- MEANS

Matías Benjamín Baudino<sup>1</sup>, Juan Francisco Dominguez Ruben<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ingeniero Civil. Hormi-Block S.A.

<sup>2</sup> Ingeniero Civil. Loma Negra C.I.A.S.A.

Palabras Clave: Testigos, Esclerometría, Ultrasonido, Variabilidad, Clusterización.

## Introducción

El presente trabajo surge con el fin de dilucidar la fuente de la variabilidad encontrada en los resultados de los ensayos de resistencia a compresión de 131 testigos extraídos de 30 elementos estructurales de un edificio formados por un hormigón H40. En la mayoría de los elementos estructurales los resultados de resistencia de los testigos presentaron diferencias considerables entre los valores mínimos y máximos.

En cada elemento, se realizó un estudio de t de Student para detectar posibles valores atípicos (según lo establecido en la guía ASTM E178) sin encontrar en ningún caso una significancia que justificase descartar algún valor. En base a esto se decidió trabajar con todos los resultados de rotura. Según Barlett y MacGregor [1], la variabilidad del hormigón en los testigos vendrá expresada por:

$$V_{\text{core}}^2 = V_{\text{wt}}^2 + V_{\text{wb}}^2 + V_{\text{s}}^2 + V_{\text{d}}^2$$

En donde  $V_{\text{core}}$  es el coeficiente de variabilidad del testigo observado en la rotura de especímenes hermanos,  $V_{\text{wt}}$  es el coeficiente de variación asociado a variaciones normales del método de ensayo,  $V_{\text{wb}}$  es el coeficiente de variación debido a la inherente aleatoriedad de la resistencia a compresión del hormigón y  $V_{\text{s}}$  es el coeficiente de variación debido a la variación sistémica del hormigón in situ a través del volumen de cada elemento, lo cual aumenta el coeficiente de variación de los testigos. El coeficiente de variación que refleja la incertidumbre asociada al posible daño que se desarrolla en el proceso de extracción se ve representada en  $V_{\text{d}}$ . Tal como puede observarse en los coeficientes que definen la variabilidad de los testigos, parte de esta vendrá dada por variaciones en el material, en la construcción y en los ensayos. Por lo tanto, la premisa que llevó a realizar los ensayos no destructivos es que “si los elevados coeficientes de variación observados en los resultados de rotura de los testigos pudiesen ser asociados a variaciones en el hormigón o en el elemento estructural, estos se verían reflejados en otro tipo de mediciones, ya que sería independientes del método utilizado para medir las propiedades del hormigón”.

Para caracterizar los elementos estructurales, se decidió realizar ensayos esclerométricos y de ultrasonidos en dos alturas distintas (a 1 y 2 metros de altura desde el nivel del piso), en varios puntos formando cuadrículas de 2 por 4, 2 por 5 y 2 por 6, según la geometría del elemento estudiado.

Al analizar los resultados se pudo que parece existir relaciones entre la resistencia y el resultado de la esclerometría, como así también con el resultado del ultrasonido, pero las dispersiones son mayores a lo que usualmente se presentan en este tipo de relaciones, lo cual no permite establecer modelos de regresión que tengan performances aceptables. Lo indicado nos lleva a pensar que esta dispersión (o ruido) podría estar asociado a problemas con la precisión de la resistencia medida en los testigos.

En la figura 1 se puede observar que los coeficientes de variación de los resultados de los testigos parecen reflejar comportamientos diferentes a lo que normalmente se puede observar en esta propiedad del hormigón, es decir distribuciones que se asemejan a una campana de Gauss. Si bien el rebote y la velocidad del pulso de ultrasonido no son necesariamente la resistencia, se puede considerar que existen correlaciones entre estos parámetros y la resistencia del hormigón por lo que, de existir diferencias en un valor deberían verse reflejadas en los otros, condición que no se verificó en este caso. El promedio de las distribuciones de los rebotes y los ultrasonidos, dieron 4,42% y 3,08% respectivamente, mientras que el promedio de los coeficientes de variación, presentados en la figura 1, para los testigos resultó 12,81%. En la referencia uno, capítulo 6 se detallan lineamientos con respecto a este parámetro, establecidos por



Figura 1 - Histograma de coeficientes de variación de los testigos.

diferentes normativas y recomendaciones bibliográficas, los cuales van desde 3,2% hasta 7,1%, casi la mitad de lo obtenido en promedio en la estructura analizada.

## Clusterización

Una vez establecido que el origen de la variación de los resultados de los testigos podría provenir de variaciones asociadas a la extracción y el ensayo de los mismos, se decidió realizar un procedimiento de Clusterización (agrupar los elementos estructurales en grupos de comportamiento similar) en función de los promedios y los desvíos estándar de las esclerometrías y los ultrasonidos, parámetros con los cuales se pretendió caracterizar el comportamiento de los elementos estructurales.

El algoritmo que se utilizó para la Clusterización fue K-Means, el cual arrojó que existen 5 clusters en el grupo de elementos estructurales analizados. Si bien la Clusterización se realizó con cuatro parámetros, se grafican solo 2 con el fin de facilitar la visualización (figura 2). En la figura 3 se observan los resultados que definen el comportamiento de cada cluster, siendo estos valores los centros de masa de las propiedades que definen a dichos elementos (en esta primera etapa dichas propiedades fueron el promedio y el desvío estándar de las esclerometrías y ultrasonidos). En la figura 2 se pueden apreciar los 5 clusters detectados.

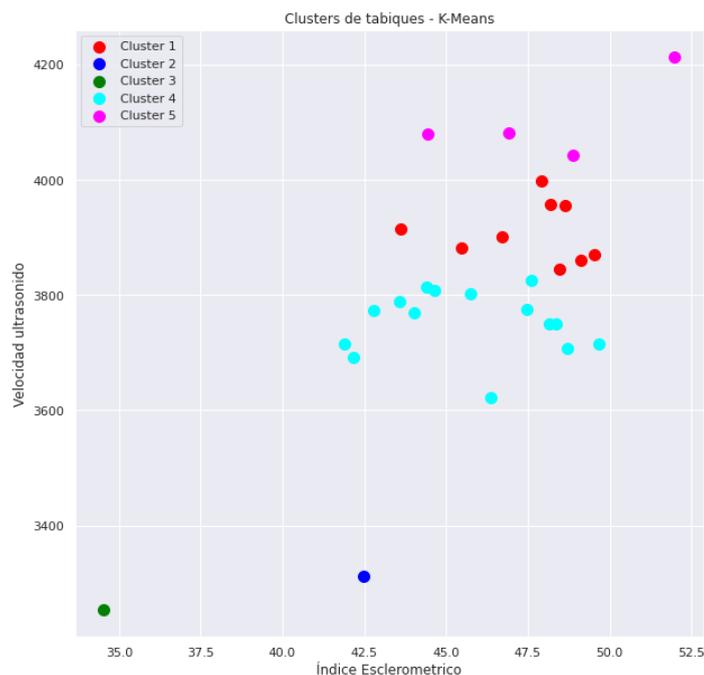


Figura 2 - Resumen de características de cada Cluster.

En esta primera etapa dichas propiedades fueron el promedio y el desvío estándar de las esclerometrías y ultrasonidos). En la figura 2 se pueden apreciar los 5 clusters detectados.

Clusters	Índice escler.		Velocidad		Clusters	Índice escler.	Velocidad	Rotura	Clusters			
	mean	std	mean	std						mean	std	
0	47.513161	2.263505	3909.260865	92.536837	0	47.513161	2.263505	3909.260865	92.536837	35.586481	5.170541	0
1	42.473958	1.349571	3311.134562	18.755613	1	42.473958	1.349571	3311.134562	18.755613	32.550000	4.879037	1
2	34.528274	3.353428	3254.599917	600.693286	2	34.528274	3.353428	3254.599917	600.693286	23.300000	0.707107	2
3	45.707336	1.807395	3753.753187	85.099661	3	45.707336	1.807395	3753.753187	85.099661	33.477778	4.118995	3
4	48.053729	2.072917	4103.870885	185.085852	4	48.053729	2.072917	4103.870885	185.085852	38.206667	4.107787	4

Figura 3 - Resumen de características de cluster iniciales (izquierda) y clusters actualizados (derecha).

Tal como lo indican los resultados, existen dos elementos estructurales que se diferencian del resto. Según lo establecido por el reglamento CIRSOC 201 del 2005, 14 de estos elementos estructurales deberían ser no conformes en función del criterio para la resistencia de los testigos, en donde se pide que cada valor individual de un elemento sea mayor o igual al 75% de la resistencia especificada y el promedio de los testigos de un mismo elemento sea mayor o igual al 85% de f'c. Dado que la resistencia de los testigos presentó desvíos atípicos, se decidió realizar nuevamente el proceso de Clusterización pero agregando a los 4 parámetros iniciales el promedio y el desvío de la resistencia a compresión obtenida para cada elemento estructural. Con esto se pretende hacer una comparación ponderada que permita obtener un valor promedio de la resistencia por cluster. Los resultados de esta nueva iteración pueden verse en la figura 5.

Tal como se puede apreciar en la figura 3, al agregar los valores de los testigos al proceso de Clusterización no se cambió la cantidad de los clusters ni los parámetros iniciales que los definían, por lo que el peso de las mediciones esclerométricas y de ultrasonido permitió encontrar comportamientos similares por sobre las incertidumbres que existían en las mediciones de resistencia a la compresión.

Muchos de los elementos que inicialmente se consideraron no conformes se agruparon mediante este método a elementos que eran conformes, gracias a comparar otros parámetros que se midieron de dichos elementos estructurales.

Con esto se pudo llegar a la conclusión de que los testigos extraídos no eran representativos del comportamiento estructural de los elementos y que al definir dicho comportamiento mediante otras

mediciones que pueden ser también relacionadas con las resistencias, los comportamientos difieren considerablemente de los que inicialmente se establecieron en función de las resistencias.

Otro detalle importante que cabe destacar, es que los elementos estructurales que presentaron los comportamientos más deficientes, ubicados en los clusters 3 y 2, en realidad poseían sectores defectuosos puntuales, tal como puede apreciarse en las figuras 4.

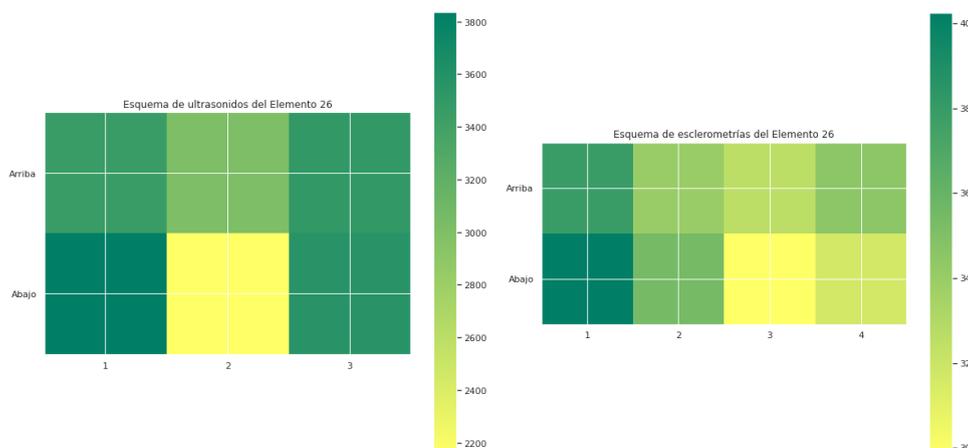


Figura 4 - Detalle de resultados del elemento 26 de ultrasonido (izquierda) y esclerometría (derecha).

Esto significa que a la hora de elegir el sector en donde realizar la extracción del testigo pueden obtenerse valores muy por encima de la media (o muy por debajo) si no se toman las precauciones para realizar un muestreo que realmente represente los diversos comportamientos que se pueden apreciar en los esquemas que detallan los resultados de los ensayos no destructivos en este elemento estructural en particular. Vale la aclaración de que cada elemento estructural analizado comprendía aproximadamente 8 metros cúbicos de hormigón, por lo que no se estaría hablando de diferentes pastones entre elementos estructurales.

## Conclusiones

Una vez establecida la atípica variabilidad de la resistencia obtenida por la rotura de los testigos, el algoritmo de Clusterización nos permitió disminuir las incertidumbres de los ensayos, agrupar elementos en cluster de comportamientos similares y obtener propiedades de resistencia para cada cluster como el promedio de las resistencias de cada elemento estructural, que según el teorema del límite central, nos dará un valor cercano a la verdadera media del conjunto. Ensayos posteriores con testigos de mayor diámetro confirmaron las conclusiones obtenidas por este estudio, ayudando a aceptar elementos que inicialmente fueron descartados.

Habiendo establecido los parámetros que definen a cada cluster, se podría continuar analizando el resto de la edificación únicamente con los ensayos no destructivos (siempre y cuando se estudien elementos compuestos por el mismo hormigón), y agrupar cada nuevo resultado según la clusterización establecida. Con esto se puede disminuir el número de testigos para analizar una estructura completa como así también prescindir de cualquier proceso de calibración anterior de los aparatos (esclerómetro y ultrasonido) que busque asociar los valores de las mediciones a una resistencia a la compresión del hormigón, es decir, se utilizarían directamente el rebote y la velocidad del pulso de onda para caracterizar la pieza y asociarla luego a la resistencia de los testigos.

## Referencias

### Proceedings:

[1] Bartlett F. M., MacGregor J. G., "Assessment of Concrete Strength in Existing Structures", Structural Engineering Report No. 198, (1994).

[2] Breyse D., "Non-destructive Assessment of concrete Structures: Reliability and Limits of Single and Combined Techniques", Tilm technical Committee 207-INR, RILEM (2012).

### Libros:

[1] Gerón A., "Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow", Second Edition, O'Reilly, (2019), 1150.

# PROTOTIPO DE CÁMARA DE CARBONATACIÓN ACELERADA

Diana Gonzalez<sup>1</sup>, Sebastián Peirano<sup>1</sup>, Anabela Guillarducci<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Centro de Investigación y Desarrollo para la Construcción y la Vivienda (CECOVI). FRSF, UTN.

Palabras Clave: carbonatación, cámara, condiciones controladas

## Introducción

Se denomina carbonatación al proceso químico en el que el dióxido de carbono ( $\text{CO}_{2(g)}$ ) reacciona con los iones de calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) para formar carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) [1]. En el proceso de carbonatación pueden diferenciarse dos etapas, por un lado, la difusión que consiste en el ingreso del  $\text{CO}_{2(g)}$  al interior de los poros del material y, por otro lado, la reacción que originan el  $\text{CaCO}_3$ . A continuación, se describen dichas etapas y se mencionan las variables por las que se ven influenciadas:

- **Difusión:** Es el mecanismo que transporta el  $\text{CO}_{2(g)}$  presente en el ambiente al interior de la matriz. Este proceso físico influye directamente en la velocidad de carbonatación y está condicionado por la distribución y tamaños de poros del material y la condición ambiente en la que se encuentra embebido el mismo (concentración de  $\text{CO}_{2(g)}$ , presión, humedad, temperatura) [2].
- **Reacción:** Pueden distinguirse tres fases que hacen posible la precipitación de carbonato de calcio. La primera fase es la disolución del  $\text{CO}_{2(g)}$  en el agua ( $\text{H}_2\text{O}_{(l)}$ ) contenida en poros, el  $\text{CO}_{2(g)}$  se combina con  $\text{H}_2\text{O}_{(l)}$  para formar ácido carbónico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ). El  $\text{H}_2\text{CO}_3$  se ioniza rápidamente a  $\text{H}^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ , haciendo que el pH caiga aproximadamente 3 unidades, típicamente de 11 a 8. Estas primeras reacciones que involucran al  $\text{CO}_{2(g)}$  se ven favorecidas cuando la humedad relativa (HR) se mantiene entre el 50% y el 70 %, ya que la presencia de agua en poros permite la disolución del  $\text{CO}_{2(g)}$  (el límite superior está vinculado con el proceso de difusión, ya que un contenido de humedad elevado afecta la permeabilidad del material al  $\text{CO}_{2(g)}$ ). Por otra parte, se produce la disolución de las fases cementicias, que libera iones de  $\text{Ca}^{2+}$ , por lo que la composición de la fase sólida puede dar una idea del grado de carbonatación que se puede lograr. Y, finalmente se presenta la nucleación de  $\text{CaCO}_3$  que se ve favorecida por temperaturas ligeramente elevadas [2] [3].

La alta alcalinidad del hormigón, que promueve la formación de una capa de óxidos pasivo sobre el acero, se ve modificada por el fenómeno de carbonatación. Cuando el frente de carbonatación alcanza el recubrimiento de protección de la armadura, esta comienza su proceso corrosivo, razón por lo que la carbonatación es considerada una patología del hormigón armado ( $\text{H}^\circ\text{A}^\circ$ ) [1].

A una concentración atmosférica natural de  $\text{CO}_{2(g)}$ , el proceso de carbonatación es lento, por lo que distintos autores han perseguido acelerar el proceso con la intención de evaluar la vida útil del  $\text{H}^\circ\text{A}^\circ$ , sin embargo, no existe un consenso sobre la metodología a aplicar. Se ha probado que el comportamiento de las estructuras en condiciones reales no guarda una relación lineal con el resultado obtenido en condiciones aceleradas, por lo que, los métodos acelerados pueden ser aplicados para evaluar desempeños comparativos [4].

En la actualidad existen distintas líneas de investigación que aplican la carbonatación acelerada como técnica para evaluar la capacidad de distintos materiales de ser empleados como sumidero de emisiones de  $\text{CO}_{2(g)}$ , originadas en procesos productivos, y mejorar de esta manera las propiedades químicas y físicas de los mismo, a través de la carbonatación, para que puedan ser reutilizados en diferentes aplicaciones en la industria de la construcción [5] [6]. A su vez, se ha abordado el empleo de la carbonatación acelerada como método de curado, ya que se ha probado que se logran mejoras en materiales de base cementicia [7].

Si bien en el mercado mundial existen equipos que permiten generar las condiciones para acelerar el proceso de carbonatación, el objetivo del presente trabajo es materializar una cámara que permita acelerar el proceso de carbonatación en probetas de una dimensión de 1x1x6 cm de pasta de cemento. Estimando que, si es posible observar el fenómeno en muestras de pasta de cements, será posible en un futuro escalar el prototipo para evaluar el desempeño en hormigones.

## Metodología

### Probetas

Para cada evaluación se moldearon 6 probetas de pasta de cemento de consistencia normal de 1x1x6 cm. Las mismas fueron curadas en cámara húmeda y a la edad de 28 días se secaron en estufa a 105 +/- 5 °C por 48 hs. Luego se estacionaron por un período mínimo de 7 días, a una temperatura de laboratorio de 21+/- 2°C a una HR del 65% +/- 5%, para luego ser ensayadas.

### Cámara de carbonatación acelerada

Se evaluó el desempeño de distintos prototipos de cámara que surgieron en función de las siguientes premisas:

- Permitir contener dióxido de carbono en estado gaseoso a una presión estable.
- Estar constituida de un material tal que permita desde el exterior observar su interior.
- Contar con válvulas que permitan el ingreso y la purga del CO<sub>2(g)</sub>.
- El control de la presión interna de la cámara se realiza a través de un manómetro.
- El rango de presión de trabajo va de 0 a 2 bar.

Para un desarrollo más claro del trabajo se asigna a cada prototipo un número (Figura 1). A continuación, se describe cada uno de ellos:

- Prototipo 1: Cámara de vidrio cilíndrica con cierre roscado y sistema complementario de compresión de tapa. Válvula de ingreso y purga de gas y manómetro incorporado.
- Prototipo 2: Desecador de vidrio con cierre por mordaza, junta de goma entre tapa y recipiente. Válvula de ingreso y purga de gas, materializada en vidrio, y manómetro incorporado.



Prototipo 1



Prototipo 2



Prototipo 3

Figura 1 – Prototipos evaluados

- Prototipo 3: Cámara de acrílico cilíndrica cuyo cierre se consigue a través de un sistema roscado que desplaza una placa acrílica que comprime uno pad de neopreno en el fondo y una junta de goma en la parte superior entre el cilindro y la placa. Válvula de ingreso y purga de gas y manómetro incorporado.

Las variables que se evaluaron fueron:

- Presión de ensayo: Para garantizar la máxima cantidad posible de moles de CO<sub>2(g)</sub>, dentro de las diferentes cámaras, se hace circular CO<sub>2(g)</sub> por unos minutos, de manera tal de generar un flujo de entrada y salida a través de las válvulas. Luego, la válvula de purga se cierra y se continúa incorporando gas hasta alcanzar la presión interna deseada. El rango de presión evaluado fue 1 a 0,5 bar.
- Hermeticidad: Dado que se busca acelerar la carbonatación al incrementar la presión, es necesario que el prototipo sea hermético, de manera tal de establecer como variable de ensayo una presión constante para poder alcanzar la repetibilidad y reproducibilidad. Para comprobar si el prototipo presenta fugas, se sumergió el mismo en agua y se evaluó visualmente la presencia o ausencia de burbujas.
- Temperatura y humedad: El proceso de carbonatación se ve favorecido en un entorno de humedad relativa de entre 50% y 70 %, por lo que se establece como humedad ambiente de ensayo 65% +/- 5% de HR, a una temperatura de 21+/- 2°C. Para generar las condiciones de humedad y temperatura se coloca un recipiente con un volumen conocido de agua en el interior de la cámara y se asegura que la temperatura del ambiente donde se ubique el prototipo sea la deseada. El control se realizó con un termohigrómetro digital.
- Tiempo de ensayo: Los periodos de exposición evaluados fueron: 8hs, 24hs, 48hs y 72hs.
- Espesores de carbonatación: Al rociar una solución de fenolftaleína al 1% en alcohol, en la sección transversal de las probetas, las zonas que presenten un pH por encima de 8 vira de color, evidenciando la zona carbonatada (zona no coloreada). Como prueba de control, antes de realizar la evaluación de carbonatación acelerada, se estableció el espesor de carbonatación de 3 probetas de las 6 que fueron moldeadas (e0: espesor inicial). Las 3 probetas restantes se emplean para las evaluaciones de desempeño de la cámara, determinando posteriormente el espesor final (ef:

espesor final). Dichos espesores se terminan tomando dos lecturas por cara, por probeta, con una lupa de 60X de aumento. Dado que, la cara de enrase presenta una superficie debilitada, debido a la suspensión de partículas finas, la misma se descarta.

La evaluación de la posibilidad de acelerar el proceso de carbonatación consistió en exponer las muestras a distintas combinaciones de presión y tiempo de exposición, dentro de los rangos definidos para cada variable. Y posteriormente determinar si existe un frente o no de avance.

## Resultados y Discusión

Al someter a los prototipos a condiciones de presión por encima de la presión atmosférica, hasta una presión de 2 bar, se observó que los prototipos 1 y 3 soportan dicha presión. Mientras que el prototipo 2, durante uno de los ciclos de evaluación de presión, se fisuró (se cree que alguna imperfección ofició como punto de concentración de tensiones, lo que desencadenó la rotura).

De las pruebas de hermeticidad se pudo establecer que los prototipos 1 y 3 cumplían con el requisito de estanquidad en las primeras horas. Sin embargo, a largo plazo, se pudo identificar que el prototipo 1 presentaba inconvenientes con su sistema de cierre a rosca, ya que con el tiempo presentaba pérdidas. A partir de estas primeras pruebas, se concluye que el prototipo 3 reúne los requisitos para ser empleado para el estudio de las condiciones de ensayo.

De las experiencias llevadas adelante solo dos presentaron un frente de carbonatación, para la combinación, 24hs de exposición, 0,84 bar de presión, 71% HR y 19°C de temperatura, se obtuvo un espesor promedio de carbonatación de 0,12 mm. Mientras que, para la combinación, 48hs de exposición, 0,88 bar de presión, 74,5 % HR y 19°C de temperatura, se alcanzó un espesor promedio de carbonatación de 0,1 mm. Tal como se indica, la condición de humedad presentó dificultades, ya que no pudo garantizarse los valores inicialmente establecidos. La HR se ubicó siempre por encima del 70%. Al trabajar con tiempos de ensayo relativamente cortos, la humedad relativa no puede ser equilibrada mediante el empleo de sales de potasio, razón por la cual se optó por aportar humedad en forma arbitraria a través de una cama de agua. Sin embargo, este aspecto debe ser abordado ya que, el proceso de carbonatación acelerada puede favorecerse si se logra disminuir la HR.

## Conclusión

A partir del presente trabajo, se puede concluir que:

- El proceso de carbonatación puede acelerarse en un corto periodo de tiempo si se analiza a una menor escala.
- Fue posible definir un prototipo de cámara que es capaz de tolerar una presión de trabajo de hasta 2 bar y mantener la estanquidad en forma prolongada en el tiempo.
- Se logró generar un frente de carbonatación, sin embargo, las variables del ensayo deben seguir siendo evaluadas.

## Referencias

- [1] Giovambattista, A., "Hormigón, materiales, vida útil y criterios de conformidad y su consideración en el reglamento CIRSOC 201-2005", 1a ed., Instituto Nacional de Tecnología Industrial – INTI, (2011), páginas 240-243.
- [2] Galán García, I., "Carbonatación del hormigón: combinación de CO<sub>2</sub> con las fases hidratadas del cemento y frente de cambio de pH", (Tesis de doctorado), Universidad Complutense de Madrid, Madrid, (2011), 202 páginas.
- [3] Fernández Bertos, M., Simons, S.J.R., Hills, C. D., Carey, P.J., "A review of accelerated carbonation technology in the treatment of cement-based materials and sequestration of CO<sub>2</sub>", Journal of Hazardous Materials, B112, (2004), páginas 193-205.
- [4] F. H., Traversa L. P., Ortega N. F., "Correlación entre carbonatación natural y acelerada del hormigón con distintos cementos", VII Congreso Internacional - 21ª Reunión Técnica de la AATH, (2016), páginas 333-340.
- [5] Fernández Bertos, M., Simons, S.J.R., Hills, C. D., Carey, P.J., "A review of accelerated carbonation technology in the treatment of cement-based materials and sequestration of CO<sub>2</sub>", Journal of Hazardous Materials, B112, (2004), páginas 193-205.
- [6] Pu, Y., Li, L., Wang, Q., Shi, X., Luan, C., Zang, G., Fu, L., Abomohra, A.E., "Accelerated carbonation technology for enhanced treatment of recycled concrete aggregates: A state-of-the-art review", Construction and Building Materials, 282, (2021), 122671.
- [7] Wang, J., Xu, H., Xu, D., Du, P., Zhou, Z., Yuan, L., Cheng, X., "Accelerated carbonation of hardened cement pastes: Influence of porosity", Construction and Building Materials, 225, (2019), páginas 159-169.

# ANÁLISIS INSTRUMENTAL DE PROCESOS DE DETERIORO DE HORMIGONES ECOEFICIENTES

Lautaro Santillán<sup>1</sup>, Silvana Sommadossi<sup>1</sup>, Yury Villagrán<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> IITCI, CONICET-UNCo, Neuquén, Argentina

<sup>2</sup> LEMIT, CONICET, La Plata, Argentina

<sup>3</sup> Magnel-Vandepitte Lab. for Structural Engineering and Building Materials, Ghent Univ., Zwijnaarde, Bélgica

Palabras Clave: análisis instrumental, microestructura, durabilidad, agregados reciclados, vida útil, cementos de bajo carbono.

## INTRODUCCIÓN

En este resumen extendido se presentan los lineamientos generales abordados en el plan de investigación (2021-2022) del autor principal, bajo la dirección de los coautores del presente trabajo. Este plan de trabajo, surge como una continuidad y profundización de las investigaciones durante el doctorado (2015-2020) del mismo autor [1]. La utilización de mezclas cementíceas conllevan un impacto ambiental asociado, producto del consumo de materias primas y energía necesarias para tal fin, como así también impactos asociados a las etapas posteriores en el ciclo de vida de las mismas. La utilización de materiales reciclados de la misma industria, como así también el reemplazo de cemento por materiales de menor impacto ambiental, y la utilización de materiales regionales, significan prácticas que aumentan considerablemente la eco-eficiencia de los materiales [2].

Por otro lado, el desarrollo de la tecnología del hormigón ha permitido mejorar las prestaciones durables de los hormigones, lo que constituye per se una práctica eco-eficiente. Una mayor durabilidad de las estructuras, según las condiciones de exposición, significa una mayor vida útil de las construcciones, reduciendo sus costos de mantenimiento, reparación y demolición, así como extendiendo el tiempo transcurrido para su reemplazo por una nueva estructura. El estudio microestructural de los fenómenos vinculados a la durabilidad permite comprender cabalmente la fenomenología y en base a eso mejorar la tecnología aplicada a los materiales y su desempeño.

El objetivo principal del plan de trabajo es el de aplicar y mejorar técnicas de análisis instrumental, en el estudio de fenómenos vinculados a la durabilidad de mezclas cementíceas (principalmente en relación a la corrosión y el ataque por sulfatos), poniendo especial énfasis en mezclas de un grado elevado de eco-eficiencia. Para tal fin se propone estudiar mezclas en las que se utilicen agregados reciclados y en las que se reduzca el contenido relativo de cemento utilizando materias primas de carácter estratégico regional.

## TECNICAS DE ANÁLISIS

El estudio de los fenómenos microestructurales y la vinculación de los mismos con efectos macroscópicos o ingenieriles es una práctica extendida en el campo de la tecnología del cemento y del hormigón [3]. La mayoría de las patologías que se pueden encontrar en una estructura de hormigón armado tienen un fundamento físico-químico que se manifiesta en la microestructura de los materiales. Se detallan a continuación las metodologías a abordar.

### Microscopía electrónica de barrido y complementos (SEM/BSE/EDS)

A través del análisis de imágenes de microscopía electrónica de barrido con detector de electrones secundarios y retrodispersados (SEM/SE-BSE), se pueden cuantificar fases en diferentes regiones de la pasta de cemento (por contraste de fases, morfología). Si el equipo incluye EDS (Energy-Dispersive X-ray spectroscopy) también se pueden cuantificar fases a partir de las composiciones químicas evaluadas en las muestras. El análisis de imágenes gestadas por este instrumental también permite investigar la genealogía de eventual microfisuración y productos asociados a la misma. En las mezclas con agregados reciclados se propone poner énfasis en el estudio de la interfase entre el mortero adherido de las partículas y la nueva pasta de cemento. En el estudio de adiciones minerales se propone estudiar la determinación del grado de hidratación de las mismas y vincularlo con las propiedades macroscópicas observadas. La combinación de los efectos del agregado reciclado, los cementos adicionados y los fenómenos de deterioro es una temática poco abordada en la literatura disponible.

### Espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS)

La espectroscopia de impedancia electroquímica (electrochemical impedance spectroscopy, EIS) permite conocer las propiedades conductivas de una muestra, las cuales tienen vinculación directa con el desempeño de las mezclas cementíceas frente a fenómenos de corrosión por cloruros (celda electroquímica) [4] y permitiría también conocer la resistividad eléctrica de diferentes mezclas, evaluando el impacto de las diferentes adiciones minerales, e incluso de agregados reciclados. La evaluación de muestras en el tiempo permite conocer como varían las propiedades electroquímicas de las muestras al ser sometidas a diferentes acciones de deterioro. La vinculación de este estudio con otros permitiría por ejemplo, vincular el estado de fisuración con las propiedades electroquímicas de la muestra, o el estado de carbonatación.

### **Difracción de rayos X**

La técnica de difracción de rayos X permite no solo la detección de fases minerales en diferentes muestras sino que permite también su cuantificación, mediante la utilización del método de Rietveld [5]. Esta técnica requiere de la utilización de protocolos de análisis que se ajusten específicamente a las las fases a cuantificar, por lo que este trabajo implica el desarrollo y perfeccionamiento de esta técnicas para productos de reacción en base a experiencias de estudios previos [6]. Todos los fenómenos vinculados a la durabilidad de las mezclas, que impliquen variaciones en la composición mineralógica de las mezclas, pueden ser estudiadas tomando muestras en distintos tiempos para conocer la evolución de los mismos según las condiciones de exposición y las características de la muestra. La cuantificación de fases puede ser vinculada con los estudios de fisuración, para estudiar, por ejemplo, la relación entre formación de productos expansivos y procesos físicos de deterioro en la escala microestructural.

### **Termogravimetría**

Las técnicas microtermogravimétricas permiten también cuantificar con relativa precisión la composición mineralógica de las muestras, como así también los contenidos de agua libre y adsorbida por las muestras en el momento del estudio. Al igual que las técnicas anteriormente descritas para cuantificación mineral, la vinculación de estos estudios permite calibrar los protocolos para obtener resultados más confiables, a la vez que permiten tener un mayor grado de comprensión de los fenómenos físico-químicos que intervienen en estos procesos.

## **MATERIALES Y MEZCLAS**

La utilización de materiales con vida útil extendida constituye en sí mismo una práctica eco-eficiente en la industria del hormigón. La preocupación global por la emisión de gases efecto invernadero y la explotación de recursos naturales obliga a la industria a mejorar los aspectos ambientales tanto de la producción como así también el periodo útil de los edificios y su etapa de finalización (residuo, reutilización).

### **Agregados reciclados**

La utilización de agregados reciclados es actualmente una técnica en expansión sobre la cual se han abocado numerosas investigaciones y líneas de trabajo [7,8]. La utilización de los mismos reduce: (i) la cantidad de residuos a depositar, (ii) la explotación de agregados naturales no renovables y (iii) significativamente los costos de transporte de los agregados. La tesis doctoral del autor [1] se inscribe en una línea de investigación que lleva adelante el Área de Tecnología del Hormigón del LEMIT hace más de 20 años, cuyos avances en la temática acompañan el estado del arte actual del campo internacional.

### **Adiciones minerales/materiales regionales**

La utilización de adiciones minerales (o materiales cementíceos suplementarios) es una práctica extendida en la industria del cemento y del hormigón. La disminución del factor clínker en las mezclas de hormigón aumenta la eco-eficiencia del material dado que es el clínker el componente del hormigón con mayor carga relativa de energía y emisión de gases efecto invernadero. Existe un extenso desarrollo sobre las técnicas de caracterización y aplicación de diferentes materiales con menor carga ambiental. Si además se utilizan para tal fin, materiales próximos en términos territoriales, del destino del hormigón, se reducen significativamente los costos asociados al transporte del mismo. Resulta de especial interés para este plan de trabajo, la evaluación de puzolanas naturales, cenizas volcánicas o arcillas con cierto grado de calcinación que pudieran existir en la región norpatagónica del país (cuencas de los ríos Limay, Neuquén y Río Negro, región andina de Río Negro y Neuquén).

## **PROCESOS DE DETERIORO**

Las mezclas a estudiar serán sometidas a diferentes tipos e intensidades de exposición. A su vez, para los diversos ataques estudiados se utilizarán las técnicas de evaluación microestructural con mayor aplicabilidad para cada caso.

### **Corrosión por cloruros**

La corrosión de armaduras de hormigón armado por ingreso de cloruros constituye uno de las problemáticas más amplias respecto a la durabilidad del material. La caracterización de las mezclas cementíceas, como así también de los materiales constituyentes se encuentran normalizados y estandarizados en la mayoría de los países. La caracterización de nuevos materiales permite ampliar el banco de parámetros utilizables por ejemplo en métodos de diseño predictivos por vida útil, incorporando materiales de carácter estratégico regional en las técnicas de diseño. Por otro lado, resulta de interés el estudio de la relación entre los procesos de fisuración y los cambios de las propiedades electroquímicas de las muestras, como así también, la relación entre la cantidad de herrumbre formada en la superficie de la armadura y el punto crítico de tensiones internas de fisuración. El plan contempla la elaboración de muestras con distintos contenidos de adiciones minerales y agregados reciclados expuestos al ingreso de cloruros.

### **Corrosión por carbonatación**

La segunda causa de corrosión de armaduras en estructuras de hormigón armado se atribuye a la carbonatación del espesor de recubrimiento. Existen numerosos estudios sobre las variaciones mineralógicas que se producen por la carbonatación de las armaduras (transformación de portlandita y C-S-H en carbonatos de calcio). Resulta de especial interés caracterizar el efecto del uso de agregados reciclados en la velocidad de carbonatación de mezclas cementíceas, prestando especial atención al aporte de reserva alcalina que otorga el mortero adherido en dichos agregados. También se propone estudiar el efecto de diversas adiciones minerales a la resistencia a la carbonatación por parte de la pasta de cemento. Las técnicas de cuantificación de fases minerales mencionadas, como la análisis termogravimétrico, DRX+Rietveld y el mapeo con SEM permitirían calibrar modelo predictivos para el diseño por vida útil de mezclas eco-eficientes, así como la capacidad de recaptura de CO<sub>2</sub> de las mezclas.

### **Ataque por sulfatos**

El ataque por sulfato y sus ataques asociados constituyen un ataque de tipo físico-químico. Existe evidencia de suelos salinos en diversos puntos del país incluyendo la región norpatagónica [9]. Por otro lado, el autor del trabajo realizó para su trabajo de tesis doctorales numerosos estudios experimentales de los cuales se pueden extraer una gran cantidad de muestras [1] para un análisis instrumental. Interesa especialmente evaluar la interacción de diferentes contenidos de agregados reciclados, de diferente calidad química (contenido de C3A en su pasta de cemento). El análisis de la fisuración y las variaciones macroscópicas también pueden ser largamente vinculados con análisis instrumentales de este tipo [10].

### **Referencias**

- [1] Santillán, L.R. (2020) Durabilidad del hormigón reciclado frente al ataque por sulfatos.
- [2] Abbas, A., Fathifazi, G., Isgor, O.B., Razaqpur, A.G., Fournier, B., and Foo, S. (2006) Environmental benefits of green concrete. *EIC Clim. Chang. Technol. Conf. 10-12 May 2006, Ottawa, Canada*.
- [3] Scrivener, K., Snellings, R., and Lothenbach, B. (2018) *A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials*.
- [4] Villagrán-Zaccardi, Y.A. (2012) Estimaciones del ingreso de cloruro en hormigón y de la despasivación localizada de armaduras. Tesis doctoral, Universidad Nacional de La Plata
- [5] Torre, A.G. De, Cabeza, A., Losilla, E.R., and Aranda, M.A.G. (2006) Quantitative phase analysis of ordinary Portland cements using synchrotron radiation powder diffraction. *Eur. Powder Diffr. Conf. EPDIC 9*, 23, 587–592.
- [6] Santillán, L.R., Villagrán Zaccardi, Y.A., Alderete, N.M., Zega, C.J., and De Belie, N. (2016) Cuantificación mineralógica de cemento mediante análisis Rietveld de DRX. Análisis cruzado de difractogramas experimentales y programas de refinamiento. *VII Congr. Int. la AATH*, 529–536.
- [7] González-Fontebona, B., Seara-Paz, S., De Brito, J., González-Taboada, I., Martínez-Abella, F., and Vasco-Silva, R. (2018) Recycled concrete with coarse recycled aggregate. An overview and analysis. *Mater. Constr.*, 68 (330), 1–29.
- [8] Zega, C.J., Santillán, L.R., Sosa, M.E., and Villagrán Zaccardi, Y.A. (2020) Durable Performance of Recycled Aggregate Concrete in Aggressive Environments. *J. Mater. Civ. Eng.*, 32 (7), 1–10.
- [9] Irassar, E.F., Di Maio, A., and Batic, O.R. (2010) TÓPICO 1 – Patologías de las construcciones Deterioro del hormigón por cristalización de sales. *Cinpar*.
- [10] Schmidt, T., Lothenbach, B., Romer, M., Neuenschwander, J., and Scrivener, K. (2009) Physical and microstructural aspects of sulfate attack on ordinary and limestone blended Portland cements. *Cem. Concr. Res.*, 39 (12), 1111–1121.

## **MEZCLAS CON MCS Y ADITIVOS**

# CARACTERIZACIÓN EN ESTADO FRESCO DE HORMIGONES AUTOCOMPACTANTES COLOREADOS CON ADICIÓN DE DESECHO DE PERLITA

Verónica Artigas<sup>1</sup>, María Josefina Positieri<sup>2</sup>, Ángel Oshiro<sup>2</sup>, María Virginia Quintana<sup>3</sup>

*1 CINTEMAC, UTN-FRC/ Universidad Nacional de Salta - Argentina*

*2 CINTEMAC, UTN-FRC – Argentina*

*3 INIQUI-CONICET, Universidad Nacional de Salta - Argentina*

Palabras Clave: hormigón, autocompactante, coloreado, adición, perlita

## Introducción

La industria de elaboración de hormigón es responsable de un importante consumo de recursos naturales y de una significativa generación de contaminación ambiental, principalmente debido a la producción de clinker de cemento Portland que requiere un alto consumo de materias primas y de energía, y genera una importante emisión de CO<sub>2</sub>.

La creciente demanda de cemento en los últimos años ha llevado a un aumento en su producción, que se estima en más de 4 millones de toneladas métricas a nivel mundial [1]. De acuerdo con [2], la fabricación de cemento aporta alrededor del 7% de las emisiones de CO<sub>2</sub> al medio ambiente generadas por el hombre, lo cual demuestra la magnitud de la influencia que tiene la producción de cemento en el aspecto medioambiental.

En la actualidad el cuidado del medio ambiente y la reducción de costos de fabricación son importantes temas de discusión a nivel de las industrias. Es por ello que la industria del cemento ha presentado numerosos cambios, entre ellos, impulsa el uso de materiales naturales, residuales o subproductos industriales en su proceso de fabricación [3].

Este trabajo contribuye al diseño de hormigones autocompactantes coloreados (HAC-C) que resulten más amigables con el medio ambiente, disminuyendo el consumo de cemento a nivel local con el reemplazo de parte del mismo por un material de desecho, para lo cual se analizó el comportamiento en estado fresco de HAC-C con incorporación de polvo de perlita natural (PPN) como adición.

La perlita es una roca de origen volcánico, muy utilizada en diversas industrias, debido a su composición mineralógica (mayormente sílice y alúmina), potencialmente puzolánica; sin embargo, esta característica de la perlita se menciona en un número limitado de documentos técnicos [4,5,6]. En la zona de La Puna en Salta (Argentina) se sitúan numerosos yacimientos de perlita, en los cuales se llevan a cabo procesos industriales de extracción y expansión de este material que generan desechos. Este polvo de descarte, el PPN, puede ser aprovechado con diversos fines, entre los cuales se encuentra la elaboración de hormigones con adición de este material como uno de sus componentes.

## Metodología

Para la elaboración de los hormigones se utilizó cemento Portland CPC 30 (densidad 3,20 gr/cm<sup>3</sup>), pigmentos inorgánicos a base óxido de hierro de color rojo (densidad 4,90 gr/cm<sup>3</sup>) y amarillo (densidad 4,00 gr/cm<sup>3</sup>), polvo de perlita natural (densidad 2,64 gr/cm<sup>3</sup>, superficie específica BET 5,28 m<sup>2</sup>/gr) y aditivo hiperplastificante de altas prestaciones para hormigones a base de policarboxilato (residuo sólido 35%).

Se elaboró un hormigón patrón de cada color (gris, amarillo y rojo) y hormigones con adiciones variables de PPN (10, 20 y 30% en reemplazo del cemento), contabilizando un total de 12 familias de hormigones. Las dosificaciones se presentan en la Tabla 1.

En la nomenclatura la letra “G” hace referencia a los hormigones grises (sin pigmento), la “A” a los amarillos y la “R” a los rojos, mientras que el número (0, 10, 20 y 30) indica el porcentaje en relación al peso del cemento contenido en el hormigón patrón que es reemplazado por PPN.

La relación agua/material cementante se estableció en 0,45. La dosis de pigmento se mantuvo fija en 6% para todos los HAC-C, de acuerdo con [7] este valor corresponde a la dosis de saturación, es decir que un aumento en la cantidad de pigmento a partir de ella no supone una diferencia importante en el color final obtenido. El aditivo hiperplastificante se incorpora como porcentaje del peso del material cementante y su

dosis será la necesaria para mantener constante la fluidez requerida, que se fijó en  $70 \pm 2$  cm de diámetro de extendido medido por el Slump-flow test.

Tabla 1: Dosificación de los hormigones (kg de material/m<sup>3</sup> de hormigón).

Hormigón	Cemento	Agua	Perlita	Pigmento	Ag. Fino	Ag. Grueso
G0	445		-	-		
G10	400		45	-		
G20	355		90	-		
G30	310		135	-		
A0	445		-	27		
A10	400	200	45	27	890	851
A20	355		90	27		
A30	310		135	27		
R0	445		-	27		
R10	400		45	27		
R20	355		90	27		
R30	310		135	27		

La finalidad de los ensayos en estado fresco se detalla a continuación:

- Slump-flow test: Se utiliza para evaluar el flujo libre horizontal de HAC en ausencia de obstrucciones, además da cierta idea de la resistencia a la segregación del hormigón. Se mide el diámetro final ( $D_F$ ) alcanzado, el tiempo  $T_{50}$  y el índice de estabilidad visual (IEV).

- J-Ring: Este método se utiliza para determinar la capacidad de paso del HAC. Se mide el diámetro final ( $D_J$ ) y se lo compara con  $D_F$ .

- V-funnel: Es un ensayo que se utiliza para determinar la capacidad de llenado del hormigón. Se mide el tiempo  $T_v$  que tarda el hormigón en pasar a través del embudo.

- L-box: Este método evalúa el flujo del hormigón y también la medida en que está sujeto a bloqueo. Se mide la altura del hormigón en la sección al comienzo y al final de la caja ( $H_2$  y  $H_1$ ).

## Resultados

Las dosis de aditivo hiperfluidificante necesarias para alcanzar el diámetro de extendido estipulado en cada caso se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2: Dosis de aditivo hiperfluidificante (en % del peso del material cementante)

Hormigón	G0	G10	G20	G30	A0	A10	A20	A30	R0	R10	R20	R30
% aditivo	0,60	0,65	0,65	0,70	0,70	0,70	0,72	0,75	0,65	0,65	0,65	0,70

En la Figura 1 se presentan los resultados de los ensayos de Slump-flow test y J-Ring. El índice de estabilidad visual fue de 0 en los HAC con hasta 10% de PPN y de 1 en los HAC con 20 y 30% de perlita.

En la Figura 2 se muestran los resultados del V-funnel. La relación entre las alturas  $H_2/H_1$  del L-box se mantuvieron entre 0,8 y 0,9 para todos los HAC.

De acuerdo con [8] todos los hormigones elaborados pertenecen a la categoría SF2

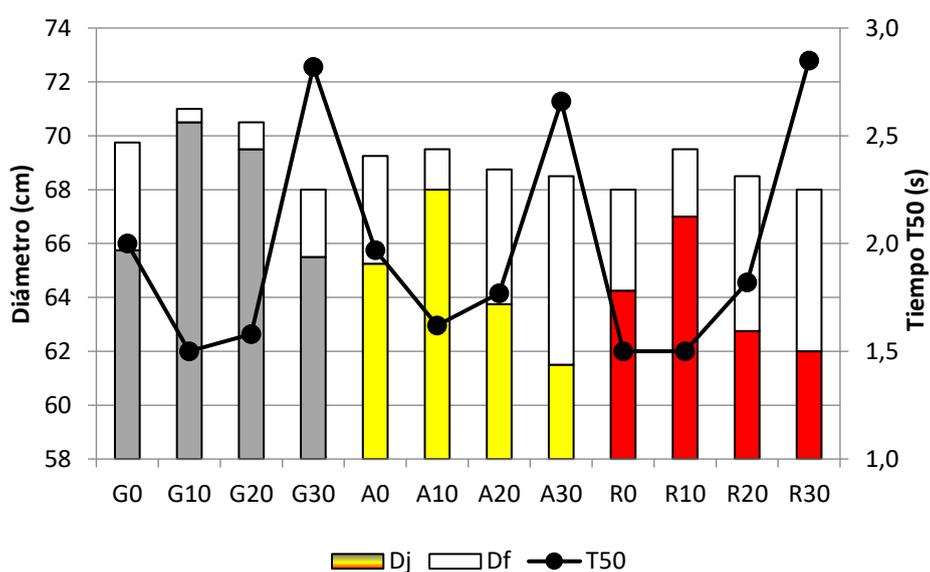


Figura 1 – Resultados de los ensayos en estado fresco de los HAC: Slump-flow test ( $D_F$  y  $T_{50}$ ) y J-Ring ( $D_J$ )

(Slump-flow test entre 66 y 75 cm), los HAC y HAC-C con hasta 20% de PPN corresponden a la clase de viscosidad VS1/VF1 ( $T_{50} \leq 2$  s,  $T_V \leq 8$  s), mientras que los G30, A30 y R30 si bien tienen un  $T_V$  menor a 8 s su  $T_{50}$  supera los 2 s. La clase de acuerdo a la habilidad de paso es PA2 para todos los hormigones (la relación  $H_2/H_1$  dada por el L-box con tres barras es mayor o igual a 0,8).

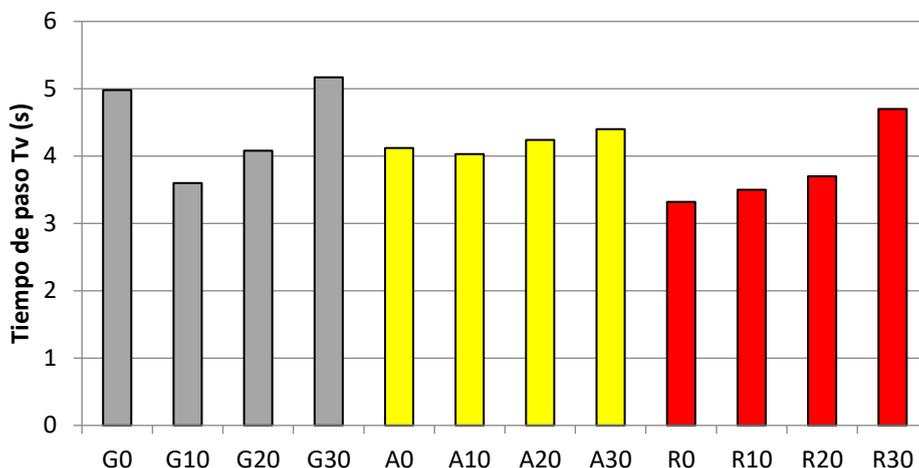


Figura 2 – Resultados del ensayo en estado fresco de los HAC: V-funnel

## Conclusiones

La incorporación de PPN en el HAC incrementa la dosis de aditivo hiperfluidificante requerida para alcanzar una determinada fluidez, lo que se debe a la mayor absorción de agua por parte de este material pulverulento. La adición de pigmentos causa el mismo efecto en el HAC, siendo más evidente en el caso del color amarillo, donde la forma de aguja de las partículas de este pigmento aumenta la demanda de agua de la mezcla. En todos los casos la inspección visual fue satisfactoria, no denotando indicios de segregación.

Con el aumento de PPN en la mezcla disminuye la capacidad de paso del hormigón, evidenciada en mayores diferencias entre  $D_F$  y  $D_J$ . Sin embargo, los hormigones grises con hasta 30% de PPN y los coloreados con hasta 20% cumplen con el límite de diferencia entre diámetros considerado aceptable para HAC.

La viscosidad del hormigón es levemente menor al patrón para los HAC con 10 y 20% de PPN, pero es superior en los hormigones con 30% de reemplazo donde se tienen mayores tiempos de  $T_{50}$  y  $T_V$ .

Este trabajo permite vislumbrar las aptitudes del material de descarte PPN para ser incorporado en la elaboración de HAC y HAC-C, resultando factible un reemplazo de hasta 20% del cemento sin alterar negativamente las propiedades en estado fresco del hormigón y sin demandar una dosis de aditivo hiperfluidificante significativamente mayor. Se encuentra en proceso la realización de ensayos en estado endurecido para determinar la influencia del PPN en las propiedades mecánicas y de durabilidad del hormigón. El aporte al desarrollo de conocimientos que busquen la utilización de materiales considerados desechos resulta beneficioso en términos de sustentabilidad.

## Referencias

- [1] Nidheesh, P. V. y Suresh Kumar, M., "An overview of environmental sustainability in cement and steel production", Journal of Cleaner Production, 231, (2019), 856-871.
- [2] Pal A., "Developing Low-Clinker Ternary Blends for Indian Cement Industry", Journal of The Institution of Engineers (India): Series A, 99, (2018), 433-447.
- [3] Fernandez, L. I. y Trezza, M. A., "Estudio de la aptitud del loess pampeano como adición activa al cemento Portland", Revista de la Construcción, 6,1, (2007), 4-12.
- [4] Erdem, T. K., Meral, Ç., Tokyay, M. y Erdogan, T. Y., "Use of perlite as a pozzolanic addition in producing blended cements", Cement & Concrete Composites, 29, (2007), 13-21.
- [5] Abdulkader, E. M. y Salem, G. N., "Utilization of industrial waste perlite powder in self-compacting concrete", Journal of Cleaner Production, 156, (2017), 507-517.
- [6] Pachta, V., Papadopoulos, F. y Stefanidou, M., "Development and testing of grouts based on perlite by-products and lim", Construction and Building Materials, 207, (2019), 338-344.
- [7] Positieri, M. J., "Propiedades físico-mecánicas y durabilidad del hormigón coloreado", Tesis doctoral, UTN-FRC, Córdoba, (2005).
- [8] Especificaciones de EFNARC, "The European Guidelines for Self-Compacting Concrete. Specification, Production and Use", (2006).

# PRIMEROS AVANCES EN LA ELABORACIÓN DE AGREGADOS POROSOS A PARTIR DE LUTITA, CALIZA Y DOLOMITA

Cecilia Martinefsky<sup>1</sup>, Anabella Mocciaro<sup>2</sup>, Alejandra Tironi<sup>1</sup>, Edgardo Fabián Irassar<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería, CIFICEN (CONICET, CICPBA, UNCPBA), Olavarría, Buenos Aires, Argentina, 2284-451055

<sup>2</sup> Centro de Tecnología de Recursos Minerales y Cerámica (CETMIC-CONICET-CICPBA), Con. Centenario y 506, Manuel B. Gonet, Argentina, 2499-2599

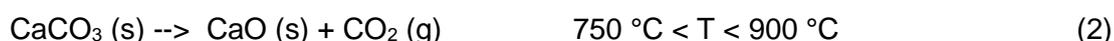
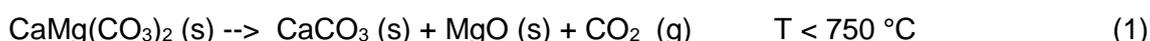
Palabras Clave: lutita, carbonatos, tratamiento térmico, agregados porosos.

## Introducción

Los agregados porosos según sus características fisicoquímicas, densidad y resistencia pueden ser utilizados para aislamiento térmico y acústico, como agregado liviano en elementos estructurales prefabricados y hormigón, en aplicaciones geotécnicas, jardinería e hidroponía. Las materias primas que contienen minerales arcillosos son actualmente las más adecuadas para la producción de agregados porosos livianos, debido a su disponibilidad y sus características [1].

En la región de Olavarría, centro de la provincia de Buenos Aires, se cuenta con un amplio stock de lutitas, obtenido como destape de las canteras de caliza. Las lutitas de la región presentan una composición mineralógica predominante de cuarzo y minerales arcillosos: illita y clorita [2].

Para lograr la formación de una estructura de poros óptima en el agregado, la materia prima debe contener compuestos que liberen gases durante la sinterización y desarrollen una fase de transición vítrea de viscosidad adecuada, simultánea con la formación de gases, para causar la expansión debido a que los gases liberados quedan contenidos dentro de la superficie exterior sinterizada [3]. La producción de agregados porosos a partir de materia prima que contiene minerales arcillosos e impurezas como óxido de hierro, materia orgánica y carbonatos, presenta diversas fuentes de generación de gas a altas temperaturas: la liberación de moléculas de agua entre láminas y deshidroxilación de los minerales arcillosos, la disociación o reducción de óxidos férricos, la combustión de materia orgánica, y la descomposición térmica de carbonatos [1]. El contenido de SiO<sub>2</sub> y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> adecuado asegura la formación de una capa externa sinterizada. La illita se supone más eficaz que la caolinita para atrapar el CO<sub>2</sub> producido durante la descomposición de los carbonatos [4]. Otras materias primas minerales de la región, como la caliza y la dolomita, son potenciales componentes a incorporar para optimizar la porosidad de los agregados elaborados y sus propiedades físicas. La descomposición de la dolomita (CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>) ocurre en dos etapas (Ec. 1 y 2), mientras que la de la caliza (CaCO<sub>3</sub>) en una sola etapa (Ec. 2). Estas reacciones endotérmicas, a considerablemente alta temperatura, contribuyen al desarrollo de los canales porosos microestructurales [5].



Las características de la materia prima y los parámetros de producción determinan la estructura de poros obtenida, factor importante para determinar la densidad del agregado, la absorción de agua y la resistencia. El objetivo de este trabajo es evaluar la aptitud de una lutita de la provincia de Buenos Aires como materia prima para la producción de agregados porosos y el efecto de la adición de caliza y dolomita en la formación de poros.

## Metodología

Se caracterizó una lutita (L), una caliza (C) y una dolomita (D) procedentes de la provincia de Buenos Aires. Se determinó la composición química en laboratorio externo, se identificaron los minerales presentes mediante difracción de rayos X (DRX) en un equipo Philips PW-3710 con radiación Cu-K $\alpha$  ( $\lambda = 0,154$ ) a 40 kV y 35 mA y espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) utilizando un espectrómetro Nicolet Magna 500, se realizó análisis térmico diferencial y térmico gravimétrico (ATD-TG) con un equipo Rigaku Evo plus II Japón.

Se elaboraron tres pastas: una de lutita y agua (L), y dos con 10% de reemplazo de lutita por caliza (10C) y dolomita (10D). Se determinó in-situ el efecto de la temperatura mediante imágenes en microscopio

óptico de calentamiento L74 Linseis con una rampa de 20°C/min hasta 1250°C, la temperatura se registró con una termocupla Pt – Rh tipo S. Se moldearon esferas de aproximadamente 10 mm de diámetro y se realizó un tratamiento térmico a 1140 °C durante 15 minutos. Finalmente se analizó el cambio de fases producido mediante FTIR y se observó en lupa con cámara Leica DMC4500, un corte de los agregados para obtener información cualitativa de la estructura de poros, su distribución y la presencia de fase sinterizada.

## Resultados y análisis de resultados

La Figura 1 muestra los difractogramas de las materias primas. Se identificaron en L los minerales arcillosos illita (I) y clorita (Ch), cuarzo (Q), calcita (Cc) y albita (F, feldespato). Los carbonatos C y D tienen como mineral principal calcita y dolomita (Dol) respectivamente. Mediante el análisis FTIR se confirmó la presencia de estos minerales.

El análisis térmico diferencial permitió determinar la liberación de 39,7 g CO<sub>2</sub> cada 100 g de C a 860°C, y la liberación de CO<sub>2</sub> en dos etapas para D: 23,5 g de CO<sub>2</sub> cada 100g de D a 770°C y 20,8 g de CO<sub>2</sub> cada 100g de D a 920°C, confirmando la generación de gases a altas temperaturas que contribuirían al desarrollo de la estructura porosa.

El proceso de sinterizado y los cambios de volumen de las tres pastas observados en el microscopio óptico de calentamiento indicaron las siguientes temperaturas características [6]: el rango de sinterización para L es de 1110 a 1170°C, la deformación se inicia a 1180°C y finalmente, a la máxima temperatura analizada 1250°C, la deformación y expansión continúan. Para 10C y 10D, los valores coinciden con un rango de sinterización de 1120 a 1180°C, la deformación se inicia a 1190°C y a 1250°C ambos se encuentran en el punto de esfericidad, donde la relación ancho/altura es cercana a 1. En base al rango de temperatura de sinterización determinado se selecciona 1140°C para el tratamiento térmico de las esferas. Una selección de las imágenes tomadas en el microscopio óptico para las pastas se muestra en la Figura 2.

De los óxidos fundentes, el MgO puede favorecer la reducción de la temperatura de sinterización [7]. En 10D, donde se incorpora MgO a partir del reemplazo de un 10% de lutita por dolomita, no se compensa la reducción de otros óxidos fundentes presentes en la lutita (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O), por lo que no se observó una disminución de la temperatura inicial de sinterización. Con el reemplazo de lutita por ambos carbonatos la temperatura mínima de sinterización aumenta.

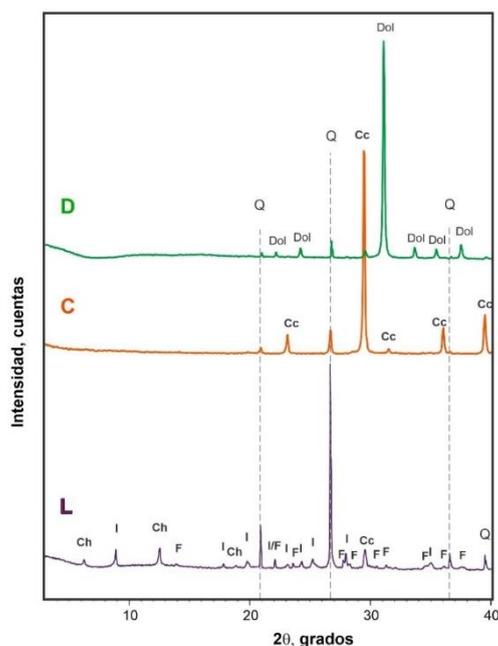


Figura 1 - Caracterización por DRX (I = illita, Ch = clorita, Q = cuarzo, Cc = calcita, F = feldespato (albita), Dol = dolomita)

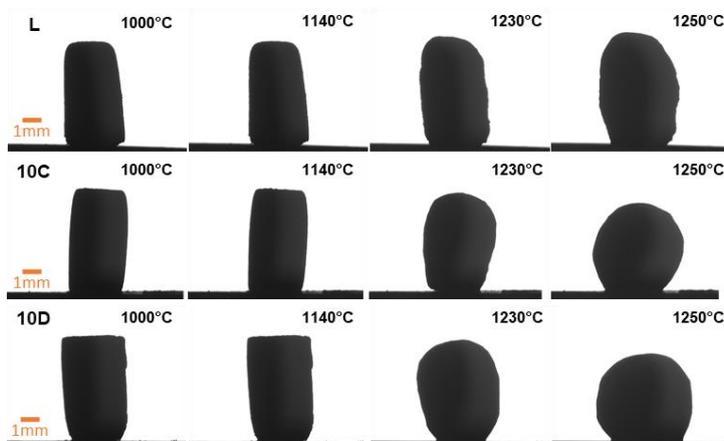


Figura 2 - Selección de imágenes del microscopio óptico de calentamiento a 1000, 1140, 1230 y 1250°C.

A partir del análisis de los espectros FTIR realizados a los agregados, se corrobora la obtención de fase sinterizada (bandas anchas en la región Si-O y Si-O-Al) y la liberación de gases: agua (ausencia de las bandas correspondientes a los grupos OH y al agua) y CO<sub>2</sub> (ausencia de las bandas asignadas a la dolomita y calcita).

La Figura 3 muestra las imágenes en lupa del corte de los agregados porosos. En el agregado L se observan poros grandes, deformes y con distribución de tamaño no uniforme, lo que indicaría que se produjo la coalescencia de parte de los poros pequeños para formar poros grandes. Los agregados 10C y 10D presentan poros más pequeños y uniformes, y se observa una mayor sinterización en la superficie exterior (más vitrificada).

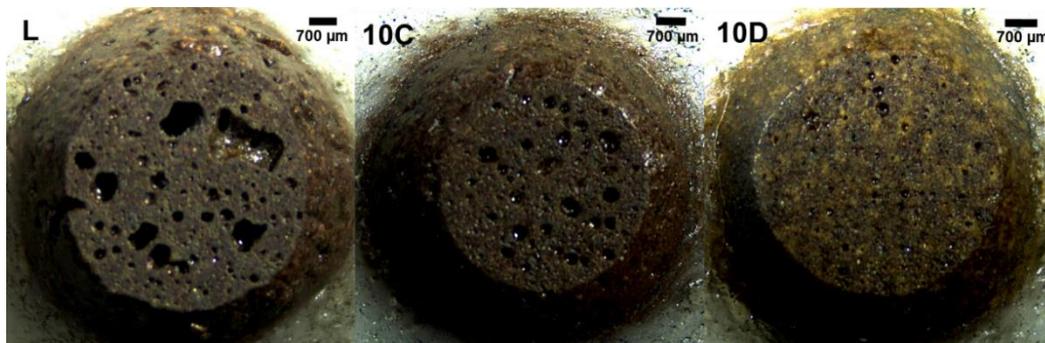


Figura 3 - Imágenes en lupa de L, 10C y 10D sinterizadas a 1140°C.

## Conclusiones

Se logró elaborar agregados porosos utilizando materias primas de la provincia de Buenos Aires: lutita, caliza y dolomita.

Se obtuvo la temperatura mínima de sinterización en el agregado elaborado únicamente a partir de lutita debido al contenido de óxidos fundentes ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ), mientras que los agregados con 10% de reemplazo de lutita por carbonatos con menor contenido de estos óxidos, a pesar de incorporar mayor proporción de otros óxidos fundentes ( $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ), no disminuyen la temperatura inicial de sinterización. Estos últimos óxidos sí contribuyen a una mayor proporción de fase sinterizada a la temperatura de trabajo ( $1140^\circ\text{C}$ ), observando mayor vitrificación en la superficie de los agregados porosos elaborados con caliza y dolomita.

El agregado obtenido a partir de lutita presentó poros grandes, deformes, con distribución de tamaño no uniforme, lo que indicaría que se produjo la coalescencia de parte de los poros pequeños para formar poros grandes, acorde con la menor temperatura inicial de sinterización. Los agregados con caliza y dolomita desarrollaron poros más pequeños y uniformes, característica deseada para una mejor resistencia del agregado.

A partir de los resultados obtenidos, se propone para próximas instancias medir densidad y distribución de poros, evaluar diferentes tratamientos térmicos y porcentajes de reemplazo de lutita por caliza y dolomita.

## Referencias

- [1] Ayati B., Ferrándiz-Mas V., Newport D., Cheeseman C., "Use of clay in the manufacture of lightweight aggregate", *Construction and Building Materials* 162 (2018) 124-131.
- [2] 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.
- [3] González-Corrochano B., Alonso-Azcárate J., Rodas M., "Production of lightweight aggregates from mining and industrial wastes", *Journal of Environmental Management* 90 (2009) 2801-2812.
- [4] Dondi M., Cappelletti P., D'Amore M., de Gennaro R., Graziano S.F., Langella A., Raimondo M., Zanelli C., "Lightweight aggregates from waste materials: Reappraisal of expansion behavior and prediction schemes for bloating", *Construction and Building Materials* 127 (2016) 394-409.
- [5] Bayoussef A., Loutou M., Taha Y., Mansori M., Benzaazoua M., Manoun B., Hakkou R., "Use of clays by-products from phosphate mines for the manufacture of sustainable lightweight aggregates", *Journal of Cleaner Production* 280 (2021) 124361.
- [6] Korat L., Ducman V., Legat A., Mirtic B., "Characterisation of the pore-forming process in lightweight aggregate based on silica sludge by means of X-ray micro-tomography (micro-CT) and mercury intrusion porosimetry (MIP)", *Ceramics International* 39 (2013) 6997-7005.
- [7] Moreno-Maroto J.M., Uceda-Rodríguez M., Cobo-Ceacero C.V., Cotes-Palomino T., Martínez-García C., Alonso-Azcárate J., "Studying the feasibility of a selection of Southern European ceramic clays for the production of lightweight aggregates", *Construction and Building Materials* 237 (2020) 117583.

# INCORPORACION DE TAMICES MOLECULARES MOLIDOS EN MORTEROS

Rocío Peralta Ring<sup>1</sup>, Carla Priano<sup>1</sup>

*1 Instituto de Ingeniería, Dep. de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur, Av. Alem 1253, Bahía Blanca.*

Palabras Clave: tamices moleculares, morteros, medio ambiente.

## Introducción

A partir de un trabajo previo [1], en el cual se realizó un relevamiento de los desechos generados por diferentes empresas e industrias de la zona de influencia de Bahía Blanca, se analizaron las posibles formas de incorporación de dichos residuos, dentro de matrices cementicias. Entre ellos, se hallaron tamices moleculares (Figura 1), utilizados por una empresa de transporte de gas. Los tamices moleculares (TM) son usados en procesos industriales para absorber gases y líquidos que están en suspensión en el gas. Consisten en minerales de aluminosilicatos, arcillas, carbones microporosos, zeolitas o compuestos sintetizados que tienen una estructura abierta, a través de la cual pueden difundir moléculas. Los TM se usan ampliamente en la industria del petróleo, especialmente, para la purificación de corrientes de gas, y en los laboratorios de química para separar compuestos y para el desecado de reactivos.

En una instancia anterior [2], se evaluó la influencia de la incorporación de TM, como reemplazo parcial del agregado fino en morteros cementicios. La sustitución afectó significativamente las características y propiedades de las mezclas analizadas. Si bien las resistencias, tanto a flexión como a compresión, disminuyeron notablemente, se puso de manifiesto la posibilidad del empleo de estos TM como agregado de bajo peso unitario para elaborar morteros y hormigones livianos. Además, debido a su elevada porosidad, podrían utilizarse como agentes de curado interno, para mejorar la permeabilidad de hormigones convencionales a largo plazo. Y fundamentalmente, la inclusión de TM en mezclas cementicias resultó una alternativa posible para la disposición final de un desecho industrial sin afectar al ambiente.

Mediante un análisis de difracción de rayos X de los tamices moleculares, se observó una estructura cristalina coincidente a una zeolita sintética de tipo A ( $\text{Na}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7\text{H}_2\text{O}$ ), compuesta por sodio, aluminio y sílice. Las zeolitas son aluminosilicatos hidratados principalmente de Na, K, Mg y/o Ca, que se caracterizan por su alta capacidad de intercambio catiónico y por absorber humedad sin mayores variaciones en su estructura cristalina [3].

No se tiene gran cantidad de datos de la utilización de tamices moleculares en mezclas cementicias, algunos resultados experimentales indican que pueden emplearse para sustituir al cemento hasta en un 15% [4] y que el cemento portland normal es el mejor material aglutinante para contener dichos residuos en matrices cementicias [5]. Pero sí existen numerosos trabajos donde se estudian las propiedades mecánicas de morteros con zeolitas naturales trituradas que demuestran que la presencia de éstas en la mezcla, incluso cuando aumenta su proporción, favorece la ganancia de resistencias mecánicas a largo plazo. Esto se debe a la capacidad altamente reactiva de las zeolitas que se comportan como un material puzolánico [6, 7, 8]. Esta actividad puzolánica está estrechamente vinculada al tamaño de la zeolita tras su trituración, ya que a medida que aumenta la superficie específica de las partículas, se registra una mayor puzolanidad [9].



Figura 1 – Tamices moleculares sin moler



Figura 2 – Tamices moleculares molidos

Las zeolitas naturales son aluminosilicatos que si bien no tienen propiedades aglomerantes por sí mismas, cuando son molidas finamente y en presencia de humedad pueden reaccionar con la cal y formar productos estables semejantes a los que se producen durante la hidratación del cemento portland [10]. Su utilización es una práctica habitual en la preparación de morteros y hormigones, debido a las ventajas que ello supone. Las mejoras más significativas que se consiguen mediante la inclusión de las puzolanas, se pueden concretar en un aumento de las resistencias mecánicas a largo plazo, como consecuencia de la

formación de cantidades adicionales de productos de hidratación, por reacción del hidróxido cálcico liberado en la hidratación del cemento y la puzolana [11].

Con el objetivo de estudiar el posible efecto puzolánico de los TM, se procedió a triturarlos e incorporarlos finamente molidos (Figura 2) en morteros cementicios como reemplazo parcial del cemento.

## Metodología

En un trabajo previo [2] se caracterizaron los TM, obtenidos de una planta de transporte de gas cercana a la ciudad de Bahía Blanca. En esta etapa, se decidió triturar estos materiales con un molino de bolas de laboratorio para incorporarlos en morteros cementicios, como reemplazo del cemento.

Para la elaboración de las mezclas se utilizó agua desmineralizada (para mezclado y curado), cemento proveniente de una fábrica de la provincia de Buenos Aires, caratulado como portland normal CPN40 y como agregado fino, una arena silíceo. Los tamices moleculares molidos (TMm) fueron incorporados en dos proporciones diferentes de reemplazo: 15% (TMm<sub>15</sub>) y 25% (TMm<sub>25</sub>), respecto al peso de cemento, para comparar resultados con una muestra de referencia, sin incorporación del residuo (PTMm). Se dosificaron morteros con relación agua/material cementicio de 0,50 en peso, a fin de comparar los resultados obtenidos con las muestras patrón. Se moldearon, 3 juegos de 3 probetas prismáticas de 4x4x16 cm para cada uno de los reemplazos de TMm. Para evaluar el desempeño mecánico de los morteros cementicios, se realizaron ensayos de resistencia a compresión, según la metodología indicada en la norma IRAM 1622 [12], a la edad de 7, 28 y 56 días.

Se determinó el índice de actividad puzolánica (IAP), como el cociente entre la resistencia a compresión del mortero de cemento con los TMm y la del mortero control (UNE-EN 450-1). La norma UNE-EN 450-1 [13] especificada para cenizas volantes y con una sustitución del 25% del cemento portland, propone que una adición mineral se comporta como puzolana cuando el IAP es superior a 75% a los 28 días y a 85% a los 90 días.

## Resultados

En la Figura 3 se representa la resistencia a compresión de las barras de mortero elaboradas con los diferentes porcentajes de reemplazo de TMm para las tres edades ensayadas: 7, 28 y 56 días. Se puede observar que la incorporación de TMm en reemplazo del cemento genera una disminución de la resistencia a compresión respecto a las muestras patrón, para las tres edades ensayadas. Para los dos porcentajes de reemplazo estudiados (15% y 25%), las pérdidas de resistencia a los 7 días de edad son del 17% y 36,5%. Sin embargo, a los 56 días de edad, las mermas son del 11% y 15%, respectivamente. Teniendo en cuenta este comportamiento en morteros, es fundamental evaluar la resistencia a 90 días.

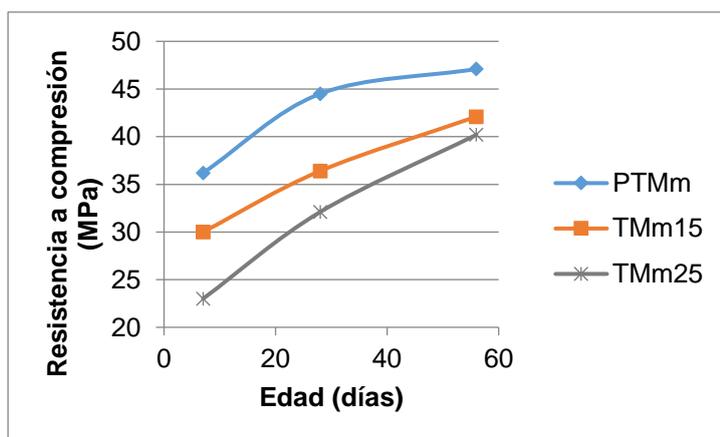


Figura 3 – Resistencias a compresión

Para el reemplazo del 15% y 25% de TMm, el IAP a los 28 días resultó de 82% y 72%, respectivamente. Si se calcula el IAP a los 56 días, se obtiene 89% y 85% para los morteros TMm15 y TMm25 respectivamente. A pesar de no disponer de los valores a 90 días, se puede apreciar que para ambos reemplazos a la edad de 56 días, ya se ha superado el 85% requerido por la norma para considerar que esta adición mineral pueda comportarse como una posible puzolana.

## Conclusiones

Se concluye que el reemplazo de cemento por tamices moleculares molidos en 15% y 25%, afecta significativamente las resistencias a compresión en las primeras edades, reduciéndose dicha merma con el paso del tiempo. Es necesario evaluar el comportamiento de las muestras a largo plazo para establecer el posible efecto puzolánico de los TMm.

Además, se debería complementar con estudios de la evolución de los productos de hidratación para verificar que el residuo incorporado desarrolle efectivamente una actividad puzolánica y no esté actuando como una adición inerte, en la cual sus partículas funcionen como centros de nucleación favoreciendo el crecimiento de los productos de hidratación del material cementiceo al cual fue incorporado.

## Agradecimientos

Los autores agradecen al Laboratorio de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la UNICEN por la ejecución del proceso de trituración de la muestra incorporada y, al Departamento de Ingeniería y a la Secretaría General de Ciencia y Tecnología Universidad Nacional del Sur por el apoyo brindado en estas investigaciones.

## Referencias

- [1] Peralta Ring R., Priano C., Ortega N., "Relevamiento de residuos industriales factibles de reciclar, para uso en hormigón", AA2019 IV Congreso Nacional de Ciencia y Tecnología Ambiental, (2019), 6 pag.
- [2] Peralta Ring R., Priano C., Ortega N., "Estudio de factibilidad de la utilización de tamices moleculares en mezclas cementiceas", IX Congreso Internacional y 23ª Reunión Técnica la Asociación Argentina Tecnológica del Hormigón, (2020), pp 213-220.
- [3] Bonavetti V., Rahhal V., Locati F., Irassar E., Marfil S., Maiza P., "Utilización de una zeolita natural de la provincia de Chubut como adición mineral activa", VIII Congreso Internacional - 22º Reunión Técnica de la AATH, (2018), pp 105-114.
- [4] Zangana, M. H.S., Ibraheem, F. H., Khaleel, S. I., Al-Dahhan, M. H., "Recycling of spent molecular sieves from oil and gas industry: North gas company as a case study", International Conference on Environmental Impacts of the Oil and Gas Industries, (2017), pp 54-58.
- [5] Deneanu N., Dulama M., Teoreanu I., "Some aspect on the conditioning of the molecular sieves waste", Romanian Journal of Physics, 54, (2009), pp. 844- 850.
- [6] Mustelier J.L.C., Lam M.R., Pérez B.C., "Estudio del comportamiento puzolánico de algunas zeolitas de iberoamérica empleando el método de la conductividad eléctrica", VII Congreso Ibérico y X Congreso Nacional de Geoquímica, (2009), pp 1–10.
- [7] Valipour M., Pargar F., Shekarchi M., Khani S., "Comparing a natural pozzolan, zeolite, to metakaolin and silica fume in terms of their effect on the durability characteristics of concrete: A laboratory study", Construction and Building Materials, 41, (2013), pp 879–888.
- [8] Burris LE, Juenger M.C.G., "The effect of acid treatment on the reactivity of natural zeolites used as supplementary cementitious materials", Cement and Concrete Research, (2016), 79, pp 185–193.
- [9] Borrachero M. V., Monzó J., Payá J., "El catalizador gastado de craqueo catalítico adicionado al cemento portland: las primeras 48 horas de curado y la evolución de la resistencia mecánica", VIII Congreso Nacional de Propiedades Mecánicas de Sólidos, (2002), pp 579-589.
- [10] ACI 232.1R-00, "Use of raw or processed natural pozzolans in concrete", American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, (2002), 24 pag.
- [11] Malhotra V.M., Mehta P.K., "Pozzolanic and cementitious materials", Gordon and Breach Publishers, (1996), 191 pag.
- [12] IRAM 1622: Cemento portland. Determinación de resistencias mecánicas. Instituto Argentino de Normalización y Certificación, (2006), 25 pag.
- [13] UNE EN 450-1: Cenizas volantes para hormigón. Parte 1: Definiciones, especificaciones y criterios de conformidad, AENOR, (2013), 34 pag.

# RESISTENCIA AL ATAQUE POR SULFATOS DE MORTEROS CON REEMPLAZO CRECIENTE DE ARCILLA ILLÍTICA CALCINADA

Gisela Cordoba<sup>1</sup>, Viviana Bonavetti<sup>1</sup>, Edgardo F. Irassar<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería de Olavarría – CIFICEN (CONICET-CICPBA-UNICEN)

Palabras Clave: ataque por sulfatos, arcillas calcinadas, illita.

## Introducción

En la actualidad, con el objetivo de reducir el impacto ambiental de la industria de la construcción, se utilizan materiales cementíceos suplementarios (SCM) como reemplazo parcial del cemento portland normal (CPN) [1]. Dentro de los SCM, las arcillas calcinadas han cobrado particular importancia debido a su disponibilidad y a la posibilidad de producirlas a un costo relativamente bajo [2].

En sistemas cementíceos con SCM, la resistencia inicial (1 a 3 días) se ve afectada por el efecto de dilución que provoca el reemplazo de CPN por un material no reactivo durante las primeras horas [3]. Luego, la resistencia está gobernada por la porosidad y la estructura de poros, y la reacción puzolánica de los SCM con el hidróxido de calcio (CH) contribuye a la ganancia de resistencia debido a la formación de silicato de calcio hidratado (C-S-H) [4].

Por otro lado, la reducción del CH disponible beneficia particularmente a las propiedades durables de morteros y hormigones [5]. El consumo del CH produce (a) un aumento de la tortuosidad de la estructura de poros y una disminución del volumen de poros capilares grandes, lo que reduce el ingreso de iones agresivos en la pasta de cemento [2,4], (b) un aumento de la resistencia al ataque por sulfatos, debido a que limita la formación de ettringita y yeso, y la posterior expansión [6], y (c) una menor expansión debida a la reacción álcali-sílice, ya que, por un lado, disminuye el contenido de CH para la formación del gel expansivo y, por el otro, parte de los álcalis disponibles en la solución de poros se fijan en las fases hidratadas del cemento: C-S-H y C-A-S-H [2,7].

En este trabajo se estudia la influencia en la resistencia al ataque por sulfatos de morteros con reemplazo creciente (de 15 a 45 %) de CPN por arcilla illítica calcinada (IC) siguiendo la norma IRAM 1635.

## Materiales y Métodos

Se utilizó un cemento portland normal (CPN), con un contenido de filler calcáreo del 5 %, y 95 % del clinker portland de bajo contenido de  $C_3A$  (3,2 %) y un elevado contenido de  $C_3S$  (60,5 %). Como material cementíceo suplementario (SCM) se utilizó una arcilla cuyo mineral principal es la illita (I), procedente de la ciudad de Olavarría, Provincia de Buenos Aires. La muestra fue calcinada a 950 °C para activarla térmicamente y obtener un material puzolánico. La composición química del CPN y la illita calcinada (IC) se presenta en la Tabla 1. La IC presenta un moderado contenido de  $K_2O$  y  $Na_2O$ . La presencia de  $K_2O$  está asociada al contenido de illita, y la de  $Na_2O$  se debe a la presencia de feldespatos como impureza.

Se determinaron: la densidad de acuerdo con la norma IRAM 1624, la distribución del tamaño de partículas (PSD) utilizando un analizador por difracción láser Malvern Mastersizer 2000E, con unidad de dispersión en seco Sirocco 2000M (Argentina), y la superficie específica Blaine (SEB) de acuerdo con la norma IRAM 1623. Las características físicas del CPN y la IC se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Composición química y características físicas del CPN y la IC

Composición química								
Material	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
CPN	63,8	21,2	3,8	3,8	0,8	2,4	1,1	0,1
IC	1,6	59,9	19,8	13,4	2,3	0,1	2,5	0,5
Características físicas								
	Densidad, g/cm <sup>3</sup>	Distribución del tamaño de partículas			Superficie específica Blaine, m <sup>2</sup> /kg			
		d <sub>10</sub> , μm	d <sub>50</sub> , μm	d <sub>90</sub> , μm				
CPN	3,09	2,69	20,79	66,62	324			
IC	2,73	3,05	21,08	61,44	622			

Se elaboraron: un mortero de control (0%IC) y cuatro morteros con reemplazo creciente de cemento por IC: 15%IC, 25%IC, 35%IC y 45%IC. En todos los casos se empleó una relación agua/material cementíceo ( $a/mc$ ) = 0,50 y arena (IRAM 1623)/ $mc$  = 3.

Se determinaron la fluidez de acuerdo con la norma ASTM C 230 y la resistencia a la compresión de acuerdo con la norma IRAM 1622. Luego, se estudió la resistencia al ataque por sulfatos mediante la expansión de barras de mortero, siguiendo la norma IRAM 1635. Para el estudio del ataque por sulfatos, se elaboraron morteros con una relación  $a/mc$  constante (0,485) y una relación cemento:arena graduada (ASTM 778) = 1:2,75. Se moldearon 5 barras de mortero para la medición del cambio de longitud y cubos de mortero para la determinación de la resistencia a la compresión. Una vez que los morteros alcanzaron una resistencia a la compresión igual o mayor de 20 MPa se sumergieron las barras en una solución de  $Na_2SO_4$  (0,352 mol/l) a 20°C. La renovación periódica de la solución se reemplazó por el control periódico de su pH mediante una titulación con disolución combinada de  $Na_2SO_4$  (0,352 M) y  $H_2SO_4$  (2N). Este procedimiento neutraliza el pH de la solución y restablece la concentración de iones  $Na^+$  y  $SO_4^{2-}$  [3].

Se registró la longitud de las probetas a las edades establecidas en la norma IRAM 1635 hasta los 12 meses, y se extendió la medición hasta los 30 meses. La expansión informada corresponde al promedio de cinco barras.

## Resultados

La Fig. 1 muestra la fluidez y la resistencia a la compresión hasta los 90 días de los morteros con 0, 15, 25, 35 y 45 % de reemplazo de CPN por IC. En la misma se puede observar que la fluidez disminuye con el aumento del contenido de IC, y esto puede ser atribuido a la mayor SEB que presenta la IC respecto del CPN. Además, se puede ver una menor resistencia a la compresión con el aumento del nivel de reemplazo. A 2 días, el incremento de 0 a 45 % en el contenido de IC produce una resistencia 59 % menor a la alcanzada por el mortero de control, mientras que a los 90 días la disminución es del 26 %.

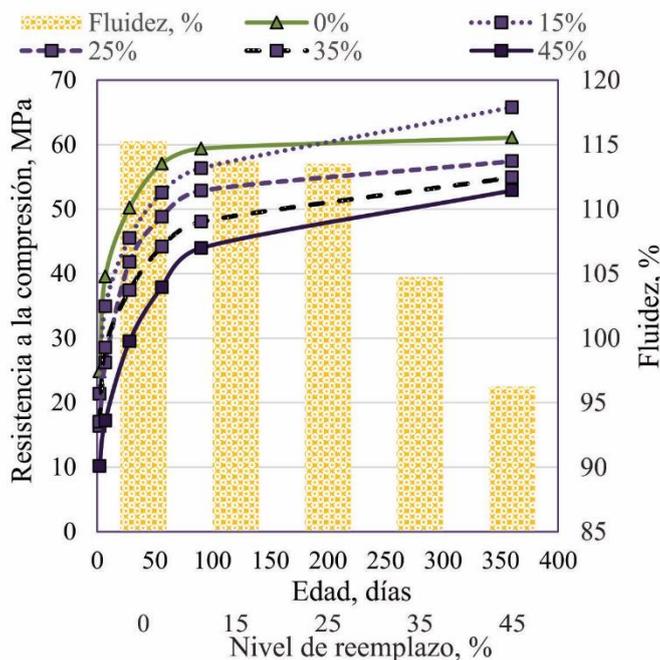


Figura 1 – Fluidez y resistencia a la compresión de los morteros con IC

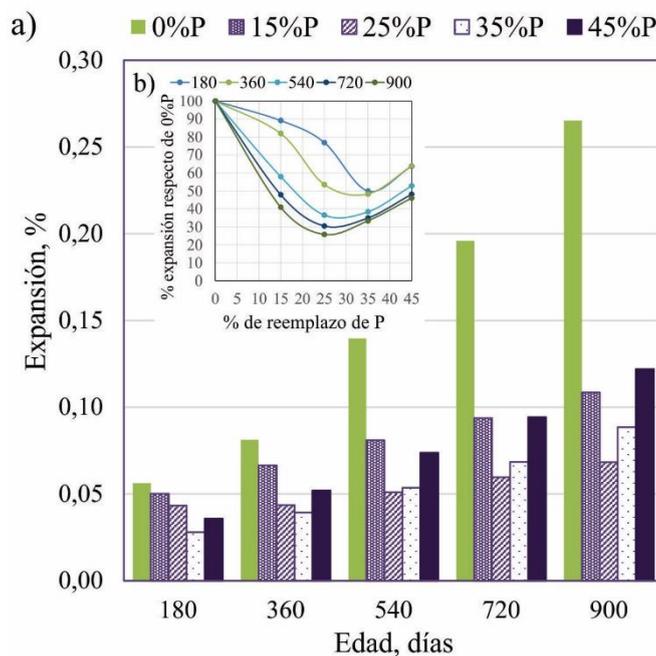


Figura 2 – a) Expansión de los morteros a los 6, 12, 18, 24 y 30 meses de exposición y b) Reducción de la expansión de los morteros con IC respecto del mortero control CPN

En la primeras edades, el efecto de estimulación de las reacciones de hidratación del cemento ocasionado por la inclusión de partículas muy fina, no alcanza a contrarrestar el efecto de dilución, dado por la menor cantidad de material inicialmente reactivo; provocando una importante disminución de la resistencia a compresión cuando se incrementa el contenido de IC. A edades más avanzadas, la reacción puzolánica de la IC permite compensar parcialmente el efecto de dilución y la disminución de la resistencia por incremento en el contenido de IC en el cemento disminuye. Así, el mortero con 15 %IC alcanza a los 90 días una resistencia levemente superior (5 %) a la registrada por mortero de control.

La Fig. 2a muestra la expansión de las barras de mortero a los 180, 360, 540, 720 y 900 días (6, 12, 18, 24 y 30 meses). De acuerdo con la norma ASTM C1157, un cemento altamente resistente a los sulfatos (ARS) es aquel cuya expansión no exceda los límites 0,05 y 0,10 % a los 6 y 12 meses, respectivamente. Por lo tanto, el mortero control no clasifica como ARS debido a que, a pesar de que no supera el límite 0,10 % a los 360 días, supera el de 0,05 % a los 180 días. Además, a los 18 meses supera el límite 0,10 % y presenta una expansión exponencial. La elevada expansión del mortero control se atribuye al alto contenido de  $C_3S$  del CPN, pues durante su hidratación produce un elevado contenido de CH que conduce a la formación de yeso por su reacción con los iones  $SO_4^{2-}$ . En el caso de los morteros con IC, presentaron una expansión menor que la del mortero control a todas las edades, pudiendo elaborarse cementos ARS con porcentajes de reemplazo entre 15 y 45 %. El reemplazo de CPN por IC conduce a una reducción del CH dado por el efecto de dilución y por el consumo de este compuesto durante la reacción puzolánica de la IC a partir de los 28 días.

En la Fig. 2b se presenta la reducción de la expansión de los morteros con contenido variable de IC con respecto a la expansión registrada por el mortero de control. Hasta los 360 días, el mortero 35%IC redujo en mayor proporción la expansión del mortero control. A partir de los 540 días, el mortero 25%IC fue el que mostró la menor expansión. A mayor nivel de reemplazo, disminuye la disponibilidad de CH para formar yeso y/o ettringita; por lo que se incrementa la resistencia potencial a los sulfatos. Sin embargo, el aumento en el contenido de adición también conduce a un incremento de la relación a/c efectiva que produce un aumento de la porosidad y favorece el ingreso de iones  $SO_4^{2-}$  al sistema. Este efecto, sumado al moderado contenido de  $Al_2O_3$  que tiene la IC conduce a la formación de fases AFm que, en presencia de iones  $SO_4^{2-}$ , se transforman en ettringita, y provocan la expansión tardía de las barras de mortero, a medida que aumenta el contenido de IC en el cemento disminuye la resistencia a los sulfatos. Por lo expuesto, a largas edades el mortero con 25 % de IC presenta un mejor comportamiento frente a los sulfatos que el mortero con 35 % de IC.

## Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos en morteros con reemplazo creciente de cemento portland por arcilla illítica calcinada (IC), se concluye que:

- Al aumentar el reemplazo de CPN por IC, se reduce la fluidez del mortero debido a la elevada superficie específica Blaine de la IC.
- El reemplazo de CPN por IC conduce a una reducción de la resistencia a la compresión debido a que la formación de compuestos cementantes dados por la reacción puzolánica de IC no alcanzan para compensar el efecto de dilución.
- A pesar del bajo contenido de  $C_3A$  del CPN, no es posible clasificarlo como un cemento altamente resistente a los sulfatos (ARS) debido a su elevado contenido de  $C_3S$ , que conduce a la formación de yeso y a posteriores expansiones.
- Es posible elaborar cementos ARS con reemplazos de CPN por IC de entre 15 y 45 % ya que reducen la disponibilidad de CH tanto por el reemplazo de cemento portland como por la reacción puzolánica, obteniéndose la menor expansión a edades tardías para un nivel de reemplazo del 25 %.

## Referencias

- [1] Aitcin P.-C., Mindess S., "Sustainability of concrete", 1ra Edición, CRC Press, (2011).
- [2] Trümer A., Ludwig H.M., Schellhorn M., Diedel R., "Effect of a calcined Westerwald bentonite as supplementary cementitious material on the long-term performance of concrete", *Applied Clay Science*, 168 (2019) 36–42.
- [3] Juenger M., Siddique R., "Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete", *Cement and Concrete Research*, 78 (2015) 71–80.
- [4] Dhandapani Y., Santhanam M., "Assessment of pore structure evolution in the limestone calcined clay cementitious system and its implications for performance", *Cement and Concrete Composites*, 84 (2017) 36–47.
- [5] Khatib J.M., Wild S., "Pore size distribution of metakaolin paste", *Cement and Concrete Research*, 26 (1996) 1545–1553.
- [6] Irassar E.F., "Sulfate attack on cementitious materials containing limestone filler - A review", *Cement and Concrete Research*, 39 (2009) 241–254.
- [7] Lothenbach B., Scrivener K.L., Hooton R.D., "Supplementary cementitious materials", *Cement and Concrete Research*, 41 (2011) 1244–1256.

# CARACTERIZACIÓN DE PASTAS Y MORTEROS CON FILLER CALCÁREO, PUZOLANAS NATURAL Y ARTIFICIAL

Ailen Ferreyra<sup>1</sup>, Carlos Pico-Cortés<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> FI UNLP, La Plata, Argentina <sup>2</sup> LEMIT, La Plata Argentina

<sup>3</sup> CONICET, La Plata, Argentina

Palabras clave: adiciones minerales, puzolanas, filler calcáreo, pastas, morteros.

## Introducción

Las adiciones minerales intervienen en el hormigón aportando mejoras en aspectos técnicos, económicos y ecológicos. Técnicos porque al interactuar con los demás componentes del material, permiten mejorar sus propiedades en estado fresco y/o endurecido. Económicos porque al reemplazar una parte del cemento disminuyen la cantidad de energía necesaria para la generación del aglutinante. Y ecológica, ya que la producción de cemento implica emisión de dióxido de carbono (perjudicial para el medio ambiente). Además, el uso de desechos industriales como materia prima optimiza aún más el uso de recursos no renovables [1].

Las adiciones pueden clasificarse con base en diversos parámetros. Uno de los más referidos es el grado de reactividad o interacción que tienen con el cemento portland. Así, pueden distinguirse las adiciones inertes de las activas. Las primeras se caracterizan por tener un efecto que resulta común para todos los tipos de adiciones: la dispersión de las partículas del cemento. Esto genera una mejor condición para el desarrollo de la hidratación ya que el agua tiene un mayor acceso a los granos de cemento, y la formación de núcleos para los productos cristalinos de la hidratación (como es el hidróxido de calcio). Este efecto sobre la hidratación ha sido verificado por diferentes autores, señalándose también que las adiciones inertes producen un efecto de dilución significativo a largo plazo [2]. Un material normalizado en Argentina que entra en las adiciones inertes es el filler calcáreo. Por otro lado, las adiciones activas se caracterizan por tener, además, una reacción química con el medio en el que se incluyen. Este es el caso de las llamadas puzolanas, que reaccionan con el hidróxido de calcio generado en la hidratación del cemento. Esta reacción genera silicato de calcio hidratado secundario sin agotar su disponibilidad, es decir, que no se modifica el pH alcalino. Dicho producto posee características similares al silicato de calcio hidratado que genera la hidratación del cemento, con la diferencia de que es menos denso [3]. En estudios realizados sobre pastas binarias con filler calcáreo o ceniza volcánica por separado, se observó que ambas adiciones aumentaron la demanda de agua, y que el reemplazo con ceniza volcánica a 30% y 50% aumenta los tiempos de fraguado, mientras que el filler calcáreo en un 15% no tuvo influencia significativa en esta propiedad [4]. Otras investigaciones indican que dichas adiciones tienen una influencia significativa en la resistencia a la compresión, exhibiendo generalmente a largo plazo, resistencias más altas que las encontradas en la mezcla de referencia, con excepción de aquellas definidas con 30% de puzolana natural [5]. Estudios comparativos entre mezclas binarias y ternarias de puzolana y filler presentaron mayores resistencias para mezclas binarias en laboratorio, pero con valores aproximados en condiciones que simulaban ambiente real [6].

En este trabajo se presentan algunas conclusiones preliminares sobre el uso conjunto de adiciones minerales inertes y puzolánicas en las propiedades de pastas y morteros, en función de resultados de ensayos realizados a 7 y 28 días. Para la elaboración de los morteros se definieron cinco mezclas empleando cemento portland normal de alta resistencia inicial (CPN50 ARI), filler calcáreo (L), puzolana natural (PZN) y puzolana artificial (arcilla íltica calcinada) (PZA).

## Metodología

En la fase de pastas así también como en la de morteros, se elaboraron cuatro mezclas variando las proporciones de las puzolanas y el filler, y una mezcla de control empleando CPN50 ARI, denominada O100. De esta forma se completaron dos mezclas con 60% de CPN50 ARI y 40% de PZA o PZN, denominadas O60P40 y O60Pn40 respectivamente, y otras dos mezclas con 50% de CPN50 ARI, 40% de PZA o PZN y 10% de L, denominadas O50P40L10 y O50Pn40L10 respectivamente.

Las adiciones minerales y el cemento portland fueron evaluados previamente a la elaboración de pastas y morteros, determinándose sus densidades y finuras. El ensayo de densidad se llevó a cabo según se indica en IRAM 1624. La finura se definió por tamizado húmedo según IRAM 1621, con los tamices N°200 (75 µm) y N°325 (45 µm). Para las puzolanas se determinó el índice de puzolanicidad según IRAM 1654. A

nivel de pastas, se realizaron las determinaciones de consistencia normal (IRAM 1612) y de tiempos de fraguado (IRAM 1619). Para los morteros, con cada mezcla se realizó, en estado fresco, el ensayo de extendido según ASTM C1437, el ensayo de PUV según IRAM 1562 y se midió su contenido de aire según IRAM 1602-2. En estado endurecido se llevaron a cabo ensayos de densidad y absorción según ASTM C642 (adaptada para morteros) y ensayos de resistencia a flexión y compresión según IRAM 1622.

## Resultados y Discusión

Respecto a la caracterización de los materiales usados, el CPN50 ARI resultó con la mayor densidad, con un valor de 3,12 g/cm<sup>3</sup>, y el de mayor finura, cuyos retenidos fueron de 2,4% y 0,2% en los tamices N°325 y N°200 respectivamente. En cuanto a la densidad de las adiciones, la PZN registró el menor valor con 2,43 g/cm<sup>3</sup>, siguiéndole el L con 2,60 g/cm<sup>3</sup> y la PZA con 2,67 g/cm<sup>3</sup>. Estos valores se encuentran dentro de los normales para cada tipo de material. En términos de material retenido, el filler fue el que presentó mayor porcentaje, con 32,2% y 20,2% en los tamices N°325 y N°200 respectivamente. Entre las puzolanas, la PZA resultó con mayor finura que la natural, con retenidos de 11,5% y 1% frente a 16,2% y 4,6% de la PZN, en el tamiz N°325 y N°200 respectivamente. El índice de puzolanidad para la PZA resultó en 0,692, mientras que para la PZN fue 0,801.

Para lograr la consistencia normal de las pastas se requirieron contenidos de agua de 29,6%, 31,0%, 30,7%, 29,4% y 28,9% para la O100, O60P40, O50P40L10, O60Pn40 y O50Pn40L10, respectivamente. Respecto a los tiempos de fraguado, la mezcla O100 tuvo un tiempo de fraguado inicial de 2,6 horas, mientras que la mezcla O60P40 obtuvo un fraguado inicial más rápido que la mezcla O60Pn40, con valores de 2,5 horas y 2,9 horas respectivamente. Para ambas puzolanas, no se observaron diferencias notables entre las mezclas con y sin filler. El fraguado final mostró tiempos más cortos para la mezcla control, con 4,6 horas, siguiéndole las mezclas O60P40 y O50P40L10 con 4,7 horas y 4,72 horas respectivamente. Las mezclas con puzolana natural, O60Pn40 y O50Pn40L10, tuvieron un tiempo de fraguado final más extendido, alcanzando las 5,65 horas y 5,77 horas.

A nivel de morteros, en la Tabla 1 se presentan los resultados obtenidos de las evaluaciones en estado fresco. Con los resultados del extendido se observó que la puzolana natural aportó mayor fluidez que la artificial. Las mezclas con filler calcáreo (O50P40L10 y O50Pn40L10) presentaron mayor fluidez en comparación con las mezclas que no lo poseen (O60P40 y O60Pn40). El empleo de la PZN mostró menores valores del PUV y contenido de aire incorporado, respecto de las mezclas de control y con PZA. No se observó una clara incidencia del uso de filler sobre estas dos últimas propiedades.

Tabla 1: Resultados de ensayos en estado fresco de morteros

Mezcla	Extendido	PUV	Contenido de aire
	[cm]	[gr/cm <sup>3</sup> ]	[%]
O100	20,9	2171	8,0
O60P40	20,0	2148	8,0
O50P40L10	21,0	2145	8,5
O60Pn40	22,4	2138	7,4
O50Pn40L10	22,5	2120	6,6

En la Figura 1 se presentan las densidades de los morteros elaborados. Las mezclas con PZN resultaron más densas que las mezclas con PZA a ambas edades, mientras que aquellas que contienen filler fueron las que menores densidades presentaron. La mayor densidad de las mezclas con PZN, respecto a las con PZA, puede atribuirse, parcialmente, al menor contenido de aire incorporado, sumado a una posible mayor generación de productos de hidratación, hecho que se evidencia especialmente a la edad de 28 días. Todas las mezclas con adiciones resultaron con menor densidad que la mezcla control. Los valores de densidad saturada a superficie seca resultaron con la misma tendencia que las densidades secas.

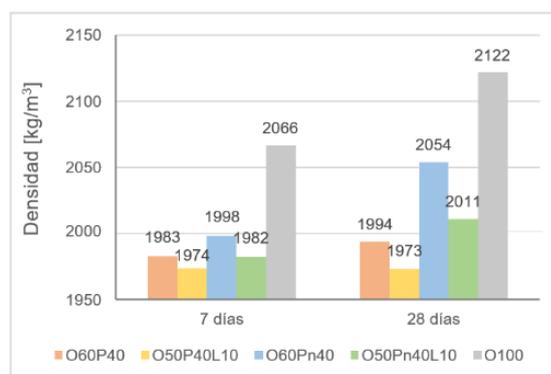


Figura 1 – Densidad seca de los morteros

Los valores de absorción a 7 y 28 días para las mezclas O60P40, O50P40L10, O60Pn40 y O50Pn40L10 fueron de 10,5 y 10,9%, 11,1 y 11,3%, 10,4 y 9,1%, y 10,9 y 10,4% respectivamente en cada

caso. Se observa que las mezclas con filler tuvieron mayor absorción de agua en comparación con aquellas que no tienen esta adición. La mezcla de control fue la que menores absorciones tuvo, con 9,3% a 7 días y 8.4% a 28 días.

En la Figura 2 se presentan las resistencias a flexión a 7 y 28 días. Las mezclas con PZN tuvieron una pérdida de resistencia a los 7 días respecto a la mezcla de control del 43 y 30% con y sin filler respectivamente, mientras que las mezclas con PZA aportaron mayor resistencia, con pérdidas del 39 y 13% con y sin filler. Para la edad de 28 días las mezclas con PZN tuvieron un mayor desarrollo de resistencia en comparación de las mezclas con PZA.

La resistencia a compresión a los 7 y 28 días se presenta en la Figura 3. Nuevamente se observa que las mezclas con filler calcáreo presentaron menor resistencia en ambas edades. Sin embargo, las mezclas con PZA no tuvieron una mayor resistencia en la edad más temprana, sino que en ambas edades tuvieron valores de resistencia a compresión menores que las mezclas con PZN. Es destacable que a 28 días la mezcla O60Pn40 alcanzó valores de resistencia similares a los de la mezcla control a la edad más avanzada, tanto en compresión como en flexión.

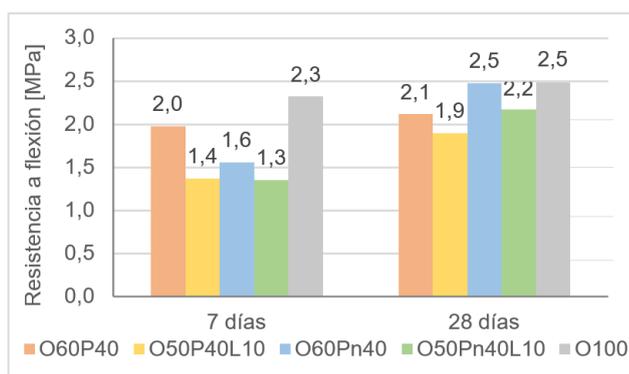


Figura 2 – Resistencia a flexión

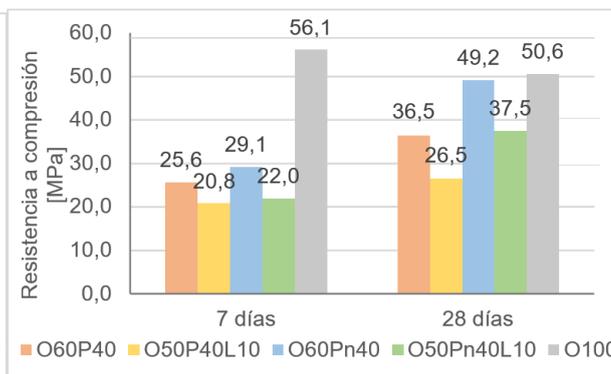


Figura 3 – Resistencia a compresión

## Conclusiones

En función de los resultados obtenidos surge que las puzolanas naturales permiten obtener valores de densidades y resistencias menores que las mezclas con 100% de CP50 ARI a 7 y 28 días, pero no tan alejados. Si bien el uso de puzolana natural y artificial condujo a menores valores de resistencia a edad temprana, con relación a la mezcla de control, la ganancia de resistencia a 28 días es mayor en las mezclas adicionadas. Este hecho se relaciona con una hidratación tardía de las adiciones minerales, por lo que es de esperar que a edades más avanzadas se logre equiparar o incluso superar la resistencia de control. La puzolana artificial presentó valores más alejados de la muestra control, especialmente a edad temprana. Con respecto al filler calcáreo, los resultados evidencian su viabilidad como reemplazo del cemento, empleando un porcentaje bajo. Estos resultados permiten seguir evaluando la posibilidad de uso de distintas adiciones en mezclas cementíceas como herramienta potencial para disminuir el uso del cemento en hormigones sustentables.

## Referencias

- [1] Balzamo H, Bascoy D A, Bonavetti V, Cabrera O A, Carrasco M F, Clariá M A, Di Maio A A, Eperjesi L, Checmarew R L, Fornasier G, Irassar F E, López R, Maldonado N G, Oshiro A, Rahhal V, Sota J D, Traversa L P, Zega C J, Zerbino R L, “Ese material llamado hormigón”, Primer edición, Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón (2012), 79.
- [2] V.L. Bonavetti, V.F. Rahhal & E.F. Irassar. 2002. “Evolución de la hidratación de cementos con adiciones”. *Materiales de Construcción*, 52, pp. 57-64.
- [3] Giovambattista A, “Hormigón, materiales, vida útil y criterios de conformidad y su consideración en el reglamento CIRSOC 201-2005”, Primer edición, Instituto Nacional de Tecnología Industrial (2011), 62-65.
- [4] Celik K., Hay R., Hargis C. & Moon J., “Effect of volcanic ash pozzolan or limestone replacement on hydration of Portland cement”, *Construction and Building Materials* (2019).
- [5] Elbahi B. & Boukli Hacene S, “Influence of limenstone fillers and natural pozzolan on engineering properties of concrete, *Journal of Adhesion Science and Technology*” (2016).
- [6] Rodriguez C, Ortega JM, Hernandez M. “Cementos ternarios como alternativa sostenible para la Ingeniería Civil”, *Revista de la Asociación Española de Materiales compuestos* (2020), 4:16–21.

# EVALUACIÓN DE CENOSFERAS COMO MATERIALES CEMENTANTES SUPLEMENTARIOS

Victoria M Guzzardi<sup>1</sup>, Christian M. Martín<sup>1</sup>, Teresa M. Pique<sup>1,2</sup>

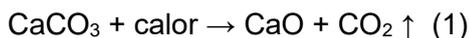
<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires

<sup>2</sup> Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina

Palabras Clave: Materiales Cementantes Suplementarios, Cenosferas, Microesferas Huecas de Vidrio, Dióxido de Carbono.

En mayo del año corriente la Agencia Internacional de Energía (IEA) redactó el informe *Net Zero by 2050* [1] en el que se llega a la conclusión de que para alcanzar el objetivo de limitar el aumento de temperatura a 1,5 °C por encima de los niveles preindustriales en 2050 como se propuso en el acuerdo de París, debemos alcanzar un balance cero de emisiones de CO<sub>2</sub>. Para esto plantea varios pasos a seguir para descarbonizar la sociedad entre los cuales redonda la necesidad de captura, utilización y almacenamiento de este gas de efecto invernadero (CCUS). El CCUS propone una salida para las industrias de intenso consumo energético que liberan CO<sub>2</sub> no solo por la combustión, tendencia que se limita en el plan de acción del *Net Zero 2050* incentivando el uso de nuevos vectores energéticos, si no para aquellas que genera CO<sub>2</sub> por reacción. Este CO<sub>2</sub> deberá ser capturado y utilizado o almacenado de manera biológica o en formaciones subterráneas.

Entre estas industrias se encuentra la del cemento portland. El 40% de las emisiones de esta industria provienen de la combustión, mientras el 60% restante proviene de la calcinación del material calcáreo [2]. La descomposición de la caliza en la preparación del Clinker portland supone aproximadamente la mitad del total de las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas a la fabricación del cemento, debido a la reacción de descarbonatación de la materia prima que se muestra en la Ecuación 1.



La descomposición genera una liberación promedio de 0.87 kg de CO<sub>2</sub> por kilogramo de cemento portland producido [3]. Disminuir estas emisiones presenta un desafío, por lo que además de tecnologías de bajo consumo para la producción y la captura directa del CO<sub>2</sub> producido por la descarbonatación de la caliza se propone disminuir la relación Clinker/cemento utilizando materiales cementantes suplementarios (MCS). Los MCS se definen como un material inorgánico que contribuye a las propiedades de una mezcla de cemento mediante actividad hidráulica, puzolánica o ambas [4]. Se pueden encontrar MCS de origen natural y de origen artificial, pudiendo ser los últimos productos secundarios de algún proceso industrial específico. La incorporación de los MCS en las mezclas de cemento permiten alcanzar mejoras tecnológicas en su desempeño ya sea en estado fresco o endurecido. Asimismo, la utilización de dichos materiales en reemplazo parcial del Clinker permite disminuir la cantidad de CO<sub>2</sub> asociada a su producción, utilizar subproductos de procesos industriales.

El trabajo que aquí se introduce tiene como objetivo diseñar una pasta de cemento con reemplazo parcial del Clinker que cumpla la función de aislar zonalmente pozos inyectores de CO<sub>2</sub> en el subsuelo. Las pastas o lechadas de cemento ocupan el espacio anular comprendido entre el macizo rocoso y la cañería de inyección o *casing* y tienen la función de aislar zonalmente las formaciones que atraviesa el pozo. En estado fresco, durante la cementación, generan una presión de tipo hidrostático sobre el macizo rocoso que puede superar su resistencia o gradiente de fractura. El gradiente de fractura se define como la presión requerida para generar fracturas en una roca a una profundidad dada que depende no solo de las propiedades de la roca sino del estado tensional del subsuelo. La presión de tipo hidrostática que ejerce la pasta de cemento en estado fresco se controla ajustando su densidad para que la presión que ejerce sobre la roca sea inferior al gradiente de fractura y superior a la presión de poros de la formación. En investigaciones previas se ha trabajado con microesferas huecas de vidrio (MEHV) para regular la densidad de estas lechadas. Estas se han utilizado ampliamente dentro de la industria de hidrocarburos dada la excepcionalmente baja densidad que poseen. Son un material liviano de alta resistencia que se fabrica a partir de vidrio de borosilicato que consisten en burbujas esféricas de vidrio de espesor de cascara determinado que le confiere alta resistencia al aplastamiento. Dicha cascara se compone principalmente de dióxido de silicio (SiO<sub>2</sub>). Su tamaño de partícula varía entre 20 y 70 micrómetros y puede tener densidades de 100 a 800 kg/m<sup>3</sup>. Las MEHV se clasifican de acuerdo a la resistencia al aplastamiento que poseen que puede alcanzar un valor de hasta 186 MPa [5]. Se demostró la capacidad cementante de las MEVH mediante la reacción puzolánica mediante diversos ensayos, uno de ellos fue el Chappelle modificado, el cual indico los valores de CH que se consumían en la reacción demostrando que eran superiores al límite estándar [5].

Si bien este material ha demostrado un alto rendimiento y tener propiedades cementantes resulta ser un material que se fabrica específicamente para este uso. En este trabajo se busca estudiar el reemplazo de las MEVH por un subproducto industrial en lugar de las MEHV. Se plantea entonces el uso de cenosferas, un material físicamente similar a las MEHV que se obtienen como un subproducto de las centrales térmicas, lo que implica un impacto medioambiental menor.

Las cenosferas son esferas livianas, poseen densidades entre 500 y 800 kg/m<sup>3</sup>, y al igual que las MEVH, son huecas. Están compuestas principalmente de óxidos de sílice y aluminio y rellenas de aire o gas inerte. Presentan un color de grisáceos a blancos y su aspecto pulverulento, similar al cemento portland. Comprende partículas de 1 a 500 micrones con espesores de pared del orden de 5 a 10% del diámetro. Su superficie específica varía normalmente entre 300 y 500 m<sup>2</sup>/kg. Tienen alta resistencia mecánica con roturas entre 10.5 y 21.0 MPa, alta resistencia a temperaturas con un punto de fusión mayor a 1600°C y baja conductividad térmica (menor a 0.1 Wm<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>) [6]. La **Figura 1** muestra una imagen obtenida por medio de microscopía electrónica de barrido (SEM) de cenosferas comerciales.

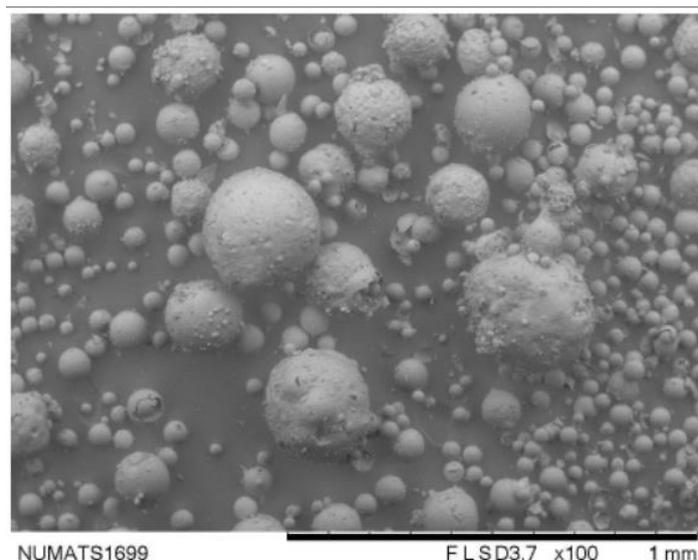


Figura 1. Imagen de cenosferas comerciales obtenidas a partir de microscopía electrónica de barrido.

Las cenosferas se han utilizado previamente para alivianar mezclas de cemento. Blanco y et al. [7] utilizaron las cenosferas de 995 kg/m<sup>3</sup> de densidad media para obtener hormigones de baja densidad, los que dosificaron optimizando el empaquetamiento de partículas. Midieron la densidad, porosidad, conductividad térmica, resistencia al congelamiento y deshielo y comportamiento acústico de los hormigones alivianados y destacaron la relación entre la densidad y la resistencia, tanto en flexión como en compresión, observando que la resistencia aumenta con el tiempo de curado y los valores de resistencia más bajos son aquellos asociados a las menores densidades. Encontraron también que la conductividad térmica disminuye con el tamaño de partícula y que, comparando con otros materiales, un muro fabricado con hormigón con reemplazo de cenosferas presentaría mejor conductividad térmica. Por último, verificaron que estos hormigones no presentaron fisuración ni desgaste luego de 25 ciclos de congelamiento y deshielo. Kannan [8] estudió el desarrollo de la resistencia de morteros de cemento con reemplazo de cenosferas y humo de sílice. También observó que los morteros de cemento con cenosferas tienen resistencias menores a cortas edades, adjudicando este comportamiento a una posible actividad puzolánica. Concluye que esta pérdida de la resistencia puede subsanarse con la incorporación de humo de sílice. Por su parte, Wang y et al. [9] analizaron la interacción entre las cenosferas y el cemento a partir de morteros de cemento con reemplazo de cenosferas de 870 kg/m<sup>3</sup> de densidad media. Las cenosferas mostraron reactividad puzolánica limitada entre 28-30°C y 38°C y actividad puzolánica significativa a partir de los 80°C. Verificaron también que las cenosferas son inertes frente a la reacción álcali-sílice (RAS).

Visto estos resultados prometedores, la intención del trabajo es estudiar las cenosferas para obtener resultados similares a los obtenidos reemplazando parcialmente el cemento con MEVH. Para ello se estudiarán las cenosferas como material de reemplazo de cemento en pastas para la cementación de pozos inyectores de CO<sub>2</sub> en el subsuelo, viendo como varía la densidad y la resistencia del material resultante. Adicionalmente se estudiará si existe una interacción química entre las cenosferas y la pasta de cemento, para lo que se cuantificará la actividad puzolánica de las cenosferas con el objetivo de poder comprobar si trabajan como un material cementante suplementario. Finalmente se medirá la susceptibilidad a la carbonatación de las pastas en estado endurecido para poder predecir su comportamiento frente al CO<sub>2</sub> con

el que estará en contacto durante el almacenamiento. Para lo anterior se diseñó un plan experimental que incluye medición de PUV, resistencia a la compresión, calorimetría isotérmica, termogravimetría y el avance de la carbonatación frente a una atmósfera saturada de CO<sub>2</sub>. Se esperan obtener resultados similares a los obtenidos con las MEHV, permitiendo utilizar las cenosferas en la misma medida haciendo uso de un subproducto industrial en vez de un material fabricado *ad hoc* y así sumar ideas para lograr alcanzar el balance cero de emisiones de CO<sub>2</sub> propuestos en el Informe Net-Zero para el 2050.

## Referencias

- [1] International Energy Agency, Special Report: Net Zero by 2050, A Roadmap for the Global Energy Sector (2021), París ([www.iea.org/reports/net-zero-by-2050](http://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050))
- [2] C. A. Brunatti “La industria del cemento Portland y la sostenibilidad”, (E-libro), 1ra ed. Asociación de Fabricantes del cemento portland, (2014), 69.
- [3] Scarponi, N., Viclagrán Zaccardi, Y., “Implementación del método Chapelle modificado para la determinación de la reactividad de adiciones minerales en Argentina”, IX Congreso Internacional AATH y 23ra reunión técnica, 2020, 8.
- [4] H. A. Ali, D. Xuan, C. S. Poon, “Assessment of long-term reactivity of initially lowly-reactive solid wastes as supplementary cementitious materials (SCMs)”, department of civil environmental engineering, the hong kong polytechnic university (2019), 10.
- [5] C. M. Martín, N. B. Scarponi, Y. A. Villagrán, D. Manzanal, T. Pique, “Cuantificación de la actividad puzolánica de las microesferas huecas de vidrio”, IX Congreso Internacional AATH y 23ra reunión técnica, 2020, 8.
- [6] P. A. Giovanbattista, “Incorporación de cenizas volantes en el hormigón elaborado – Beneficios y usos”, 1, Maternix, año, 25.
- [7] F. Blanco, P. Garcia, P. Mateos, J. Ayala, “Characteristics and properties of lightweight concrete manufactured with cenospheres”, Cement and concrete research (2000), 9.M. Lanzón Torres, P.A. García Ruiz, “Lightweight pozzolanic materials used in mortars: evaluation of their influence on density, mechanical strength and water absorption”, Departamento de arquitectura y tecnología de la edificación, escuela de arquitectura e ingeniería de la edificación, Universidad politécnica de Cartagena, (2006), 6.
- [8] K. Senthamarai Kannan, “An investigation on strength development of cement with cenosphere and silica fume as pozzolanic replacemet”, Ana S. Guimaraes (2016), 7.
- [9] J. Wang, M. Zhang, W. Li, K. Chia, R. Leiw, “Stability of cenospheres in lightweight cement composites in terms of alkali-silica reaction”, department of civil and environmental engineering, national university of Singapore (2012), 7.

# ESTABILIDAD DEL FILLER DOLOMITICO: MODIFICANDO EL RUMBO DEL Mg

Antonela Di Salvo Barsi<sup>1</sup>, Mónica A. Trezza<sup>1</sup>, Edgardo F. Irassar<sup>1</sup>

Facultad de Ingeniería, CIFICEN (UNCPBA-CIC-CONICET). Av. del Valle 5737 (B7400JWI) Olavarría, Argentina. antonela.disalvo@fio.unicen.edu.ar-mtrezza@fio.unicen.edu.ar-firassar@fio.unicen.edu.ar

Palabras Clave: filler, dolomita, dedolomitización, FT-IR.

## Introducción

Muchos trabajos previos han determinado que la incorporación de partículas finas al cemento, rellenan y mejoran el empaquetamiento de partículas de los cementos binarios [1-4]. El efecto del filler es mayoritariamente físico, ya que actúa como relleno entre los granos del clinker acelerando la hidratación del C<sub>3</sub>S y de la fase aluminato debido a la nucleación heterogénea. El efecto beneficio del filler depende del porcentaje incorporado, pues a medida que éste aumenta, el efecto de estimulación empieza a perder importancia y el efecto de dilución puede afectar adversamente la resistencia [5].

El material calcáreo a ser empleado en la fabricación de cementos portland con filler debe cumplir con ciertos requisitos químicos. La norma IRAM 1593:94 requiere un contenido mínimo de CaO, expresado como carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>) ≥ a 75 %. Así cuando se habla de filler, se hace referencia exclusivamente al filler calizo siendo ampliamente utilizado debido a su disponibilidad natural, así como a sus ventajas técnicas y económicas [6]. Sin embargo, en algunos países los depósitos de materia prima no satisfacen este requisito de calidad [7] por lo que otras fuentes de carbonato están en el foco de la investigación [8]. La dolomita (CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>) puede reaccionar con el Ca(OH)<sub>2</sub> producido durante la hidratación del cemento portland y formar CaCO<sub>3</sub> (calcita) y Mg(OH)<sub>2</sub> (brucita). La formación de brucita se asocia a un proceso de expansión y agrietamiento que deteriora las estructuras constituidas con agregados dolomíticos. Sin embargo, cuando están presentes en la solución de poros otros iones, como Al o Si, el curso de la reacción es modificado y se forma otro producto de hidratación [7].

En esta línea de investigación se aborda la estabilidad del filler dolomítico en diferentes medios alcalinos y su interacción con adiciones activas que proporcionan cantidades variables de alúmina y sílice, modificando el rumbo del Mg en la reacción de dedolomitización.

## Metodología

El filler dolomítico (D) se dispersó en distintos medios: agua (H), solución de hidróxido de calcio (CH) y solución de agua de poro (AP = 0,45M KOH + 0,15M NaOH) en proporción 1:100. Los ensayos se realizaron a 40 °C para acelerar la disolución de los carbonatos durante 14 días. Transcurrido ese tiempo, el sólido fue separado del líquido por filtración y se identificaron los compuestos sólidos mediante FT-IR. De igual manera, los sistemas, filler dolomítico + metacaolín (D-MK) y filler dolomítico + humo de sílice (D-HS) en proporción 1:1 se dispersaron en H, CH y AP en proporción 1:100. Luego de 14 días a 40 °C, se identificaron los minerales presentes en el sólido filtrado mediante FT-IR.

## Resultados preliminares

La composición química de D, MK y HS determinada mediante XRF indica que el contenido de CaO expresado en CaCO<sub>3</sub> en D (54,6 %) es menor que el establecido por la norma IRAM 1593 para ser utilizado como filler para el reemplazo parcial de cemento. El MK aporta cantidades importantes de Al y Si (41,55 y 57,48 %, respectivamente); mientras que el HS aporta una elevada cantidad de Si (98 %).

En la Figura 1 se presentan los espectros FT-IR de los sólidos filtrados cuando D permaneció en los diferentes medios. En todas las muestras puede observarse una ancha banda centrada en 3430 cm<sup>-1</sup> que puede ser atribuida al modo de estiramiento H-OH del agua enlazada o al agua absorbida en la superficie [9], mientras que la resonancia a 1644 cm<sup>-1</sup> se asigna al modo de deformación de la unión H-OH [10-12]. Cuando el medio es H en los espectros se observan bandas combinadas en 3020 y 2626 cm<sup>-1</sup>. La dolomita, D, que posee una estructura similar a la calcita, C, se asigna en base al grupo CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> con sus bandas ligeramente desplazadas. Esto es una pequeña banda en 1815 cm<sup>-1</sup>, una fuerte banda en 1431 cm<sup>-1</sup> correspondiente a  $\nu_3$  del grupo CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, dos pequeñas bandas entre 1100-1000 cm<sup>-1</sup>, una banda en 885 cm<sup>-1</sup> que se asigna al  $\nu_2$  del mismo grupo, y la correspondiente a  $\nu_4$  a 728 cm<sup>-1</sup>. Cuando el medio es CH, las bandas combinadas y la banda en 1815 cm<sup>-1</sup> son más evidentes que en H. La banda en 1431 cm<sup>-1</sup> se

presenta con una mayor intensidad y con un pico más ancho respecto al medio H. Se observa el crecimiento de C ( $2514\text{ cm}^{-1}$ ) y la aparición de un pico agudo en  $3690\text{ cm}^{-1}$  que es indicativo de un entorno rígido de la estructura de brucita, B, [13]. El proceso de dedolomitización no se completa por el agotamiento del CH en la solución. En AP, las bandas combinadas son prácticamente imperceptibles. La banda en  $1431\text{ cm}^{-1}$  se presenta más aguda e intensa en comparación con la muestra almacenada en CH, debido al estiramiento asimétrico del vibrador  $\nu_3$  C-O, y la fuerte absorción en  $875\text{ cm}^{-1}$  característica de la vibración de deformación fuera del plano del enlace O-C-O,  $\nu_2$ , del grupo carbonato, que se asignan a la C. La presencia de C también se confirma por la banda típica y muy aguda en  $712\text{ cm}^{-1}$ , correspondiente a la deformación en el plano de enlace O-C-O,  $\nu_4$ . Como en el medio CH, se observa la presencia de B en  $3690\text{ cm}^{-1}$ , generada como consecuencia de la reacción de dedolomitización.

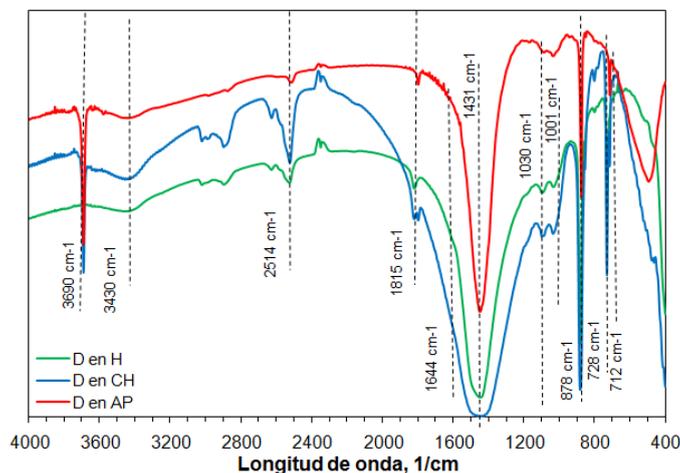


Figura 1 – FT-IR de D en H, CH y AP a  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  durante 14 días.

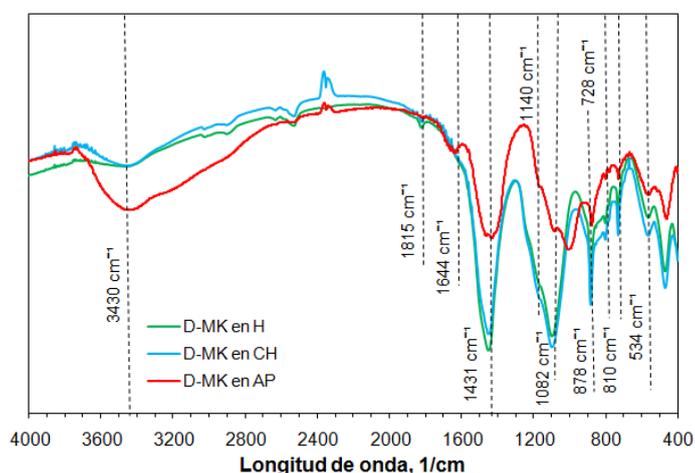


Figura 2 – FT-IR de D-MK en H, CH y AP a  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  durante 14 días.

La Figura 2 muestra los espectros FT-IR de los sólidos del sistema D-MK en los diferentes medios. Cuando el medio es H, las bandas relacionadas con las vibraciones de unión Si-O del MK en el rango  $1200\text{--}400\text{ cm}^{-1}$  no sufren cambios [14], y las bandas de D también permanecen inalteradas. Cuando el medio es CH, se observa la disminución del pico en  $1431\text{ cm}^{-1}$  asignado a la D. La banda de absorción en  $3430\text{ cm}^{-1}$  resulta más evidente que en el medio H. Vanderlaan et al. demostraron que las bandas en el rango entre  $3700$  y  $3000\text{ cm}^{-1}$  son características de la formación de hidroxicarbonatos de aluminio y magnesio amorfo [13]. Esta observación coincide con lo reportado por Grey & Ragozzini [9] quienes determinaron que en el espectro FT-IR la B presenta un pico muy agudo en  $3690\text{ cm}^{-1}$ , la hidrotalcita (Ht) presenta un pico ensanchado en  $3530\text{ cm}^{-1}$  y estructuras intermedias, llamadas hidroxicarbonatos, presentan bandas poco definidas en rangos intermedios, indicando un estado altamente desordenado. Cuando el sistema se encuentra en presencia de AP, la banda ancha en  $3430\text{ cm}^{-1}$  se hace más evidente. La disminución de los picos en  $1431$  y  $728\text{ cm}^{-1}$  asignados a la D es mayor que en el CH. Esto puede ser atribuido a que los iones  $\text{Mg}^{2+}$ , producto de la descomposición de la D, junto a los aluminatos, aportados por el MK, formaron fases del tipo hidroxicarbonatos amorfo. En  $1632\text{ cm}^{-1}$  aparece un hombro que se debe en gran parte al agua libre absorbida por el hidroxicarbonato de aluminio y magnesio [13]. La disolución de la sílice amorfa del MK se manifiesta por la desaparición de banda a  $1082\text{ cm}^{-1}$ , lo que indicaría que los enlaces Si-O se rompen bajo la influencia de la solución alcalina. La aparición de un pequeño pico en  $1140\text{ cm}^{-1}$  indicaría que la alúmina presente reaccionó con la sílice amorfa del MK formando una red de gel C(A)-S-H [15].

Los espectros FT-IR del sistema D-HS en los diferentes medios se muestran en la Figura 3. Cuando el sistema se encuentra en H, las bandas de enlace de la D y del HS se encuentran presentes sin alteraciones. Cuando el medio es CH, no se presentan cambios significativos en el espectro respecto al medio H. Se puede observar un aumento del ensanchamiento de los picos en  $1431$  y  $1120\text{ cm}^{-1}$ , atribuidos a  $\nu_3$  del grupo  $\text{CO}_3^{2-}$  y al modo de estiramiento del enlace Si-O-Si, respectivamente. Cuando el sistema se encuentra en el medio AP, el pico en  $1120\text{ cm}^{-1}$  atribuido al modo de estiramiento del enlace Si-O-Si se corre a valores de longitud de onda más bajos y su banda se ve claramente disminuida. Los picos en  $815$  y  $475\text{ cm}^{-1}$  atribuidos al modo de absorción de vibraciones del enlace Si-O se encuentran ausentes. La aparición de la banda en  $1090\text{ cm}^{-1}$  estaría asociada al crecimiento del C-S-H [16]. La banda de absorción entre  $3700$  y  $3000\text{ cm}^{-1}$  se hace un poco más evidente respecto al medio CH.

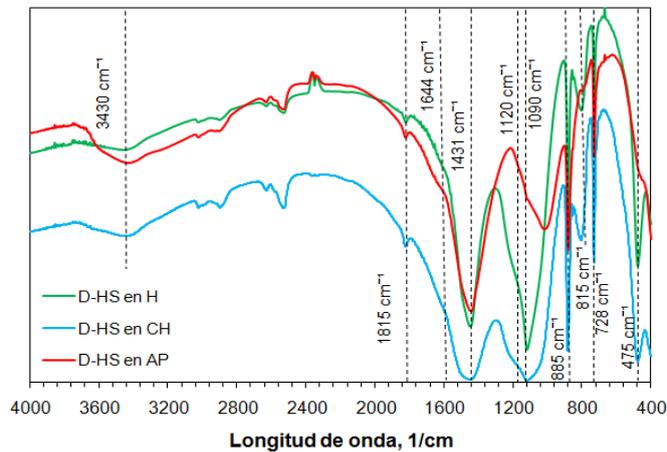


Figura 3 – FT-IR de D-HS en H, CH y AP a 40 °C durante 14 días.

## Consideraciones finales

En base a los resultados preliminares de esta investigación propuesta se puede decir que:

- El filler dolomítico en medios alcalinos sufre un proceso conocido como dedolomitización y en solución de CH y AP se detecta brucita.
- Cuando el filler dolomítico se encuentra en un sistema cementíceo con adiciones que aportan Al y/o Si (como MK y HS) se presenta el proceso de dedolomitización, pero sin la formación de brucita.
- Para corroborar los resultados, morteros de cemento-filler dolomítico están siendo estudiados por un largo periodo en agua de poros para comprobar el cambio de rumbo del Mg en la dedolomitización.

## Referencias

1. Buil M., Paillère A.M., Roussel B. "High strength mortars containing condensed silica fume". Cement and Concrete Research, Vol. 14, N°5, (1984), 693-704.
2. Buil M. "Use of ultrafine fillers in concretes". Bulletin of the International Association of Engineering Geology - Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur, Vol. 14, N°1, (19849), 193-196.
3. Soroka I., Setter N. "The effect of fillers on strength of cement mortars". Cement and Concrete Research, Vol. 7, N°4, (1977), 449-456.
4. Marchetti G., Rahhal V.F., Irassar E.F. "Influence of packing density and water film thickness on early-age properties of cement pastes with limestone filler and metakaolin". Materials and Structures, Vol. 50, N°2, (2017), 111.
5. Bonavetti V. "Cementos con filler calcáreo: mecanismo de interacción y su influencia sobre las propiedades resistentes". Tesis Magister en tecnología y construcciones de hormigón, UNCPBA (1998).
6. Moon G.D., Oh S., Jung S.H., Choi Y.C. "Effects of the fineness of limestone powder and cement on the hydration and strength development of PLC concrete". Construction and Building Materials, Vol. 135, (2017), 129-136.
7. Zajac M., Bremseth S.K., Whitehead M., Ben Haha M. "Effect of  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$  on hydrate assemblages and mechanical properties of hydrated cement pastes at 40 °C and 60 °C". Cement and Concrete Research, Vol. 65, (2014), 21-29.
8. Machner A., Zajac M., Ben Haha M., Kjellsen K.O., Geiker M.R., De Weerd K. "Portland metakaolin cement containing dolomite or limestone – Similarities and differences in phase assemblage and compressive strength". Construction and Building Materials, Vol. 157, (2017) 214-225.
9. Grey I.E., Ragozzini R. "Formation and characterization of new magnesium aluminum hydroxycarbonates". Journal of Solid State Chemistry, Vol. 94 N°2, (1991), 244-253.
10. Ryskin Y.I. "In The infrared spectra of minerals". Farmer, V. C., Ed, (1974), 137-182.
11. Chukanov N.V. "IR spectra of minerals and reference samples data, in Infrared spectra of mineral species". (2014) Springer. 21-1701.
12. Farmer V.C. "Infrared spectra of minerals". Mineralogical society, (1974).
13. Vanderlaan R.K., White J.L., Hem S.L. "Formation of Hydrotalcite in Mixtures of Aluminum Hydroxycarbonate and Magnesium Hydroxide Gels". Journal of Pharmaceutical Sciences, Vol. 71 N°7, (1982), 780-786.
14. Król M., Rożek P., Chlebda D., Mozgawa W. "ATR/FT-IR studies of zeolite formation during alkali-activation of metakaolin". Solid State Sciences, Vol. 94, (2019), 114-119.
15. Kupwade-Patil K., Palkovic S. D., Bumajdad A., Soriano C., Büyüköztürk O. "Use of silica fume and natural volcanic ash as a replacement to portland cement: micro and pore structural investigation using NMR, XRD, FTIR and X-ray microtomography". Construction and Building Materials, Vol. 158, (2018), 574-590.
16. Piqué T.M., Vázquez A. "Uso de Espectroscopía Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR) en el estudio de la hidratación del cemento". Concreto y cemento. Investigación y desarrollo, Vol. 3 N°2, (2012) 62-71.

# LIXIVIACIÓN DE ÁLCALIS DE UNA ROCA CON ALTO CONTENIDO DE ESMECTITA

Lemma Roxana<sup>1</sup>, Viviana Rahhal<sup>1</sup>, Colasurdo, V.<sup>2</sup>, Marfil, S.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería, CIFICEN (UNCPBA-CONICET-CICPBA) - Olavarría, Bs. As., [vrahhal@fio.unicen.edu.ar](mailto:vrahhal@fio.unicen.edu.ar)

<sup>2</sup> Instituto Multidisciplinario sobre Ecosistemas y Desarrollo Sustentable (CIC-UNCPBA) Tandil-FIO

<sup>3</sup> Dpto. de Geología, Universidad Nacional del Sur. CGAMA-CIC. Bahía Blanca, Bs. As.

Palabras Clave: Arcilla, esmectita, tratamiento térmico, lixiviación, álcalis.

## Introducción

La cocción de arcillas para su incorporación como material cementíceo suplementario (SCM) a los cementos es una alternativa cada vez más difundida a nivel mundial y nacional. Las ventajas de su uso van desde la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> al ambiente [1] y del consumo de energía, hasta el incremento de la producción de cemento sin tener que fabricar más clinker, manteniendo su desempeño [2]. Esto hace que la incorporación de adiciones sea una buena solución desde el punto de vista ecológico y económico; como así también tecnológico, dado que el uso de adiciones minerales es indiscutido en una gran cantidad de obras civiles

A su vez, es conocido que la presencia de alto contenido de álcalis en el cemento junto a agregados potencialmente reactivos, puede desarrollar la reacción álcali-sílice [3]. Las esmectitas en su composición contienen sodio, calcio, magnesio, etc. como iones de intercapa, los cuales tienen una alta capacidad de intercambio catiónico. Por lo tanto, es necesario estudiar si los mismos se pueden lixiviar o no al medio para analizar su potencial participación en una reacción de estimulación o deletérea.

Es por eso que, en este trabajo, se estudió el comportamiento de la lixiviación de álcalis de una roca con alto contenido de esmectita, tratada a distintas temperaturas, en un medio neutro y un medio alcalino, a distintas edades.

## Materiales y metodología

Se estudió una roca con alto contenido de esmectita, en particular montmorillonita, junto a otros componentes minoritarios como cuarzo y yeso. Para determinar la temperatura óptima para el tratamiento, y su composición mineralógica, se realizaron análisis termo gravimétricos y difracción de rayos X (DRX). Para ello se utilizó un equipo DTA-TG-SDT TA Q600 y un difractómetro Rigaku D-Max IIIC con radiación de Cu K $\alpha$  y monocromador de grafito, operado a 35 kV y 15 mA respectivamente. Su densidad de 2,48 g/cm<sup>3</sup> se obtuvo a través del Volumenómetro de Le Chatelier. La muestra se molió en un molino de bolas hasta conseguir un valor de retenido en el tamiz N°325 compatible con el requisito establecido en la norma IRAM 1654 para puzolanas.

Para estudiar la evolución de la lixiviación de álcalis se utilizó la muestra en estado natural (E-0) y tratada a 300 y 600°C (E-3 y E-6). Las muestras se colocaron en una relación agua/arcilla = 5 en dos soluciones con diferente pH, una con pH neutro compuesta por agua destilada (N) y una alcalina con pH>13 compuesta por una solución saturada de cal (A), pretendiendo simular la alcalinidad del hormigón. Obteniéndose así las combinaciones N E-0, N E-3, N E-6, A E-0, A E-3 y A E-6, según la temperatura de cocción y el tipo de solución utilizada. Las muestras se mantuvieron en estufa a 40°C hasta las edades de ensayo que fueron 2 y 28 días para las muestras en medio neutro y 6 horas y 2, 7 y 28 días para las muestras en medio alcalino.

La concentración de sodio y potasio del agua de contacto se determinó por medio de un fotómetro de llama Zeltec ZF240 y la concentración de calcio del agua de contacto por titulación con ácido etilendiaminotetraacético.

## Resultados y discusión

En la figura 1a se muestra los resultados del análisis térmico gravimétrico (DSC-TG) de la arcilla y, en la figura 1b, los diagramas de rayos X de la muestra en estado natural y tratada a 300 y 600°C, con la identificación de los compuestos presentes y mostrando su evolución con la temperatura de cocción.

En el gráfico del DSC-TG, se puede observar el primer máximo en 85,51°C, que corresponde a la pérdida de agua adsorbida en la superficie de la arcilla, el segundo máximo (en 122,7°C) se debe a la transformación de yeso a basanita. El máximo producido a 464,67°C es ocasionado por la eliminación de agua de los espacios interlaminares. Y, por último, el máximo que se produce a 652,05°C se encuentra asociado al fenómeno de deshidroxilación [4].

En los difractogramas, las reflexiones correspondientes a cuarzo y feldespatos se mantienen presentes a lo largo de todo el proceso de cocción. Por otra parte, la intensidad de los picos de montmorillonita decrecen con el aumento de la temperatura y comienzan a desplazarse hacia la derecha debido a la modificación de la estructura. Por último, las reflexiones de yeso desaparecen a los 300 °C.

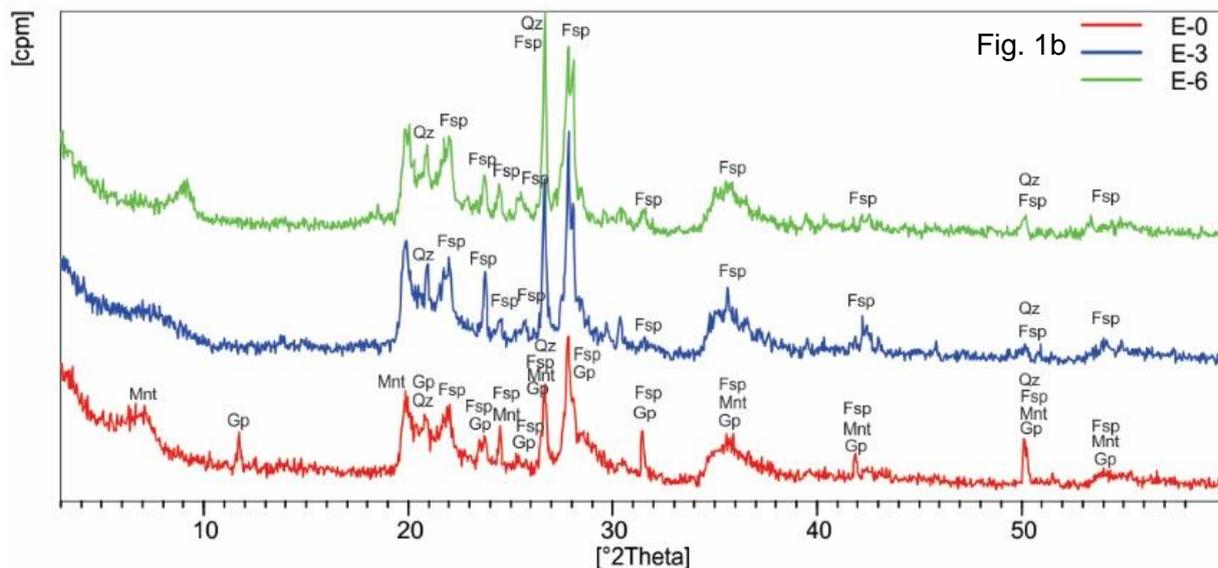
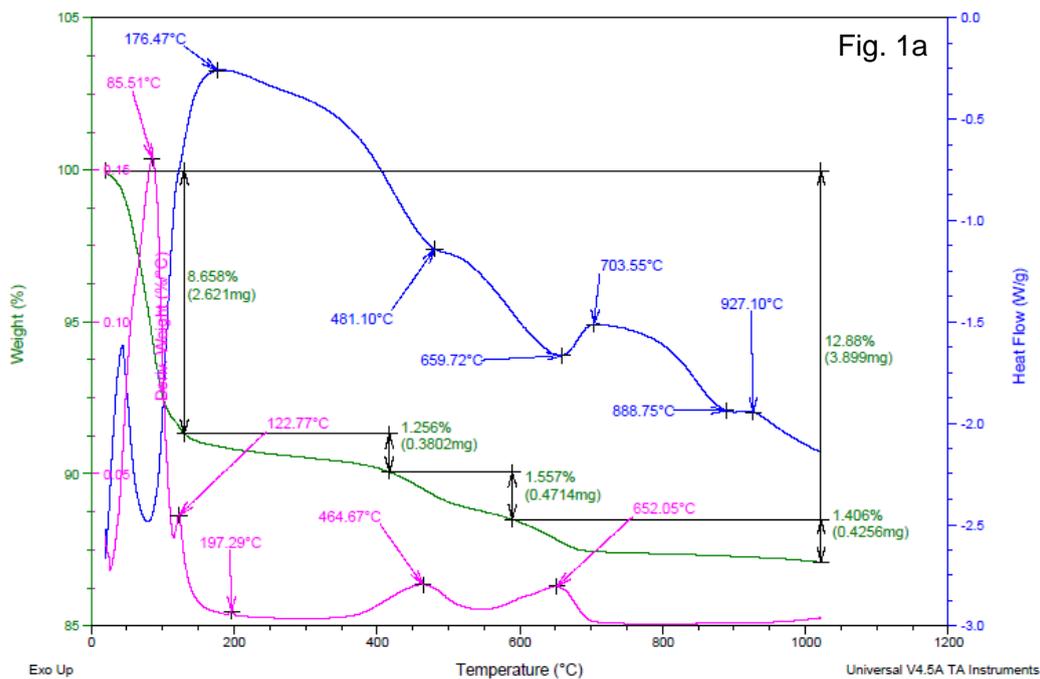


Figura 1: a) Análisis térmico y b) Diagramas de DRX para la muestra en estado natural y tratada a 300 y 600 °C. Mnt.: Montmorillonita, Gp.: Yeso, Qz.: Cuarzo y Fsp.: Feldespatos.

En la figura 2 se muestra la variación de las  $[Na^+]$  y  $[K^+]$  en la solución con el tiempo. En ella se aprecia que, en general, el comportamiento de las muestras en medio neutro se mantiene en el tiempo, ya sea para los valores de concentración de sodio como de potasio. Además, las muestras sin tratar y tratadas a 300°C presentan los mismos valores (~29,0 mM/L para  $[Na^+]$  y ~0,07 mM/l para  $[K^+]$ ); sin embargo, la muestra tratada a 600°C lixivia menos sodio y más potasio que las antes mencionadas.

Por otra parte, las concentraciones de sodio y potasio en medio alcalino muestran una acelerada disminución inicial, hasta los 7 días, y luego, se mantiene en los valores cercanos a los obtenidos en medio neutro.

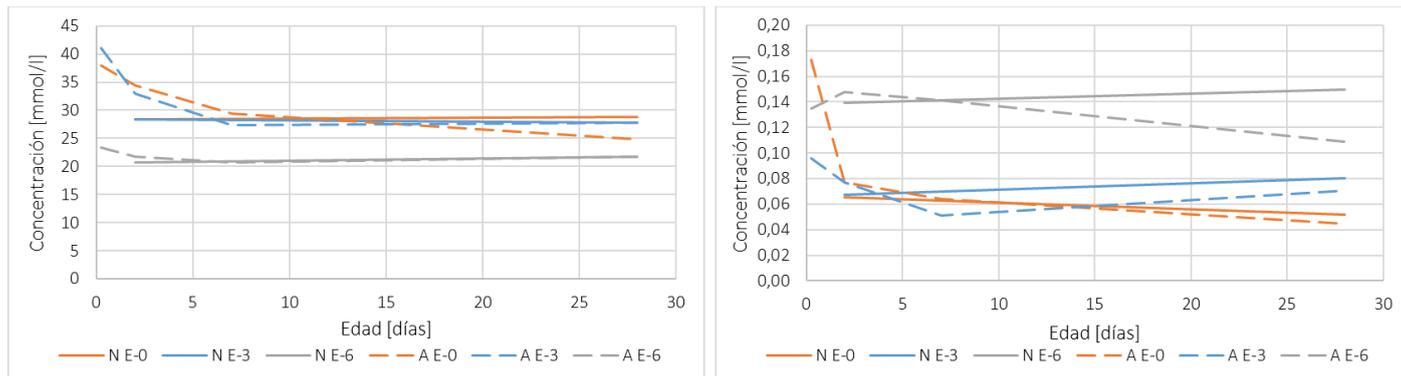


Figura 2: a) Concentración de sodio y b) Concentración de potasio.

Los resultados de las mediciones de la  $[Ca^{2+}]$  a medida que aumenta la edad se muestran en la figura 3. Se puede apreciar, que en las muestras en medio neutro hay una leve disminución en la concentración de calcio en el tiempo. Pero, en las muestras en medio alcalino hay una elevada concentración inicial de calcio, debido al hidróxido de calcio incorporado a la solución, que luego disminuye rápidamente hasta los 7 días, edad a partir de la cual se igualan a los valores de las muestras en medio neutro.

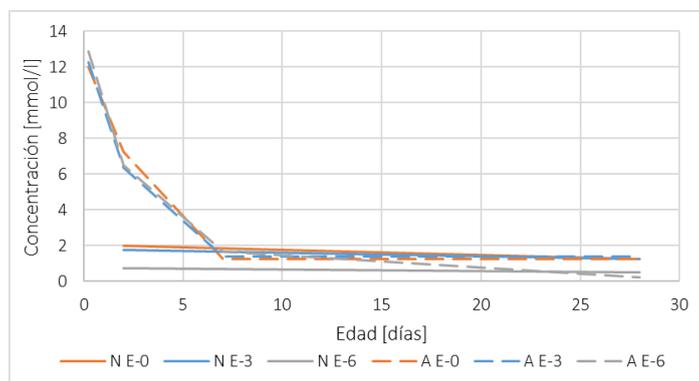


Figura 3: Concentración de calcio.

Por otra parte, tanto en medio neutro como en medio alcalino, las muestras sin tratar y tratadas a  $300^{\circ}C$  se mantienen con los mismos valores, pero la muestra tratada  $600^{\circ}C$  presenta menor concentración de calcio a 28 días, tanto en el medio neutro como en el alcalino.

## Conclusiones

En base a los resultados de los estudios realizados sobre una roca con alto contenido de esmectita, se puede concluir que:

- Las muestras lixivian **sodio y potasio** en forma similar, tanto en medio neutro como alcalino.
- Las muestras sin tratar y tratadas térmicamente a  $300^{\circ}C$  presentan un comportamiento inverso, en cuanto a su lixiviación de **sodio y potasio**, respecto de las muestras tratadas a  $600^{\circ}C$  tanto para medio neutro como para medio alcalino
- La concentración de **calcio** en las muestras en medio neutro no presentan una variación apreciable, pero en medio alcalino se produce una disminución inicial rápida de la concentración para todas las muestras alcanzando, la tratada a  $600^{\circ}C$ , valores cercanos a cero a los 28 días.

## Referencias

- [1] ACI Committee 232, "Report on the use of raw or processed natural pozzolans in concrete", (2012).
- [2] Scrivener K.L., John V.M., Gartner E.M., "Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low- $CO_2$  cement-based materials industry", Cement and Concrete Research. 114 (2018) 2–26.
- [3] Drolet, C., Duchesne, J., Fournier, B., "Validation of the alkali contribution by aggregates to the concrete pore solution". Cement and Concrete Research. 98 (2017) 10-23.
- [4] Vargas Rodríguez Y. M., Gómez Vidales V., Vázquez Labastida E., García Bórquez A., Aguilar Sahagún G., Murrieta Sánchez H., Salmón M., "Caracterización espectroscópica, química y morfológica y propiedades superficiales de una montmorillonita mexicana". Revista mexicana de ciencias geológicas. 25 (2008) 135-144.

# ADSORCIÓN DE COMPUESTOS VEGETALES A LA ARMADURA COMO MÉTODO DE PROTECCIÓN FRENTE A LA CORROSIÓN

Natalia Delbianco<sup>1,2</sup>, Carla Priano<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Becaria de doctorado CONICET*

<sup>2</sup> *Departamento de Ingeniería, UNS*

Palabras Clave: corrosión, extractos, plantas, enlace, capa protectora.

## Antecedentes

La vida útil de una estructura de hormigón armado expuesta a corrosión es función del tiempo hasta la despasivación del acero, de la velocidad de corrosión y de la habilidad de la estructura a resistir el ataque [1]. Resulta casi imposible evitar el proceso de corrosión, pero sí resulta factible su control en el tiempo. En este contexto surgen los inhibidores de corrosión que tienen como objetivo reducir la velocidad de corrosión y mantener su valor debajo de un límite tolerable. Según la ISO 8044:2020 [2], los inhibidores de corrosión son sustancias químicas que, cuando están presentes en un sistema de corrosión en concentraciones adecuadas, reducen la velocidad de corrosión, sin cambiar significativamente la concentración de ningún agente corrosivo. El inhibidor de corrosión por excelencia es el ion hidróxido, presente en la solución de poros, ya que promueve la formación de una capa pasiva estable de óxido sobre la superficie del acero. Sin embargo, para ambientes con una alta agresividad, esta protección no alcanza y resulta necesario incorporar inhibidores de corrosión. Estos aditivos se comenzaron a estudiar y utilizar hace ya varias décadas, como los nitritos, cuya primera referencia data de la década de 1950 [3]. El nitrito de calcio genera una reducción en la velocidad de corrosión, inclusive cuando la relación entre cloruros y nitrito es elevada. Este efecto sobre la corrosión se logra sin afectar las propiedades del hormigón. Esta sustancia ha demostrado su efectividad en varios países. Sin embargo, en Europa sólo existen pocos casos de uso debido a recientes regulaciones ambientales combinadas con la preocupación sobre su toxicidad [4]. Desde un punto de vista tanto legal como financiero, la compatibilidad de los químicos usados en la industria de la construcción está convirtiéndose en eje central. Por esto, los aditivos que se consideren tóxicos o dañinos deben ser reemplazados debido a regulaciones ambientales. Además, ya que el hormigón puede ser demolido, se plantean inquietudes sobre el uso de productos en las mezclas de hormigón que no sean amigables con el ambiente, lo que pueden convertirlo en un residuo peligroso con altos costos de disposición.

Los productos a base de plantas están siendo foco de atención porque son una fuente rica en antioxidantes y, además, no son tóxicos, son biodegradables y abundantes en la naturaleza. Estos materiales contienen compuestos como alcaloides, flavonoides, taninos, ácidos fenólicos, etc., con muchos mecanismos diferentes de interacción con metales que pueden utilizarse con fines industriales. Además, las moléculas que contienen átomos con pares libres de electrones, como el oxígeno, nitrógeno y sulfuro, se utilizan frecuentemente en procesos metalúrgicos para interactuar con metales [5]. Extractos de banana [6], café [7], pimienta negra [8], entre otros, fueron ensayados en medios ácidos como inhibidores solubles de la corrosión del acero. Diferentes compuestos de Aloe vera actúan como buenos inhibidores de la corrosión en metales [9] y en hormigón armado [10]. El orégano (*Origanum vulgare*) presenta una importante actividad antioxidante *in vitro* [11] y ha demostrado inhibir la corrosión del acero de bajo contenido de carbono [12].

Existen variedad de trabajos que analizan el poder anticorrosivo de los extractos vegetales (EV) en solución, donde se estudia electroquímicamente el comportamiento frente a la corrosión. Un ejemplo es el artículo de Herrera-Hernández et al. [10] que analiza un gel de Aloe Vera. Por el contrario, se ha encontrado escasa bibliografía que informe el efecto *in situ* de estos compuestos naturales, una vez incorporados al hormigón. Asipita et al. [13] analizaron el tratamiento con *Bambusa Arundinacea* de una mezcla de hormigón (resistencia a la compresión de 30 MPa y *a/c* 0,45) durante 360 días de exposición, y demostraron que evitó la corrosión en la superficie del acero. Eyu et al. [14] compararon el efecto anticorrosivo de *Vernonia amigdalina* con nitrito de calcio y de sodio, y concluyeron que el grado de reducción de la velocidad de corrosión del acero fue mayor para el compuesto vegetal que para los nitritos. Roselli et al estudiaron el extracto acuoso de yerba mate para ser incorporado en pinturas anticorrosivas [15]. Dichos autores concluyen que los extractos en sí reducen la velocidad de corrosión y que es posible incorporarlos a una pintura con resultados prometedores. En trabajos previos de los autores [16,17], en los que se analizaba el poder anticorrosivo de los compuestos vegetales, se observó la presencia de una capa negra sobre el acero en estudio, la cual no estaba compuesta por óxidos, según difracción de rayos X. En este contexto, surgió la necesidad de investigar en profundidad la composición de esta capa protectora y su mecanismo

de protección. En esta revisión bibliográfica se analiza la información disponible acerca de dicho mecanismo de control de corrosión de los EV.

## Discusión

El estudio del efecto inhibitor de compuestos naturales en la corrosión de armaduras forma parte de un plan de tesis doctoral de uno de los autores del presente trabajo. Extractos acuosos de orégano y yerba mate demostraron un efecto anticorrosivo sobre acero en solución [16, 17]. Sobre la superficie del acero que estuvo en contacto con los EV, se observó la formación de una capa oscura (negro azulado) adherida al acero, con un grosor suficiente como para cubrir las marcas del pulido realizado (Figura 1).



Figura 1- Acero con 500x en microscopio óptico expuesto a una solución corrosiva a) sin extractos, b) con extracto de orégano y c) con extracto de yerba mate.

Torres et al. [18] analizaron el cactus deshidratado (*Opuntia Ficus Indica*) usado como aditivo en hormigón armado, en diferentes concentraciones y observaron la formación de una capa superficial más densa en la superficie del acero. Pradipta et al. [19] también encontraron la presencia de dicha capa, mediante el ensayo de resistencia a la polarización y luego la confirmaron mediante inspección visual y microscópica.

Varios autores [20, 21] explican que los EV están formados por una amplia variedad de compuestos orgánicos, los cuales contienen heteroátomos como fósforo, nitrógeno, sulfuro, oxígeno, que se combinan con los iones del metal, a través de sus pares libres de electrones. La disponibilidad de estos últimos para formar enlaces en las moléculas del inhibidor, facilita la transferencia de electrones desde el inhibidor hacia el metal, y forman un enlace covalente. El grado de adsorción química en la superficie del metal depende de la cantidad de dichos electrones del grupo funcional del inhibidor [22]. Este enlace genera películas protectoras en la superficie del metal que previenen la corrosión. Es por esto que el efecto inhibitor de los EV se atribuye a la adsorción sobre la superficie del metal de las sustancias orgánicas antioxidantes presentes en los extractos, formando una película compacta que funciona como barrera. Diferentes compuestos químicos presentes en los EV pueden reaccionar con el hierro (Fe). Este último, primero se disuelve de la superficie liberando electrones y quedando como ion, para luego formar un complejo con los compuestos vegetales [Fe-EV] [23, 27]. En la Figura 2 se observa un esquema del compuesto formado. La película protectora se genera a partir de este enlace, que bloquea los sitios activos. La existencia de este complejo hierro-extracto fue comprobado por Abdel-Gaber et al. con un espectrómetro de rayos UV visible [28]. Por otra parte, Oguzie [29] ha sugerido que las moléculas orgánicas adsorbidas físicamente se unen al metal en cátodos locales y se impide la reacción catódica, mientras que las moléculas adsorbidas químicamente protegen las áreas anódicas. Una variable muy importante a considerar para este enlace es el pH de la solución, ya que las características de la capa formada dependen de este parámetro. Hider et al. [30] reportan que, a pH ácidos, se observa un compuesto azul y violeta y, por sobre este rango de valores de pH, se observan compuestos con colores amarillos y naranjas. Otro aspecto interesante que pudieron encontrar es que, el tipo de ion hierro que se une al fenol depende del pH y el color del compuesto generado está relacionado con dicho tipo de ion hierro que se une al fenol. Es decir, los compuestos azulados contienen  $Fe^{2+}$  y, los compuestos anaranjados,  $Fe^{3+}$ .

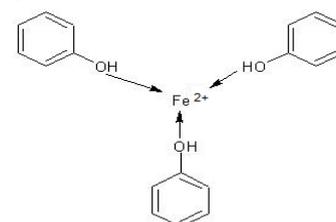


Figura 2- Compuesto [Fe-EV]

## Proyección

En general, los trabajos presentes en la bibliografía analizan las propiedades de inhibición de los extractos vegetales en soluciones ácidas. Para estudiar el caso de la corrosión del acero embebido en el hormigón, se debe considerar una situación completamente diferente, ya que la solución de poros tiene un

pH alcalino y la situación real no sólo es el contacto directo de los inhibidores con el acero desnudo en solución, sino también la interacción con la matriz de hormigón de forma física y química. Los estudios realizados hasta la actualidad son la base para profundizar el conocimiento de las variables involucradas y poder analizar en detalle la corrosión en hormigón armado. A futuro, está proyectado estudiar y caracterizar la capa observada en los ensayos y avanzar en el conocimiento del mecanismo de acción de los extractos utilizados. Además, se prevén ensayos de corrosión en hormigón armado con los compuestos en la mezcla para verificar su perfil de inhibidores de corrosión y analizar su eficiencia.

## Referencias

- [1] Tuutti K., "Corrosion of Steel in Concrete", Doctor, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, (1982), 468 p.
- [2] ISO 8044:2020, "Corrosión de metales y aleaciones – Vocabulario", 5, ISO, 29. (2020).
- [3] Moskwin V., Alekseyev S., "Beton i Zhelezobeton", J. Impact, 2,21, (1958).
- [4] Elsener, B., "Corrosion inhibitors for steel in concrete. State of the art report", 35, Maney Publishing, (2001), 74 p.
- [5] Nobahar A, Dias Carlier J., Graça Miguel M., Clara Costa M., "A review of plant metabolites with metal interaction capacity: a green approach for industrial applications.", Biometals, 34, (2021), 761–793.
- [6] Ji G., Anjum S., Sundaram S., Prakash R., "Musa paradisica peel extract as green corrosion inhibitor for mild steel in HCl solution.", Corrosion Science, 90, (2015), 107–17.
- [7] Vasconcelos Torres V., Salgado Amado R., Faia de Sá C., Lopez Fernandez T., da Silva Riehl C., Guedes Torres A., "Inhibitory action of aqueous coffee ground extracts on the corrosion of carbon steel in HCl solution.", Corrosion Science, 53, (2011), 2385-92.
- [8] Raja P., Sethuraman M., "Inhibitive effect of black pepper extract on the sulphuric acid corrosion of mild steel.", Materials Letters, 62, (2008), 2977–9.
- [9] Prato M., Ávila R., Donquis C., Medina E., Reyes R., "Antraquinonas en Aloe Vera Barbadosensis de zona semiáridas de Falcón, Venezuela, como inhibidores de la corrosión.", Multiciencias, 8, 2, (2008), 148-54.
- [10] Herrera-Hernández H et al., "Gel De Aloe-Vera como Potencial Inhibidor De La Corrosión Del Acero De Refuerzo Estructural", Avances en Ciencias e Ingeniería, 6, 3, (2015), 9-23.
- [11] Pérez M., Banek S., Croci C., "Retention of antioxidant activity in gamma irradiated Argentinian sage and oregano.", Food Chemistry, 126, (2011), 121-26.
- [12] Challouf H., Souissi N., Messaouda M., Abidi R., Madani A., "Origanum majorana Extracts as Mild Steel Corrosion Green Inhibitors in Aqueous Chloride Medium", Journal of Environmental Protection, 7, (2016), 532-44.
- [13] Asipita, S., Ismail, M., Abd Majid, A., Majid, Z., Abdullah, C., Mirza, J., "Green Bambusa Arundinacea leaves extract as a sustainable corrosion inhibitor in steel reinforced concrete", Journal of Cleaner Production, 67, (2014), 139-46.
- [14] Eyu D. G., Esah H., Chukwuekezie C., Idris J. and Mohammad I., "Effect of green inhibitor on the corrosion behaviour of reinforced carbon steel in concrete", Journal of Engineering and Applied Sciences, 8, 5, (2013), 326-32.
- [15] Roselli S., Bogdan S., Deyá C., Romagnoli R., "Inhibidor anticorrosivo eco-amigable para recubrimientos acuosos protectoras del acero: *Ylex paraguayensis* (Yerba mate)", Avances en Ciencias e Ingeniería, 7, 3, (2016), 65-72.
- [16] Delbianco N., Pérez M., Flamini D., Priano C, Ortega N.F., "Estudio de extracto de yerba mate y orégano como posibles inhibidores de corrosión del acero en el hormigón armado", IV Congreso Nacional de Ciencia y Tecnología Ambiental, (2019), 6 p.
- [17] Delbianco N., Priano, Pérez M., Ortega N. F., "Efecto de extractos de orégano y yerba mate sobre la superficie del acero ADN 420", IX Congreso internacional y 23° Reunión técnica de la AATH, (2020), 8 p.
- [18] Torres Acosta A., Martínez Molina W., Lomelí Gonzalez M., Pérez Gallardo A., "Adiciones en base a cactus como inhibidor de corrosión para acero de refuerzo en concreto", Secretaría de comunicaciones y transportes, 328, (2010), 90 p.
- [19] Pradipta I., Kong D., Tan J., "Natural organic antioxidants from green tea form a protective layer to inhibit corrosion of steel reinforcing bars embedded in mortar", Construction and Building Materials, 221, (2019), 351-62.
- [20] Sangeetha M., Rajendran S., Muthumegala T.S., Krishnaveni A., "Green corrosion inhibitors-An Overview", Zaštita Materijala, 52, 1, (2011), 3-19.
- [21] Abdullah Dar, M., "A review: plant extracts and oils as corrosion inhibitors in aggressive media", Industrial Lubrication and Tribology, 63, 4, (2011), 227-33.
- [22] Chauhan, L., Gunasekaran, G., "Corrosion Inhibition of Mild Steel by Plant Extract in Dilute HCl Medium" Corrosion Science, 49, (2007), 1143-61.
- [23] Gunasekaran G., Chauhan L., "Eco friendly inhibitor for corrosion inhibition of mild steel in phosphoric acid medium", Electrochimica Acta, 49, (2004), 4387-95.
- [24] Orubite K., Oforka N., "Inhibition of corrosion of mild steel in HCl solutions by the extracts of leaves of *Nypa fruticans* wurmb", Materials Letters, 58, 11, (2004), 1768-72.
- [25] El-Etre A., "Natural honey as corrosion inhibitor for metals and alloys. I. Copper in neutral aqueous solution", Corrosion Science, 40, 11, (1998), 1845-50.
- [26] El-Etre A., Abdallah M., "Natural honey as corrosion inhibitor for metals and alloys. II. C-steel in high saline water", Corrosion Science, 42, 4. (2000), 731-38.
- [27] El-Etre A., "Inhibition of acid corrosion of aluminum using vanillin", Corrosion Science, 43, 6, (2001), 1031-39.
- [28] Abdel-Gaber, A., Abd-El-Nabey, B., Sidahmed, I., El-Zayady, A., Saadawy, M., "Inhibitive action of some plant extracts on the corrosion of steel in acidic media", Corrosion Science, 48, 9, (2006), 2765-79.
- [29] Oguzie E., "Evaluation of the inhibitive effect of some plant extracts on the acid corrosion of mild steel", Corrosion Science, 50, 11, (2008), 2993-98.
- [30] Hider R., Mohd-Nor A., Silver J., Morrison I., Rees L., "Model Compounds for Microbial Iron-transport Compounds. Part I. Solution Chemistry and Mossbauer Study of Iron(ii) and Iron(iii) Complexes from Phenolic and Catecholic Systems" Journal of the Chemical Society, Dalton Transactions, 2, (1981), 609-22.

# **CARACTERIZACIÓN DE HORMIGONES, MORTEROS Y AGREGADOS**

# EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN, PENETRACIÓN DE AGUA Y PERMEABILIDAD AL AIRE DE MORTEROS REGLAMENTARIOS.

Carolina Domizio<sup>1</sup>, Graciela Maldonado<sup>1</sup>, Luis Fernández Luco<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Mendoza, CeReDeTeC

<sup>2</sup> Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería, INTECIN

Palabras Clave: morteros, permeabilidad, resistencia, penetración de agua, durabilidad.

## Introducción

Es necesario el estudio de la durabilidad de los morteros, sobre todo por problemas de patologías debido a la presencia de agua y sales, que en su combinación los deterioran [1][2]. Se tomaron las dosificaciones propuestas en los reglamentos CIRSOC 501-2007 [3], INPRES-CIRSOC 103-III-2016 [4] y Código de Construcciones Sismorresistentes de la Provincia de Mendoza de 1987 (CCSR'87) [5], y se realizaron los ensayos de resistencia a compresión, penetración de agua y permeabilidad al aire.

Los resultados obtenidos permiten observar las diferencias entre distintas dosificaciones y tipos de materiales cementantes; y en función de la obra a construir (según su localidad, clima, napas de agua muy superficiales, etc), se puede elegir una dosificación adecuada, asociada al problema de humedad ascendente o descendente.

## Metodología

Los morteros ensayados fueron realizados en volumen en laboratorio, en una hormigonera de 60 litros de capacidad, y según las dosificaciones que se muestran en la Tabla 1. El reglamento IC 103-III-2016 y CIRSOC 501-2007 establecen las tres mismas calidades y dosificaciones de morteros según sea su resistencia: Elevada, Intermedia y Normal; pero solo en el IC 103-III-2016 especifica la resistencia a compresión mínima a 28 días. Los morteros de calidad elevada y normal concuerdan con las dosificaciones 3 y 2 del CCSR '87, respectivamente. La dosificación 1 del CCSR '87 no se tuvo en cuenta.

Tabla 1: Dosificaciones en volumen para morteros, según CIRSOC 501-2007, IC 103-III-2016 y CCSR '87.

Partes de			CIRSOC 501, IC 103-Parte III: Calidad resistente	CCSR' 1987	f'c 28 días (MPa)
Cemento	Cal	Arena			
1	-	3	Elevado (E)	3	15
1	0.5	4	Intermedio (I)	-	10
1	1	6	Normal (N)	2	5
0.25	1	3	-	1	-

Durante el proceso de elaboración de las mezclas, se tomó nota del agua necesaria para que tuvieran una consistencia adecuada, en aplicación como revoques. Los materiales que se utilizaron, de amplia disponibilidad en el Gran Mendoza, fueron: arena gruesa, y como materiales aglomerantes, cementos CPP30 y CPC40, y cal aérea hidratada. En estado fresco se midió la consistencia en la mesa de sacudidas, según la norma IRAM 1570-1994 [6] y se calculó la relación agua/cemento. (En probetas cúbicas de mortero de 7cm de lado se realizaron ensayos de resistencia a compresión a 28 días (Figura 1.a); y en probetas cilíndricas de 150 mm de diámetro y 120 cm de alto se hizo primero la determinación de permeabilidad al aire (Figura 1.b y c) y luego el ensayo de penetración de agua, según la norma IRAM 1554-1983 [7] (Figura 1.d).



Figura 1 – Ensayos en probetas de morteros: a) resistencia a compresión, b) y c) permeabilidad al aire, d) penetración de agua

## Resultados

En la Tabla 2 se muestran los resultados de los distintos ensayos mencionados en la sección anterior, según las dosificaciones y tipos de cementos utilizados.

Tabla 2: Resultados de los ensayos.

TIPO DE CEMENTO	DESIGNACIÓN ENSAYO	Relación a/c	Consistencia (%)	ENSAYOS		
				f'c 28 días (MPa)	Perm. Aire kT ( $10^{-16}$ m <sup>2</sup> )	Penetr. Agua (mm)
CPP30	CPP30 1:3	0.75	35	18.70	0.33	20
	CPP30 1:0,5:4	1.07	32	8.67	0.20	33
	CPP30 1:1:6	1.62	30	5.43	6.64	49
CPC40	CPC40 1:3	0.77	34	19.53	0.23	37
	CPC40 1:0,5:4	0.91	24	13.53	0.27	43
	CPC40 1:1:6	1,25	25	8.15	3.86	56

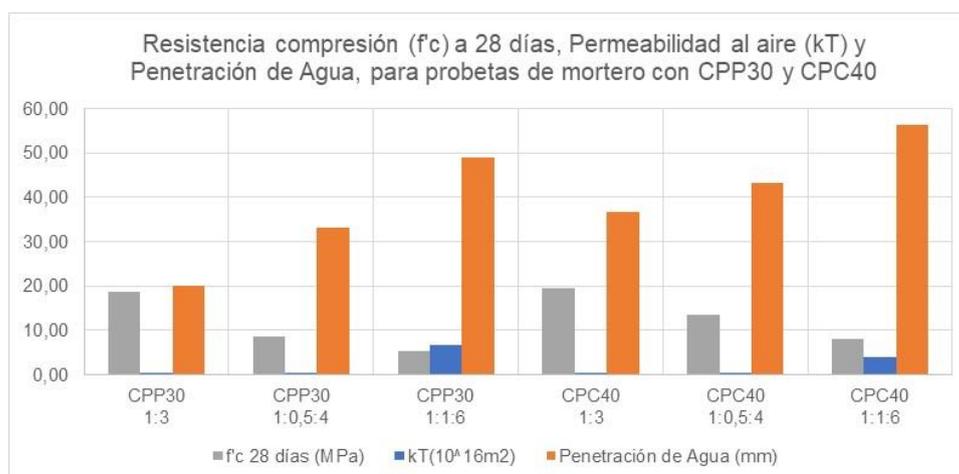


Figura 2 – Gráfico con los resultados de los ensayos de resistencia a compresión, permeabilidad al aire y penetración de agua

De los resultados obtenidos, y según la Figura 2, se observan que las resistencias a compresión en todos los casos superan los 5 MPa, que el reglamento IC 103-III-2016 establece como resistencia mínima. Los morteros de clase elevada y normal, cumplen con los límites reglamentarios de 15 y 5 MPa, respectivamente; pero el mortero de clase intermedia confeccionado con CPP30 tiene una resistencia menor al mínimo reglamentario de 10 MPa. Los morteros con CPC40 cumplen todos los valores exigidos de resistencia mínima de acuerdo al reglamento.

La permeabilidad al aire es moderada (valores entre 0,1 y  $1 \times 10^{-16}$  m<sup>2</sup>) en los morteros de resistencia elevada e intermedia, en cambio el mortero de resistencia normal, tiene valores de permeabilidad alta (valores entre 1 y  $10 \times 10^{-16}$  m<sup>2</sup>) [8].

El CIRSOC 201-2005 [9] establece por cuestiones de durabilidad, 50 mm como valor máximo y 30 mm de valor promedio máximo de penetración de agua para hormigones; en comparación con los valores obtenidos para los morteros, el de calidad elevada presenta resultados menores al valor máximo mencionado, en un 60% y 25% en morteros realizados con CPP30 y CPC40, respectivamente. Los morteros de calidad normal superan los 50 mm de penetración de agua, pero en los de calidad intermedia mantiene sus valores por debajo de ese límite.

## Conclusiones

A partir de los resultados mostrados en la sección anterior, se puede observar que los morteros con mayor cantidad de cemento tienen mayor resistencia a compresión, menor permeabilidad al aire y menor penetración de agua; y entre ambos cementos, los morteros realizados con CPC40 tienen mayores valores respecto a los confeccionados con CPP30 a los 28 días.

La incorporación de cal y el aumento también de la proporción de arena, disminuye la resistencia a compresión y aumenta la penetración de agua de los morteros; la permeabilidad al aire en dosificaciones de calidad elevada e intermedia son similares, pero sube un rango en las dosificaciones normales.

Los morteros realizados con CPP30 en todas sus dosificaciones, tienen menor profundidad de penetración de agua con respecto a las mismas dosificaciones elaboradas con CPC40; sin embargo, la permeabilidad al aire es menor en los morteros realizados con CPC40.

Los morteros con dosificación 1:3 (calidad elevada, cementicios puros) tienen mayor impermeabilidad al aire y al agua, respecto de las otras dosificaciones reglamentarias; no son aconsejables para revoques de muros que tengan problemas de humedad ascendente o descendente porque pueden sufrir daños y afectar a su durabilidad.

## Referencias

- [1] Domizio M.C., Maldonado N. G., Pablo M., Fernández Luco L., Affranchino G. (2016) "Incompatibilidad de morteros en la puesta en valor patrimonial: un caso de estudio". 21 RT AATH. 28-30/09/2016, Salta, Argentina.
- [2] Domizio M., Maldonado N., Fernández Luco L. (2018) "Evaluación de morteros para la puesta en valor de mampostería patrimonial". 22 Reunión Técnica de la AATH - 5 al 9 de Noviembre de 2018, Olavarría, Argentina.
- [3] Reglamento CIRSOC 501-2007. Reglamento Argentino de Estructuras de Mampostería.
- [4] Reglamento IC 103-Parte III-2016. Reglamento Argentino para Construcciones Sismorresistentes. PARTE III - Construcciones de Mampostería.
- [5] CCSR'87. Código de Construcciones Sismorresistentes de la Provincia de Mendoza, 1987.
- [6] Norma IRAM 1570-1994. Morteros para mampostería. Determinación de la consistencia – método de escurrimiento.
- [7] Norma IRAM 1554-1983. Hormigón de Cemento Portland. Método de determinación de la penetración de agua a presión en el hormigón endurecido.
- [8] Fernández Luco L., Torrent. R., Castillo A. (2010) "La medición in situ de la permeabilidad al aire: una herramienta para el diagnóstico y el control de calidad de ejecución". VI CINPAR. 2 al 4 de Junio de 2010, Córdoba, Argentina.
- [9] Reglamento CIRSOC 201-2005. Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón

# HORMIGON REFORZADO CON FIBRA DE VIDRIO (GRC): APLICACIONES EN FACHADAS

Fernando Rubiano <sup>1</sup>, Darío Campos <sup>2</sup>, Pablo Stumpf <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Av. Vélez Sarsfield 1600. Córdoba, Argentina.

<sup>2</sup> Astori Estructuras S.A. – Av. Piero Astori 1500. Córdoba, Argentina.

<sup>3</sup> Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Av. Vélez Sarsfield 1600. Córdoba, Argentina.

Palabras Clave: Hormigón, fibra de vidrio, fachadas, premoldeado.

## Introducción

En este trabajo se presenta el estudio experimental desarrollado en el Departamento de Calidad de la empresa Astori Estructuras S.A. y en el Laboratorio de Estructuras de la Universidad Nacional de Córdoba con el fin de desarrollar hormigones reforzados con fibra de vidrios (Glassfiber Reinforced Concrete-GRC) y determinar su comportamiento para revestimientos en edificaciones habitacionales.

Es importante destacar que las construcciones edilicias presentan la adaptación correspondiente para la combinación con estructuras de acero galvanizado llamados bastidores, con sus anclajes hacia la losa, viga o columna y la placa de GRC premoldeada en fábrica, unida a los bastidores previamente definidos, llamándose todo este conjunto "STUD FRAME".

El GRC es un material prefabricado del tipo pesado compuesto por cemento portland, arena de sílice, agua, aditivos y fibra de vidrio álcali resistente que se proyecta mecánicamente.



Figura 1 – Fachada de edificación de GRC

En lo que respecta a normativa, en Argentina se encuentra para la tecnología y propiedades del hormigón el reglamento INTI-CIRSOC 201.2005, la cual no especifica consideraciones o parámetros sobre el hormigón reforzado con fibras de vidrio, por lo que puede utilizarse como referencia la norma española UNE-EN-1170\_GRC.

En el desarrollo del producto GRC se procedió en dos fases, la primera a escala de laboratorio con probetas de acuerdo a la normativa externa y en una segunda fase con ensayos industriales a escala real. Los ensayos de la primera fase son: ensayo simplificado a flexión (EN 1170-4), ensayo completo a flexión (EN 1170-5) y determinación de la absorción de agua por inmersión y determinación de la densidad seca (EN 1170-6). Por otro lado, a escala real ensayos de carga estáticos y dinámicos, e impactos blando y duro.

## Metodología

El control de calidad es un procedimiento que se realiza a cada uno de los materiales que hacen al hormigón y después a la combinación del mismo, ya sea en estado fresco o endurecido. Para este último, se confeccionan probetas de GRC que tienen dimensiones de: 20 cm de largo, 5 cm de ancho y 1 cm de espesor. Dicho control tiene las características de prevención de errores y validación del material mediante procedimientos planteados por la norma española UNE.

Como se planteó en la introducción, la UNE describe diferentes ensayos para realizarle al GRC en sus dos estados. Alguno de ellos son: "flexión completa según (EN 1170-5)" y "absorción y densidad



Figura 2 – Ensayo de flexión completa según EN 1170-5

según (EN 1170-6)”, ambos ensayos en estado endurecido. En la figura 2 se muestra el ensayo a flexión completa.

Se registraron cada uno de las mediciones realizadas y valores obtenidos, siguiendo la UNE. Dichos datos se transcribieron en planillas. Se puede observar un resumen de resultados en la Tabla 1.

Tabla 1: Resultados de un Ensayo de Flexión Completa según EN 1170-5

REF. PLACA	FECHA ENSAYO	EDAD	DIMENSIONES [mm]			LIMITE PROPORCIONAL				ROTURA			
			LONGITUD	ANCHO	ESPESOR	Carga FLOP [daN]	Tension $\sigma$ LOP [Mpa]	Flecha $\Delta$ LOP [mm]	Deformacion $\epsilon$ LOP [mm/mm]	Carga FMOR [daN]	Tension $\sigma$ MOR [Mpa]	Flecha $\Delta$ MOR [mm]	Deformacion $\epsilon$ MOR [mm/mm]
B1-1	29/07/2021	30D	205,00	49,50	11,40	25,50	7,10	0,32	0,00	71,70	20,00	5,20	0,01
B1-2			207,00	49,90	11,50	20,90	6,20	0,35	0,00	77,80	23,30	6,80	0,01
B1-3			201,00	50,10	11,90	22,90	7,40	0,31	0,00	61,30	19,90	4,40	0,01
B1-4			203,00	50,30	11,20	21,70	7,00	0,35	0,00	79,10	25,40	5,80	0,01
T1-1	29/07/2021	30D	205,00	49,90	10,90	21,50	6,60	0,30	0,00	66,10	20,10	5,00	0,01
T1-2			206,00	49,80	10,50	20,70	6,10	0,30	0,00	71,10	21,10	6,10	0,01
T1-3			203,00	50,10	11,10	29,60	8,30	0,40	0,00	65,90	18,50	4,20	0,01
T1-4			201,00	50,20	10,50	22,30	6,50	0,33	0,00	68,90	20,20	6,30	0,01

Una vez realizado el control en probetas lo siguiente es comenzar con la fabricación del “STUD FRAME”, el cual consta de un bastidor de acero galvanizado y el GRC como se mencionó antes. Al bastidor se lo diseño y calculó para soportar su propio peso, el peso del GRC y algún otro material (ej.: balcón con vidrio de cerramiento), y el anclaje que tendrá que sostener al elemento estructural del edificio.

Luego se fabricó la placa de GRC que previamente se diseñó un molde con la forma, textura, color y acabado que requiera. Estos moldes que contendrán al mortero en su estado fresco, deben tener una superficie tal que no deje poro alguno en la superficie del GRC, a menos que el cliente lo requiera. Luego con una pistola spray se proyectó una primera capa de mortero cementicio quedando cuasi adherido al molde, ya que al molde debe colocarse un desmoldante para luego desmoldar el material en estado endurecido. Llegado a obtener unos 3mm aproximados del mortero, se proyectó ahora el mortero más la fibra de vidrio que con la misma pistola, expulsando simultáneamente ambos materiales y eligiendo el largo de la fibra ya que la misma pistola contiene cuchillas que corta a la misma fibra. Para obtener un producto denso, se lo compacta con rodillos luego de cada pasada, hasta lograr 1 cm de espesor.

Una vez fabricada la placa y desmoldada correctamente se la unió en conjunto con el bastidor, formando así una sola pieza llamada STUD FRAME. A esta placa también se le hizo una serie de ensayos en su escala real para simular posibles eventos que afectarían al conjunto de la pieza. Gracias a la colaboración del Laboratorio de Estructuras (UNC) se logró hacer una serie de ensayos donde se pudo apreciar cómo se comporta la Placa de GRC mediante cargas estáticas y dinámicas.

En dicho laboratorio se montó la placa antes mencionada para que simule su estado real el día que se encuentre ya colocada en la edificación. Hay una serie de ensayos que simulan su estado de servicio en el futuro, alguno de ellos es: impacto blando, que se simularía el golpe de un hombre golpeando la placa de GRC accidentalmente por realizar mantenimiento en el edificio; impacto duro, simula una tormenta de granizo donde el mismo golpea concentrado en los puntos que se requieran, ya sea GRC o vidrio.



Figura 3 – Prototipo escala real placa GRC, bastidor y vidrio balcón.

En la figura 3 se visualiza un prototipo en escala real de STUD FRAME para una fachada de edificio que consta de: GRC, bastidor y vidrio balcón. Este conjunto se encuentra anclado a una losa prefabricada que simula ser la losa de un balcón del edificio, para luego una vez montado se realicen los ensayos antes mencionados.

La finalidad de este conjunto de ensayos y controles de calidad tanto de probetas como del prototipo en escala real es para una torre emblemática que se encuentra en construcción en Capital Federal, Buenos Aires, Argentina. Dicha torre estará revestida con STUD FRAME desde las losas de cada nivel, como punto de vinculación estructura-fachada.



Figura 4 – Edificio L'Avenue Libertador

Como se ilustra en las figuras 3 y 4, dicha fachada tiene una forma especial con partes rectas y otras curvas lo cual es algo novedoso en revestimientos de hormigón ya que no es tan fácil conseguir esos resultados. La gran ventaja que tiene este tipo de fachadas con GRC es que ofrece alternativas y soluciones sin límites dando una creatividad arquitectónica.

## Conclusión

Para resumir, este tipo de hormigón es especial ya que logra dar amplia variedad de soluciones en fachadas, tiempos de montaje y la ventaja de ser amigable con el medio ambiente al disminuir los tiempos de producción, son livianos, ahorran el consumo de hormigón, impermeables, flexibles, resistentes a la intemperie, pero sobre todo se logra darle la forma que se desee a través del molde. No cabe duda que es un material que revoluciona la manera de construir con amplias ventajas.

## Referencias

### Libros:

[1] "Ese material llamado Hormigón" 2da impresión, nombre editorial, (año), Cap. 8: hormigón en estado endurecido; Cap. 10: hormigón en estado fresco.

### Páginas Web:

[1]Asociación Internacional de Hormigón Armado con Fibra de Vidrio (GRCA), disponible Online en: <https://www.grca.online> (05/08/2021).

[2]Asociación Internacional de Hormigón Armado con Fibra de Vidrio (GRCA), "Nota técnica 01: Premezcla Pulverizada", "Nota técnica 02: Estándares y pruebas de GRC", "Nota técnica 03: Uso de aditivos en la producción del GRC", "Nota técnica 04: Detalle 3D de elementos de GRC", "Nota técnica 05: Barreras acústicas GRC", "Nota técnica 06: GRC en la construcción de viviendas", "Nota técnica 07: Premezcla autocompactante de GRC", "Nota técnica 08: Especificación de GRC", "Nota técnica 09: La calidad importa", "Nota técnica 10: La apariencia importa", "Nota técnica 11: Fibras de vidrio AR", "Nota técnica 12: Polímeros para GRC", "Nota técnica 13: Tolerancias GRC", disponible Online en: [https://www.grca.online/technical/tech-notes?qclid=Cj0KCQjwv5uKBhD6ARIsAGv9a-y81HLs80rf-T3CxcgXJYLEwtbqim5ii\\_JUMFm5AevHi81fU6fvs4loaAt2xEALw\\_wcB](https://www.grca.online/technical/tech-notes?qclid=Cj0KCQjwv5uKBhD6ARIsAGv9a-y81HLs80rf-T3CxcgXJYLEwtbqim5ii_JUMFm5AevHi81fU6fvs4loaAt2xEALw_wcB) (05/08/2021).

[3]Universidad Politécnica de Madrid (UPM), "MOOC Hormigones: GRC, Fabricación", "MOOC Hormigones: GRC, Durabilidad y Sostenibilidad", "MOOC Hormigones: GRC, Aplicaciones", "MOOC Hormigones: GRC, Propiedades mecánicas", "MOOC Hormigones: GRC, Energía de fractura", disponibles Online en: <https://www.upm.es/> , <https://www.youtube.com/channel/UCNW9djX3St9Wtb-oAsSEtkQ> (01/08/2021).

[4]Astori Estructuras S.A. "Manual de GRC", disponible Online en: <http://www.astoriestructuras.com.ar/grc> (01/08/2021)

### Revistas Electrónicas:

[1]J.P.J.G. Ferreira and F.A.B. Branco, "The use of Glass Fiber-Reinforced Concrete as a structural material", Techniques, (2007), pag 64-73. Disponible Online en:

<https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.454.2982&rep=rep1&type=pdf>.

# POTENCIAL LIXIVIACIÓN DE ÁLCALIS DE MIGMATITAS DE LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES

Paula Pérez Marfil<sup>1</sup>, Francisco Locati<sup>2</sup>, Darío Falcone<sup>3</sup>, Silvina Marfil<sup>1</sup>

<sup>1</sup> CGAMA (CIC-UNS) – Dpto. de Geología (UNS), Bahía Blanca. Prov. de Bs. As. San Juan 670. paulaperezmarfil@gmail.com, smarfil@uns.edu.ar

<sup>2</sup> CICTERRA (CONICET-UNC). Av. Vélez Sarsfield 1611, Córdoba. flocati@unc.edu.ar <sup>3</sup> LEMIT-CICPBA. Calle 52 entre 121 y 122. La Plata. durabilidad@lemit.gov.ar

Palabras Clave: lixiviación, álcalis, RAS, solución alcalina.

## Introducción

Para que se produzca la reacción álcali-sílice (RAS) es necesaria la concurrencia de tres factores principales, agregados potencialmente reactivos, humedad elevada y la solución de poro del hormigón debe ser suficientemente alcalina. La concentración alcalina (OH<sup>-</sup>, Na<sup>+</sup> y K<sup>+</sup>) deriva principalmente del cemento, por lo que utilizar variedades de bajo contenido alcalino puede ser una opción para evitar el desarrollo de la RAS. Sin embargo, los álcalis también pueden provenir de otras fuentes como aguas o suelos alcalinos, sales descongelantes, aditivos químicos, materiales cementicios suplementarios, el agua de amasado, como así también de los agregados pétreos (p. ej. [1]). En este último caso, son muchos los antecedentes que dan cuenta sobre la potencial liberación de álcalis por parte de algunos minerales presentes en los agregados pétreos a la solución de poro del hormigón, en especial los feldespatos alcalinos (en mayor medida) y las micas (en menor medida), favoreciendo el desarrollo de la RAS ([2] y referencias allí citadas).

Si bien esta es una problemática que viene estudiándose hace mucho tiempo por diversos autores, aún no existe un método normalizado a nivel internacional para evaluar la potencial liberación de álcalis por parte de los agregados pétreos. Sin embargo, la International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures (RILEM) desde hace algunos años se encuentra trabajando en el desarrollo de un método, conocido como AAR-8 ([3]).

En el presente trabajo se evaluó la potencial lixiviación de álcalis por parte de agregados pétreos provenientes del basamento de las Sierras Septentrionales de la provincia de Buenos Aires mediante el método AAR-8 ([3]), teniendo en cuenta el elevado contenido de feldespatos y micas que contienen las muestras estudiadas.

## Materiales y métodos

Los materiales utilizados corresponden al triturado 0-6 mm de cinco canteras localizadas en proximidades a las ciudades de Olavarría, Azul y Balcarce, denominadas Olp, Opi, Ovm, Ama y Blm, y ubicadas en el basamento de las Sierras Septentrionales de la provincia de Buenos Aires. Estas muestras fueron estudiadas previamente desde el punto de vista petrográfico en la fracción 6mm-20 mm y además se determinó su potencial reactividad mediante ensayos físicos ([4]). Todas las muestras corresponden a una mezcla de migmatitas con tamaño de grano < 3 mm compuestas esencialmente por feldespato potásico, plagioclasa y cuarzo, y cantidades variables de biotita, anfíbol, piroxenos y granate. En menor proporción (20%-30%) aparecen migmatitas similares pero con feldespatos centimétricos. En la Tabla 1 se muestran los resultados de los ensayos físicos obtenidos previamente así como los porcentajes de plagioclasa y feldespato potásico en las diferentes muestras.

Tabla 1. Resultados de ensayos físicos para evaluar la potencial reactividad y porcentajes de feldespatos en la fracción 6mm-20 mm de las muestras estudiadas (adaptado de [4]).

Cantera	Porcentaje de feldespato potásico (Kfs) y plagioclasa (Pl)	Resultados de ensayos físicos*.		
		a) IRAM 1674 [5], b) IRAM 1700 a 38 °C [6], c) IRAM 1700 a 60 °C [6].		
Olp	Kfs: 25%, Pl: 20%	a) 0,024%, b) 0,021%, c) 0,032%		
Opi	Kfs: 20%, Pl: 25%	a) 0,062%, b) 0,014%, c) 0,030%		
Ovm	Kfs: 25%, Pl: 30%	a) 0,033%, b) 0,013%, c) 0,022%		
Ama	Kfs: 20%, Pl: 15%	a) 0,058%, b) 0,018%, c) 0,021%		
Blm	Kfs: 30%, Pl: 30%	a) 0,023%, b) 0,022%, s) 0,055%		

(\*) Según la norma IRAM 1531 ([7]), los límites para calificar a un agregado como potencialmente reactivo son 0,1% a 16 días ([5]), 0,04% a 52 semanas ([6]) y 0,08% a 13 semanas (para agregados de reacción lenta, [6]).

Para determinar el potencial aporte de álcalis por parte de los agregados se aplicó el método RILEM AAR-8 ([3]). Se colocaron 100 gramos de muestra molida, tamizada (4 mm – 2 mm: 10%, 2 mm – 1 mm: 20%, 1 mm – 0,5 mm: 20%, 0,5 mm – 0,25 mm: 25%, 0,25 mm – 0,125 mm: 15%, < 0,125 mm: 10%) y lavada. Se agregaron 400 ml de solución preparada como se describe a continuación:

- a) 28 gramos de NaOH + 2 gramos Ca(OH)<sub>2</sub> en un litro de agua (aprox. 0,7N)
- b) 39,27 gramos de KOH + 2 gramos de Ca (OH)<sub>2</sub> (aprox. 0,7N).

Se colocaron en recipientes plásticos de boca ancha de 500 ml a 38 °C y 60 °C durante 52 semanas. A diferencia del método propuesto por RILEM, en la versión implementada en este trabajo no se tomaron alícuotas intermedias y no se procedió al agitado de los recipientes en períodos intermedios. Solo se tomó una alícuota de 10 ml a las 52 semanas y se procedió a su análisis en el LANAQUI (CERZOS-CONICET-UNS) mediante espectrometría de emisión atómica por plasma de acoplamiento inductivo (ICP-AES), con un equipo Shimadzu simultáneo 9000.

## Resultados

En la Tabla 2 se presentan los elementos lixiviados (Al, Fe, K, Mg, Na y Si) en las soluciones de KOH + Ca(OH)<sub>2</sub> (en adelante KCa) y NaOH + Ca(OH)<sub>2</sub> (en adelante NaCa). Se puede observar que el contenido de Al y Si a 38 °C es muy bajo en ambas soluciones. Sin embargo, la concentración de Si a 60 °C es elevada en ambas soluciones, aunque mayor en la de NaCa respecto de la de KCa. Tanto a 38 °C como a 60 °C, se observa una mayor lixiviación de K en relación al Na, aunque a 60 °C los valores absolutos son más bajos que a 38 °C. Los contenidos de Fe y Mg medidos en ambas soluciones y a ambas temperaturas podrían considerarse como despreciables (< 0,14 mg/L).

La muestra de la cantera Ama produce la mayor liberación de Na a 38 °C y la que menos libera es la Blm. La muestra de la cantera Blm es la que más K libera a 38 °C, mientras que la que menos libera es la Opi. A 60 °C la muestra de la cantera Olp es la que más Na libera y la que menos libera es la Ovm. Finalmente, la muestra de la cantera Ovm es la que más K libera a 60 °C, mientras que las que menos liberan son las Ama y Blm.

Tabla 2. Elementos lixiviados en soluciones de KCa y NaCa a 38 °C y 60 °C.

Muestra	Temp.(C°)	Al (mg/L)	Fe (mg/L)	K (mg/L)	Mg (mg/L)	Na (mg/L)	Si (mg/L)
Blm	38 (KCa)	0,41	0,100	-	< 0,005	23,1	1,14
Olp	38 (KCa)	2,4	0,109	-	0,013	31,2	2,74
Ama	38 (KCa)	2,1	0,106	-	0,012	37,6	2,85
Opi	38 (KCa)	0,48	0,088	-	0,033	32,2	4,56
Ovm	38 (KCa)	4,2	0,116	-	0,005	27,6	6,29
Blm	60 (KCa)	3,1	0,115	-	0,050	41,4	268
Olp	60 (KCa)	7,5	0,135	-	0,033	58,6	207
Ama	60 (KCa)	7,7	0,129	-	0,015	55,1	224
Opi	60 (KCa)	9,6	0,128	-	0,018	56,2	179
Ovm	60 (KCa)	4,1	0,086	-	0,044	39,3	181
Blm	38 (NaCa)	5,0	0,052	156	0,006	-	6,2
Olp	38 (NaCa)	8,3	0,051	124	< 0,005	-	6,9
Ama	38 (NaCa)	6,3	0,046	142	< 0,005	-	8,22
Opi	38 (NaCa)	7,0	0,047	73,4	0,024	-	4,79
Ovm	38 (NaCa)	7,1	0,042	92,2	< 0,005	-	6,11
Blm	60 (NaCa)	6,4	0,068	78,2	< 0,005	-	284
Olp	60 (NaCa)	3,0	0,084	82,5	< 0,005	-	309
Ama	60 (NaCa)	4,1	0,077	78,1	0,014	-	257
Opi	60 (NaCa)	4,9	0,082	84,2	< 0,005	-	205
Ovm	60 (NaCa)	2,4	0,107	89,6	0,009	-	420

En la Tabla 3 se muestran los cálculos realizados según la norma RILEM AAR-8 ([3]), para transformar los valores de K y Na (mg/L) en valores de Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub> liberados (% Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub>), así como la potencial cantidad de álcalis liberables por los agregados por m<sup>3</sup> de hormigón (kg Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub>/m<sup>3</sup>), calculado en base a un hormigón que contenga 1850 kg/m<sup>3</sup> de agregados ([8]).

Tabla 3. K y Na lixiviados expresados como % Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub> y kg Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub>/m<sup>3</sup> a 38 °C y 60 °C.

Cantera	Temp. (°C)/ solución	K (mg/L)	Na (mg/L)	K-Na (mg)	Na <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O <sub>eq</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O <sub>eq</sub>	kg Na <sub>2</sub> O <sub>eq</sub> /m <sup>3</sup> (*)
					liberado (mg Na <sub>2</sub> O/kg)	liberado (mg Na <sub>2</sub> O <sub>eq</sub> /kg)	liberado (% Na <sub>2</sub> O)	liberado (% K <sub>2</sub> O)	liberado (% Na <sub>2</sub> O <sub>eq</sub> )	
Blm	38/KCa	-	23,1	9,24	124,56	619,15	0,01	-	0,06	1,15
Olp		-	31,2	12,48	168,23	561,37	0,02	-	0,06	1,04
Ama		-	37,6	15,04	202,74	652,95	0,02	-	0,07	1,21
Opi		-	32,2	12,88	173,62	406,34	0,02	-	0,04	0,75
Ovm		-	27,6	11,04	148,82	441,14	0,01	-	0,04	0,82
Blm	60/KCa	-	41,4	16,56	223,23	471,16	0,02	-	0,05	0,87
Olp		-	58,6	23,44	315,97	577,54	0,03	-	0,06	1,07
Ama		-	55,1	22,04	297,10	544,72	0,03	-	0,05	1,01
Opi		-	56,2	22,48	303,03	569,99	0,03	-	0,06	1,05
Ovm		-	39,3	15,72	211,91	495,99	0,02	-	0,05	0,92
Blm	38/NaCa	156	-	62,40	751,67	-	-	0,08	-	-
Olp		124	-	49,60	597,48	-	-	0,06	-	-
Ama		142	-	56,80	684,21	-	-	0,07	-	-
Opi		73,4	-	29,36	353,67	-	-	0,04	-	-
Ovm		92,2	-	36,88	444,25	-	-	0,04	-	-
Blm	60/NaCa	78,2	-	31,28	376,80	-	-	0,04	-	-
Olp		82,5	-	33,00	397,52	-	-	0,04	-	-
Ama		78,1	-	31,24	376,32	-	-	0,04	-	-
Opi		84,2	-	33,68	405,71	-	-	0,04	-	-
Ovm		89,6	-	35,84	431,73	-	-	0,04	-	-

(\*)Potencial cantidad de álcalis liberables por los agregados en base a un hormigón con 1850 kg/m<sup>3</sup> de agregados [8].

## Consideraciones y conclusiones

En este trabajo no se encontró buena correlación entre el contenido de feldespatos en las diferentes muestras y los álcalis liberados. Esto podría deberse en parte a que la determinación del contenido de feldespatos se realizó en la fracción 6-20 mm, mientras que los ensayos de lixiviación se realizaron en la fracción 0-6 mm. Sin embargo, la liberación alcalina es un proceso complejo y depende de muchos otros factores, como el tipo de solución en contacto, la composición mineralógica, tamaño de grano y textura del agregado, el tamaño de las partículas de agregado, etc. (p. ej. [2], [8]). Si bien todas las muestras se califican como no reactivas, es importante tener en cuenta que a largo plazo estos agregados podrían aportar cantidades significativas de álcalis a la solución de poro del hormigón (~ 1 kg Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub>/m<sup>3</sup> de hormigón), en especial si son utilizados como agregado fino. Esto es importante en el caso de mezclas con agregados potencialmente reactivos ya que el uso de un cemento de bajo contenido alcalino podría no ser suficiente para inhibir su reactividad. Finalmente, la evaluación de la potencial reactividad de un agregado no solo debe considerar el contenido de sílice reactiva, sino también la potencial liberación de álcalis, en especial en el caso de agregados de reacción lenta que no presentan contenidos significativos de sílice reactiva, y que sin embargo evidencian comportamientos reactivos en estructuras de hormigón (p. ej. [9]).

## Referencias

- [1] Sims I, Poole A, "Alkali-aggregate reaction in concrete: a world review", 1era Ed., CRC Press, (2017), 767 pp.
- [2] Menéndez E, García-Rovés R, Ruiz S, "Alkali release from aggregates: contribution to ASR", Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials, Vol. 169, N° 4, (2016), pp. 206-214.
- [3] Menéndez E, Santos Silva A, Duchesne J, "AAR-8: Determination of alkalis releasable by aggregates in concrete", borrador de febrero de 2018, RILEM TC 219-ACS, (2018), 13 pp.
- [4] Pérez Marfil P, Locati F, Marfil S, Falcone D, "Assessment of the potential alkali-reactivity of slow-reacting aggregates from the province of Buenos Aires, Argentina", Bulletin of Engineering Geology and the Environment, (2019), <https://doi.org/10.1007/s10064-019-01551-w>.
- [5] Instituto Argentino de Normalización y Certificación, "IRAM 1674. Agregados. Determinación de la reactividad alcalina potencial. Método acelerado de la barra de mortero", 1era Ed., IRAM, (1997), 14 pp.
- [6] Instituto Argentino de Normalización y Certificación, "IRAM 1700. Agregados. Métodos para la determinación del cambio de largo en prismas de hormigón, debido a la reacción álcali-agregado", 2da Ed., IRAM, (2013), 16 pp.
- [7] Instituto Argentino de Normalización y Certificación, "IRAM 1531. Agregado grueso para hormigón de cemento. Requisitos y métodos de ensayo", 5ta Ed., IRAM, (2016), 33 pp.
- [8] Drolet C, Duchesne J, Fournier B, "Validation of the alkali contribution by aggregates to the concrete pore solution", Cement and Concrete Research, Vol. 98, (2017), pp. 10-23.
- [9] Soares D, Santos Silva A, Mirão J, Fernandes I, Menéndez E, "Study on the factors affecting alkalis release from aggregates into ASR, 15th International conference on alkali-aggregate reaction in concrete, (2016), 9 pp.

# EVALUACIÓN DE PROPIEDADES DEL HORMIGÓN DEBIDO AL USO DE ADITIVOS HIDRÓFUGOS

**Fernando Rodríguez<sup>1</sup>, Gastón Guajardo<sup>1</sup>, Juan Jalif<sup>1</sup>, Maldonado<sup>2</sup>**

*1 Departamento Ingeniería Civil, Facultad Regional Mendoza, Universidad Tecnológica Nacional, Rodríguez 273, Ciudad, Mendoza, Argentina.*

*2 CeReDeTeC Facultad Regional Mendoza, Universidad Tecnológica Nacional, Rodríguez 273, Ciudad, Mendoza, Argentina.*

Palabras Clave: Hormigón, mortero, hidrófugos, resistencia a compresión, corrosión.

## Introducción

Lo que se busca en la presente investigación, es determinar cómo influye la incorporación de aditivos hidrófugos destinados para morteros cementicios, en las propiedades del hormigón tanto en su estado fresco como endurecido.

El uso de dichos aditivos en la elaboración de hormigones elaborados (fundaciones y sobrecimientos), está en función de las siguientes razones:

- i) La fácil adquisición de estos productos, disponibles en la mayoría de los comercios de la construcción.
- ii) El bajo costo comercial.
- iii) La equivocada idea de que su utilización nos permitirá solucionar problemas asociados a mezclas pobremente diseñadas.

## PROBLEMÁTICA ABORDADA POR LA PROPUESTA

Esta investigación surge debido al uso común de estos aditivos tanto en obras de pequeña como de gran envergadura, aun cuando esto no está fundamentado desde el punto de vista cuantitativo, ni siquiera está recomendado por el propio fabricante.

Su uso queda en función de la experiencia del constructor sin ningún tipo de control con o sin conocimiento de los posibles efectos que pudiesen producirse, es por esto que ante ello se propone llevar a cabo distintas pastonadas de hormigón, las cuales serán elaboradas con distintas relaciones de agua/cemento, sin incorporación de hidrófugo y con la incorporación de dos aditivos hidrófugos de gran venta comercial y amplio uso en obras.

## IMPACTO ESPERADO DE LA PROPUESTA

La implementación del proyecto nos permitirá analizar cómo son afectadas y en qué magnitud las propiedades del hormigón tanto en su estado fresco como endurecido para con ello poder:

- ✓ Determinar y generar propuestas de recomendación a la sociedad ante el uso de los Aditivos Hidrófugos evaluados.
- ✓ Adquirir experiencia en el desarrollo de ensayos e interpretación de los resultados.
- ✓ Evaluar la durabilidad del Hormigón Armado.

## OBJETIVO DEL PROYECTO

Determinar cuál es el impacto en las propiedades del hormigón al incorporarse aditivos hidrófugos no previstos para el mismo, y cuyo uso, está indicado para morteros cementicios.

Para llevar a cabo esto, se elaborarán 9 pastonadas de hormigón con y sin aditivo hidrófugo, y con distintas relaciones agua/cemento. De estas pastonadas se obtendrán las probetas de evaluación, para

poder estudiar el comportamiento del hormigón en su estado fresco y endurecido en función de la medición de las siguientes propiedades:

- Asentamiento, por ser el parámetro en cuanto a la trabajabilidad en su estado fresco se refiere.
- Resistencia a la compresión, por ser el indicador de mayor duración del hormigón endurecido a largo plazo.
- Resistividad eléctrica, porque nos brinda información rápida en cuanto a la posibilidad de aceleración de la corrosión en las armaduras.
- Potencial de corrosión, ya que es el indicador probabilístico de la intensidad de corrosión en las armaduras.

## Metodología

Se confeccionan hormigones con tres distintas relaciones agua/cemento (a/c): 0,55, 0,65 y 0,75, donde se tiene un hormigón de referencia y dos hormigones donde se incorporan los aditivos hidrófugos comerciales indicados como (P) y (S), que son los de mayor uso en la tecnología de obra local.

Se usa un cemento portland puzolánico CPP40, agregado grueso (AG) de tamaño máximo nominal 19 mm y módulo de finura 6,6 y arena lavada como agregado fino (AF) con módulo de finura 3,1. Se utiliza una dosificación en peso 1 : 2 : 3 : a/c (cemento : arena : agregado grueso : relación a/c). El aditivo hidrófugo incorporado se hace con un reemplazo del 10% del agua (h).

Se elaboran 12 probetas de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura (CIRSOC 201, 2005), las que se curan en agua durante 28 días. La mitad de las probetas se usan para los ensayos de resistencia a compresión a 28 y 56 días (IRAM 1546), tres probetas se utilizan para evaluar la resistividad durante 6 meses (UNE 83988-2) y tres probetas incorporan insertos de acero para medir potencial de corrosión (IRAM 738) con equipo CANIN (Figura 2).

Las pastonadas se designan en función de la relación a/c de cada una como P55, P65 y P75.

Las dosificaciones utilizadas y los resultados obtenidos en los ensayos de las probetas se presentan en la Tabla 1.

**Tabla 1:** Dosificaciones utilizadas y resultados de ensayos

Pastonada	Dosificación C: AF: AG: a/c: h	Asentamiento	f'c28	f'c56	Resistividad	Potencial de corrosión
		cm	MPa	MPa	kΩcm	mv
P55	1:2:3:0,55:0	4	18,7	22,2	10,22	
P55s	1:2:3:0,45:0,10	2,5	11,2	14	7,62	
P55p	1:2:3:0,45:0,10	2	15,2	16,3	7,33	
P65	1:2:3:0,65:0	6	18,2	22,3	8,84	
P65s	1:2:3:0,55:0,10	4	13,4	15	7,62	
P65p	1:2:3:0,55:0,10	5,5	16,5	18,2	7,33	
P75	1:2:3:0,75:0	10	12,3	19,5	7,04	-542
P75s	1:2:3:0,65:0,10	7	8,7	13,2	5,91	-509
P75p	1:2:3:0,65:0,10	7,5	10,3	18	6,70	-516

## Conclusiones

Las conclusiones que a continuación se indican, no pretenden ser de carácter general sino que sólo representativo de los hormigones que fueron elaborados y evaluados en el presente proyecto de investigación. Al respecto se puede establecer que:

- En general la incorporación del aditivo hidrófugo ocasionó una disminución del asentamiento de la mezcla, haciendo más consistente a la misma.

- La incorporación del aditivo hidrófugo produjo una disminución en la resistencia a la compresión del hormigón.
- La utilización del aditivo hidrófugo tuvo un efecto entre nulo y levemente contraproducente en los valores finales de resistividad eléctrica medidos.
- En cuanto a las mediciones de potencial eléctrico, la presencia de los aditivos hidrófugos no produjo cambios que puedan considerarse significativos con respecto a la no utilización de los mismos.
- No se recomienda el uso de los aditivos hidrófugos para morteros en la confección de hormigones con función resistente.

## Referencias

- Canin+ (2012). "Operating Instructions, Corrosion Analyzing Instrument". PROCEQ, Switzerland, Suiza
- CIRSOC 201 (2005). "Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón", Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles, INTI, Buenos Aires, Argentina
- INPRES - CIRSOC 103 (2018). "Reglamento Argentino para Construcciones Sismorresistentes. Mampostería", Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles, INTI, Buenos Aires, Argentina
- IRAM 738-1999: Corrosión electroquímica de metales. Estructuras de hormigón armado y pretensado. Método de medición de potenciales espontáneos de armaduras de acero.
- IRAM 1534:2004. Hormigón. Preparación y curado de probetas en laboratorio para ensayos de compresión y de tracción por compresión diametral. Buenos Aires, Argentina, IRAM.
- UNE-83988-2 (2008). "Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la resistividad eléctrica". Parte 2: Método de las cuatro puntas o de Wenner. Madrid, España.

# HORMIGON REFORZADO CON FIBRAS

Elizabeth Fiorella Cuéllar Huamani<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dirección de Infraestructura Ministerio de Salud de la Provincia de Buenos Aires, Argentina.

Palabras Clave: hormigón reforzado con fibras, control de fisuración, tenacidad, resistencia a tracción.

## Antecedentes, interacción matriz-fibra, tipos, y comentarios finales.

Históricamente, las fibras fueron empleadas para reforzar materiales frágiles. Algunos ejemplos de su uso fueron: fibras vegetales en arcilla cocida, y pelos de animales en morteros de albañilería [1].

Luego a principios del año 1900, se empezaron a utilizar fibras de asbesto (amianto) en el hormigón, esto llevó a que para el año 1950 se empiece a introducir el concepto de materiales compuestos en donde el hormigón reforzado con fibras, fue y aun es, uno de los temas que está bajo la lupa debido a los grandes beneficios que le otorga al hormigón en estado fresco y endurecido [2].

Las primeras experiencias de adición de fibras a los materiales destinados a la construcción corresponden a las fibras metálicas. Se conoce como el primer puntapié patente en California 1874 por A. Berard, en el cual el hormigón fue reforzado con acero granular procedente de desechos. Luego, en 1911 Graham M. empleó las fibras metálicas para incrementar la resistencia y estabilidad del hormigón armado convencional. Por otra parte, también G. Martin en el año 1927 en California, adicionaba alambres de acero rizado en el hormigón empleado en tuberías [2].

Con el paso del tiempo, la idea y materialización del uso de fibras en la construcción se fue perfeccionando. A partir del año 1950 se profundiza en la investigación sobre los HRF, principalmente, destacándose los estudios realizados por Romualdi, Batson y Mandel en el año 1963 [1].

Su uso en la industria data en década del '70, siendo empleada para la construcción de losas sobre suelo, particularmente pisos industriales, construcción sobre sustratos de menor calidad y posibilidad de reemplazar las barras de acero convencionales, hormigón proyectado para estabilización de taludes o construcción de túneles. No obstante, debido a la inexistencia de recomendaciones de cálculo estructural, el uso de HRF estuvo mucho tiempo limitado, pudiéndose emplear en función a la determinación de resultados empíricos o recomendaciones particulares de cada productor de fibras [1].

En la actualidad, la aplicación de fibras revoluciona el mercado ya que, otorga ventajas estructurales y constructivas. Además, permite disminuir costos operativos, implicando modificaciones en los cálculos tradicionales de los hormigones sin fibras [3].

El American Concrete Institute **define** el HRF como un hormigón realizado con cementos hidráulicos que contiene agregado fino o fino y grueso y fibras discontinuas. Por otra parte, explicita que las mallas continuas o barras de gran longitud quedan excluidas de la mencionada definición (ACI 544 1R-82-1982) [3].

En el fib Código Modelo 2010 (2012), se indica que HRF es un compuesto caracterizado por una matriz cementicia que incorpora refuerzos con fibras discretas (discontinuas) y que la matriz puede incluir o no agregados gruesos, es decir, puede ser hormigón o simplemente mortero [3].

El hormigón posee una pequeña capacidad de deformación de tracción. En los HRF, el porcentaje de volumen de fibras es menor al 1%, exceptuando casos especiales. La principal acción de las fibras se da una vez iniciada la fisura, los filamentos producen una acción de costura o puente que permite la transmisión de esfuerzos a través de las fisuras y evita o controla su propagación. Dicha transmisión involucra fenómenos de adhesión, fricción y

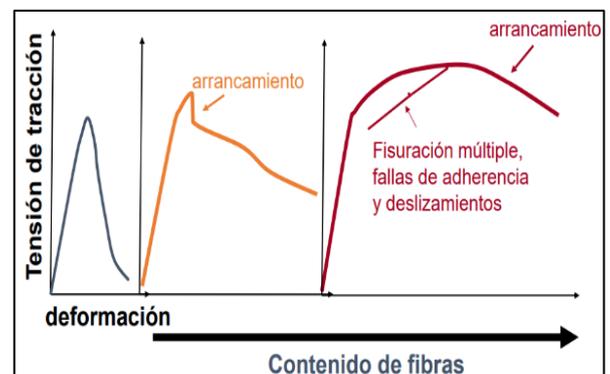


Figura 1 – Efecto del contenido de fibras en la respuesta del hormigón a tracción.

anclaje mecánico. El principal mecanismo de acción, es el arrancamiento/deslizamiento progresivo de las fibras (pull-out), y es poco frecuente que se produzca la rotura de las mismas [4].

Cabe destacar, que la presencia de las fibras en el hormigón, provee capacidad residual en la integridad de la pieza. Al cargar la pieza, una vez aparecida la primera fisura, la misma seguirá absorbiendo energía durante el proceso de cargas por el hecho de que la fisura se encuentra cocida por la fibra. Al incrementar la carga progresivamente, la pieza se seguirá fisurando, hasta localizarse la falla en una fisura principal, y se arranquen las fibras de a poco [4].

Respecto a sus propiedades mecánicas, para que las fibras sean eficientes, su resistencia a tracción y su capacidad de deformación deben ser superiores a la de la matriz [4].

A su vez, la efectividad de las fibras varía en gran medida conforme a la geometría o esbeltez, relación longitud/diámetro (l/d). A modo de ejemplo, la fibra de acero posee usualmente valores entre 50 y 100, con lo cual, para una longitud menor, la pieza fallará por adherencia (pull-out). El hecho de que la fibra este por fallar por adherencia significa que el material se encuentra a su mayor tensión. Si se tiene para un mismo contenido de fibras, mayor esbeltez, habrá mayor adherencia, a costa de que se reduzca la trabajabilidad del hormigón en estado fresco, por ello se las limita a un valor de 100 [3]. La longitud de la fibra (1) aproximadamente deberá ser mayor a 2,5 veces el tamaño máximo del agregado, para que la misma cosa la fisura [4].

$$l \geq 2,5 d_{\text{máx}} \tag{1}$$

Por otro lado, para mejorar la adherencia muchas veces se realizan ganchos en los extremos de las fibras. Conforme se incrementa la cantidad de fibras, aumenta la capacidad residual [3, 5].

Los tipos de fibras que al día de hoy empleados son: las fibras de acero, fibras poliméricas (sintéticas), fibras de vidrio, (tal como se muestran en la Figura 2) a su vez tendrán: micro y macro fibras sintéticas, micro y macro fibras de vidrio, y macro fibras de acero. La tabla 1 describe en forma general algunos de los aspectos relevantes de las fibras [3, 5].

Tabla 1: Características generales de las fibras.

Filamento	Ventajas	Desventajas	% volumen respecto al del hormigón
Acero	No se degradan durante el mezclado.	Baja resistencia a la humedad (corrosión). Pueden provocar manchas de óxido al estar cercanas a la superficie, y reducir la capacidad de carga del HRF si los agentes agresivos atraviesan una zona fisurada.	0,25 - 1
Polimérica (sintética)	Excelente resistencia a la humedad, los ácidos y a los álcalis.	No deben usarse con función estructural en estado endurecido.	≤ 0,2 (Microfibras) 0,2-1 (Macrofibras)
Vidrio	Resistentes al medio alcalino. No son inflamables, y no liberan vapores, ni gases tóxicos a altas temperaturas o bajo la acción del fuego.	Pueden dañarse y perder eficacia ante condiciones de mezclado enérgicas y/o mezclas muy secas con agregados triturados, es importante seguir las recomendaciones del fabricante en este sentido.	5

En el caso de hormigones de alta resistencia (HAR), puede ser beneficioso utilizar mezclas híbridas combinando fibras cortas y largas, esquemáticamente indicado en la Figura 3 [3, 5].

Algunos comentarios finales sobre puntos importantes a tener en cuenta cuando se piensa en utilizar fibras son:

- No es posible generalizar y afirmar, que fibra es mejor que otra, ya que cada una ha sido optimizada en cuanto al material que la compone como su geometría y conformación superficial de forma tal, de contribuir a la mejor performance mecánica del HRF.
- La performance se valora sobre el material compuesto HRF.
- La disposición de las fibras dependerá mucho de cada tipo de fibra, fluidez de la mezcla, proceso de colocación (si es vibrado o no) y dimensiones del elemento estructural.
- Su uso permite reducir espesores, simplificar procesos constructivos y mantener al servicio elementos fisurados que en otros casos habrían acabado su vida útil.
- Con los avances que se llevaron a cabo en el presente siglo, los HRF ofrecen la posibilidad de realizar diversos tipos de obras: **pisos industriales** (mejorando su comportamiento a flexión y reduciendo los efectos de contracción, son ventajas que se suman a las constructivas de seguridad, facilidad y economía de ejecución. Permiten reducir espesores de losa para una misma capacidad. Al reducir el contenido de agua, se reduce la segregación y exudación, con lo cual mejora la calidad superficial), **pisos y pavimentos** (en el caso de hormigones reforzados con fibra de vidrio (HRFV) se minimiza el impacto de las fibras sobre la trabajabilidad de la mezcla y el riesgo de segregación/flotación de las fibras dada su densidad, rapidez del mezclado y distribución homogénea de las fibras en el hormigón), **reparación o refuerzos de antiguos pavimentos** (tales como los conocidos whitetopping, el cual a su vez se subdivide en convencional, delgado y ultra delgado según su espesor. Las fibras permitirán la transferencia de fuerzas ante la presencia de eventuales fisuras, ello permite reducir el espesor del refuerzo e incrementar la vida en servicio), **estabilización de taludes o revestimiento de túneles** (en este caso, el HRF permite reemplazar total o parcialmente las barras de armadura convencional, lo cual reduce las operaciones de montaje, produce efectos positivos sobre el control de contracción y sobrellevar esfuerzos específicos durante las etapas constructivas), entre otros [1,3].



Figura 2 – Fibras metálicas (superior), fibras de vidrio (medio), fibras sintéticas (inferior).

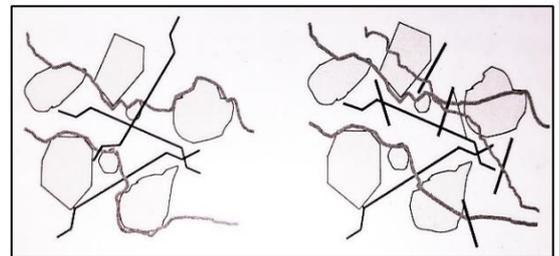


Figura 3 – Formación de fisuras en un HRF, y control ejercido por las fibras de hormigón de resistencia convencional (izquierda), y en otro de la alta resistencia (derecha).

## Referencias

### Revistas Electrónicas:

[1] Zerbino RL, “El hormigón reforzado con fibras y su proyección dentro de la industria de la construcción”, Revista de ingeniería, Nº 153, (2020), páginas 74. Disponible Online en: <http://sedici.unlp.edu.ar/>

### Tesis:

[2] Ramos H., “Aplicación de fibras estructurales a los pilotes CPI 8”, Tesis de maestría, Universidad Politécnica de Cataluña, España, (2012), páginas 77.

### Libros:

[3] Zerbino RL, “Hormigón reforzado con fibras”, Edición Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, año (2020), páginas 323.

### Páginas Web:

[4] Instituto del cemento portland argentino (ICPA) Autor Zerbino RL, “Hormigones reforzados con fibras (HRF)”, disponible Online en: <https://web1.icpa.org.ar/index.php/2019/06/25/hormigones-reforzados-con-fibras/>, (25/06/2019).

[5] Slideshare, “Hormigón con fibras de acero, disponible Online en: <https://es.slideshare.net/Heieneman/msc-20112012-hfibras>, (23/01/2014).

# EFFECTOS DE LAS FIBRAS MICRO- Y MACROSINTÉTICAS SOBRE LAS PROPIEDADES DEL HORMIGÓN DRENANTE

Dayana P. Rautenberg<sup>1</sup>, Ana G. Cressa<sup>1</sup>, Juan Pablo CINGOLANI<sup>1</sup> y Gastón ANGELINO<sup>1</sup>

<sup>1</sup> CINTEMAC (Centro de Investigación, Desarrollo y Transferencia de Materiales y Calidad)

Palabras Clave: hormigón drenante, fibras sintéticas, propiedades mecánicas, propiedades hidráulicas, durabilidad.

## Antecedentes

El crecimiento de la urbanización, que conduce a la mayor impermeabilización del suelo como consecuencia de la pavimentación de calles, aceras y edificios, trae consigo impactos ambientales cada vez mayores que están obligando a la industria de la construcción a buscar alternativas para evitar problemas futuros, tales como inundaciones. Estas superficies cubiertas pueden ocupar el 30% del área de la cuenca de drenaje [1]. Si se considera el coeficiente de escorrentía o escorrentía superficial, según Marchioni et al. [2], las áreas muy densamente construidas pueden tener coeficientes de escorrentía de 0,70 a 0,95, lo que significa que hasta el 95% de la lluvia genera escorrentía superficial.

Según Merighi et al. [3], el hormigón drenante (también conocido como hormigón poroso, hormigón permeable u hormigón sin finos) es una alternativa que puede ayudar en el drenaje urbano y facilitar la infiltración directa de agua en el suelo. Sin embargo, en Argentina, su uso aún se encuentra en las primeras etapas. Por tanto, su aplicación sigue estando restringida, lo que puede explicarse por la ausencia de un conocimiento adecuado en relación al comportamiento mecánico e hidráulico y las posibles aplicaciones de este material por parte de los diseñadores y profesionales en el campo. De acuerdo con las recomendaciones ACI 522R [4], sus usos típicos incluyen: pavimentos de estacionamientos, vías municipales, aceras, áreas peatonales en zoológicos, parques y terrazas de piscinas, entre otros. La ACI (American Concrete Institute) lo describe como un hormigón de grado abierto, de asentamiento cero con poco o ningún agregado fino, un contenido de huecos que varía entre el 18% y el 35% y una resistencia a la compresión entre 2,8 y 28 MPa, con permeabilidad de 0,0135 a 0,122 cm/s. Para la ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), un pavimento drenante en un sitio debe tener una resistencia mecánica a la flexión de al menos 2,0 MPa y una permeabilidad de 0,100 cm/s, sin considerar el requisito de resistencia a la compresión [5].

Rodrigues y Montardo afirmaron que el uso de fibras sintéticas como refuerzos en el hormigón ha crecido en los últimos años en Brasil con el fin de mejorar el rendimiento del hormigón drenante [6]. Varias obras han utilizado fibras sintéticas, incluyendo presas, túneles, puentes, canales de riego, estaciones de tratamiento de aguas y aguas residuales y, especialmente, pavimentos y suelos de hormigón. El polipropileno es químicamente inerte, no absorbe agua, no se oxida, tiene un bajo costo y es de fácil obtención. En este sentido, el uso de fibra de polipropileno es más apropiado que el uso de fibras metálicas debido a la corrosión y la necesidad de mejorar el desempeño de resistencia a la flexión, requisito fundamental para los pavimentos de hormigón.

Muchas propiedades cambian cuando la matriz cementosa se refuerza con fibras, tales como: trabajabilidad, resistencia a la compresión, módulo de ruptura (resistencia a la flexión), resistencia a la tracción directa, resistencia al impacto, resistencia a la fatiga, aumento de la tenacidad, inhibición de la propagación de grietas. Determinar el contenido óptimo es importante para aumentar la eficiencia y la economía, especialmente en lo que respecta a las principales propiedades relevantes para el uso previsto. A la luz de los escasos estudios sobre el comportamiento del hormigón drenante utilizando fibras, los estudios de mezclas de hormigón con varios niveles de fibras cobran mayor importancia, y este es uno de los objetivos de este trabajo.

No se evaluará el comportamiento post-fisuración porque el hormigón drenante tiene un alto contenido de huecos, por lo que es importante estudiar el comportamiento de la principal propiedad mecánica de un material de pavimento. Se sabe, sin embargo, que el comportamiento post-fisuración del hormigón con fibras mejora con fisuras más pequeñas y el probable aumento de la resistencia a la flexión puede explicar este comportamiento. El estudio de fibras sintéticas en hormigones drenantes necesita evaluaciones de comportamiento, que es uno de los objetivos de este trabajo. En este contexto general, este trabajo busca observar y analizar el comportamiento de las propiedades mecánicas e hidráulicas en diferentes mezclas de hormigón drenante con y sin adición de fibras sintéticas.

## 2. Programa experimental

*Variables Constantes:* En función de la dosificación óptima de hormigón drenante se mantiene constante la relación peso de agua/ peso de material cementicio,  $a/mc= 0,28$  [7].

*Variables Estudiadas:* Teniendo en cuenta la baja relación agua/material cementicio y el asentamiento nulo del hormigón drenante en estado fresco y con el objetivo de comprender mejor el comportamiento de la pasta de material cementicio fresca y reducir el número de variables, el presente estudio se ha llevado a cabo a:

- 5 aditivos diferentes que pretenden mejorar de manera independiente las propiedades del hormigón drenante en estado fresco,
- 3 cementos de las marcas disponibles en el mercado local y comercialmente iguales,
- 3 temperaturas diferentes que se mantienen constantes a lo largo de todos los ensayos. Estas temperaturas pretenden abarcar un amplio rango considerando dos temperaturas extremas, 6 y 38 °C representativas de las condiciones de invierno y verano, respectivamente, y una temperatura media o de referencia, 20°C.

### 2.1. Materiales

*Agregado Grueso* calcáreo tipo piedra partida comercialmente identificado como 6-12. La distribución granulométrica del agregado grueso se encuentra dentro de las curvas límites según norma IRAM 1505 e IRAM1627. Se realizaron ensayos para determinar Densidad relativa real, Densidad relativa aparente y Absorción de agua (IRAM 1533), Índice de lajiosidad (IRAM 1687), Densidad a granel y Espacios vacíos (IRAM 1548), Resistencia al desgaste (IRAM 1532) y Factor de cubicidad (IRAM 1681). Los resultados de estos ensayos se están procesando.

*Cemento Portland Compuesto* (con filler calcáreo y puzolana) 40 MPa de las marcas disponibles en el mercado local: CPC40\_A, CPC40\_B, CPC40\_C.

*Aditivos:* Se estudiar los aditivos que se detallan a continuación y la combinación entre ambos, de manera tal de establecer un orden y tiempo de mezclado: Aditivo\_A: plastificante y reductor de agua, para todas aquellas aplicaciones en las que se necesita una moderada velocidad de hidratación del cemento o un tiempo de transporte largo; Aditivo\_B: superplastificante de base acrílica, para lograr buena trabajabilidad en hormigones con baja relación agua/cemento; Aditivo\_C: retardante, para todas aquellas aplicaciones en las que se requiere un altísimo mantenimiento de trabajabilidad; Aditivo\_D: látex de goma sintética, para mejorar la adhesión de pastas/morteros; Aditivo\_E: emulsión a base de agua especialmente combinada con copolímeros, para mejorar las propiedades del hormigón premezclado con características de drenaje

*Fibras sintéticas:* Fibra\_A: polipropileno monofilamento de 18 mm y Fibra\_B: polímericas estructurales de 42 mm.

### 2.2. Procedimientos de ensayo

#### 2.2.1. Métodos de ensayo sobre pastas

Como primera etapa, se realizará un estudio en sobre pasta con el fin de evaluar la compatibilidad entre los aditivos y los cementos o entre la combinación de los aditivos y los cementos, para seleccionar finalmente el/los aditivo/s y el cemento que mejor propiedades aporte a la pasta. Los ensayos que se realizarán son: - *Cono de Marsh (ASTM C939)*. Aspecto estudiado: Fluidez y punto de saturación y Pérdida de fluidez con el tiempo y - *Aparato de Vicat (IRAM 1612 - IRAM 1619 ó BS EN 196-3)*. Con sonda para la determinación de la consistencia normal, aspectos estudiados: Demanda de agua del cemento y Principio de fraguado: Tiempo de inicio de fraguado, Tiempo de final de fraguado y Evolución de la penetración de la aguja de Vicat durante el fraguado.

#### 2.3. Métodos de ensayo sobre hormigones

Los ensayos que se realizarán sobre los hormigones para estudiar la influencia en la incorporación de fibras serán:

- ✓ *Estado Fresco: segregación, exudación* → - Trabajabilidad estático: Hand-Squeeze , Cono de Abrams invertido, Asentamiento - Trabajabilidad dinámico: Remoldeo de VeBe, Mesa de Graf - Unidad de volumen - Contenido de aire incorporado - Tiempo de fraguado - Temperatura.
- ✓ *Estado Endurecido* → - Compresión - Flexión - % vacíos - Percolación - Impacto – Contracción.

### 3. Proyección/Resultados esperados

Las dificultades presentadas durante el año 2020 y 2021 que se relacionan con la situación epidemiológica de la pandemia de COVID-19 y la implementación del aislamiento / distanciamiento social preventivo y obligatorio en el país, condicionó el desarrollo pleno de las actividades experimentales programadas. Por lo que al momento de del envío del presente resumen extendido sólo se pudo avanzar con la caracterización de los materiales.

En cuanto al estudio sobre pastas, con los resultados que se obtendrán, se espera analizar las siguientes hipótesis: ¿la fluidez de las pastas de cemento estudiadas depende de la temperatura? - ¿el punto de saturación determinado en pasta de cemento corresponde a una dosis de aditivo comprendida en el rango establecida por el proveedor? ¿es superior o inferior a la dosis empleada en el hormigón? - ¿el punto de saturación determinado en pasta de cemento depende de la temperatura? - ¿la demanda de agua de las pastas de cemento con aditivo aumenta al aumentar la temperatura? - ¿la incorporación de aditivo disminuye la demanda de agua en función de la dosis a distintas temperaturas? - ¿cómo influye la temperatura en el proceso de fraguado para cada aditivo?, y muchas otras preguntas que surgirán durante los ensayos con el fin de formular criterios de elección de un aditivo (o la combinación de aditivos) y de un cemento que se adapte a las condiciones del proyecto.

Respecto al estudio sobre hormigones, con los resultados que se obtendrán, se espera analizar las siguientes hipótesis: ¿la presencia de fibras en el Hormigón Drenante mejora las propiedades mecánicas? - ¿cómo afectan las fibras a la permeabilidad del hormigón? - ¿el uso de fibras contribuye a una mejora en la puesta en obra de los Hormigones Drenantes? Responder a estas preguntas, nos permitirá adoptar un criterio de elección de fibras.

Como coronario, es fundamental una elección sensible de los materiales en el diseño de los Hormigones Drenantes para garantizar durabilidad, satisfacción en su uso y sostenibilidad del proyecto. La elección de los componentes dependerá de las necesidades de respuesta (mecánica e hidráulica), posibilidad de mantenimiento, tecnología de equipos y materiales disponibles en cercanía a la planta de hormigón o asfalto o al predio del proyecto, y del presupuesto económico asignado al proyecto.

### Referencias

- [1] ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland. Projeto Técnico: Pavimento permeável. São Paulo, 2013.
- [2] MARCHIONI, M.; SILVA, C. O.; VAQUERO Y MAYOR, A. Conceitos e requisitos para pavimentos de concreto permeável. Associação Brasileira de Cimento Portland, São Paulo, 2011.
- [3] MERIGHI, João Virgílio; FORTES, Rita Moura; BANDEIRA, Alex. Estudo de propriedades do concreto poroso aplicado a pavimentação. In: IBRACON, 2006, Rio de Janeiro - RJ. Anais do 48° Congresso Brasileiro do Concreto. São Paulo - SP, 2006.
- [4] ACI 522R-06 – American Concrete Institute. Pervious Concrete. Michigan, 2006.
- [5] ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 16.416: Pavimentos permeáveis de concreto- Requisitos e procedimentos. Rio de Janeiro, 2015.
- [6] RODRIGUES, Públio Penna Firme; MONTARDO, Julio P. A Influência da Adição de Fibras de Polipropileno nas Propriedades dos Concretos para Pisos e Pavimentos. In: IBRACON, 2002, Belo Horizonte - MG. Instituto Brasileiro do Concreto - 44° Congresso Brasileiro. Belo Horizonte – MG, 2002.
- [7] Rautenberg, D. P. (2017). Estudio del Hormigón Permeable como Material de Construcción en Obras Viales - Contribución a la disminución del Impacto Ambiental asociado a la Urbanización [Disertación de grado no publicada]. Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba.

# CARACTERIZACIÓN ESTÁTICA Y AL IMPACTO DE UN HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS PARA SOSTENIMIENTO DE TÚNELES

Juan Carlos Vivas<sup>1</sup>

<sup>1</sup> CONICET. LEMIT - Facultad de Ingeniería Universidad Nacional de La Plata, La Plata, Argentina

Palabras Clave: HRF, Impacto, Hormigón proyectado, Túneles, Caracterización estática

## Introducción

El sostenimiento primario de túneles, es una de las principales aplicaciones del Hormigón Reforzado con Fibras (HRF). No resulta difícil la incorporación de las fibras en la masa de hormigón y estas proporcionan grandes ventajas. Las fibras controlan la fisuración, que por temas de durabilidad es un aspecto muy crítico en este tipo de obras, también ofrecen un mejor control de grandes deformaciones y confieren buena resistencia al impacto. Aunque la eficiencia de las fibras sintéticas para esta aplicación está ampliamente comprobada, por la naturaleza del material, cuyo comportamiento depende de la interacción de todos los materiales componentes, es necesario que ante cada nueva dosificación se verifique el desempeño del compuesto. Por lo general, en la industria tunelera, esta evaluación se realiza mediante *ensayos estáticos* a flexión de paneles [1], de vigas con carga centrada [2] o con carga a los tercios [3], y en ocasiones con el ensayo de doble punzonado (Método Barcelona) [4]. Pero debido a los desprendimientos de terrenos que suelen ocurrir tras el sostenimiento, también interesa verificar la resistencia al impacto. Por tal motivo, considerando que a pedido de la empresa Sika® fueron evaluados hormigones reforzados con macrofibras sintéticas con ensayos estáticos antes mencionados, y que recientemente se ha diseñado en el LEMIT-CIC un nuevo método de ensayo ante impactos aplicable a HRF, también se han evaluado estos hormigones ante esta carga dinámica. En el presente trabajo se presentan los resultados de la caracterización estática y en impacto de los mencionados hormigones y se analizan las correlaciones entre las distintas variables.

## Materiales, mezclas y probetas

Se prepararon dos HRF, ambos con la misma mezcla de base, dosificados de manera tal que tuvieran un asentamiento mayor a 15 cm luego de la adición de las fibras. A los HRF, denominados en adelante P1 y P2, se le adicionaron 4 y 6 kg/m<sup>3</sup> respectivamente de una de uno de los varios modelos de macrofibra sintética de la marca Sika. Con cada mezcla se moldearon tres cilindros de 100x200 mm para los ensayos de compresión, 2 cilindros de 150x150 mm para los ensayos Barcelona y 3 prismas de 150x150x600 mm para los ensayos de flexión e impacto. Todas las probetas fueron compactadas con mesa vibradora, desmoldadas e introducidas en cámara de curado húmedo (temperatura 25°C y humedad relativa 95%) a las 24 h. Después de los 28 días fueron extraídas y dejadas en ambiente de laboratorio por espacio de 4-5 horas, luego se llevaron a cabo los ensayos.

## Metodología de ensayos

Los ensayos de resistencia a la compresión se realizaron en base a lo establecido en la norma IRAM 1546 [5] sobre las probetas cilíndricas de 100x200 mm con placas elastoméricas en sus extremos. Los ensayos de flexión sobre vigas se ejecutaron conforme a la norma EN14651 [2]. Las probetas (prismas de 150x150x600 mm) se dispusieron simplemente apoyados, con una luz libre entre apoyos de 500 mm, habiendo practicado previamente una entalla, mediante aserrado, en el centro de la cara traccionada. A través un transductor tipo clip se mide la apertura en los labios de la entalla (CMOD) y gracias al control de velocidad de dicha apertura, se obtienen la tensión de primera fisura ( $f_L$ ) y las tensiones residuales a las CMOD 0,5 y 2,5 ( $f_{R1}$  y  $f_{R3}$ ), que son los principales parámetros empleados en el análisis. Los ensayos de flexión sobre paneles se ejecutaron en función de la norma BS EN14488 [6]. En este caso las probetas fueron losas de 600x600x100 mm apoyadas en todo su perímetro sobre un marco de acero a luces de 500x500 mm. La carga se aplicó centrada en un área de 100x100 mm a una tasa de deflexión de 0,1 mm/min, hasta alcanzar una flecha de 30 mm, la cual se midió con un transductor de desplazamiento lineal (LVDT) colocado en el centro de la parte inferior de la probeta. De esta prueba se obtienen la carga máxima ( $P_{max}$ ) y la energía absorbida a una flecha de 25 mm ( $E_{25}$ ), calculada como el área bajo la curva Carga-Deflexión. El ensayo Barcelona está normalizado en la UNE83515 [4] y la probeta consiste en un cilindro de 150x150 mm, que se carga en el centro de sus caras circulares a través de dos indentadores cilíndricos de acero de 37,5 mm de diámetro. La velocidad de desplazamiento axial de la máquina es 0,5 mm por minuto y a través de un LVDT fijo a una cadena se mide en todo el ensayo la apertura circunferencial de la muestra. Luego,

en base puntos característicos en la curva carga-apertura circunferencial o carga-desplazamiento axial se analiza el desempeño del HRF. En este trabajo se reportan particularmente la resistencia ( $f_{ct}$ ) calculada a partir de la carga máxima, la resistencia residual para 4 mm de abertura en la deformación radial ( $f_{ct4}$ ), la energía (área bajo la curva) para esa misma abertura ( $E_4$ ) y las resistencias residuales para desplazamientos axiales a partir de la carga pico iguales a 0,5 y 1,5 mm ( $f_{ct0,5}$  y  $f_{ct1,5}$ ).

Finalmente, el *ensayo de impacto* implementado es del tipo drop-weight test, con impactos repetidos y crecientes y ha sido descrito en detalle en [7–9]. Las probetas son prismas de 150x150x300 mm que en el presente trabajo se obtuvieron de las mitades resultantes del ensayo de flexión sobre vigas. Las mismas fueron entalladas en el centro de la cara traccionada a una profundidad de 25 mm y se dispusieron simplemente apoyadas en la maquina de ensayo. El proceso de carga se da conforme a través de un proyectil de masa (m) 5 kg conforme dos fases: en la Fase 1, se proporciona un impacto en cada nivel de altura (h), dejando caer el proyectil, partiendo de 100 mm y con incrementos de 50 mm, hasta que aparezca la fisura. Luego se inicia la Fase 2, donde se proporcionan tres impactos en cada h, iniciando también en 100 mm pero con incrementos entre cada nivel de 100 mm. Luego de cada impacto se mide la abertura de fisura (COD) y en combinación con la energía acumulada ( $E^*$ ), calculada conforme a la Ecuación 1 (donde “n” es el número total de impactos y “g” es la aceleración de la gravedad) se construye la denominada “Curva de Impacto”, de la cual se extraen los principales parámetros resultantes de la prueba, que son: La energía acumulada en el momento de la fisuración ( $E_C$ ), la abertura inicial de dicha fisura ( $COD_C$ ), la energía recibida por la probeta entre el momento de la fisuración y el final de la prueba ( $E_P$ ), la  $V_C$  que es la tasa de fisuración, determinada como la inversa de la pendiente de la Curva de Impacto entre las aberturas 0,5 y 2,5 mm y la energía total ( $E_T$ ), que es la sumatoria de  $E_C$  y  $E_P$ .

$$E^* = \sum_{i=1}^n m \cdot g \cdot h \quad (1)$$



Figura 1. Ensayos de (a) compresión (b) flexión de vigas (c) flexión de paneles (d) Barcelona (e) impacto.

## Resultados, análisis y discusión

En las Tablas 1 y 2 se presentan resúmenes de los resultados de los ensayos estáticos y de impacto para cada serie, se indica el coeficiente de variación (CV). De la misma manera, en la Tabla 2 se presentan los resultados de los ensayos de impacto. Los hormigones presentaron resistencia media a la compresión muy similar, mayor a 30 MPa, siendo ligeramente superior la resistencia de la serie P2 respecto a la P1. La tensión de primera fisura ( $f_L$ ) resultó igual en ambos casos, y la magnitud fue aproximadamente un 10% de la resistencia a la compresión. De igual manera, la tensión  $f_{ct}$  del ensayo Barcelona fue similar en ambas series, pero aproximadamente un 6% de la  $f_c$ . La carga máxima del ensayo a flexión de paneles, también resultaron bastante similares entre series, pero ligeramente mayor la  $P_{max}$  del hormigón P2.

La relación de tensiones residuales en flexión  $f_{R3}/f_{R1}$ , determinadas con el ensayo EN14651[2], fueron: 1,07 para el hormigón P1 y 1,31 para P3, lo cual clasifica estos HRF como d y e respectivamente, en función de lo propuesto por en el *fib* Model Code [10]. Son hormigones con endurecimiento post fisuración y se observa que el aumento de la dosis benefició el desempeño del material. Sin embargo, al comparar los resultados de las  $f_{ct0,5}$  y  $f_{ct1,5}$  del ensayo Barcelona se observa un comportamiento diferente, ya que en ambas mezclas las tensiones descendieron a la vez que se incrementaron las fisuras. Con este método también se observó mejor desempeño del HRF a mayor contenido de fibras.

En cuanto a los parámetros energéticos de los ensayos estáticos, tanto en la flexión de paneles, como en el método Barcelona, a mayor dosis de fibras la energía resultante fue mayor, pero en la flexión de los paneles el incremento fue un 20% mayor.

Es interesante que, así como ocurrió con la tensión de primera fisura ( $f_L$ ) del ensayo de flexión de vigas y el parámetro análogo del ensayo Barcelona ( $f_{ct}$ ), también la energía acumulada hasta la fisura del ensayo de impacto ( $E_C$ ) se mantuvo constante, a pesar del incremento de la dosis de fibra, lo cual sugiere que estos

parámetros dependen principalmente de la resistencia a tracción de la matriz. Al comparar la abertura de fisura inicial  $COD_c$  y las tasas fisuración  $V_c$  de ambas series, también se puede constatar que una mayor cantidad de fibras reduce ambas magnitudes. A través de la energía total ( $E_T$ ), parámetro global de la prueba de impacto, puede verse que, así como sucedió en el caso estático, el aumento de dosis de fibra también mejoró la performance del material, y en los HRF estudiados en este trabajo, la mejora de la  $E_T$  fue proporcionalmente igual a la del  $E_{25}$  (incremento del 53%) y 20% mayor que el incremento presentado entre los valores de la  $E_4$  del ensayo Barcelona. Sin embargo, al comparar las energías posteriores a la fisura ( $E_P$ ) de ambas series, se evidencia que estas mejorías en la  $E_T$  se deben principalmente a la resistencia al impacto post fisuración que aportan las fibras.

Tabla 1: Resumen de ensayos estáticos

Serie	Compresión	Flexión de vigas			Flexión de paneles		Barcelona					
		$f'_c$ (MPa)	$f_L$ (MPa)	$f_{R1}$ (MPa)	$f_{R3}$ (MPa)	$P_{max}$ (kN)	$E_{25}$ (J)	$f_{ct}$ (MPa)	$f_{ct4}$ (MPa)	$E_4$ (J)	$f_{ct0,5}$ (MPa)	$f_{ct1,5}$ (MPa)
P1	Media	33,2	3,2	1,4	1,5	31,1	403	1,99	0,60	139	0,83	0,64
	CV	-	4	10	24	5	16	26	13	13	5	3
P2	Media	34,6	3,2	1,6	2,1	33,3	620	1,91	0,82	177	1,21	0,88
	CV	2,7	2	10	8	12	13	6	9	7	10	9

Tabla 2: Resumen de ensayos de impacto

Serie	$E_c$ (J)	$COD_c$ (mm)	$E_P$ (J)	$V_c$ (J)	$E_T$ (J)	
P1	Media	62	95,7	281	14,7	343
	CV (%)	49	42	37	47	37
P2	Media	60	86,4	468	7,5	527
	CV (%)	21	1	12	4	13

Considerando todo lo anterior, es visible cómo las fibras mejoran el comportamiento del material tanto en cargas estáticas como ante impactos, lo cual ratifica por qué el HRF es un excelente material para el sostenimiento de túneles. Si bien los ensayos de caracterización estática dan una idea general del comportamiento de un HRF en impacto, es necesario llevar a cabo la prueba específica, pues todos los métodos tradicionales presentan límites en dicha evaluación del material. Por ejemplo, ningún ensayo estático da información acerca de la tasa de fisuración del material ante impactos repetidos, tampoco permiten evidenciar el efecto de las fibras sobre la abertura inicial de las fisuras y no necesariamente dan información precisa de las mejoras del desempeño del HRF al aumentar la dosis de fibra. Valdría la pena expandir este tipo de experiencia a otras dosis de fibras poliméricas y para el caso de otras aplicaciones, probar distintas dosificaciones del hormigón de base, así como otros tipos de fibras.

## Agradecimientos

El presente trabajo fue elaborado con la supervisión del Dr. Ing. Raúl Zerbino y con la colaboración del Ing. Martín Schneider de Sika Argentina. Se agradece el apoyo del LEMIT-CIC, el CONICET y la FI-UNLP.

## Referencias

- [1] EFNARC, European specification for sprayed concrete, United Kingdom, 1996.
- [2] Technical Committee CEN/TC 229, EN 14651:2005 Test method for metallic fibered concrete - Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual) Méthode, 2005.
- [3] American Society for Testing and Materials, ASTM C 1609/C 1609M-05 Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete ( Using Beam With Third-Point Loading ) 1, 2005.
- [4] Technical Committee AEN/CTN 83, UNE 83515:2010 Hormigones con fibras. Determinación de la resistencia a fisuración, tenacidad y resistencia residual a tracción. Método Barcelona, España, 2010.
- [5] Instituto Argentino de Racionalización de Materiales, NORMA IRAM 1546. Hormigón de cemento portland, Método de ensayo a compresión., Argentina, 1992.
- [6] Technical Committee B/570, BS EN 14488-5:2006 Testing sprayed concrete - Part 5: Determination of energy absorption capacity of fibre reinforced slab specimen, 2006.
- [7] J. Vivas, Ensayo para el estudio de la resistencia al impacto de hormigones con fibras, in: Jorn. Jóvenes Investig. En Tecnol. Del Cem. y Hormigón, LEMIT, La Plata, Argentina, 2019: pp. 5–8..
- [8] J.C. Vivas, R. Zerbino, M.C. Torrijos, G. Giaccio, Effect of the fibre type on concrete impact resistance, Constr. Build. Mater. 264 (2020) 120200.
- [9] J.C. Vivas, Ensayo de Impactos Crecientes para Hormigones Reforzados con Fibras, Rev. Hormigón. (2021).
- [10] International Federation for Structural Concrete (fib), Model Code Volume 1, (2012) 350.
- [11] A. Conforti, R. Zerbino, G.A. Plizzari, Influence of steel , glass and polymer fibers on the cracking behavior of reinforced concrete beams under flexure, Struct. Concr. (2018) 1–11. <https://doi.org/10.1002/suco.201800079>.