

The background is a collage of hexagonal images. The images include: a concrete bridge structure, a construction site with a crane, a large concrete dam, a modern building under construction with a curved facade, a close-up of concrete aggregate, and several concrete test cylinders. The hexagons are arranged in a honeycomb pattern, with some hexagons containing images and others being solid dark blue or green.

ACTUALES INVESTIGACIONES EN

Tecnología del Cemento y el Hormigón

**Memorias de la 3° edición de
las Jornadas de Jóvenes
Investigadores 2023**

ISBN 978-631-90193-0-8

3° edición de la jornada de jóvenes investigadores en tecnología del hormigón y el cemento : actuales investigaciones en tecnología del cemento y el hormigón en Argentina / Constanza Bourmod... [et al.] ; compilación de Constanza Bourmod... [et al.]. - 1a ed. - Ciudad Autónoma de Buenos Aires : Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, 2023.

Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga y online

ISBN 978-631-90193-0-8

1. Hormigón. 2. Cemento. 3. Materiales de Construcción. I. Bourmod, Constanza, comp.
CDD 693.5

Diseño y arte de tapa:
Constanza N. Bourmod

ISBN 978-631-90193-0-8



Actuales Investigaciones en Tecnología del Cemento y el Hormigón en Argentina



Memorias de las III Jornadas de Jóvenes Investigadores
en Tecnología del Cemento y el Hormigón

Editado por:

Bournod Constanza, Delbianco Natalia, Peralta Ring Rocío

2 y 3 de noviembre de 2023

Bahía Blanca

Argentina

Organizadores



Avales académicos e institucionales



Colaboradores



Sponsors



Comité Organizador de las JJITCH 2023

Bournod Constanza, CGAMA, UNS (Argentina)
Delbianco Natalia, CGAMA, UNS (Argentina)
Madsen Lenís, CGAMA, UNS (Argentina)
Marfil Silvina, CGAMA, UNS (Argentina)
Peralta Ring Rocío, CGAMA, UNS (Argentina)
Priano Carla, CGAMA, UNS (Argentina)
Rahhal Viviana, UNCPBA (Argentina)
Santillán Lautaro, UNCo (Argentina)
Vidal González Aviña José, UANL (México), UDS (Canadá), Rilem

Comité Científico de las JJITCH 2023

Alderete Natalia, Ghent University (Bélgica)
Alonso Maricruz, IETcc (España)
Andrade Carmen, UPC (España)
Bernal Susan, University of Leeds (Reino Unido)
Carrasco María Fernanda, UTN-FRSF (Argentina)
Castro Pedro, CINVESTAV, Mérida (México)
Durán-Herrera Alejandro, UANL (México)
Fonteboa Belén, UAC (España)
Gettu Ravindra (India)
Giaccio Graciela, UNLP-LEMIT (Argentina)
Irassar Fabián, UNCPBA (Argentina)
Kessler Sylvia, HSU-HH (Alemania)
Locati Francisco, CICTERRA-UNC (Argentina)
Marfil Silvina, UNS (Argentina)
Martirena Fernando, UCLV (Cuba)
Mendoza José Manuel, UANL (México)
Milanesi Carlos, Cementos Avellaneda (Argentina)
Positieri María, UTN-FRC (Argentina)
Priano Carla, UNS (Argentina)
Rahhal Viviana, UNCPBA (Argentina)
Segerer Maximiliano, UNCUIYO (Argentina)
Sosa María Eva, UTN FRLP (Argentina)
Villagrán Zaccardi Yury, VITO (Bélgica)
Zega Claudio, LEMIT (Argentina)

PRÓLOGO

En esta nueva edición de las JJITCH queda demostrado el inmenso potencial de trabajo que radica en los jóvenes que emprenden una trayectoria en investigación, los que desde sus años de estudiante sienten la vocación por la ciencia y de aquellos que, a pesar de estar trabajando en el ámbito privado, siguen conectados y comprometidos con el avance de la ciencia y la tecnología, realizando sus aportes en estas temáticas que nos convocaron.

Este encuentro se realizó en Bahía Blanca del 2 al 3 de noviembre de 2023, dos días en los que se pretendió reunir presencialmente a los jóvenes investigadores del país y la región que trabajan en temáticas relacionadas con el cemento y el hormigón, de acuerdo con el objetivo primigenio de las jornadas de favorecer la interacción, promover actividades conjuntas, el intercambio de ideas e información y afianzar la camaradería entre colegas, dando lugar a la generación de lazos que persistan y enriquezcan sus futuros proyectos.

El compromiso asumido en 2022 cuando la AATH nos legó la realización de esta tercera edición implicó un enorme esfuerzo por parte de los integrantes locales del comité, porque entendemos lo que significa movilizarse hasta Bahía Blanca, con los escasos recursos y fondos que usualmente manejan los jóvenes. Tomamos ese desafío con mucha responsabilidad, anhelando que se hayan cubierto las expectativas de todos los asistentes.

El comité organizador de las III JJITCH 2023 se integró con representantes de la AATH, la Universidad Nacional del Sur y RILEM, conformado por 6 integrantes locales, 2 externos y 1 representante internacional. El comité científico estuvo conformado por 24 integrantes de gran trayectoria académica y profesional, tanto del ámbito nacional como internacional. Las conferencias plenarias estuvieron a cargo de la Prof. Dra. Ing. Sylvia Kessler, de la Helmut Schmidt University (HSU) y University of the Federal Armed Forces de Hamburgo (Alemania), y del Dr. Ing. Carlos Milanesi de Cementos Avellaneda S.A. (Argentina). La primera conferencia se refirió a la "Corrosión de armaduras en estructuras de hormigón y la evaluación del estado de corrosión", la cual fue transmitida online desde Alemania. La segunda disertación se tituló "Consideraciones sobre la capacidad de predicción de algunos modelos empleados en la tecnología del cemento y del hormigón" y fue desarrollada de manera presencial.

Las Jornadas fueron declaradas de interés municipal por el Honorable Consejo Deliberante de la ciudad de Bahía Blanca. Contaron con el aval de numerosas instituciones y el apoyo de la Universidad Nacional del Sur y la Comisión de Investigaciones Científicas de la provincia de Buenos Aires, con el auspicio de varias empresas del medio productivo y colaboración local. Además, en el marco de las Jornadas se hizo un reconocimiento a las dos mejores exposiciones orales, que consistió en la membresía Rilem para los autores expositores de los mismos. Por su parte, el comité editor de la Revista Hormigón de la AATH seleccionó tres trabajos e invitó a sus autores a enviar una versión extendida para publicar en un próximo volumen.

Participaron de las Jornadas estudiantes de grado, tesis y becarios doctorales y posdoctorales, investigadores y profesionales de apoyo del CONICET y de la CIC y jóvenes profesionales de Argentina, Uruguay, México, y Brasil. Las temáticas principales abarcaron: hormigones sustentables y uso de residuos, metodologías de ensayo, mezclas con materiales suplementarios y aditivos, caracterización de hormigones, morteros y agregados, y tecnologías constructivas. Éstas dieron lugar a los capítulos que estructuran este libro, donde se agrupan los resúmenes extendidos presentados en las JJITCH 2023.

Agradecimientos

A la AATH, UNS y Rilem por el apoyo para realizar estas Jornadas.

Al CGAMA, a los Dptos. de Ingeniería y Geología y a la Secretaría de Cultura y Extensión de la UNS por apoyarnos desde el primer momento, y proveer becas de alojamiento para los asistentes.

A la SECyT de la UNS y a la CIC de la provincia de Buenos Aires por el apoyo económico para el financiamiento parcial de las jornadas.

A la UTN FRBB, FCEYN de la UNC, INTI y Confedi por el aval institucional.

A los sponsors Loma Negra, Cementos Avellaneda y Penetron por colaborar con la entrega de materiales para los participantes.

Al Consorcio del Puerto de Bahía Blanca, por facilitarnos el ingreso a las instalaciones durante el Paseo.

A los editores de la Revista Hormigón, por la invitación a enviar los trabajos extendidos para los participantes seleccionados.

A Rilem, por brindar la membresía Rilem como reconocimiento a los mejores expositores.

A los miembros del Comité Científico, por el tiempo dedicado a la revisión de las contribuciones y sus invaluable aportes.

A los conferencistas, por la excelente disposición para estar presentes en esta edición, compartiendo sus conocimientos y experiencia con todos los asistentes.

A María Eva Sosa por su ayuda en el proceso de organización, y en especial, a Graciela Martínez por todas las gestiones.

A todos los que participaron, y en especial, a todos los que vinieron a Bahía Blanca...

Muchas gracias!!!!

Comité Organizador JJITCH 2023
Bahía Blanca – noviembre 2023

ÍNDICE

Capítulo 1 – Caracterización de hormigones, morteros y agregados 7-40

Caracterización de losas de hormigón en un estacionamiento de Bahía Blanca (Buenos Aires).....	08
<i>Berezosky J.J., Bournod C., Madsen L., Delbianco N., Peralta Ring R., Marfil S., Priano C.</i>	
Evaluación de la capacidad flexional de vigas utilizando hormigón reforzado con distintas combinaciones de fibras.....	11
<i>Cardozo N.</i>	
Estudio del uso de perlita en pastas, hormigones y morteros alivianados con fines estructurales y no estructurales.....	14
<i>Ceppi J., Espinoza C., Yaya J., Domizio C., González del Solar G.</i>	
Hormigón reforzado con fibras de acero y micro-polipropileno: estado del arte normativo y su comportamiento mecánico-resistente.....	17
<i>Cuéllar Huamaní E.F.</i>	
Comportamiento mecánico de vigas de gran altura de hormigón reforzado con fibras: análisis experimental.....	20
<i>Denardi M.C., Rougier V.C.</i>	
Mecánicas de hormigones drenantes diseñados según aci-522-10.....	23
<i>Fogliatti F.L., Goddio R.C., Noguera Vivas S.A.</i>	
Evaluación de la capacidad de carga de tubos de hormigón reforzado con fibras híbridas.....	26
<i>González F., Rougier V.</i>	
Mortero refractario (High Alumina Mortar): diseño y aplicaciones.....	29
<i>Mendibe J., Campos D., Stumpf P., Dahbar P.</i>	
Efecto de la morfología y composición del cemento Portland en su hidratación.....	32
<i>Molina A., Rodríguez I., Pícolo Salvador R., Guzzo A., Hernandez V., Tovar G., Segura L.</i>	
Evaluación del comportamiento mecánico de hormigón celular espumado reforzado con fibras de polipropileno aplicado a vigas de Bernoulli con armadura tradicional de acero.....	35
<i>Retamal F.A., Rougier V.C.</i>	
Desempeño en impacto del hormigón reforzado con diversas fibras poliméricas.....	38
<i>Vivas J.C., Cruz R., Aparicio T., de Barrio J.</i>	

Capítulo 2 – Metodologías de ensayo 41-50

Adecuación de cámara de curado según norma IRAM 1597.....	42
<i>Mendoza F.T.</i>	
Determinación de parámetros reológicos de lodos bentoníticos empleando el cono de Marsh. Parte I: calibración del embudo.....	45
<i>Vivas J.C., Guerrero A., Rocco C.</i>	
Estudio del proceso de hidratación del cemento mediante la técnica de speckle dinámico: influencia del entorno y tipos de cemento.....	48
<i>Zamateo M., Oliva F.</i>	

Capítulo 3 – Mezclas con MCS y aditivos 51-66

Morteros elaborados con cal hidráulica y arcillas calcinadas. Análisis de la captación de CO ₂ ambiental, propiedades físicoquímicas, mecánicas y biológicas.....	52
<i>Aristarán L., Paulo C., Iraporda C., Tironi A.</i>	

Efecto de extractos de plantas en la hidratación de matrices cementicias.....	55
<i>Delbianco N., Priano C., Irassar E.F.</i>	
Activación alcalina de una arcillita calcinada con alto contenido de esmectita.....	58
<i>Lemma R., Marfil S., Rahhal V.</i>	
Evaluación de la actividad puzolánica de un material de descarte en la industria cementera, Olavarría, Argentina.....	61
<i>Madsen L., Bournod C., Rahhal V., Marfil S.</i>	
Resistencia al ataque de sulfatos en morteros de cementos ternarios con filler calcáreo y arcilla illítica calcinada.....	64
<i>Montani L., Tironi L., Bonavetti V., Irassar E.F.</i>	

Capítulo 4 – Tecnologías constructivas **67-79**

Estudio de la coloración de hormigones livianos a partir de la adición de pigmentos de origen natural y artificial.....	68
<i>Agostini G., Avalos J., Galimberti D., Domizio C., González del Solar G.</i>	
Análisis de contraste en demarcación horizontal sobre hormigón mediante láser.....	71
<i>Benitez A., Gotte A., Vincitorio F.</i>	
Grouteo en fundaciones de aerogeneradores.....	74
<i>Marconi G., Marconi B.</i>	
Estudio de la incorporación de polímeros superabsorbentes en la resistencia a compresión de morteros.....	77
<i>Pardal G., Mercado R., Salinas T., Domizio C., González del Solar G.</i>	

Capítulo 5 – Hormigones sustentables y uso de residuos **80-104**

Morteros con adición de fibras recicladas. Evaluación del comportamiento.....	81
<i>Bossio F.J., Andradá R.C., Mugetti V., Ceballos V.L., Fulginiti B.</i>	
Desarrollo de aplicación destinada a mejorar la gestión de residuos de la construcción.....	84
<i>Cuchán E., Meneses R., Moro J.M.</i>	
Aserrín como agente formador de poros en la obtención de agregados livianos.....	87
<i>Martinefsky C., Mocciaro A., Irassar F., Tironi A.</i>	
Evaluación de hormigones con sobrantes triturados de hormigón elaborado en plantas como sustituto parcial del agregado grueso.....	90
<i>Olmos A., Azcurra L., Manzi S., Labarba R.</i>	
Estudio preliminar de la utilización de tamices moleculares en hormigón drenante.....	93
<i>Peralta Ring R., Enriquez I., Verney J., Priano C., Rahhal V.</i>	
Equilibrio entre la reducción del factor clínker, la captura de carbono potencial y el desempeño por carbonatación en morteros sustentables.....	96
<i>Pico-Cortés C.</i>	
Empleo de bacterias ureolíticas para la elaboración de bio hormigón.....	99
<i>Rupp S., Cerutti C., Baque A.</i>	
Expansión de prismas de hormigón reciclado expuestos al ataque externo por sulfatos.....	102
<i>Santillán L., Zega C.</i>	

Capítulo 1

Caracterización de hormigones, morteros y agregados

CARACTERIZACIÓN DE LOSAS DE HORMIGÓN EN UN ESTACIONAMIENTO DE BAHÍA BLANCA (BUENOS AIRES)

Juan José Berezosky^{1, 2}, Constanza Bournod^{2, 3}, Lenís Madsen^{2, 3}, Natalia Delbianco^{2, 4, 5}, Rocío Peralta Ring^{2, 4, 5}, Silvina Marfil^{2, 3}, Carla Priano^{2, 4}

¹ Dirección Nacional de Vialidad, Distrito 19, CP 8000, Bahía Blanca, Argentina

² Centro de Geología Aplicada, Agua y Medio Ambiente (CGAMA, CIC-UNS), CP 8000, Bahía Blanca, Argentina

³ Departamento de Geología, Universidad Nacional del Sur, CP 8000, Bahía Blanca, Argentina

⁴ Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur, CP 8000, Bahía Blanca, Argentina

⁵ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina

Palabras Clave: RAS, fisuración, petrografía, ensayos físicos, MEB-EDS.

Introducción

La reacción álcali-sílice (RAS) es una de las principales causas de deterioro de las estructuras de hormigón. En el sur de la provincia de Buenos Aires existen numerosos antecedentes de pavimentos de hormigón deteriorados por la RAS. En general, esta patología está vinculada a la reactividad del agregado fino comúnmente utilizado, que suele presentar componentes reactivos de reacción rápida, principalmente vidrio volcánico [1, 2, 3]. Por otra parte, recientes estudios indican que las cuarcitas utilizadas como agregado grueso en la zona presentan cuarzo microcristalino (de reacción lenta), lo que sumado a otros factores ha llevado al deterioro prematuro de algunas estructuras de hormigón [4].

En el presente trabajo se estudiaron las losas de una playa de estacionamiento en la ciudad de Bahía Blanca. Este sector se compone íntegramente de hormigón H-21 y consta de 2000 m² de superficie. La misma está expuesta en su totalidad a las inclemencias del tiempo y recibe cargas dinámicas de vehículos livianos. Un gran porcentaje de losas evidencia deterioro manifestándose como fisuración “en mapa”, en ocasiones con material rellenando las fisuras. El objetivo de este estudio es evaluar el estado actual del hormigón y determinar la influencia de los agregados utilizados en el desarrollo de reacciones deletéreas como la RAS.

Metodología

Se estudió el hormigón de las losas del estacionamiento situado en el interior de un complejo ubicado en la ciudad de Bahía Blanca (provincia de Buenos Aires) (Figura 1 a). En el relevamiento del pavimento se detectaron abundantes fisuras tipo “mapa” así como también productos blanquecinos rellenando dichas fisuras (Figura 1 b y c). A fin de evaluar el estado del hormigón en su espesor total, se calaron testigos de 10 cm de diámetro x 20 cm de altura (aproximadamente) en cuatro sectores (Figura 1 a).

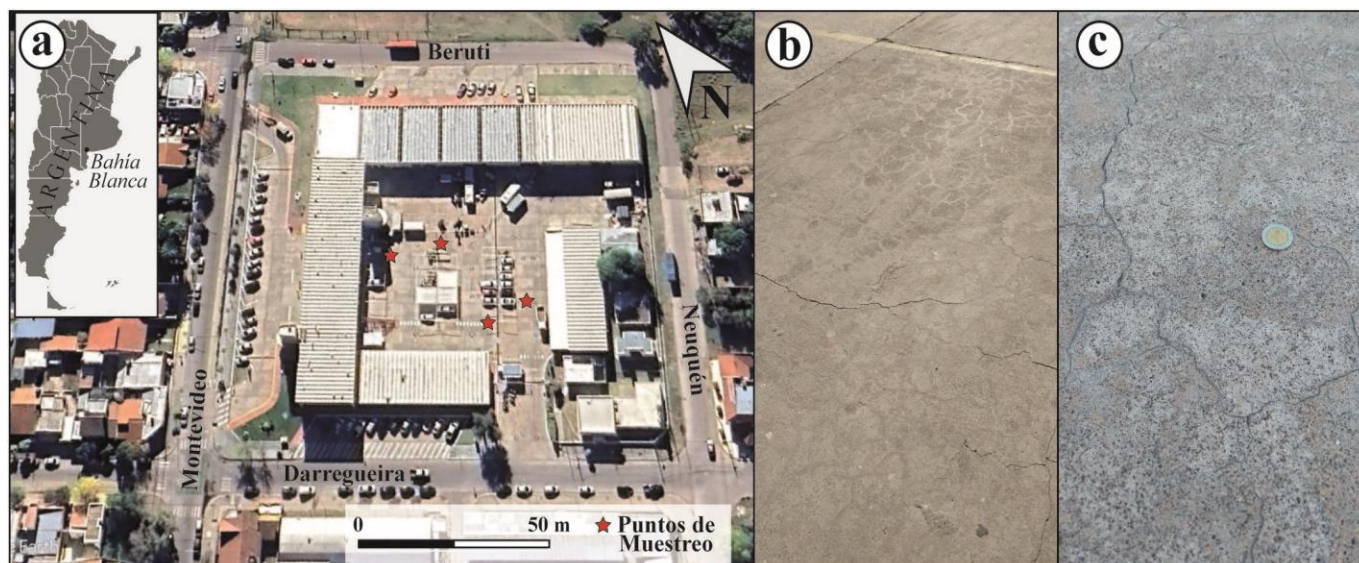


Figura 1 – a) Ubicación del área de estudio, b) Vista de la losa de hormigón con fisuras en mapa, c) Detalle de la fisuración del hormigón (Escala moneda, diámetro = 23 mm)

Se realizó el ensayo de resistencia a la compresión según norma IRAM 1551 [5] y la determinación de sus características físicas: densidad, absorción y espacios vacíos, según lo establecido en la norma ASTM C 642-13 [6]. La observación del estado del hormigón, la identificación de fisuras y productos de neoformación en los testigos se llevó a cabo con un estereomicroscopio Leica S9i. Se separaron productos de neoformación para analizar su morfología y composición semicuantitativa, con un microscopio electrónico de barrido (MEB-EDS) LEO EVO 40-XVP, a 10 kV sobre muestras metalizadas con oro (Au).

Resultados

Todas las losas muestreadas presentaban similares características macroscópicas, haciéndose notorias las fisuras desarrolladas desde la superficie hasta la base de la estructura. Se evidenciaron productos de neoformación como relleno de fisuras, en el mortero y en las interfaces con el agregado. El agregado grueso presenta una buena distribución y está constituido por una piedra partida granítica, de tamaño máximo aproximado de 30 mm. Estas rocas están compuestas por cristales de feldespato potásico, plagioclasa, cuarzo, y biotita generalmente desferrizada y, en algunos casos, fuertemente cloritizada. El agregado fino es una arena natural polimíctica, constituida en forma predominante por granos subredondeados de cuarzo, feldespatos y una alta proporción de rocas volcánicas. Algunas partículas de arena, principalmente tobas de grano fino, andesitas afaníticas y riolitas, suelen presentar coronas de reacción y microfisuras que las atraviesan y se continúan por el mortero, por el borde del agregado grueso desarrollando uniones triples y rellenas por productos blanquecinos (Figura 2 a y b). El mortero presenta cavidades de aire accidental de 3 - 9 mm de diámetro e irregulares. En algunos sectores está intensamente fisurado y las cavidades de menor tamaño presentan productos de reacción. En la Figura 2 c se muestra una cavidad con una capa externa incolora traslúcida, con brillo vítreo, seguida por un material blanquecino opalescente, de aspecto terroso. En algunos casos se pudieron diferenciar materiales cristalinos (calcita, portlandita y ettringita) asociados con sustancias amorfas de aspecto craquelado. En los productos de neoformación analizados por MEB-EDS se identificaron silicio, calcio (mayoritarios), sodio, potasio y aluminio (minoritarios), en las interfaces del agregado fino, asociados con carbonato de calcio (Figura 2 d). Éstos constituyen productos de reacción típicos relacionados a la RAS. Por su parte, en la interfase con el agregado grueso se reconocieron calcita y portlandita, que presentaban su morfología característica (la primera romboédrica y la segunda en placas hexagonales).

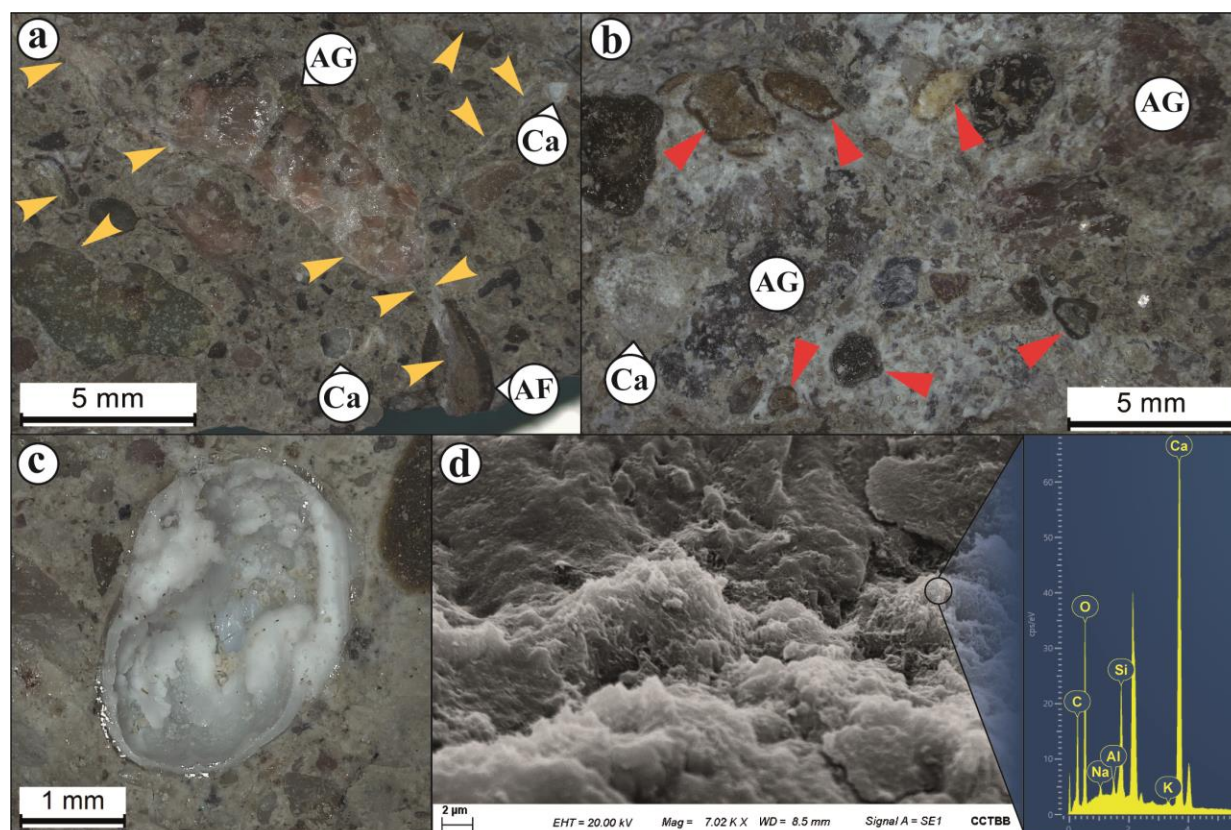


Figura 2 – a) Fisuración del mortero (flechas amarillas), AF: agregado fino, AG: agregado grueso y Ca: cavidades de aire accidental, b) Coronas de reacción (flechas rojas) en partículas de arena y productos de reacción en el mortero, c) Cavidad de aire accidental con productos de neoformación, d) Materiales amorfos en la interfase del agregado fino (MEB-imagen de electrones secundarios) y EDS del punto señalado

En la Tabla 1 se detallan los resultados de los ensayos de resistencia a compresión, densidad (saturado superficie seca), absorción y porosidad, realizados sobre un porcentaje de testigos extraídos. Los resultados de los ensayos no reflejan diferencias apreciables entre los diferentes testigos, cumpliendo con la resistencia mínima requerida para la que fue diseñado (H21). Si bien se observa un valor más elevado de resistencia a compresión en el Testigo 2 respecto al Testigo 1, son valores habituales para este tipo de estructuras ya que puede existir una variación en aditivos o relación agua cemento que genera dicha disparidad [7]. La porosidad influye en la absorción del material y en su resistencia [8]. Los valores típicos de absorción de agua para un hormigón de unos 25 MPa de resistencia bien compactado varían entre el 7,5% y el 9%, y las porosidades entre el 10% y el 15% [9].

Tabla 1: Caracterización físico-mecánica de los testigos de hormigón estudiados.

Testigo	Resistencia a Compresión [MPa]	Densidad [g/cm ³]	Absorción [%]	Porosidad [%]
1	26	2,47	4,8	11,4
2	35	2,46	5,4	12,6

Conclusiones

Si bien los resultados de los ensayos físico-mecánicos no mostraron evidencias del deterioro, los testigos presentaban importantes signos característicos de la RAS: fisuras en la pasta y agregado fino, partículas de arena con coronas de reacción y productos de neoformación en fisuras, cavidades de aire accidental y en la interfase agregado-mortero. Los análisis en el MEB-EDS indicaron la presencia de silicio, aluminio, calcio, potasio y sodio, propios de los productos de reacción relacionados a la RAS, principalmente asociados a las interfases con el agregado fino. El agregado fino utilizado contiene especies deletéreas en las rocas volcánicas que fueron responsables de la reacción. En el contacto del mortero con el agregado grueso se encontraron altos valores de calcio, correspondiente a la generación de hidróxidos de calcio (portlandita) y a una alta carbonatación. La presencia de estos productos se estima que guarda relación con microfisuras de borde y con el agregado fino adyacente.

Referencias

- [1] Berezosky, J.J., Lescano, L., Marfil, S.A., Maiza, P.J., "Desarrollo de la reacción álcali-agregado en el hormigón de la rotonda de acceso a la localidad de Médanos, provincia de Buenos Aires", XX Congreso Geológico Argentino, (2017), pp. 4-7.
- [2] Berezosky, J., Marfil, S., Di Sciullo, N., "Evaluación del deterioro de pavimentos de hormigón de rutas interurbanas de Bahía Blanca (provincia de Buenos Aires)", VIII Congreso Internacional - 22ª Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, (2018), pp. 449-456.
- [3] Berezosky, J., Lescano, L., Locati, F., Maiza, P., Marfil, S., "Behaviour of reactive sands in concrete. A case of study", Proceedings of the International Conference on Sustainable Structural Concrete (Sustain Concrete 2015), (2015), pp. 349-358.
- [4] Berezosky, J.J., Priano, C.V., Bournod, C.N., Locati, F., Marfil, S.A., "Evaluación del pavimento de hormigón de la rotonda de acceso a la ciudad de Pigüé, Buenos Aires, Argentina", Revista Hormigón, N° 62, (2022), pp. 5-16.
- [5] Instituto Argentino de Normalización y Certificación, "IRAM 1551. Hormigón de cemento portland. Extracción, preparación y ensayo de testigos de hormigón endurecido", (2000).
- [6] American Society for Testing and Materials, "ASTM C642. Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete", (2013).
- [7] Federal Highway Administration U.S. Department of Transportation, "The effects of higher strength and associated concrete properties on pavement performance", Publication N° FHWA-RD-00-16, (2001). Disponible online en: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/00161.pdf>
- [8] Hincapié, Á.M., Montoya, Y.D., "La micro estructura de los prefabricados de concreto", Revista universidad EAFIT, 41, 140, (2005), pp. 95-105.
- [9] Revuelta Crespo, D., Gutiérrez Jiménez, J.P., "Estimación de la resistencia a compresión del hormigón mediante el muestreo, extracción y rotura de probetas testigo", II Jornadas de Investigación en Construcción, (2008), pp. 1337-1349.

EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD FLEXIONAL DE VIGAS UTILIZANDO HORMIGÓN REFORZADO CON DISTINTAS COMBINACIONES DE FIBRAS

Nicolás Cardozo^{1, 2}

¹ Maestría en Ingeniería Estructural, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, Argentina

² Jefe de Calidad y Producto, PREMIX SA Hormigón Elaborado, Carril Rodríguez Peña 2406, Mendoza, Argentina

Palabras Clave: hormigón fibro-reforzado; capacidad flexional; tenacidad.

Introducción

El hormigón es uno de los materiales más utilizados en proyectos de ingeniería civil. Su capacidad de ser moldeado junto con sus propiedades mecánicas y de durabilidad lo hacen un material ideal para diversos tipos de estructuras. Sin embargo, desde sus inicios la industria del hormigón se ha visto en la obligación de innovar y explorar diversos materiales para ser incorporados en las mezclas, como aditivos y adiciones, con el fin de disminuir costos, mejorar sus propiedades y obtener ventajas sobre otros materiales usados en la construcción. En este trabajo se busca estudiar alternativas que mejoren la baja resistencia a tracción que tiene el hormigón, así como también, beneficios en la tenacidad del elemento estructural.

Existen varios tipos de fibras diseñadas para el refuerzo del hormigón: acero, vidrio, poliméricas y naturales, entre otras. Entre ellas, las fibras de acero y poliméricas proporcionan mejoras en las características estructurales del hormigón. Algunas normas incluyen el uso de macrofibras de acero y poliméricas para fines estructurales, si se cumplen ciertos requisitos.

La presencia de las fibras modifica las propiedades de la matriz no solo disminuyendo costos operativos, sino que también mejorando características mecánicas de los elementos que las utilizan, como por ejemplo ductilidad, tenacidad, resistencia al impacto, cortante, torsión y flexotracción. Su utilización mejora la resistencia del material bajo todo tipo de solicitaciones que induzcan tensiones de tracción y, más importante aún para una matriz frágil como la del hormigón, mejora la capacidad de deformación y controla el proceso de fisuración, aumentando el número de fisuras, pero con menores valores de abertura, mejorando notablemente la durabilidad de dichos elementos. Esto da lugar a notables incrementos en la tenacidad del material compuesto, lo que es fundamental al momento de considerar la respuesta frente a acciones dinámicas. Las fibras producen una acción de costura o puente a través de las fisuras que permite la transmisión de esfuerzos y confiere al material compuesto una resistencia adicional.

La principal razón de incorporar fibras es aportar capacidad de transferencia de cargas postfisuración. En una matriz sin fibras, luego de alcanzar la carga máxima se producirá la rotura con una caída brusca de la capacidad portante. En un hormigón reforzado con fibras (HRF), conforme el tipo y concentración de las fibras, pueden aparecer diferentes comportamientos. Hasta la carga de primera fisura, que corresponde a la resistencia de la matriz sin reforzar, no existirán grandes diferencias en las respuestas, pero a partir de la aparición de la fisura, la carga se transfiere progresivamente a las fibras controlando el crecimiento de la fisura. En este proceso se ponen en juego los mecanismos de adherencia fibra-matriz en lo que el anclaje mecánico adquiere un rol protagónico. Si las fibras son pocas, o menos eficaces, se produce una única fisura donde las fibras se van arrancando en forma progresiva y se verifica un decrecimiento continuo de la capacidad portante a medida que crecen los desplazamientos. Por el contrario, si el tipo y la concentración de fibras es suficiente como para sobrellevar una carga mayor a la que produjo la de fisuración de la matriz, puede incluso crecer la capacidad postpico y dar lugar a la aparición de otras fisuras. Si bien la matriz está fisurada, el refuerzo permite sobrellevar las cargas e impide el progreso de la fisura inicial. Inclusive, conforme el tipo de sollicitación se puede llegar a desarrollar fisuración múltiple antes que una de las fisuras se transforme en la fisura principal, entonces en esa sección se concentra el arrancamiento de las fibras y da lugar a la caída final de la capacidad postpico.

La combinación de fibras de diferentes características geométricas (esbelteces), diferentes materiales o ambos ha ido incrementando y se conocen como compuestos híbridos. En compuestos bien logrados hay una interacción positiva entre las fibras, y el comportamiento del compuesto híbrido alcanza un mejor comportamiento que el resultante de la suma de cada tipo de fibra por separado, este fenómeno

se conoce como sinergia. La combinación de fibras puede llevar al desarrollo de compuestos que proporcionen comportamiento superior, bajo condiciones ambientales y de carga severas a costos razonables, ya que permite controlar fisuras a diferentes edades o niveles de carga.

Acero Pachón [1] estudió la combinación de fibras metálicas y sintéticas aplicado a revestimiento de túneles. Por otro lado, Gonzáles et al. [2] analizaron su uso combinado en tubos premoldeados. Othman et al. [3] investigaron a cerca de las propiedades mecánicas del hormigón reforzado con combinación de macro y micro fibras en estado fresco y endurecido, así como también su tenacidad y ductilidad. Annadurai y Ravichandran [4] realizaron una investigación empleando diferentes combinaciones de macrofibra metálica de acero y macrofibra sintética. En el documento se concluyó que la capacidad de carga última, la ductilidad y la tenacidad incrementan con el aumento en contenido de fibra. La combinación con la cual se obtuvieron los mejores resultados fue con 80% de contenido de fibra metálica y 20% de fibra sintética.

En este trabajo se propone el estudio de vigas de hormigón al cual se le incorporan fibras sintéticas PFRC (cuatro marcas comerciales distintas), fibras metálicas SFRC (tres esbelteces distintas) y distintas combinaciones de ellas, con y sin uso de armadura longitudinal. Se busca estudiar la mejora en la capacidad flexional por utilizar las mismas y evaluar si es posible disminuir la cuantía de armadura longitudinal debido a la utilización de macrofibras. Por otro lado, se pretende determinar si la combinación de fibras genera sinergia.

Metodología

Para evaluar el comportamiento de flexión se estudian 20 muestras con distintas combinaciones de fibras. Se ensayan dos vigas por muestra según el ensayo de vigas con carga centrada y entalla, tal cual lo indica la norma europea UNE-EN 14651 (Figura 1).

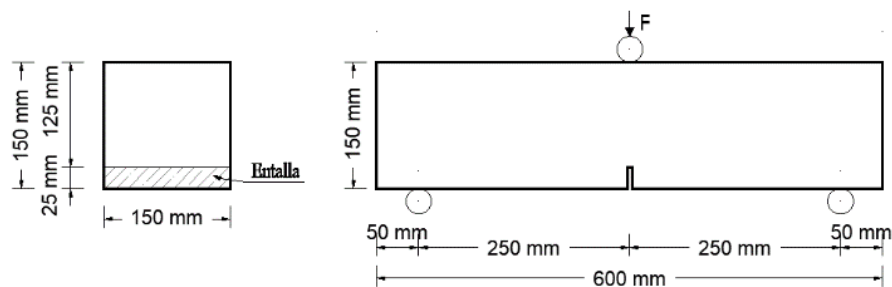


Figura 1 – Ensayo a flexotracción según la UNE-EN 14651

Las macrofibras sintéticas a estudiar son: SikaFiber Force PP-48 (S), Mapefibre ST 42 (M), Strux BT50 (G), Legafiber Macro (L). Las macrofibras metálicas a estudiar son: Wirand FS3N (FS3N) [esbeltez: 44], Wirand FF1 (FF1) [esbeltez: 50] y Wirand FF3 (FF3) [esbeltez: 67].

Las combinaciones de fibras en estudio son: **1)** “C” H35; **2)** “PFRC” H35 – P4 (G); **3)** “PFRC” H35 – P4 (L); **4)** “PFRC” H35 – P4 (S); **5)** “PFRC” H35 – P4 (M); **6)** “SFRC” H35 – S30 (FS3N); **7)** “PFRC” H35 – P8 (S); **8)** “SFRC” H35 – S30 (FF1); **9)** “HFRC” H35 – S25 (FF1) + S25 (FS3N); **10)** “HFRC” H35 – S25 (FF3) + S25 (FF1) + S25 (FS3N); **11)** “SFRC” H35 – S30 (FF3); **12)** “HFRC” H35 – S25 (FF3) + S25 (FS3N); **13)** “HFRC” H35 – S25 (FF3) + S25 (FF1); **14)** “SFRC” H35 – S50 (FF3); **15)** “HFRC” H35 – S30 (FF3) + P4 (S); **16)** “HFRC” H35 – S50 (FF3) + P8 (S); **17)** “RC” H35 + As; **18)** “PFRC” H35 – P8 (S) + As; **19)** “HFRC” H35 – S25 (FF3) + S25 (FF1) + As; **20)** “SFRC” H35 – S50 (FF3) + As.

P4 indica que la dosificación es 4 kg/m³, S30 que es 30 kg/m³ y así sucesivamente. Las muestras 17, 18, 19 y 20 se realizan en vigas con armadura longitudinal a flexión.

El comportamiento a tracción del HRF es evaluado en términos de los valores de resistencia residual a flexión, obtenida de la curva carga - CMOD (*Crack Mouth Opening Displacement* o apertura de la entalla). En la Figura 2 se presentan los resultados obtenidos. Los valores de cada muestra presentados corresponden al promedio de dos vigas.

La tenacidad es una medida de la capacidad de absorción de energía de un material y se utiliza para caracterizar la capacidad del material para resistir la fractura cuando se somete a deformaciones estáticas o dinámicas. Esta misma está representada por el área bajo la curva de carga – CMOD. Las muestras se

ordenan del 1 al 20, de menor a mayor según su tenacidad. Además de obtener esta información, al realizar estas curvas podemos observar el comportamiento postfisuración.

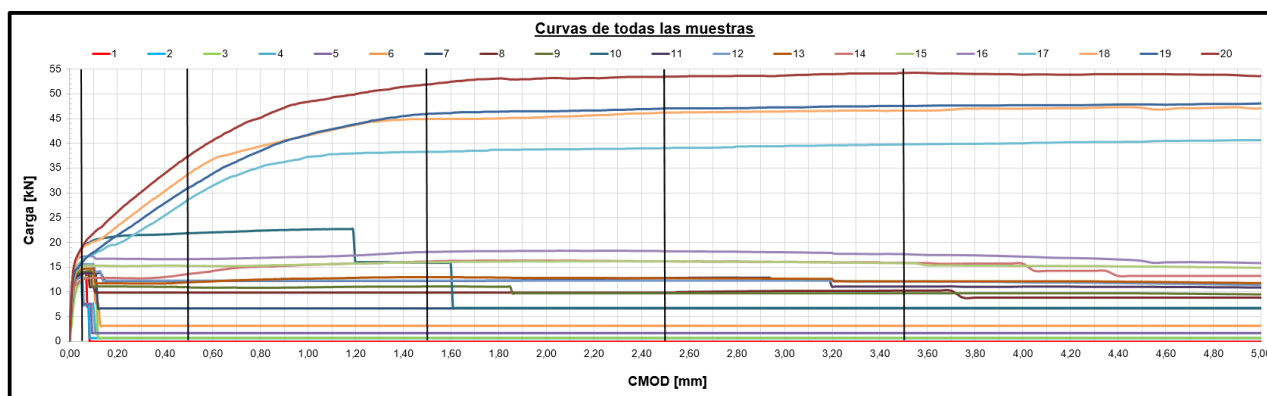


Figura 2 – Curva carga – CMOD de las muestras estudiadas según UNE-EN 14651

Conclusiones

Se obtuvieron valores de tenacidad muy diversos en función de la macrofibra utilizada. Los valores más bajos luego de la muestra sin fibras se presentaron para las macrofibras sintéticas con dosis de 4 kg/m^3 . La única fibra metálica que dio menos tenacidad que la macrofibra sintética con dosis de 8 kg/m^3 (muestra 7) fue la muestra 6 (25 kg/m^3 de FS3N), siendo esta la macrofibra metálica de menor esbeltez.

Se obtuvo un importante aumento de la tenacidad para las muestras que utilizaron macrofibras metálicas, especialmente en aquellas que usaron las de mayor esbeltez. De todas maneras, la combinación de macrofibras metálicas de distintas esbelteces no aumentó la tenacidad de la sección en mayor medida que lo que se obtuvo al utilizar un solo tipo de macrofibra de mayor esbeltez en igual dosis.

De las muestras sin armadura, las dos muestras más tenaces fueron las muestras 15 y 16, conformadas por macrofibras metálicas + macrofibras sintéticas con distintas dosis. Es interesante destacar que la tenacidad de la muestra 4 (4 kg/m^3 de macrofibra sintética) sumada a la tenacidad de la muestra 11 (30 kg/m^3 de macrofibra metálica FF3) dio un 13 % menos que la de la muestra 15 (combinación de las anteriores). Esto permite decir que existe sinergia para esta combinación de fibras. La utilización combinada de fibras metálicas y sintéticas es una buena alternativa a considerar ya que permite potenciar resultados, quedando esto demostrado en los resultados obtenidos.

El comportamiento de las fibras en las muestras con armadura fue similar a las muestras sin la misma. Es decir, la utilización de macrofibras aportaron tenacidad en la sección por más que la misma presentaba un elemento que la hace de por sí más tenaz, como es el caso de la armadura. Es notable el aumento de la tenacidad en las muestras que utilizaron esta última.

Analizando la información podemos decir que no es posible reemplazar el 100 % de armadura de una sección al utilizar HRF. De todas maneras, el uso de HRF en secciones armadas permite mejorar propiedades como la tenacidad de dicha sección.

Referencias

- [1] Acero Pachón, J. P., “Evaluación del uso combinado de fibras metálicas y sintéticas como refuerzo del concreto aplicado al soporte y revestimiento de túneles”, Tesis de Maestría, Escuela Colombiana de Ingeniería, (2017).
- [2] Gonzáles, F., Rougier, V. y Escalante, M., “Evaluación experimental del uso de fibras híbridas como refuerzo del hormigón en tubos premoldeados”, IX Congreso Internacional AATH 2020 y 23° Reunión Técnica, (2020), 8 páginas.
- [3] Othman, F., Ghazali, M., Jameran, A. e Ibrahim, I., “The mechanical properties of hybrid fibre reinforced composite concrete”, Hokkaido University, (2013), 10 páginas.
- [4] Annadurai, A. y Ravichandran, A., “Flexural behavior of hybrid fiber reinforced high strength concrete”, Indian Journal of Science and Technology, Vol. 9, (2016), 5 páginas. DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i1/74084, Disponible Online en: <https://portal.issn.org/>
- [5] Comité Europeo de Normalización, UNE-EN 14651: “Método de ensayo para hormigón con fibras metálicas. Medición de la resistencia a la tracción por flexión (límite de proporcionalidad (LOP), residual)”, Bruselas, Bélgica, (2005).

ESTUDIO DEL USO DE PERLITA EN PASTAS, HORMIGONES Y MORTEROS ALIVIANADOS CON FINES ESTRUCTURALES Y NO ESTRUCTURALES

Jesús Ceppi¹, Candela Espinoza¹, Jeremías Yaya¹, Carolina Domizio^{1,2}, Gerardo González del Solar^{1,2}

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

² Centro Regional de Desarrollos Tecnológicos para la Construcción, Sismología e Ingeniería Sísmica (CeReDeTec), Facultad Regional Mendoza, Universidad Tecnológica Nacional. Rodríguez 273, Mendoza, Argentina

Palabras clave: perlita expandida, perlita volcánica, mortero, hormigón.

Introducción

En el presente trabajo se abordarán los efectos de la incorporación de perlita en pastas, hormigones y morteros, en primer lugar, mediante el estudio de antecedentes y luego, realizando dosificaciones propias de morteros. En el laboratorio del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Mendoza, se prepararon dos tipos de morteros cementicios con adición de perlita expandida; y en el análisis de antecedentes se tomaron tres publicaciones referidas a morteros y hormigones con adición de perlita expandida y volcánica, luego se compararon los resultados.

La perlita es un vidrio volcánico amorfo que tiene un contenido de agua relativamente alto (2-5%) y tiene la propiedad inusual de expandirse veinte veces su volumen original cuando se calienta por encima de 871°C, pasando de una densidad aparente de 1180 a 70 kg/m³. Es un material químicamente inerte y con un pH aproximado de 7, pudiendo molerse finamente para su incorporación como adición en mezclas cementicias, por su acción puzolánica.

El objetivo de esta investigación es determinar el efecto de la adición en diferentes proporciones de perlita con el fin de en el futuro lograr morteros y hormigones para un uso estructural y no estructural (material para aislación termo-acústica, contra incendios, morteros alivianados para nivelación en techos, ladrillo portante o elementos sismorresistentes de hormigón, etc.), para lo cual se evaluarán las propiedades en las 5 muestras que se desarrollarán a continuación.

Metodología

Para el presente estudio se procedió a la elaboración de dos mezclas de morteros denominadas D0 y D1, las cuales fueron ensayadas a compresión luego de 3, 7 y 28 días de curado, empleando para ello probetas cúbicas de 7 cm de lado, siguiendo la norma ASTM C-109 [1]. La dosificación D0 se obtuvo siguiendo la dosificación propuesta por Jedidi et al. [2], donde se realizó un reemplazo del 15% del volumen del agregado fino por perlita expandida. Por otro lado, y con el fin de lograr mejores resultados en cuanto a la resistencia mecánica, para la dosificación D1 se incrementó el contenido de cemento y perlita expandida reduciendo en consecuencia la relación agua-cemento y la cantidad de agregado fino. La Figura 1 presenta la perlita volcánica y la perlita expandida empleadas como materia prima, así como las probetas D0 y D1 ensayadas a compresión.

En cuanto al estudio de antecedentes, cabe señalar el trabajo de Jedidi et al. [2] donde se estudiaron las propiedades mecánicas y propiedades térmicas de hormigones alivianados usando perlita expandida como agregado en reemplazo de un porcentaje de agregado fino que fluctuó entre el 15% y el 80%. Adicionalmente, Señas et al. [3] utilizaron la perlita expandida como único agregado en la mezcla, junto con cemento portland, agua y un aditivo incorporador de aire. De esta manera, el mortero obtenido se caracterizó por presentar un bajo peso propio y una importante aislación termo-acústica.

En este estudio se mantuvo constante la cantidad de perlita (121 kg/m³) y el cemento se calculó en volumen de 1:4 a 1:8, en relación a la perlita.



Figura 1 – a. Perlita volcánica, b. Perlita expandida, c. Probetas cúbicas ensayadas a compresión

Por último, en el trabajo de Artigas et al. [4], se presentó el análisis de hormigones con la incorporación de finos de perlita volcánica (90% de las partículas de tamaño inferior a $75 \mu\text{m}$) como adición mineral al contenido de cemento, y como reemplazo de éste, en un 5%, 10% y 15% en ambos casos. Las dosificaciones propuestas fueron elaboradas con el fin de comprobar si la perlita podía ser considerada como una adición activa o simplemente modificaba ciertas propiedades del hormigón. En estado fresco se evaluó el aspecto, la consistencia y el tiempo de fraguado; en tanto que en estado endurecido se procedió a analizar la resistencia a compresión, el módulo de elasticidad, la absorción y la velocidad de pulso ultrasónico.

La Tabla 1 describe las dosificaciones en estudio por unidad de volumen, en tanto que la Tabla 2 caracteriza el tipo de material.

Tabla 1: Dosificaciones y resistencias a compresión de morteros y hormigón con perlita.

Material	Dosificaciones				
	D0 mortero	D1 mortero	Jedidi et al. (2015) mortero	Señas et al. (2000) mortero	Artigas et al. (2021) hormigón
Cemento (kg/m^3)	300	698	300	350	450
Agregado Fino (kg/m^3)	1207	776	1207	-	709
Perlita (kg/m^3)	10,5	38	10,5	121	67
Agregado Grueso (kg/m^3)	-	-	-	-	979
Agua (l/m^3)	210	419	210	240	190
Aditivo (l/m^3)	3	2	3	3,5	1
Peso Unitario (kg/m^3)	1730,5	1933	1730,5	714,5	2396
a/c	0,70	0,60	0,70	0,82	0,42
f_c (28 días) (MPa)	19	29	18,5	3,9	38

Tabla 2: Caracterización del material empleado.

Material	Estudio			
	D0 y D1	Jedidi et al. (2015)	Señas et al. (2000)	Artigas et al. (2021)
Tipo de Cemento	CPC40	CEM I 32,5	CPN40	CPF40
Módulo de Finura del Agregado Fino	2,96	2,51	-	2,23
Tipo de Perlita	Expandida	Expandida	Expandida	Volcánica
Densidad de la Perlita (kg/m^3)	67	70	121	223
Tipo de Aditivo	hiperfluidificante	superfluidificante	Incorporador de aire	superfluidificante

Resultados

Las dosificaciones D0 y D1, así como las propuestas por Jedidi et al. [2] y Señas et al. [3], fueron empleadas en la elaboración de morteros con perlita expandida; en tanto que las mezclas de Artigas et al. [4], fueron para la elaboración de hormigones con adición de finos de perlita volcánica.

El material logrado por Señas et al. [3], no contenía agregados finos ni gruesos, solo utilizaron perlita expandida en gran cantidad, con lo cual necesitaron mayor contenido de agua por su gran capacidad de absorción; aunque usaron un aditivo incorporador de aire para limitar la cantidad de agua. Obtuvieron el menor peso unitario y la menor resistencia a compresión de todos los trabajos analizados, su finalidad era conseguir un material aislante de bajo peso capaz de sostener clavos para su fijación a otros materiales de construcción. En el estudio de Artigas et al. [4], consiguieron la mayor resistencia a compresión a los 28 días, cuando se adicionó un 5% y 10% de finos de perlita volcánica (sin reemplazo de cemento). Dentro del mismo estudio, obtuvieron mayores resistencias respecto a una dosificación patrón sin perlita; por lo tanto, demostraron su actividad puzolánica. La relación a/c fue la menor de todas las analizadas en este trabajo, y acorde a la elaboración de hormigones, con un peso unitario convencional; por lo tanto, consiguieron un material para resistir cargas compatibles con un uso estructural.

En la dosificación D0 y la presentada en el trabajo de Jedidi et al. [2], se consiguieron resistencias a compresión muy similares entre sí, cercanas a 20 MPa, con un menor peso unitario que para un hormigón convencional. En la dosificación D1 se aumentó de manera considerable la cantidad de cemento y el volumen de perlita, y se redujo el contenido de agregado fino; con lo cual se aumentó la resistencia a compresión a casi 30 MPa y con un peso unitario menor a 2000 kg/m³. En todas las mezclas analizadas fue necesaria la incorporación de un aditivo para darle una consistencia adecuada. En las dosificaciones D0 y D1 se incorporó un hiperfluidificante en una dosis del 1% y 3,5% respectivamente, en la de Jedidi et al. [2] y Artigas et al. [4] utilizaron un superfluidificante en una dosis del 1% y 4,5% respectivamente. En el trabajo de Señas et al. [3] usaron un aditivo incorporador de aire en una dosis del 1%. En resumen, las dosificaciones realizadas para este trabajo demuestran tener una resistencia a compresión tal que permitirían fabricar elementos estructurales más livianos que con un hormigón convencional.

Conclusiones

El objetivo propuesto para la presente investigación fue el de determinar el efecto de la adición de perlita en mezclas cementicias con el fin de lograr morteros y hormigones resistentes y livianos para un uso estructural y no estructural. Para ello se analizaron cinco muestras, dos elaboradas por los autores y tres obtenidas de bibliografía de referencia.

Se puede concluir que la perlita volcánica, expandida y sus finos permiten realizar morteros y hormigones para uso estructural, y materiales livianos aislantes de uso no estructural. Es necesario analizar las propiedades de las perlitas para ver su aplicación en cada caso y estudiar el uso de distintos aditivos y su cantidad para darle una adecuada trabajabilidad a los morteros y hormigones.

Referencias

- [1] American Society for Testing and Materials, "ASTM C-109: Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars", (2021).
- [2] Jedidi, M., Benjeddou, O. y Soussi, C., "Effect of expanded perlite aggregate dosage on properties of lightweight concrete", *Jordan Journal of Civil Engineering*, Volumen 9, N°3, (2015), 278-291.
- [3] Señas, L., Maiza, P. y Marfil, S., "Durabilidad de hormigones livianos elaborados con perlita expandida", *Revista Ciencia e Ingeniería*, Volumen 25, N°3, (2004).
- [4] Artigas, V.F., Positieri, M.J., Quintana, M.V. y Oshiro, A., "Influencia de finos de perlita en hormigones", *Revista Tecnología y Ciencia*, N° 41, (2021), 18–33. Disponible Online en: <https://doi.org/10.33414/rtyc.41.18-33.2021>

HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO Y MICRO-POLIPROPILENO: ESTADO DEL ARTE NORMATIVO Y SU COMPORTAMIENTO MECÁNICO-RESISTENTE

Elizabeth Fiorella Cuéllar Huamani^{1, 2}

¹ Estudiante de posgrado – Maestría en Construcción y Diseño Estructural, Universidad de Buenos Aires, Argentina

² Dirección Provincial de Infraestructura, Tecnología Médica y Servicios Auxiliares, Ministerio de Salud de la Provincia de Buenos Aires, Argentina

Palabras Clave: hormigón, altas temperaturas, propiedad mecánico-resistente, fibras de acero, fibras de micro-polipropileno.

Introducción y generalidades

El principal objetivo de proyectar estructuras contra altas temperaturas e incendios es: procurar la estabilidad de la misma durante un cierto periodo de tiempo, tal que permita la evacuación de los ocupantes, y anular o reducir la degradación de las construcciones linderas. Una obra civil debe ser diseñada y construida de modo tal que, en caso de incendio, su estabilidad se mantenga por un periodo razonable de tiempo [1].

Entre varias situaciones de incendio ocurridas, se cita como ejemplo el del Edificio Winsor, Madrid (año 2005), el fuego se inicia por ignición de elementos de oficina, en el piso N°21, cubriendo por completo el sector superior del edificio en 20 minutos, llegando a temperaturas máximas de hasta 1000 °C, comprometiendo la estabilidad global estructural. Ardió durante 26 hs. Consumió 2 días en extinguirse. Afortunadamente no hubo víctimas fatales. Los daños y perjuicios superaron los 143 millones de euros.

En este marco, resulta de interés el estudio del comportamiento mecánico del hormigón simple como material en sí mismo, y combinado con adición de fibras. En primera instancia combinado con adición de fibras de acero, y por otro lado combinado con fibras de micro-polipropileno.



Figura 1 – Antes y después del incendio del Edificio Winsor, Madrid, año 2005

Marco teórico y normativo

Según sea su intensidad y duración, la acción del calor provoca sobre el hormigón modificaciones de tipo volumétrico, físico, mecánico y de composición. Dichas modificaciones dependerán, también, de la composición del hormigón y de la cantidad de agua disponible en el mismo en el momento de la agresión. No obstante, en términos comparativos con otros materiales de uso estructural, el hormigón presenta un buen comportamiento frente al fuego, debido a su baja conductividad térmica, incombustibilidad y capacidad de protección del acero frente a estas solicitaciones, cuando se tiene en cuenta la seguridad estructural [2]. En general hasta temperaturas de 200 °C sólo se producen reducciones de la resistencia menores al 25% y superados los 300 °C el decrecimiento es más intenso [3].

En la pasta, se verifica que cuando la temperatura alcanza aproximadamente los 300 °C, se perderá el agua intercalada del C-S-H y algo del agua químicamente combinada del C-S-H y de los sulfoaluminatos hidratados. A partir de allí y hasta los 500 °C aproximadamente se acelera el deterioro, encontrándose una diferencia marcada con el hormigón de agregados silíceos, en este caso con reducción de resistencias del orden del 50%. A partir de aproximadamente los 700 °C, se produce una considerable aceleración del deterioro para los dos hormigones, llegando todos a una pérdida prácticamente del total de la resistencia cuando la temperatura supera los 870 °C y se acerca a los 1000 °C, como consecuencia de la descomposición de los hidratos [4].

Los efectos del aumento de temperatura sobre el hormigón son leves y algo irregulares hasta aproximadamente los 300 °C, con alguna producción de fisuración superficial, pero más allá el material experimenta una significativa pérdida de resistencia [2].

Actualmente, CIRSOC 201-2005, según el tipo de agregado silíceo o calcáreo tabula espesores y recubrimientos mínimos para la resistencia al fuego para distintos niveles de tiempo de exposición, sin embargo, no provee métodos de diseño analíticos. La norma, acepta que en un futuro es necesaria una publicación específica del tema.

Internacionalmente, el Eurocódigo EN 1992-1-2 (2004) indica empleando Hormigones de Ultra Alta Resistencia (HSC) de Clase 2 y Clase 3, se prevee *spallig* del hormigón expuesto en cualquier situación de fuego, con lo cual en tal caso se aplica una dosis mayor a 2kg/m^3 de fibras de polipropileno, entre otras soluciones. No obstante, la misma no formula métodos analíticos de diseño de HSC con fibras de polipropileno sometidas a fuego.

Con el fin de estudiar el comportamiento mecánico del hormigón simple y de alta resistencia expuesto a altas temperatura, se observan y reflexionan los resultados que se desprenden de la campaña experimental en el artículo “*Mechanical Properties of Concrete with Steel and Polypropylene Fibres at Elevated Temperatures*” de Bošnjak, J., Sharma, A. y Grauf, K. (2019) [5].

Campaña experimental

Tratamiento térmico: los hormigones se investigaron en un rango de $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (condiciones ambientales) hasta $600\text{ }^{\circ}\text{C}$, $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ u $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ dependiendo de la propiedad investigada. Para el calentamiento, se colocaron las muestras de prueba dentro de un vehículo eléctrico con controles programables para la velocidad de calentamiento, así como el tiempo de retención para la temperatura. La temperatura objetivo en cada caso se alcanzó a una velocidad de calentamiento relativamente lenta de $2\text{ }^{\circ}\text{C/min}$. Después de alcanzar la temperatura deseada, la temperatura se mantuvo durante 3 hs, para garantizar un calentamiento uniforme de la muestra de prueba. Se permitió que la temperatura bajara gradualmente después de completar el tiempo de retención, se abrieron los pequeños orificios de ventilación en el horno, mientras se mantenía la puerta del horno cerrada. Cuando la temperatura del horno alcanzó aproximadamente $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, la puerta del horno se abrió para permitir un enfriamiento relativamente rápido [5].

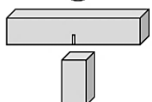
Material property	Specimen Type	Specimen Dimensions	Shape
Compressive strength	Cube	$150\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 150\text{ mm}$	
Split tensile strength	Cylinder	$150\text{ mm (D)} \times 300\text{ mm (H)}$	
Flexural tensile strength	Notched beam	$150\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 600\text{ mm}$	
Fracture energy	Notched beam	Central notch: 5 mm wide and 50 mm high	
Static modulus of elasticity	Square prism	$100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 200\text{ mm}$	
Dynamic modulus of elasticity	Square prism		

Figura 2 – Probetas ensayadas
(tomado de Bošnjak, J., Sharma, A. y Grauf, K., 2019)

Mezcla de hormigón: La Tabla 1 describe la mezcla considerada en cada caso. Las denominaciones indicadas se refieren a: SFRC - hormigón reforzado con fibras de acero con una dosis de 50 kg/m^3 de fibras de acero con ganchos extremos, HyFRC - hormigón reforzado con fibra híbrida con una dosis de 50 kg/m^3 de fibras de acero con ganchos extremos y una dosis de 1 kg/m^3 de fibras micro-polipropileno, y NC - hormigón normal sin fibras. Para garantizar la viabilidad de la mezcla, se realizaron ligeros ajustes en el contenido agregado y la cantidad de superplastificante [5].

Tabla 1: Descripción de la mezcla de hormigón utilizada en el programa de prueba
(tomado de Bošnjak, J., Sharma, A. y Grauf, K., 2019).

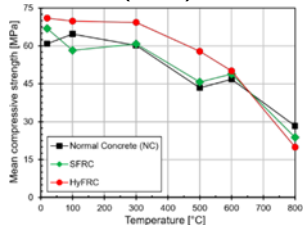
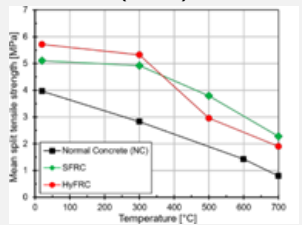
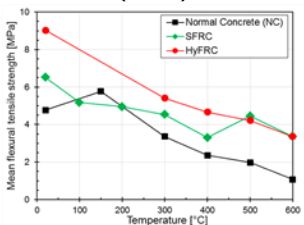
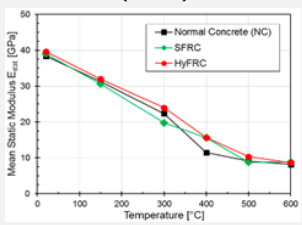
Mixture ID	Cement (kg/m^3)	Sand (kg/m^3)	Aggregate 1 (2–4 mm) (kg/m^3)	Aggregate 2 (4–8 mm) (kg/m^3)	Aggregate 3 (8–16 mm) (kg/m^3)	Water/Cement Ratio (-)	Superplasticizer (% of cement)	Steel Fibres (kg/m^3)	Micro PP Fibres (kg/m^3)
NC	370	562	259	392	571	0.48	0.2	0	0
SFRC	370	556	256	389	565	0.48	0.3	50	0
HyFRC	370	556	256	389	565	0.48	0.4	50	1

Ensayos: Las probetas se moderaron según las normas y recomendaciones, obteniendo sus distintos gráficos de comportamiento a altas temperaturas, indicadas en la Tabla 2.

Todos los tipos de hormigones, fueron ensayados a una edad similar de aproximadamente 5 a 6 meses. Al evaluar los resultados, solo se analizaron 2 muestras por caso (solo en casos excepcionales 3 o más). Sólo se investigó una dosis de fibras de acero y polipropileno [5].

Como se puede observar en los gráficos de la Tabla 2, la presencia de fibras micro-polipropileno y, de acero, favorecen a la mezcla de hormigón en alta temperatura, a comparación de un hormigón simple. No se observan efectos significativos en el módulo de elasticidad estático, debido a su bajo contenido volumétrico. Se observan notables cambios en la resistencia a tracción por flexión de HyFRC, debido a la influencia beneficiosa de las fibras [5].

Tabla 2: Normas aplicadas y gráficos de comportamiento.

	Resistencia a compresión	Resistencia a tracción por compresión diametral	Resistencia a tracción por flexión	Módulo de elasticidad estático
Norma aplicada	EN 12390-3 (2009)	EN 12390-6 (2009)	RILEM 50-FMC (1985)	EN 12390-13 (2013)
Gráficos	 Resistencia media a la compresión de diferentes mezclas de hormigón.	 Degradación de la resistencia a tracción en función a distintas temperaturas de exposición.	 Resistencia a la tracción a la flexión de diferentes tipos de hormigón a distinta temperatura.	 Variación del módulo de elasticidad estático a altas temperaturas.

Conclusiones y reflexiones finales

- Aun disponiendo de literatura en forma limitada referida a investigaciones científicas, sigue siendo un tema nuevo que sigue en discusión en los últimos tiempos.
- Ahondar en el comportamiento mecánico-resistente del hormigón reforzado con fibras de acero y micro-polipropileno, permite incorporar itemizados con criterios básicos de diseño y sugerencias a la normativa.
- Si bien, no todas las obras civiles por su uso ameriten esta clase de hormigones, por lo oneroso del proyecto, se debe poder contar con lineamientos base para el diseño de estructuras sometidas a altas temperaturas o fuego. Con el objetivo final, de que se logre la integridad estructural durante un cierto tiempo, tal que permita la evacuación de las personas ocupantes.
- La esbeltez de la fibra, relación longitud de las fibras (l) con el diámetro máximo del agregado ($d_{\text{máx}}$) empleado en la campaña experimental, se aproxima bien a la siguiente relación recomendada en hormigones de alta resistencia: $l \geq 2,5 d_{\text{máx}}$ [6]. En virtud de la fibra de acero, que es de mayor esbeltez que la fibra micro-polipropileno.
- Según lo observado en la campaña experimental, la respuesta entre solicitaciones por alta temperatura, está íntimamente vinculada al tipo de fibra empleada en la mezcla, y bien si es híbrido, o no. Además, influye el tipo de agregado, el tiempo de exposición, y la temperatura, ya que no es igual la respuesta de muestras ensayadas a alta temperatura que la “resistencia residual” [2].

Referencias

- [1] The Institution of Structural Engineers (Great Britain), “Introduction to the fire safety engineering of structures”, Edición IStructE, (2003), páginas 64. Disponible online en: <https://books.google.com.ar/books?id=j9ISAAAAMAAJ>
- [2] Balzamo, H., Bascoy, D., Bonavetti, V., Cabrera, O.A., Carrasco, M.F., Clariá, M.A., Di Maio, A., Eperjesi, L., Checmarew, R.L., Fornasier, G., Irassar, E.F., López, R., Maldonado, N.G., Oshiro, A., Rahhal, V., Sota, J.D., Traversa, L.P., Zega, C., Zerbino, R.L., “Ese material llamado hormigón”, 2da Edición, Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, (2012), 366 páginas.
- [3] Bazant Z.P., Kaplan M.F., “Concrete at high temperatures”, Concrete design and construction series, Editorial Longman, (1996), 412 páginas.
- [4] Metha P.K., Monteiro, P.J.M., “Concrete. Structure, Properties and Materials”, 2da Edición, Editorial Prentice-Hall, (1993), 450 páginas.
- [5] Bošnjak, J., Sharma, A. y Grauf, K., “Mechanical properties of concrete with steel and polypropylene fibres at elevated temperatures”, MDPI-Fibers, Vol. 7, Nº2, (2019), 9 páginas. Disponible Online en: <https://www.mdpi.com/journal/fibers>
- [6] Zerbino, R.L., “Hormigón reforzado con fibras”, Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, (2020), 323 páginas.

COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE VIGAS DE GRAN ALTURA DE HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS: ANÁLISIS EXPERIMENTAL

Miqueas C. Denardi¹, Viviana C. Rougier²

¹ Universidad Tecnológica Nacional – Regional Concordia

² Universidad Tecnológica Nacional – Regional Concepción del Uruguay

Palabras Clave: Vigas de gran altura, resistencia a corte, hormigón reforzado con fibras.

Introducción

El hormigón tiene una resistencia a la tracción considerablemente menor que a compresión. El uso de fibras como agregado a la masa de hormigón es una alternativa útil al refuerzo tradicional de barras de acero. Muchos estudios han demostrado que el uso de fibras en el hormigón permite una reducción de la cuantía de barras de acero en distintas aplicaciones estructurales [1, 2, 3, 4, 5, 6].

La utilización del hormigón reforzado con fibras resulta de gran interés desde el punto de vista práctico y económico en el caso particular de vigas de gran altura (VGA) que por sus características de comportamiento mecánico requieren de gran cantidad de armadura de refuerzo [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13].

En este trabajo se muestran los resultados de una campaña experimental en la que se evaluó la efectividad del uso de fibras de acero e híbridas (de acero y macrofibras de polipropileno) como agregado al hormigón en VGA, en reemplazo parcial de la armadura tradicional de barras de acero. Actualmente no hay a nivel nacional una normativa sobre el uso de fibras como refuerzo en hormigones, por ello, este trabajo es un aporte al conocimiento del comportamiento mecánico de dicho material compuesto.

Campaña experimental

El programa experimental consistió en la elaboración y ensayo a flexión en tres puntos de 36 VGA elaboradas con 3 tipos de hormigón: simple, HRFA (hormigón reforzado con fibras de acero) y HRFH (hormigón reforzado con fibras híbridas). Dicho programa se desarrolló en 3 etapas de 12 VGA cada una. Además, se elaboraron y ensayaron probetas cilíndricas y vigas tipo RILEM para caracterizar el comportamiento mecánico del hormigón.

Fueron elaboradas 18 vigas con hormigón simple, 9 con armadura de flexión y corte en la dirección paralela y perpendicular a la luz del tramo, y 9 con armadura de flexión y armadura de corte reducida y solo en la dirección perpendicular a la luz del tramo. Con HRFA se elaboraron 12 especímenes según dos volúmenes de fibras de acero: 3 con 1% del volumen (80 kg/m³) y 9 con 0.5% del volumen (40 kg/m³). Los 6 especímenes restantes se elaboraron con HRFH con 0.5% del volumen de fibras de acero y 0.5% de macrofibras de polipropileno. Todas las VGA de HRFA y HRFH se fabricaron con armadura de flexión y armadura de corte reducida.

El diseño de las VGA se realizó siguiendo los lineamientos del CIRSOC 201 Apéndice A [14], con una longitud de 600 mm con una luz entre apoyos de 500 mm y una sección de 300 mm de alto y 100 mm de ancho. La luz de corte es de 250 mm y la relación entre la luz libre y la altura es de 1.67 (los reglamentos CIRSOC y ACI, establecen que dicha relación sea menor que 4, para considerar una viga como de gran altura). En todos los especímenes se colocó armadura de flexión. En las vigas de la serie "CA" se colocó armadura de corte según Apéndice A, "Método de Bielas y Tirantes", CIRSOC 201-05. En el resto de los especímenes se dispuso armadura de corte reducida y solo en la dirección perpendicular a la luz del tramo.

En la Tabla 1 se presenta la descripción de los especímenes ensayados, en cuanto a denominación, características geométricas y contenido de fibras en porcentajes de volumen. La nomenclatura utilizada es la siguiente: V, hace referencia a las VGA. La sigla CA, representa a los especímenes de hormigón simple con armadura a corte reglamentaria, mientras que la SA hace referencia a las vigas de hormigón simple y armadura a corte reglamentaria reducida. Los especímenes de hormigón reforzado con fibras de acero son representados con la nomenclatura HRFA, en los que el porcentaje de adición de fibras en volumen es 0.5% y 1% (HRFA-1) respectivamente. Por su parte, las letras HRFH representan los especímenes de hormigón reforzado con fibras híbridas.

Tabla 1: Detalle de los especímenes de VGA.

Campaña	Especimen	Fibras		Armadura de corte
		Acero (%)	Polipropileno (%)	
I	V-CA	-	-	Mínima completa
	V-SA	-	-	Reducida
	V-HRFA	0.5	-	Reducida
	V-HRFA-1	1	-	Reducida
II	V-CA	-	-	Mínima completa
	V-SA	-	-	Reducida
	V-HRFA	0.5	-	Reducida
	V-HRFH	0.5	0.5	Reducida
III	V-CA	-	-	Mínima completa
	V-SA	-	-	Reducida
	V-HRFA	0.5	-	Reducida
	V-HRFH	0.5	0.5	Reducida

Materiales

Hormigones: En la ejecución de las vigas se utilizaron 3 tipos de hormigón: simple, HRFA y HRFH, dosificados según el Método ICPA de Diseño Racional de Mezclas de Hormigón del Instituto del Cemento Portland Argentino (ICPA) en función de obtener una resistencia característica de rotura a compresión a los 28 días de 25 MPa. Se trabajó con agregados de la zona y cemento portland compuesto (CPC40). La dosificación utilizada para 1 m³ fue: agua 182.55 kg, cemento 356.9 kg, canto rodado 985.77 kg, agregado fino 762.26 kg. En la Tabla 2 se muestra la resistencia media a compresión (f'_m) y la correspondiente desviación estándar (s_m) de los tres tipos de hormigón para cada una de las campañas.

Tabla 2: Resistencia a la compresión del hormigón.

Etap	Tipo de hormigón	Resistencia media a la compresión: f'_m (MPa)	S_m
I	HS	26,07	2,25
	HRFA	32,48	2,20
	HRFA-1	33.87	3,02
II	HS	31.28	1,79
	HRFA	26.20	1,25
	HRFH	27.42	1,39
III	HS	30.73	2,56
	HRFA	33.31	3,08
	HRFH	35.51	4,12

Fibras: Las fibras de acero empleadas son de extremo en gancho del tipo AR65, con una longitud de 50 mm, un diámetro de 0.8 mm, con una relación de aspecto de 62 y con un módulo elástico de 210 GPa. Para la elaboración del HRFH se utilizaron además macrofibras de polipropileno MACRONITA®, son fibras sintéticas recortadas de materiales poliméricos, con una longitud de 50 mm, un diámetro de 0.6 mm y una relación de aspecto de 83. Este tipo de fibras es químicamente inerte, tienen estabilidad volumétrica, un bajo módulo de elasticidad y bajo punto de fusión.

Procedimiento de ensayo e instrumentación: Con el objetivo de conocer el comportamiento mecánico de las VGA, se las sometió al ensayo de flexión en 3 puntos. Estas pruebas implicaron la aplicación de cargas cuasi estáticas monótonas crecientes en el centro de la luz de las vigas. Las mismas fueron aplicadas usando una prensa Shimadzu con sistema hidráulico con capacidad de desarrollar una carga vertical nominal máxima de 1000 kN (Figura 1). Los valores de los desplazamientos se tomaron de manera continua con un equipo HBM QuantumX MX840B conectado a una computadora con el software CatmanEasy.



Figura 1 – Instrumentación del ensayo a flexión de las VGA

Resultados

En la Tabla 3 se presentan los valores promedio de carga de primera fisura (P_{cr}), la desviación estándar (S_{cr}), carga máxima (P_{max}), la desviación estándar (S_{max}), el desplazamiento vertical correspondiente a dicha carga (δ_{max}) y los modos de falla. Además, se muestra el porcentaje de incremento de las cargas máxima y primera fisura de las vigas de hormigón reforzado con fibras en comparación con los especímenes de hormigón simple con armadura de corte reducida.

Tabla 3: Resultados de ensayo a flexión de VGA.

Campaña	Especimen	P _{cr} (N)	S _{cr}	% incremento	P _{max} (N)	S _{max}	% incremento	δ _{max} (mm)	Modo de falla
I	V-SA	92000	7937	-	120000	6377	-	1,04	corte
	V-CA	94000	13144	-	140000	4337	-	0,98	corte
	V-HRFA	121666,6	12583	29,43	151285,6	8554	26,07	1,02	corte
	V-HRFA-1	120000	15176	27,65	167074,3	16985	39,23	1,18	corte
II	V-SA	94000	7549	-	147540,0	20611	-	0,77	Aplastamiento en apoyos
	V-CA	100000	5000	-	164412,3	16348	-	0,90	corte
	V-HRFA	100000	11547	6,38	158700,6	8364	7,56	0,94	corte
	V-HRFH	105000	2886	11,70	170253,4	8503	15,39	0,97	corte
III	V-SA	95000	5000	-	143547,0	22867	-	0,92	corte
	V-CA	95000	5291	-	183692,5	21980	-	2,03	corte
	V-HRFA	105000	7718	10,52	190554,5	6233	32,75	2,31	corte
	V-HRFH	115000	7637	21,05	198152,0	13813	38,04	3,10	Corte y flexión

Conclusiones

En este trabajo se presentó un estudio experimental de la capacidad resistente a corte de VGA de HS, HRFA y HRFH sometidas al ensayo de flexión con carga monotónica. Del análisis y comparación de los resultados se puede decir que:

- La incorporación de fibras de acero mejoró el comportamiento en resistencia de las vigas con armadura a corte reducida. Al aumentar el volumen de fibras agregado al hormigón, se logró un incremento significativo de la capacidad resistente.
- En general, se observó que la adición de un solo tipo de fibras, y más aún, el agregado de dos tipos diferentes (fibras de acero y de polipropileno), permitió obtener cargas correspondientes a la primera fisura mayores que las obtenidas en el caso de los especímenes con armadura de corte mínima y armadura de corte reducida. Algunos de los especímenes de hormigón reforzado con fibras mostraron modos de falla combinado a corte y flexión lo que demuestra la eficiencia del uso de las fibras como refuerzo al corte.
- Los especímenes de HRFH mostraron en general, mayor resistencia y capacidad de deformación que los de HS y HRFA.

Referencias

- [1] Zerbino, R., Barragán, B. E., Conforti, A., Cuenca Asensio, E., Gettu, R., Giaccio, G., Isla, F., Luccioni, B., Nayar, S.K., Pombo, R., Torrijos, M.C., Stephen, S.J., Vivas, J.C, "Hormigón reforzado con fibras", 1ª edición, Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, (2020), 369 páginas.
- [2] Lantsoght, E.O.L., "How do steel fibers improve the shear capacity of reinforced concrete beams without stirrups?", Composites Part B, Vol. 175, (2019).
- [3] Cuenca, E., "On shear behavior of structural elements made of steel fiber reinforced concret", Universitat Politècnica de València, España, (2015).
- [4] Heek, P. y Mark, P., "Numerical simulation of steel fibre reinforced concrete girders subjected to cyclic loads", High Tech Concrete: Where Technology and Engineering meet, (2017), pp. 356-365.
- [5] Singh, H., "Steel Reinforced Concrete", Transactions in Civil and Environmental Engineering, Springer, (2014).
- [6] ACI 544.1R, "Report on fiber reinforced concrete", (1996-2002).
- [7] Nayak, C.B., "Experimental and numerical study on reinforced concrete deep beam in shear with crimped steel fiber", Innovative Infrastructure Solutions, Vol. 7, 41, (2021).
- [8] Abadel, A.A., y Albidah, A.S., "Investigation of shear reinforcement schemes for RC deep beams", Arabian Journal for Science and Engineering, 46, (2019), 4747–4763.
- [9] Shaikh, S., Kulkarni, S.K., Patil, S.S., y Halkude, S.A., "Effect of hybrid fibre reinforcement in concrete deep beams", Imperial Journal of Interdisciplinary Research (IJIR), Vol. 3, (2017).
- [10] Moradi, M., y Reza Esfahani, M., "Application of the strut-and-tie method for steel fiber reinforced concrete deep beams", Construction and Building Materials, Vol. 131, (2017), pp. 423-437.
- [11] Campione, G., "Flexural behavior of steel fibrous reinforced concrete deep beams", Journal of structural engineering, (2012), pp. 235-246.
- [12] Madan, S.K, Rajesh Kumar, G., y Singh, S.P., "Steel fibers as replacement of web reinforcement for RCC deep beams in shear", Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing), Vol. 8, Nº 5, (2007), pp. 479-489.
- [13] Smarzewski, P., "Analysis of failure mechanics in hybrid fibre-reinforced high-performance concrete deep beams with and without openings", Materials, Vol. 12, 101, (2019).
- [14] Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles, "CIRSOC 201: Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón", Instituto Nacional de Tecnología Industrial, (2005).

MECÁNICAS DE HORMIGONES DRENANTES DISEÑADOS SEGÚN ACI-522-10

Fernando L. Fogliatti¹, Rocío C. Goddio¹, Santiago A. Noguera Vivas¹

¹*Centro de Investigación y Desarrollo para la Construcción y la Vivienda (CECOVI) – UTN Facultad Regional Santa Fe, Santa Fe, Argentina.*

Palabras Clave: hormigones drenantes, dosificación, resistencia, permeabilidad.

Introducción

El hormigón drenante consiste en una mezcla de cemento, agua, agregado grueso de tamaño uniforme, a los que pueden sumarse una mínima cantidad de agregado fino y aditivos químicos. De esta manera se obtiene un material que tiene la característica de presentar vacíos interconectados que alcanzan valores entre el 15 a 35%, permitiendo que el agua percole a través de sus poros manteniendo aún niveles de resistencia a compresión de 3,5 a 28 MPa [1]. Estas propiedades cobran gran relevancia en la actualidad y han dado pie al desarrollo de diferentes aplicaciones que permiten controlar el caudal de escurrimiento superficial y la recarga de reservorios de agua, o acuíferos, en ciudades en continua expansión, a través de la construcción de pavimentos permeables que utilizan este material reduciendo el área impermeabilizada [2]. Además, se encuentran otros usos, como la construcción de reservorios pluviales que permiten regular los caudales de vertidos, solados permeables modulares, aceras, terrazas invertidas, barreras acústicas, etc. [3, 4].

Esto exige que se determinen los parámetros que influyen en las propiedades finales del hormigón drenante para lograr mejores métodos de dosificación. El tamaño de los agregados, la distribución y dimensiones de los poros, el volumen de pasta y la relación agua/cemento son algunos de los parámetros que dictan las características del material. Es por ello que en el presente trabajo se realizará la comparación entre las propiedades físicas y mecánicas de cuatro dosificaciones diferentes de hormigones drenantes, en las cuales varía la relación agua cemento, el volumen de pasta y para una de ellas el efecto de la incorporación de un aditivo reductor de agua de alto rango. En todas las dosificaciones se mantiene constante el tipo y cantidad de agregado grueso y fino, utilizando para el diseño de las mezclas una relación de vacíos teórica constante de 20%.

Al igual que ocurre con los hormigones convencionales y de propiedades especiales, existen varios métodos de diseño para hormigones drenantes, que se basan en diferentes premisas de cálculo e hipótesis propuestas, entre ellos pueden mencionarse el planteado por el American Concrete Institute (ACI) en su informe ACI 522R-10 [1], un método modificado propuesto por Nguyen et al. [5] y el presentado por De Solminihaç et al. [6] para mezclas de hormigón poroso en pavimentos urbanos permeables. En este trabajo se seguirá el método de dosificación de la ACI realizándose también una comparación entre la resistencia obtenida y los valores estimados mediante dicho método [7]. Con el fin de evaluar la idoneidad de las dosificaciones en términos de comportamiento hidrológico y resistente, se llevará a cabo el estudio de varias propiedades clave. Se analizarán la permeabilidad, absorción, densidad seca, porosidad efectiva, resistencia a compresión y resistencia a flexión a los 28 días.

Metodología

Para la elaboración de las cuatro dosificaciones de hormigón drenante, se incorporaron diferentes componentes, los cuales incluyeron agregado grueso y fino, cemento, agua potable y aditivos químicos. Específicamente, se utilizó piedra granítica 3-9 mm, arena de río, cemento portland compuesto CPC-40 (según IRAM 50000) y agua potable de red, que cumple con los requisitos del reglamento CIRSOC 201 [8] y la norma IRAM 1601 [9]. Cabe destacar que solo en una de las dosificaciones se usó aditivo químico, el cual consistió en un reductor de agua de alto rango basado en una solución acuosa de sulfonato de naftaleno modificado con una densidad de 1,18 a 1,21 g/cm³ y residuos sólidos de 34,58 g / 100 g. Las proporciones empleadas en cada caso se detallan en la Tabla 1.

Para cada mezcla se elaboraron 5 probetas cilíndricas de 10 cm x 20 cm compactadas en 3 capas de 10 golpes proporcionando una energía de 142,85 kJ/m³ mediante pisón chico, similar al del ensayo Proctor Estándar. Además, se ejecutaron 2 probetas prismáticas de 15 cm x 15 cm x 50 cm compactadas mediante pisón grande, similar al de Proctor Modificado, en 3 capas con 27 golpes y una energía de 146,22 kJ/m³. Todas las probetas se desmoldaron a las 24 h y se mantuvieron en curado en una pileta de agua con cal a temperatura de 23 ± 2°C hasta la edad de cada ensayo.

Tabla 1: Dosificaciones de las mezclas realizadas (por m³).

Identificación	A	B	C	D
Relación Agua/Cemento	0,35	0,35	0,35	0,275
Volumen de pasta (%)	15	20	25	25
Cemento (kg)	212	283	354	398
Agua (kg)	74	99	124	109
Agregado grueso (PG 3-9)	1331	1331	1331	1331
Agregado fino (kg)	213	213	213	213
Aditivo químico (kg/m ³)	-	-	-	4,8
Volumen de vacíos teórico (%)	20	20	20	20

La porosidad efectiva y la densidad seca se determinaron con el método de la balanza hidrostática. Dicha porosidad describe la proporción total de vacíos por la cual el agua puede circular [10, 11]. Es una propiedad importante para evaluar el comportamiento hidrológico y otras características del material. Por otro lado, para la permeabilidad se utilizó el método propuesto por Olek et al. [12] basado en un permeámetro de carga variable. Para obtener la resistencia a compresión a 28 días se siguió el procedimiento de la norma IRAM 1546 [13] y se emplearon placas de elastómero no adheridas (IRAM 1709 [14]). Por otro lado, para la determinación de la resistencia a la flexión se empleó el procedimiento especificado por la norma IRAM 1547 [15], ensayando las probetas prismáticas inmediatamente después de un curado por inmersión.

Resultados y discusión

Los resultados obtenidos para cada ensayo se detallan en la Tabla 2.

Tabla 2: Resultados de ensayos obtenidos en cada dosificación.

Identificación	A	B	C	D
Permeabilidad (cm/s)	0,92	0,60	0,34	<0,30
Absorción	4,70	5,40	5,30	4,20
Densidad seca (kg/m ³)	1900	1982	2086	2081
Porosidad efectiva (%)	29,90	25,90	20,40	18,90
Resistencia a compresión a 28 días (MPa)	8,60	20,40	22,70	28,90
Resistencia a flexión a 28 días (MPa)	1,30	2,60	3,33	4,36
Resistencia a flexión según ACI (MPa)	1,84	3,27	3,51	4,12

Puede verse una reducción de la permeabilidad con el incremento del volumen de pasta, esto es debido a que, al incrementarse este valor, se llena una mayor cantidad de espacios vacíos presentes en el esqueleto granular del hormigón drenante, llegando en casos extremos a poder colmatar completamente estos espacios y dejar incomunicada cierta proporción de poros, reduciendo significativamente la capacidad permeable de este hormigón. Una diferencia notable puede verse entre la pasta A y C, donde un incremento del volumen de pasta del 10% significa la reducción de casi un 40% de la permeabilidad. En todas las dosificaciones realizadas se obtuvieron valores dentro de los usados normalmente para representar la permeabilidad de un hormigón poroso la cual se encuentra entre 0,14 a 1,22 cm/s [1].

Por otro lado, el uso del aditivo modificó ciertas propiedades del hormigón en estado fresco, observándose una reducción del rendimiento volumétrico debido a un acomodamiento de los agregados. En esta dosificación (D) se obtuvieron resultados de permeabilidad dispersos e inferiores a 0,3 cm/s. Se observó que en las superficies de las secciones hubo una menor cantidad de poros expuestos, lo que puede explicar los resultados obtenidos, poco representativos de la dosificación.

La absorción de las mezclas no sufrió grandes modificaciones, sin embargo, se incrementó levemente con el crecimiento del contenido de pasta, dándose una pequeña reducción en la dosificación con aditivo D la cual posee el mismo volumen de pasta que la mezcla C.

En los hormigones elaborados, el contenido de vacíos resultó mayor al valor objetivo de 20% fijado para el método de dosificación, con la sola excepción de la dosificación D.

Para el análisis de la resistencia a flexión a 28 días se realiza una comparación (Figura 1) con los resultados que brinda la ACI 522R-10 [1], la cual establece una expresión para dicha resistencia (f_r) en función de la resistencia a compresión (f'_c) obtenida (1).

$$f_r = 0,438 f'_c^{2/3} \quad (1)$$

De la Figura 1 se desprende que, la relación entre la resistencia a compresión y la resistencia a flexión obtenida a partir de (1) y de los resultados experimentales presentados en este trabajo, arrojó un coeficiente de determinación $R^2 = 0,8334$.

Tanto la resistencia a compresión como a flexión experimentaron un incremento significativo con el aumento del volumen de pasta y el uso de aditivo. Se obtuvieron incrementos en la resistencia a compresión de hasta aproximadamente 240% entre las dosificaciones A y B, para un aumento en el volumen de pasta de 20 %.

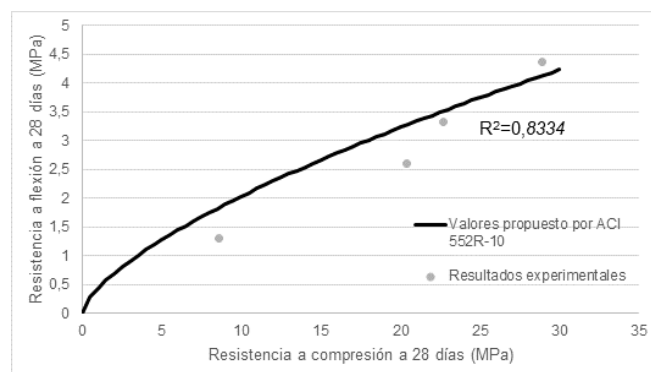


Figura 1 – Comparación entre los resultados experimentales y los valores

Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos se puede concluir que:

- La permeabilidad, absorción y la porosidad disminuyen con el aumento del contenido de pasta.
- La incorporación del aditivo químico mejoró notablemente la resistencia a compresión y flexión. Se observó una disminución de la permeabilidad, no así de la absorción y porosidad.
- Se comprobó la validez de la relación entre la resistencia a compresión y flexión propuesta por la ACI 522R-10, con un coeficiente de determinación (R^2) de 0,8334, permitiendo obtener el valor de la resistencia a flexión a partir de la resistencia a compresión sin cometer errores considerables.

Referencias

- [1] American Concrete Institute (ACI) Committee 522, "522R-10 Report on Pervious Concrete", (2010).
- [2] Castro Espinosa, M. L., "Pavimentos permeables como alternativa de drenaje urbano", Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil, Bogotá, Colombia, (2011).
- [3] Aguirre, D.D., Argento, R.S., y Carrasco, M.F., "Hormigones drenantes como retardadores de excedentes pluviales", IX Congreso Internacional y 23ª Reunión Técnica de la AATH, (2022), 511-519.
- [4] Miraglio, M.E., Aguirre, D.D., Fogliatti, F., "Uso del hormigón drenante como alternativa a los sistemas de regulación pluvial convencionales", JIT 2021: Jornadas de Jóvenes Investigadores Tecnológicos, (2021), 243-247.
- [5] Nguyen, D.H., Sebaibi, N., Boutouil, M., Leleyter, L., Baraud, F., "A modified method for the design of pervious concrete mix", Construction and Building Materials, Vol. 73, (2014), 271-282.
- [6] De Solminihaç, H., Videla, C., Fernandez, B., Castro, J., "Desarrollo de mezclas de hormigón poroso para pavimentos urbanos permeables", Materiales de Construcción Vol. 57, 287, (2007), 23-36.
- [7] Aguirre, D.D., Argento, R.S. "Hormigón drenante como regulador de excedentes pluviales", Tesina de grado, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, (2021), 41-46.
- [8] CIRSOC, "CIRSOC 201: Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón", INTI, (2005).
- [9] Instituto Argentino de Normalización y Certificación, "IRAM 1601. Agua para morteros y hormigones de cemento".
- [10] Torres, A., Hu, J., Ramos, A., "The effect of the cementitious paste thickness on the performance of pervious concrete", Construction and Building Materials, 95, (2015), 850-859.
- [11] Aguirre, D.D., Fogliatti, F.L., Miraglio, M.E., "Efecto de la porosidad y espesor de pasta en el desempeño del hormigón drenante", JIT 2022: Jornadas de Jóvenes Investigadores Tecnológicos, (2022).
- [12] Olek, J., Weiss, W.J., Neithalath, N., Marolf, A., Sell, E., Thornton, W.D., "Development of quiet and durable porous Portland cement concrete paving materials. Final Report", Institute for safe, quiet and durable highways, Purdue University, (2003), 49-66.
- [13] Instituto Argentino de Normalización y Certificación, "IRAM 1546. Hormigón de cemento portland. Método de ensayo de compresión", (2013).
- [14] Instituto Argentino de Normalización y Certificación, "IRAM 1709. Método para el uso de placas de elastómero no adheridas en la determinación de la resistencia a la compresión de probetas cilíndricas de hormigón endurecido", (2016).
- [15] Instituto Argentino de Normalización y Certificación, "IRAM 1547. Hormigón de cemento. Ensayo de tracción por flexión", (1992).

EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE CARGA DE TUBOS DE HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS HÍBRIDAS

Federico González¹, Viviana Rougier¹

¹ UTN - Facultad Regional Concepción del Uruguay

Palabras Clave: hormigón, refuerzo, fibras híbridas, tubos.

Introducción

En las últimas décadas, se ha extendido el uso de un solo tipo de fibras, ya sean de acero o sintéticas, como refuerzo del hormigón en tubos premoldeados. Sin embargo, el hormigón tiene comportamiento a la fractura en múltiples escalas y un tipo de fibra proporciona refuerzo solo en un nivel y dentro de un rango limitado de deformaciones. Por ello, un refuerzo más eficiente podría lograrse utilizando la combinación de fibras de diferentes materiales, geometría y/o características mecánicas [1]. El hormigón reforzado con dos o más tipos de fibras, combinadas racionalmente, se denomina Hormigón Reforzado con Fibras Híbridas (HRFH). El principal propósito de usar fibras híbridas es mejorar el control de la fisuración en diferentes zonas del hormigón, a distintas edades y niveles de carga [2]. Además, dos o más tipos de fibras, combinadas adecuadamente, generan mejoras en las propiedades físicas y mecánicas del material a partir de la acción de cada una de ellas [3], lo que conduce a la mejora de la respuesta estructural del elemento analizado [4, 5].

Actualmente, existen normas que regulan la utilización del hormigón reforzado con fibras para la fabricación de tubos en distintos países del mundo, como por ejemplo en España, Brasil y Estados Unidos. Sin embargo, dichas normas contemplan la utilización de un solo tipo de fibra como refuerzo, mientras que el uso de la combinación de diferentes tipos de fibras en este tipo de elemento ha sido escasamente estudiado [6].

En este trabajo se analiza experimentalmente la capacidad de carga de tubos de HRFH (THRFH), de acero y polipropileno, de 600 mm de diámetro interior sometidos al ensayo de compresión diametral de tres aristas. Los resultados se comparan con los obtenidos para tubos de hormigón armado (THA) Clase II según la norma IRAM 11503 [7] y con tubos de hormigón reforzados con fibras de acero (THRFA), elaborados y ensayados durante la misma campaña experimental.

Metodología

Se elaboraron y ensayaron tubos de 600 mm de diámetro interior, 1000 mm de longitud y un espesor de pared de 75 mm. Dichas dimensiones son las establecidas por la norma IRAM 11503 [7] para tubos Clase II, que es la clase resistente de los tubos de control en este trabajo. En la Tabla 1 se muestra la cantidad y denominación de los especímenes a ensayar agrupados de acuerdo a sus características de refuerzo.

Tabla 1: Denominación, contenido de fibras y cantidad de especímenes elaborados.

Denominación	Fibras de acero (FA)	Relación de aspecto de FA	Fibras de Polipropileno (FPP)	Vol. total de Fibras	Cantidad De tubos
THA	-	-	-	0	4
THRFA-20(50)	20 kg/m ³	50	-	0,26 %	4
THRFH-20(50)/0.5	20 kg/m ³	50	0,5 kg/m ³	0,31 %	4
THRFH-20(50)/1.0	20 kg/m ³	50	1,0 kg/m ³	0,37 %	4
THRFH-20(67)/0.5	20 kg/m ³	67	0,5 kg/m ³	0,31 %	3
THRFH-20(67)/1.0	20 kg/m ³	67	1,0 kg/m ³	0,37 %	3

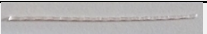
El grupo de control está constituido por los tubos de hormigón armado (THA), reforzados con la malla tradicional de acero para clase resistente II según IRAM 11503 [7]. Dicha armadura está formada por 7 barras de acero de 6 mm de diámetro en sentido longitudinal y una cuantía de 1,5 cm²/m en sentido transversal. El grupo de tubos de hormigón reforzado con fibras de acero (THRFA-20(50)) contiene 20 kg/m³ de fibras de refuerzo. Estas fibras de acero poseen una relación de aspecto igual a 50, siendo dicha relación igual al cociente entre su longitud y su diámetro equivalente.

Los tubos de hormigón reforzado con fibras híbridas (THRFH) se reforzaron con dos combinaciones de fibras diferentes: 20 kg/m³ de FA más 0,5 kg/m³ de FPP y 20 kg/m³ FA más 1,0 kg/m³ de FPP. Para ambas dosificaciones se emplearon dos relaciones de aspecto diferentes en las FA, 50 y 67.

Los especímenes ensayados se elaboraron en una empresa de premoldeados de la región mesopotámica argentina. Para este trabajo, se adoptó la misma proporción de la mezcla que utiliza la empresa para elaborar los tubos que comercializa. La mezcla de hormigón tenía una consistencia muy seca y gran cohesión debido a que, durante la etapa de producción, el tubo era desmoldado casi inmediatamente después del llenado. Las cantidades por metro cúbico de los pastones fueron: agua 80 l, cemento 300 kg, arena silíceo 980 kg y grava 1020 kg. Los agregados provenían de canteras de la zona, el canto rodado tenía un tamaño máximo igual a ½" y el módulo de fineza de la arena fue igual a 2,52.

Las fibras de refuerzo fueron agregadas manualmente a la mezcla, arrojándolas dentro de la mezcladora con la precaución de distribuirlas uniformemente en toda la superficie, a fin de evitar la formación de erizos. Se utilizaron dos tipos diferentes de macrofibras de acero (WIRAND® FF1 y WIRAND® FF3) y macrofibras de polipropileno (MACRONITA® 0.6). En la Tabla 2, se presentan las características geométricas de las fibras utilizadas, algunas de sus propiedades más importantes y se pueden observar sus formas.

Tabla 2: Características geométricas y mecánicas de las fibras empleadas como refuerzo.

Material de las fibras	Longitud mm	Diámetro mm	Densidad kg/m ³	Módulo GPa	Tracción MPa	Forma
Polipropileno	50	0,60	920	6	500	
Acero	50	1,00	7840	210	1200	
Acero	50	0,75	7840	210	1200	

Todos los tubos elaborados fueron ensayados a compresión diametral (Figura 1), de acuerdo a los procedimientos que establece la norma IRAM 11503 [7] para la determinación de la carga de rotura (F_R). El ensayo de compresión diametral es también denominado de "tres aristas" debido a que el tubo es apoyado sobre dos largueros de caucho rígido y la carga se aplica en el eje generatriz superior, a través de un perfil metálico que la distribuye uniformemente. La carga aplicada debe ser cuasi-estática monótona creciente y para su aplicación se usó una prensa con un sistema hidráulico con capacidad para desarrollar una carga vertical nominal máxima de 140 kN. Los valores de carga máxima se registraron a través de la utilización de una celda de carga digital.

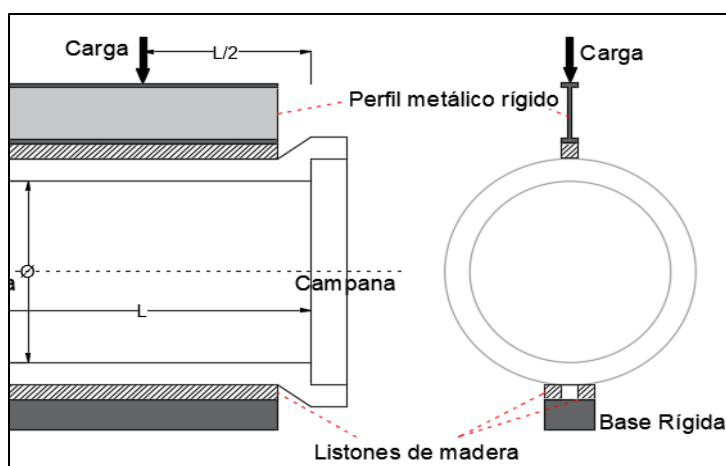


Figura 1 – Esquema de ensayo de compresión diametral de tres aristas

Resultados

En la Figura 2 se muestran las cargas de rotura promedio (F_{RM}) para cada grupo de especímenes. En la misma, se marca con una línea punteada la carga mínima de rotura (45 kN) establecida por la norma IRAM 11503 [7] para la Clase II. En la figura se observa que todos los grupos de THRFH superaron en promedio dicha carga, independientemente del tenor de fibras empleado. Por el contrario, los THRA registraron una F_{RM} 10,4% menor a la carga normativa.

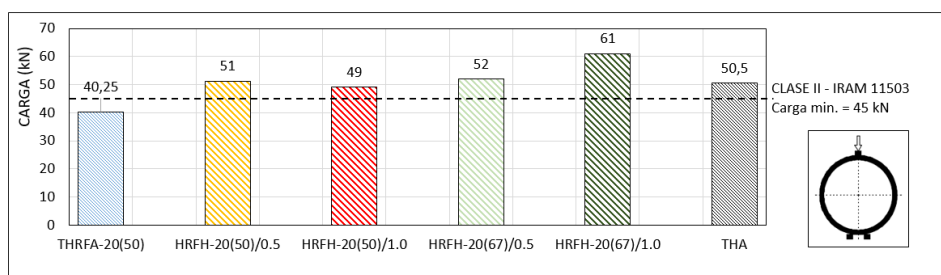


Figura 2 – Cargas de rotura promedio para los diferentes grupos

Los THRFH-20(50)/0.5, los THRFH-20(50)/1.0 y los THRFH-20(67)/0.5 alcanzaron una F_{RM} equivalente a los THA de grupo de control, con diferencias porcentuales muy bajas del orden de 1%, 3% y 3%, respectivamente. Sin embargo, el grupo con mayor contenido de FPP y FA de mayor relación de aspecto (THRFH-20(67)/1.0), superó la F_{RM} promedio del grupo de control THA en 20,8%. Basándonos en las cargas de rotura mencionadas, podemos observar que la resistencia a la rotura de los tubos se incrementó significativamente con la utilización de la combinación de fibras como refuerzo, en comparación con aquellos especímenes reforzados solamente con las FA. Las fibras, en general, forman una red tridimensional en la masa del hormigón que le impide segregar y fluir, por lo cual, la adición de un pequeño porcentaje de FPP le otorga mayor cohesión a la mezcla. Sin embargo, superado cierto volumen límite de fibras, la mayor viscosidad de la mezcla traería problemas de compactación que afectarían el comportamiento de la pieza durante el ensayo. Lo anterior explicaría la leve reducción en la carga de rotura promedio en los THRFH-20(50)/1.0 respecto de los THRFH-20(50)/0.5. Sin embargo, el uso de fibras de menor relación de aspecto que son más flexibles y con mayor eficiencia, según lo demostrado por otros autores [8, 9], combinada con un mayor contenido de FPP genera una sinergia que aumenta significativamente la carga máxima de los tubos. Esto se puede apreciar en la diferencia entre la F_{RM} registrada para el grupo de THRFH-20(67)/1.0 y los demás grupos de THRFH.

Otra observación que se realizó durante la ejecución de los ensayos fue el modo de falla de los tubos. Los THRFH, sin importar la dosis de fibras empleada o la relación de aspecto de las fibras de acero, rompieron sin desprendimiento de hormigón ni aplastamiento diametral. Se generaron cuatro fisuras principales, diametralmente opuestas entre ellas. Este tipo de rotura es típico de los tubos ensayados por compresión diametral y es compatible con una falla por flexión. Por el contrario, en los THA se observó desprendimiento de hormigón, aun antes de alcanzar la carga máxima o de rotura.

Conclusiones

En este trabajo se evaluó la capacidad de carga de THRFH a través del ensayo de compresión diametral de tres aristas, y los resultados fueron comparados con los obtenidos para THA y THRFA. Del análisis basado en los resultados obtenidos, se puede concluir lo siguiente: i) La adición de FPP para formar un refuerzo de fibras híbridas en el hormigón produjo un incremento en la carga de rotura promedio de los tubos, en comparación con los reforzados solamente con FA; ii) El aumento en el volumen de FPP en los THRFH produjo una leve disminución de la capacidad de carga cuando se emplearon FA con relación de aspecto igual a 50; iii) Se produjo una sinergia importante entre las fibras cuando se empleó FA con mayor relación de aspecto y mayor volumen de FPP en el refuerzo híbrido, incrementando de manera significativa la capacidad de carga de los THRFH; iv) Los THRFH alcanzaron una carga de rotura promedio equivalente a la de los THA Clase II.

Referencias

- [1] Zhang, T., y Pan, D., "Mechanical properties of steel-polypropylene hybrid fiber reinforced concrete in building structure: steel-polypropylene hybrid fiber reinforced concrete in building structure", *Stavební obzor-Civil Engineering Journal*, Vol. 30, Nº 2, (2021).
- [2] Li, Z.X., Li, C.H., Shi, Y.D., Zhou, X.J., "Experimental investigation on mechanical properties of Hybrid Fibre Reinforced Concrete", *Construction and building materials*, Vol. 157, (2017), 930-942.
- [3] Pakravan, H.R., Latifi, M., Jamshidi, M., "Hybrid short fiber reinforcement system in concrete: A review", *Construction and building materials*, Vol. 142, (2017), 280-294.
- [4] Caggiano, A., Gambarelli, S., Martinelli, E., Nisticò, N., Pepe, M., "Experimental characterization of the post-cracking response in hybrid steel/polypropylene fiber-reinforced concrete", *Construction and building materials*, Vol. 125, (2016), 1035-1043.
- [5] Singh, N.K., y Rai, B., "A review of fiber synergy in hybrid fiber reinforced concrete", *Journal of applied engineering sciences*, Vol. 8, Nº 2, (2018), 41-50.
- [6] Lee, S., Park, Y., Abolmaali, A., "Investigation of flexural toughness for steel-and-synthetic-fiber-reinforced concrete pipes", *Structures*, Vol. 19, (2019), 203-211.
- [7] Instituto Argentino de Normalización y Certificación, "IRAM-11503. Caños de hormigón armado no pretensado. Destinados a la conducción de líquidos sin presión", (1986).
- [8] Haktanir, T., Ari, K., Altun, F., Karahan, O., "A comparative experimental investigation of concrete, reinforced-concrete and steel-fibre concrete pipes under three-edge-bearing test", *Construction and building materials*, Vol. 21, Nº 8, (2007), 1702-1708.
- [9] Mohamed, N., Soliman, A.M., Nehdi, M.L., "Mechanical performance of full-scale precast steel fibre-reinforced concrete pipes", *Engineering structures*, Vol. 84, (2015), 287-299.

MORTERO REFRACTARIO (HIGH ALUMINA MORTAR): DISEÑO Y APLICACIONES

Juan Mendibe¹, Darío Campos^{2, 3}, Pablo Stumpf¹, Pablo Dahbar³

¹ Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Av. Vélez Sársfield 1600, Córdoba, Argentina

² Astori Estructuras S.A. – Av. Piero Astori 1500, Córdoba, Argentina

³ Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de Córdoba, Córdoba, Argentina

Palabras Clave: mortero, temperatura, calcinación, 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 la Universidad Católica de Córdoba con el fin de desarrollar morteros refractarios (*High Alumina Mortar* - HAM) con una consistencia que permita su colocación y un desarrollo de resistencia mecánica en función de las solicitaciones estructurales para los revestimientos en hornos con temperaturas comprendidas entre 1000°C y 1250°C.

Es importante destacar que las construcciones edilicias presentan una adaptación para la combinación de la estructura in situ y las placas premoldeadas de mortero refractario. La unión y conformación total de la placa premoldeada no será analizada por la confidencialidad que requiere el desarrollo.

Además en este trabajo se analiza la respuesta del mortero refractario de tres formulaciones con el objetivo de evaluar su resistencia a la compresión en estado normal y en un nuevo estado luego de experimentar un ciclo de calcinación de 900°C (Figura 1).



Figura 1 – Probetas Cilíndricas - High Alumina Mortar

Metodología

El estudio se presenta en dos etapas. La primera etapa se desarrolló íntegramente en el laboratorio, con ensayos normalizados de caracterización de los agregados y materias primas procediendo a realizar las dosificaciones y pastones de prueba.

En la segunda etapa a escala industrial se realizaron tres morteros definidos como M1, M2 y M3 a fin de validar las dosificaciones y ensayos de laboratorio. Se procedió a su evaluación en estado fresco y sus resistencias finales mediante ensayos de compresión simple en probetas curadas en condiciones normales y probetas sometidas a un ciclo de calcinación definido (Figura 1).

Materiales y Dosificaciones

La materia prima utilizada en este trabajo fue: cemento *Calcium aluminate cement* (EN 14647 – CAC [1]), dos tipos de agregado fino (chamotas refractarias) con características distintas correspondientes a “Chamete refractaria 1 triturada – AFC1” (absorción = 4,0%; Densidad = 1,79; Módulo de fineza = 1,81) y “Chamete refractaria 2 triturada – AFC2” (absorción = 4,0%; Densidad = 1,60; Módulo de fineza = 2,95), aditivos fluidificantes a base de policarboxilatos de marca reconocida y agua.

La elección de los materiales se realizó en función de sus propiedades térmicas y se definen como chamota refractaria de origen Italia. En la Figura 2, de acuerdo a normas IRAM 1605 [2], se muestran las granulometrías de las diferentes chamotas.

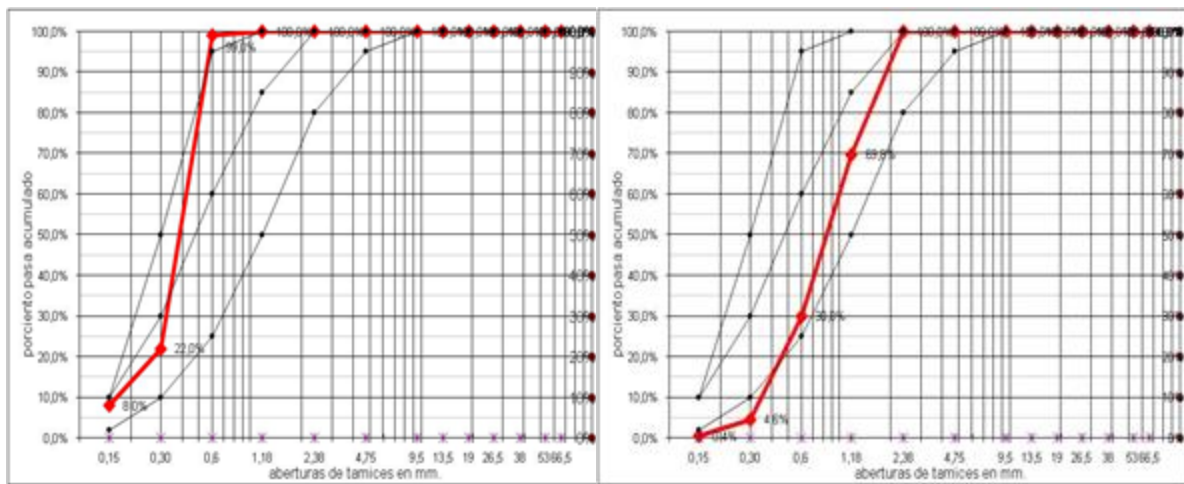


Figura 2 – Curva Granulométrica de AFC1 (izquierda) y de AFC2 (derecha)

Se realizaron tres dosificaciones de morteros (M1, M2 y M3) adoptando el método racional de la ecuación volumétrica [3].

De acuerdo a las recomendaciones del European Standard [1] se definió la relación a/c de 0,4 y un contenido de cemento mayor a 400 kg/m^3 para disminuir el riesgo de un posible proceso de conversión. La conversión en el hormigón aluminoso es un proceso químico que ocurre cuando se expone el hormigón aluminoso al agua o a la humedad ambiente. Durante esta reacción, el hidróxido de calcio (presente en el cemento) reacciona con la alúmina presente en el agregado aluminoso para formar un compuesto llamado gel de aluminato de calcio.

En la Tabla 1 se presentan las proporciones en kg/m^3 de los distintos materiales para lograr los tres morteros con resistencia superiores a 50 MPa.

Tabla 1: Dosificaciones de mezclas.

Mezcla	a/c	Proporciones de mezcla (Kg/m^3)					Densidad teórica (Kg/cm^3)	Asentamiento (cm)
		Agua	CimentFondu	AFC1	AFC2	Aditivo		
M1	0,4	188	470	730	790	4,7	2224,4	2
M2	0,4	188	470	593	928	4,7	2224,4	2
M3	0,4	188	470	395	1125	4,7	2224,4	2

El tenor de cemento fue constante para todos los morteros. En el mortero M1 se observa un 48% de AFC1 y un 52% de AFC2, es decir 48/52 (expresados en % de AFC1/AFC2). En el mortero M2 la relación es de 39/61 y en el mortero M3 la relación es de 26/74.

Tratamiento térmico

La calcinación de las probetas se realizó en una cámara controlada, bajo el régimen de temperatura que se observa en la Figura 3.

Hay un incremento de temperatura superior a los $230^\circ\text{C}/\text{hora}$ hasta alcanzar los 950°C , un mantenimiento a esta temperatura de 4 horas y un descenso de la temperatura más gradual durante 11 horas a razón de $90^\circ\text{C}/\text{hora}$. Este es el ciclo al que se sometieron las placas estructurales en el interior del horno (Figura 3).

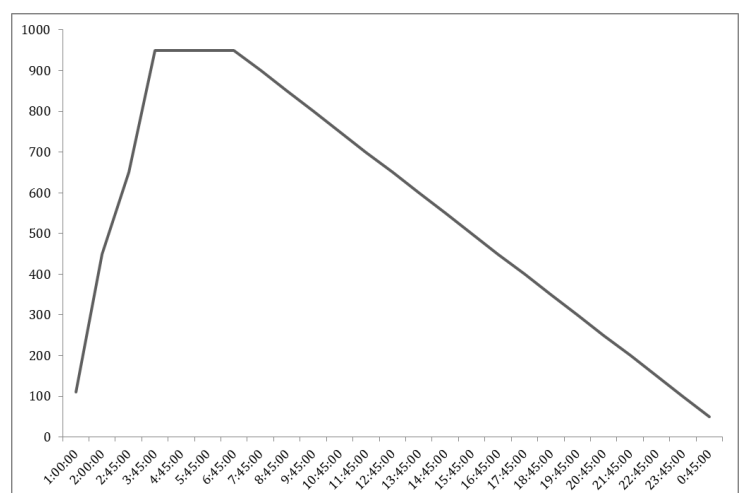


Figura 3 – Ciclo de calcinación

Resistencia a compresión

De la muestra total, se sometió el 50% a tratamiento térmico, y el otro 50% se utilizó como referencia de control para establecer la pérdida de resistencia luego del choque térmico. Se realizaron ensayos de compresión simple a 7 días sobre M1, M2 y M3 tanto en condiciones normales como calcinadas. En la Tabla 2 se muestran los resultados de ensayos de compresión para cada muestra.

Tabla 2: Resultados de resistencia a compresión.

Mezcla	Resistencia a 7 días (MPa)		% pérdida
	Normal	Calcinada	
M1	52,7	25,0	52,5%
M2	51,1	26,4	48,3%
M3	54,4	26,5	51,3%

Conclusión

Como conclusión se puede decir que:

1. El *High Alumina Mortar* (HAM) es un mortero muy especial ya que el mismo presenta muchas particularidades y complejidades a la hora de realizar el diseño de la mezcla, generar los pastones de prueba, lograr la aplicación en campo y verificar su resistencia antes y después de un ciclo de calcinación.
2. Los resultados obtenidos son satisfactorios, con una pérdida de resistencia luego del proceso de calcinado de un 50% aproximadamente.
3. La relación entre agregado de chamota fina y gruesa (ACF1/AFC2) no afecta en la pérdida porcentual de resistencia.
4. Aunque sólo se exprese la experiencia y los resultados preliminares de laboratorio y de campo la información compartida será de gran aporte a todo profesional que encuentre en un desafío similar.

Referencias

- [1] British Standards, "BS EN 14647:2005 - Calcium Aluminate Cement – Composition, specifications and conformity criteria", (2005), Anexo A.
- [2] Instituto Argentino de Normalización y Certificación, "IRAM 1505. Agregados: análisis granulométrico", Tercera edición, (2005).
- [3] Maldonado, N.G., "Cap. 7: Diseño y dosificación del hormigón", en: "Ese material llamado hormigón", Eds. Maldonado, N.G. y Carrasco, M.F., Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, (2012), 191-213.

EFFECTO DE LA MORFOLOGÍA Y COMPOSICIÓN DEL CEMENTO PORTLAND EN SU HIDRATACIÓN

Anyela Molina^{1, 2}, Iliana Rodriguez², Renan Pícolo Salvador³, Ariel Guzzo¹, Virginia Hernandez¹, Gustavo Tovar¹, Luis Segura²

¹ Cementos Artigas

² Universidad de la República, Uruguay

³ Universidad de São Judas Tadeu, Brasil

Palabras Clave: morfología del cemento, hidratación, calorimetría, reductores de agua.

Introducción

El presente trabajo se encuentra enmarcado dentro de un proyecto público-privado para desarrollar hormigón de alto desempeño, particularmente de alta resistencia, en el que el estudio de sus componentes y su adecuada selección se vuelve crucial. Se analizaron las muestras de cementos y su compatibilidad con adiciones y aditivos disponibles en el mercado, mediante ensayos de calorimetría. Los resultados demuestran la influencia de la composición del cemento y principalmente la influencia de la morfología de las partículas en su hidratación. Con ello se demostró que cuando la molienda del cemento es realizada mediante molino vertical se obtienen partículas más angulosas que las producidas por molinos de bolas. La angulosidad de las partículas aumenta la superficie específica, volviéndolas más reactivas y aumentando su velocidad de hidratación. Cuando se incorporan aditivos reductores de agua, el mismo es adsorbido en la superficie de las partículas, que al aumentar su angulosidad genera un efecto contrario; en el que el aumento de la superficie específica de las partículas aumenta su dispersión y disminuye su velocidad de hidratación.

Materiales y métodos

Se seleccionaron tres muestras de cemento que difieren tanto en sus componentes principales (clinker / yeso / arcilla calcinada / filler cálcareo) como en método de molienda (molino vertical, MV; molino de bolas, MB). La composición química de las muestras, presentada en la Tabla 1, se obtuvo a partir de Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X.

Tabla 1: Composición química y mineralógica de las muestras de Cemento.

Muestra	Composición Química (FRX)								
	SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	Fe_2O_3 (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO_3 (%)	K_2O (%)	Na_2O (%)	PPC (%)
C1	19,58	3,96	2,44	59,39	2,52	2,80	1,41	0,14	7,08
C2	20,70	3,92	2,00	61,38	3,05	3,00	1,43	0,14	3,46
C3	20,96	4,02	2,70	60,82	3,12	2,84	1,40	0,16	2,80

El aditivo seleccionado es un reductor de agua de última generación, cuya dosis adoptada fue de 0,6% en peso de cemento. Se utilizó agua destilada estabilizada a la temperatura ambiente del laboratorio, $20 \pm 2^\circ C$.

La molienda de las muestras de cemento se realizó mediante distintos métodos, obteniéndose diferentes granulometrías, superficies específicas y morfologías de las partículas (Figuras 1 y 2).

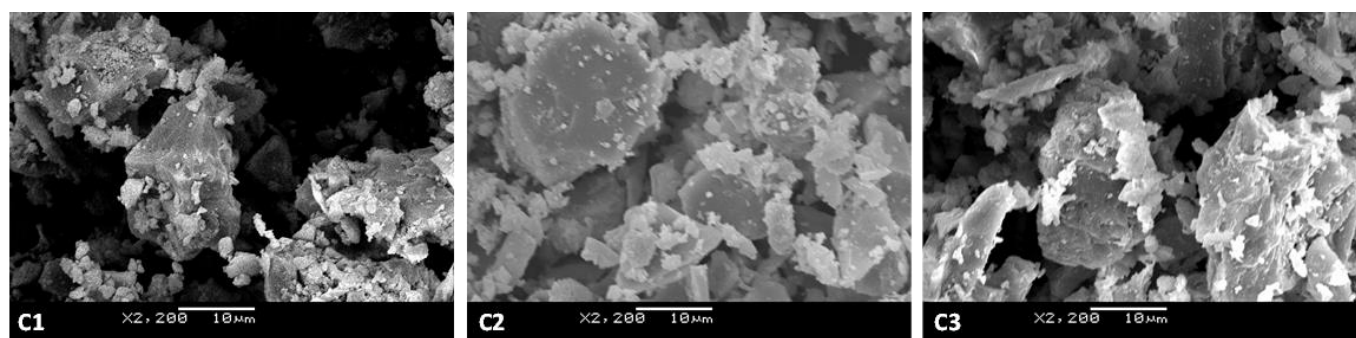


Figura 1 – Morfologías de las partículas de cemento, Microscopía Electrónica de Barrido

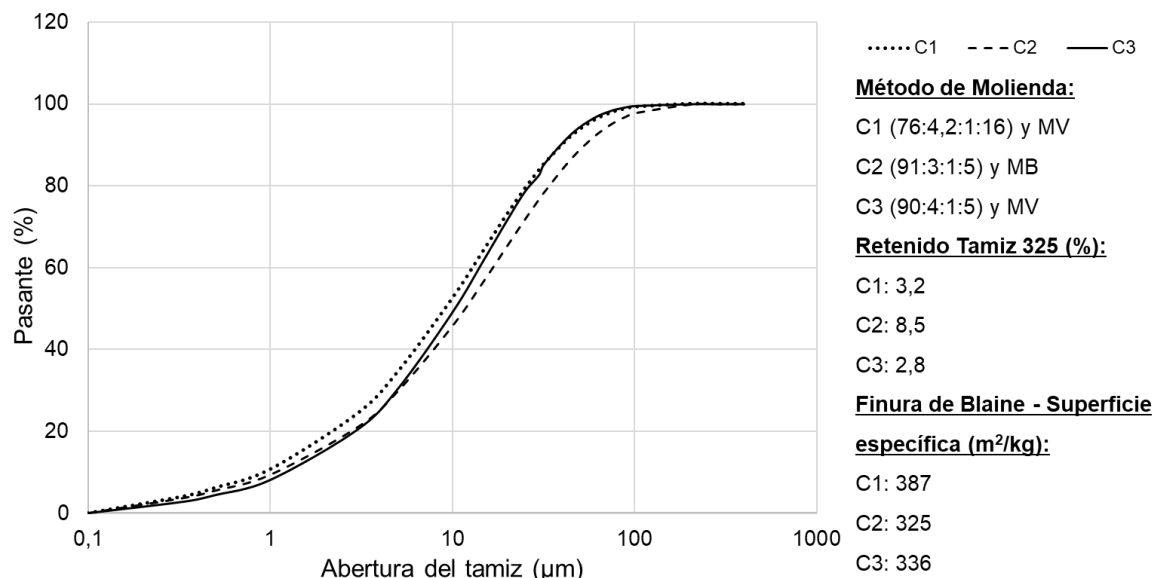


Figura 2 – Molienda, Granulometría, Retenido en el tamiz 325 y superficie específica de las muestras de cemento

Para cada ensayo se preparó una pasta con 500 g de cemento y una relación a/c de 0,45. La preparación de las muestras se realizó mediante una mezcladora IBERTEST (modelo ibermix, año 2022). Se procuró mezclar las pastas a velocidad lenta durante 1 minuto (paleta 140 rpm y planetario 61 rpm), luego con la ayuda de una espátula se rasparon las paredes del recipiente (1/2 minuto), finalmente se continuó con el mezclado a velocidad rápida por un lapso de 3 minutos (paleta 285 rpm y planetario 124 rpm).

El equipo utilizado fue un calorímetro isotérmico Calmetrix, modelo I-Cal 8000 HPC y la cantidad de pasta colocada dentro del equipo fue de 15 g. Se definieron la temperatura y duración de ensayo como 20°C y 48 horas respectivamente. Los ensayos se realizaron de acuerdo con los lineamientos que se encuentran en [1, 2] en caso necesario, los procedimientos fueron adecuados a las instalaciones del laboratorio.

Resultados

La Figura 3 presenta los resultados de calorimetría para los cementos C1, C2 y C3, con y sin incorporación de aditivo reductor de agua de última generación. Comparando los resultados para las muestras sin aditivos, es posible apreciar a grandes rasgos un comportamiento similar en la hidratación de los silicatos, con valores de liberación de calor máximos en el entorno de 3 mW/g.

El cemento C3 presentó mayor calor de hidratación durante la reacción de los silicatos (adjudicada al pico máximo). Pudiéndose observar también mayor variabilidad en la formación de etringita secundaria y su posterior conversión en mono-sulfatos.

Si se analizan las propiedades de las muestras de cemento, se aprecia que si bien el cemento C3 presentó mayor pico máximo de calor, la cantidad de C3S en su composición mineralógica resultó menor que en las demás muestras. Sin embargo, la angulosidad de sus partículas aumentó su velocidad de hidratación, implicando en una leve reducción del período inactivo y un aumento en el pico máximo de calor generado.

Analizando los resultados obtenidos para las pastas con incorporación de aditivo, se destaca que las muestras presentaron un comportamiento similar previo a la hidratación de los silicatos, donde puede apreciarse un retardo similar en el tiempo de inicio del fraguado.

La pasta del cemento C3 presentó mayor calor liberado (en el entorno de 3 mW/g) que la del cemento C1. Sin embargo, la muestra C2 fue la que presentó mayor pico máximo de liberación de calor. Observándose un comportamiento diferente al obtenido para las pastas sin aditivo.

Analizando la liberación máxima de calor, se ve la influencia del aditivo en las dos muestras cuya molienda se realizó mediante el molino vertical, presentando mayor superficie específica y por ende mayor dispersión de las partículas; implicando una disminución del pico máximo de calor al añadir el aditivo.

La hidratación de los aluminatos de la pasta C1 se vio afectada por la incorporación del aditivo, obteniéndose un pico más pronunciado. La incorporación de aditivos reductores de agua de última generación inhibe la hidratación de los aluminatos, retardando la formación secundaria de etringita.

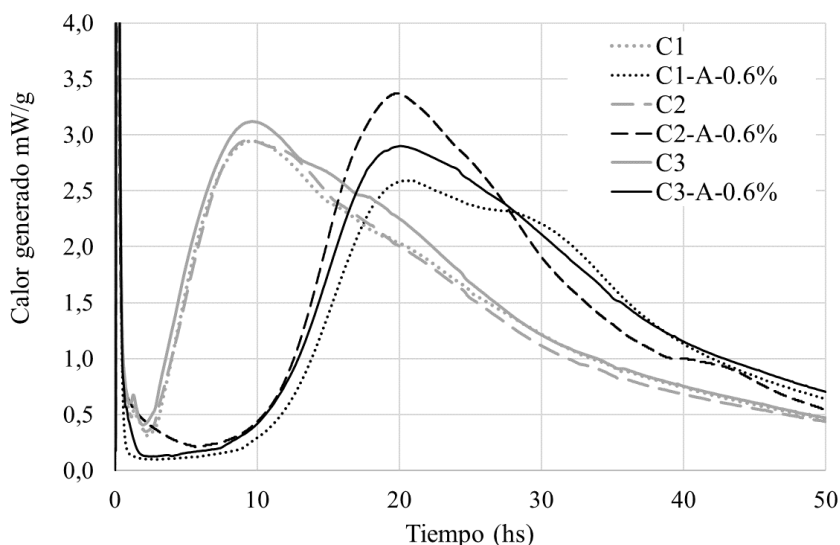


Figura 3 – Calorimetrías obtenidas de las pastas con y sin incorporación de aditivo

Conclusiones

Se constató que el tipo de molienda influye en la morfología de las partículas. Cuando se utiliza el molino de bolas la molienda es realizada por el machaqueo de la muestra mediante unas bolas de acero [3], que permiten que las partículas obtenidas presenten morfología aproximadamente esférica. En el caso del molino vertical la molienda es realizada por el paso de las partículas por debajo de rodillos de acero que las rompen mediante esfuerzo a compresión [3], obteniéndose partículas con mayor angulosidad.

Se observó que la morfología de las partículas afecta la hidratación de los aluminatos, generando mayor variabilidad en la formación secundaria de etringita y su posterior formación en mono-sulfato. La hidratación de los silicatos no se vio directamente afectada por el tipo de molienda, debido a su dureza. Sin embargo, se apreció que el aumento de la reactividad de las partículas aumentó la velocidad de reacción, disminuyendo el período inactivo y aumentando el pico máximo de calor generado.

Se comprobó la influencia de la morfología del cemento en la hidratación de las pastas cuando son incorporados aditivos reductores de agua de última generación. Al entrar en contacto el aditivo con el cemento, este es adsorbido a la superficie de las partículas, generando su dispersión. Cuando el cemento es molido mediante molino vertical incrementa la angulosidad y la superficie específica de la muestra, aumentando la adsorción del aditivo y consecuentemente la dispersión entre las partículas de cemento. Esto provoca que disminuya su interacción y por ende el calor máximo generado.

Referencias

- [1] Scrivener, K., Snellings, R., Lothenbach, B., "A practical guide to microstructural analysis of cementitious materials", Taylor & Francis Group, (2016), 530.
- [2] Hewlett, P.C., Liska, M., "Lea's Chemistry of Cement and Concrete", Fifth Edition, Butterworth-Heinemann, (2019), 858.
- [3] Di Maio, A., Oshiro, A., Zega, C., Bascoy, D., Irassar, E., Fornasier, G., Balzamo, H., Sota, J., Traversa, L., Clariá, M., Carrasco, M., Maldonado, N., Cabrera, O., López, R., Zerbino, R., Checmarew, R., Bonavetti, V. y Rahhal, V., "Ese material llamado hormigón", Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, (2012), 387.

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE HORMIGÓN CELULAR ESPUMADO REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO APLICADO A VIGAS DE BERNOULLI CON ARMADURA TRADICIONAL DE ACERO

Facundo Atuel Retamal¹, Viviana Carolina Rougier¹

¹ Grupo de Investigación de Mecánica Computacional y de Estructuras, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad Regional Concepción del Uruguay, Universidad Tecnológica Nacional

Palabras Clave: hormigón celular espumado, vigas híbridas, fibras de polipropileno, campaña experimental.

Introducción

El hormigón armado es uno de los materiales de construcción más utilizados en el mundo y sus aplicaciones son numerosas y variadas [1]. Debido a los avances tecnológicos y desafíos arquitectónicos, surge la necesidad de desarrollar nuevos tipos de hormigones y también soluciones estructurales innovadoras. Se genera así el interés por utilizar estructuralmente hormigones especiales, diseñados para usos específicos. Entre ellos, se pueden mencionar el hormigón liviano (HL) y el hormigón reforzado con fibras, entre otros [2]. El hormigón celular espumado (HCE) se clasifica como HL y su comportamiento estructural sigue este supuesto [3]. Se compone de cemento, agua, espuma preformada y puede incorporar o no, arena u otro agregado fino, además de adiciones minerales activas o inertes, entre otras variantes para su preparación. Comparado con el hormigón normal (HN), posee menor rigidez y mayor fragilidad [4], como es habitual en los HL. A pesar de esto, y debido, entre otros factores, a las situaciones descritas en el párrafo anterior, el uso estructural del HC y, en particular, del HCE, está aumentando, con variadas investigaciones al respecto [5, 6, 7, 8].

En este trabajo se evaluó el comportamiento a flexión del HCE simple y reforzado con fibras de polipropileno (HCERFPP) a través de la confección y evaluación de vigas con estos materiales y de su comparación con una viga de control (VC) elaborada con HN, obteniéndose resultados prometedores.

Materiales y métodos

Se elaboraron 3 vigas de hormigón armado reemplazando el HN por HCERFPP con diferentes dosificaciones de fibras: 0%, 0,5% y 1%, denominando a estas mezclas como HCE, HCERFPP-0,5 y HCERFPP-1,0 respectivamente. A su vez, las vigas se denominaron: V-1, elaborada con HCE simple; V-2, fabricada con HCERFPP-0,5; y V-3, a la construida con HCERFPP-1,0. Se compararon con una viga de control materializada con HN sin fibras, denominada VC. Todas las vigas se construyeron con una sección transversal de 80 mm de ancho por 160 mm de alto, con una longitud total de 1100 mm y se ensayaron a flexión a cuatro puntos. Las barras de refuerzo longitudinales fueron de acero comercial DN A 420 S de 6 mm de diámetro: 2 en la capa inferior y 2 en la capa superior. Para los estribos se utilizaron barras del mismo tipo y diámetro, con 100 mm de separación entre cada uno. Los soportes de las vigas consistieron en soportes de rodillos en los dos extremos. Ubicando los apoyos a 50 mm de cada extremo de la viga, se obtuvo una luz entre apoyos de 1000 mm. La carga se aplicó utilizando una máquina de ensayo universal con una capacidad para 1000 kN. Se usaron dos potenciómetros, colocados en los laterales de cada viga, en posición vertical, para registrar la deflexión en la mitad de la luz. Los datos fueron recolectados por un sistema de equipo de medición continua de carga-deflexión y se analizaron para obtener las curvas carga-deformación.

En la Tabla 1 se presentan los diseños de mezclas de los hormigones utilizados y su densidad teórica. Los materiales utilizados para preparar la mezcla base de pasta de cemento para el HCE fueron cemento Pórtland compuesto (CPC 50), con una densidad específica igual a 2,954, determinada experimentalmente de acuerdo con la Norma ASTM C188; arena silíceo de río, con una densidad específica en condición superficial seca saturada igual a 2,65, obtenida de acuerdo con la Norma ASTM C128 y agua potable. Para preparar la espuma preformada, se utilizó un agente espumante de tipo sintético de marca comercial, disponible en el mercado local. Para la mezcla de HN se utilizaron los mismos materiales, excepto por la exclusión de la espuma preformada y la inclusión de agregado grueso. Este último, con una densidad específica igual a 2,63, determinada experimentalmente según la Norma ASTM C127, del tipo canto rodado silíceo. Las FPP utilizadas son del tipo “macro fibras” sintéticas, de longitud igual a 50 mm; 0,60 mm de diámetro; esbeltez o relación de aspecto (RA) igual a 83; 920 kg/m³ de densidad; módulo de elasticidad de 6 GPa y resistencia a la tracción de 548 MPa.

Se realizaron ensayos para caracterizar los materiales utilizados en esta campaña experimental. Se observa que la densidad del HCE no es la suma directa de los pesos por unidad de volumen de sus componentes. Para calcularla teóricamente se debe tener en cuenta la densidad específica de cada material componente en el cálculo del volumen final de la mezcla, debido a que la espuma preformada incrementa el volumen, sin aumentar prácticamente el peso. En este trabajo, las densidades se midieron pesando cada mezcla en recipiente de volumen conocido. La consistencia se evaluó con la prueba de asentamiento, según la norma ASTM C143, y con el ensayo de extendido para los HCE, según la norma ASTM C1611. De esta forma, se pudo observar y estudiar la alta fluidez de este material. También se realizaron pruebas de compresión simple en los diferentes hormigones utilizados: HCE, HCERFPP-0,5, HCERFPP-1,0 y NC, de acuerdo con la norma ASTM C39, utilizando probetas cilíndricas de 15 cm de diámetro, por 30 cm de altura. También se evaluó la resistencia a tracción por flexión y la resistencia residual según el método RILEM TC 162-TDF, utilizando probetas con sección transversal cuadrada de 15 cm por 15 cm y 60 cm de largo. Para estudiar el comportamiento de los materiales se obtuvieron las curvas carga-deformación de estas probetas. Esto se hizo utilizando potenciómetros y una celda de carga. Se utilizó, además, una unidad HBM QuantumX MX840B, conectada a una computadora con el software CatmanEasy, para la obtención continua de datos.

Resultados y discusión

Los valores medios de los resultados de los ensayos de caracterización de los diferentes tipos de hormigones utilizados se presentan en la Tabla 2. Allí, se resumen: la densidad medida de los hormigones utilizados; los resultados del ensayo de asentamiento; del ensayo de extendido; la resistencia a compresión; la resistencia a la tracción y la resistencia a la tracción residual ($f_{R,CMOD1}$, $f_{R,CMOD2}$, $f_{R,CMOD3}$, $f_{R,CMOD4}$) para el correspondiente desplazamiento de apertura de la boca de fisura (CMOD). Se utilizó el Cono de Abrams para medir asentamiento con la finalidad de poder evaluar también el extendido de la mezcla en simultáneo. La elevada trabajabilidad del material utilizado generó que algunos valores obtenidos para este ensayo superen los máximos permitidos por la norma para su utilización. Se optó por registrar igualmente estos valores. Se puede observar que la densidad, la resistencia a la compresión y la resistencia a la tracción, fueron muy similares en cada una de las mezclas de HCE con y sin FPP, lo cual era de esperarse, debido a que se utilizó el mismo diseño de mezcla en los 3 casos, excepto por la cantidad de fibra adicionada. La densidad media de los 3 tipos de HCE fue de 1 473 kg/m³ y para el HN fue de 2 330 kg/m³. Luego, se obtuvo una reducción promedio de 37 % en densidad para HCE en comparación con HN.

Las 3 mezclas de HCE y la mezcla de HN tuvieron una fluidez importante, no siendo ninguna de ellas autocompactante, y fue apreciable la reducción de fluidez con la adición de fibras. No se consideró el extendido en el caso de HN, por no ser un material autonivelante ni autocompactante. Además, se reveló el efecto del volumen de fibras sobre la resistencia a la tracción residual de cada probeta, mostrando la efectividad de las FPP aplicadas al HCE. Estos resultados coinciden con las observaciones de Jhatial et al. [9], quienes trabajaron con mezclas de menor densidad y resistencia a la compresión.

Tabla 1: dosificaciones de hormigones utilizados.

Material	HCE	HCERFPP -0.5	HCERFPP -1.0	HN
Cemento [kg/m ³]	420,9	420,9	420,9	390
Arena [kg/m ³]	870,4	870,4	870,4	734
Ag. grueso [kg/m ³]	-	-	-	1 019
Agua [kg/m ³]	170,1	170,1	170,1	195
Espuma [kg/m ³]	7,9	7,9	7,9	-
Fluidificante [kg/m ³]	-	-	-	4,68
Fibras [%]	-	0,50	1,00	-
Densidad objetivo [kg/m ³]	1 469,3	1 469,3	1 469,3	2 342,7

Tabla 2: resultados de caracterización de materiales.

Material	HCE	HCERFPP -0.5	HCERFPP -1.0	HN
Densidad medida [kg/m ³]	1 469	1 504	1 446	2 330
Asentamiento [cm]	26,0	24,0	21,0	19,0
Extendido [cm]	40,2	36,5	33,1	-
Resist. comp. [MPa]	14,6	14,1	14,0	35,2
Resist. tracc. [MPa]	1,6	1,7	1,5	2,9
$f_{R,CMOD1}$ [MPa]	-	0,56	0,75	-
$f_{R,CMOD2}$ [MPa]	-	0,38	0,82	-
$f_{R,CMOD3}$ [MPa]	-	0,37	0,84	-
$f_{R,CMOD4}$ [MPa]	-	0,34	0,81	-

En la Tabla 3 se presenta el resumen de los resultados de la campaña experimental llevada a cabo sobre las vigas de HCE, HCERFPP y HN. Allí se informan presentan la carga máxima alcanzada por cada viga, su peso propio, el porcentaje de reducción del peso propio respecto de la viga de control HN y el modo de falla.

Tabla 3: resultados de ensayos sobre vigas.

Viga	Carga máxima [kN]	Peso [kg]	Reducción del peso [%]	Modo de falla
V-1	20,10	23,05	32,60	Corte
V-2	23,95	23,10	32,46	Flexión -corte
V-3	24,23	23,30	31,87	Flexión
VC	26,14	34,20	-	Flexión

En la Figura 1 se muestran las curvas carga-desplazamiento para las 4 vigas elaboradas. Se observó que las vigas fabricadas íntegramente con HCE tienen una carga superior menor que la VC, pero con la adición de fibras, la resistencia aumenta hasta quedar sólo un 7% por debajo de la viga de control. Además, la adición de fibras a estas vigas aumentó notablemente su resistencia a esfuerzo cortante, disminuyendo la aparición de fisuras debido a este esfuerzo característico. También se puede observar la reducción de los picos de falla, en cada curva de las vigas V-1 a V-2 y V-3, debido a la adición de las FPP, lo que se muestra en la Figura 1. No se observó falla por rotura frágil en ninguna de las vigas ensayadas. Aunque la V-1, sin FPP, presentó importantes fisuras por corte, siendo ésta la falla predominante, se logró alcanzar el escalón de fluencia, conservando el monolitismo luego de la falla.

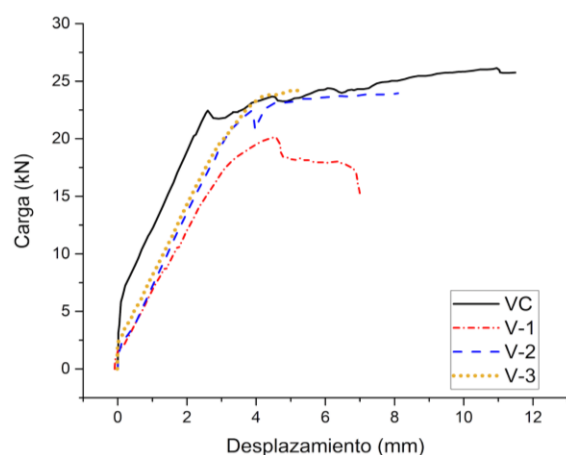


Figura 1 – Curvas carga-desplazamiento de las vigas ensayadas

Conclusiones

De los resultados presentados y del análisis desarrollado, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- El empleo de HCE en vigas esbeltas de tipo Bernoulli, con armadura tradicional de acero, devino en tipologías de falla cuasi dúctil, lo que resulta promisorio para avanzar en la profundización de estos estudios. Esto, a pesar de haberse elaborado con una mezcla base de HCE con una resistencia a compresión inferior a la mínima reglamentaria para hormigones estructurales.
- El agregado de las FPP mejoró la respuesta mecánica de las vigas, aumentando el valor de la carga última alcanzado por cada una al incrementarse la dosis de fibras.
- El aumento de la dosis de FPP disminuyó notablemente la aparición de fisuras de corte en los elementos estructurales.
- La rigidez de cada elemento estructural fabricado con HCE también aumentó al aumentar la dosis de FPP incorporada al material.
- La aplicación del HCE con y sin fibras permitió lograr una disminución de entre 31,87% y 32,60% del peso propio de los elementos estructurales.

Referencias

- [1] Lee, Y. L., Lim, J. H., Lim, S. K., and Tan, C. S., "Flexural behaviour of reinforced lightweight foamed mortar beams and slabs", KSCE Journal of civil engineering, 22, 8, (2018), 2880–2889.
- [2] Hardjasaputra, H., Ng, G., Urgessa, G., Lesmana, G., and Sidharta, S., "Performance of lightweight natural-fiber reinforced concrete", MATEC Web of Conferences, Vol. 138, (2017), 01009.
- [3] Retamal, F. A., Rougier, V. C., "Experimental study and development of an analytical model of stress-strain curve for foamed cellular concrete in uniaxial compression", 26° Arg. Conference on structural engineering, (2021), 1-15.
- [4] Jones, M., McCarthy, A., "Preliminary views on the potential of foamed concrete as a structural material", Magazine of concrete research, 57,1, (2005a), 21-31.
- [5] Hoff, G.C., "Porosity-strength considerations for cellular concrete", Cement and concrete research, 2, 1, (1972).
- [6] Nambiar, E.K., Ramamurthy, K., "Models for strength prediction of foam concrete", Materials and structures, 41, 2, (2008), 247-254.
- [7] Jones, M., McCarthy, A., "Utilising unprocessed low-lime coal fly ash in foamed concrete", Fuel, 84, 11, (2005b), 1398-1409.
- [8] Tam, C., Lim, T., Sri Ravindrarajah, R., Lee, S., "Relationship between strength and volumetric composition of moist-cured cellular concrete", Magazine of concrete research, 39, 138, (1987), 12-18.
- [9] Jhatial, A.A., Goh, W.I., Mohamad, N., Hong, L.W., Lakhari, M.T., Samad, A.A., Abdullah, R., "The mechanical properties of foamed concrete with polypropylene fibres", International journal of engineering & technology, 7, 3.7, (2018), 411-413.

DESEMPEÑO EN IMPACTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON DIVERSAS FIBRAS POLIMÉRICAS

Juan Carlos Vivas^{1, 2}, Ronald Cruz², Tomás Aparicio², Jaime de Barrio²

¹ LEMIT-CIC, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, La Plata, Argentina

² Facultad de Ingeniería UNLP, La Plata, Argentina

Palabras Clave: impacto, fibras poliméricas, HRF, GIL, impactos crecientes.

Introducción

La resistencia al impacto es una característica sobresaliente del Hormigón Reforzado con Fibras (HRF). Esto ha sido constatado por diversos investigadores [1]. En un proyecto reciente, llevado a cabo en el LEMIT, en que se evaluó el desempeño de distintos HRF, se verificó que la performance en impacto de este compuesto no sólo depende de la dosis de las fibras, sino del material de éstas. Particularmente, en un trabajo en que se evaluaron HRF de acero, vidrio y poliméricas [2], quedó en evidencia el buen potencial de estas últimas, ya que, en ocasiones, exhibieron las mayores prestaciones, incluso más que las fibras de acero. Sin embargo, debido al desarrollo de la industria de los polímeros, cada vez salen a mercado nuevas fibras de este material, con diferencias en el polímero de base, en la morfología de los filamentos, entre otros aspectos. El desempeño en impacto de hormigones que contengan estas fibras debe ser evaluado, a fin de generar conocimiento útil para el diseño de estas mezclas y de estructuras que estén expuestas a este tipo de solicitaciones. En este trabajo se compara la respuesta ante impactos de cuatro hormigones reforzados con igual dosis de diferentes macrofibras poliméricas, todas ellas de amplia difusión comercial. Se utilizó el método denominado GIL (Growing Impact Loadings), porque se basa en la aplicación de impactos por caída libre de un peso, con magnitud de energía creciente, y fue desarrollado en el LEMIT [3].

Materiales y mezclas

Se prepararon cuatro HRF con el mismo hormigón de base. Cada uno incorporó 5 kg/m³ de una de las macrofibras poliméricas que se muestran e identifican en la Figura 1. Las fibras F son hechas de copolímero/polipropileno 100% virgen, consisten en monofilamentos retorcidos de 54 mm de longitud, combinados con microfibras fibriladas. Las M son macrofibras de diámetro 0,6 mm y largo 50 mm, con sección elíptica y cuerpo rizado, producidas a partir de polipropileno copolímeros de impacto 100% virgen. Las S son macrofibras corrugadas de poliolefina de 48 mm de longitud, sección rectangular de 1,37 x 0,34 mm. Las R son fibras producidas a partir de polipropileno copolímeros de impacto 100% virgen, de 45 mm de longitud y sección rectangular de 1,45 x 0,3 mm con indentaciones transversales para mejorar la adherencia. Cada HRF se identifica con la letra correspondiente a la fibra contenida. El hormigón de base se elaboró con 390 kg/m³ de cemento CPC40, 880 kg/m³ de arena silícea natural, 845 kg/m³ de piedra partida granítica de 12 mm de tamaño máximo y 5,8 kg/m³ de un aditivo superfluidificante. La relación agua/cemento fue 0,41. Con cada mezcla se moldearon 3 cilindros de 100 x 200 mm para la caracterización en compresión; y 3 prismas de 150 x 150 x 600 mm para la caracterización estática y las pruebas de impacto. Las muestras fueron compactadas en mesa vibrante, a las 24 horas fueron desmoldadas e introducidas a piletas de curado hasta la edad de 28 días. Debido al tiempo requerido para la ejecución de todos los ensayos, a fin de evitar variaciones en los resultados por efecto de la humedad de las muestras, luego de curadas, las probetas se dejaron en ambiente de laboratorio por espacio de tres meses antes de iniciar los ensayos mecánicos.

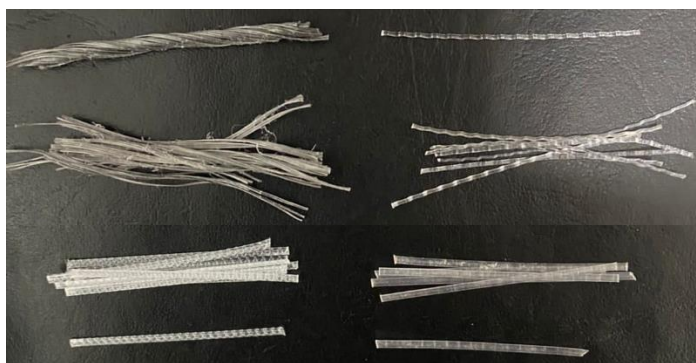


Figura 1 – Fibras poliméricas empleadas

Los ensayos de compresión se ejecutaron conforme a la norma IRAM 1546 [4], y las pruebas de flexión en base a lo establecido en la norma EN14651 [5]. La Tabla 1 muestra la caracterización estática. Como era de esperar, los HRF presentaron un valor similar, en promedio 46 MPa, de resistencia a la compresión (f_c), que confirma la poca influencia de las fibras sobre esta propiedad [6]. En el ensayo de flexión, se determinaron la tensión de primera fisura (f_t) y las tensiones residuales a 0,5 y 2,5 mm de

abertura de fisura (f_{R1} y f_{R3}), en base a las cuales, el *fib* Model Code 2010 [7] propuso un modo de clasificación del HRF. Si bien los HRF S y M presentaron el mayor endurecimiento post fisuración, S alcanzó mayores valores de f_{R1} y f_{R3} . F presentó un comportamiento intermedio, con un ligero endurecimiento, y fue la mezcla que en lo estático mostró mayor performance a pequeñas aberturas de fisura (ver f_{R1}). El hormigón R, aunque no tuvo la menor tensión f_{R1} , fue la única mezcla cuya tensión residual f_{R3} resultó menor a la f_{R1} , lo cual se denomina que posee una respuesta tipo ablandamiento.

Tabla 1: Caracterización estática de los HRF. Coeficientes de variación entre paréntesis.

Denominación	f_c (MPa)	f_L (MPa)	f_{R1} (MPa)	f_{R3} (MPa)	f_{R3}/f_{R1}	Clase
F	46,0 (1,0%)	4,27 (2%)	1,87 (6%)	2,05 (4%)	1,09	1,5c
S	45,5 (1,4%)	4,18 (9%)	1,78 (19%)	2,08 (31%)	1,17	1,5d
R	45,0 (1,2%)	4,61 (7%)	1,44 (5%)	0,89 (8%)	0,62	1a
M	48,0 (1,4%)	4,85 (6%)	1,38 (0,4%)	1,53 (2%)	1,11	1d

Ensayo de Impactos Crecientes (GIL)

El método empleado para evaluar el desempeño en impacto del HRF, fue desarrollado por Vivas et al. [3], y se basa en el principio de caída libre de un proyectil. La probeta consiste en un prisma de 150 x 150 x 300 mm, simplemente apoyado con luz libre de 240 mm, al cual se le realiza, mediante aserrado, una entalla de 25 mm de profundidad en el centro de la cara traccionada. En este trabajo los prismas usados fueron las mitades resultantes de los ensayos de flexión estática EN14651.

Para aplicar las cargas, se emplea un proyectil plano de masa (m) de 5 kg, también denominado martillo o pesa, cuyo extremo inferior ha sido modificado para lograr un impacto linear y uniforme en todo el ancho del espécimen. En la prueba GIL, las cargas se aplican de forma creciente, conforme a dos Fases. En la Fase 1 el primer impacto se da desde una altura de caída (h) de 100 mm y los posteriores se aplican incrementando la altura con una magnitud $\Delta h = 50$ mm entre cada uno; esta etapa finaliza al aparecer la fisura. Luego inicia la Fase 2, en la cual, a diferencia de la anterior, se aplican tres impactos desde cada nivel de altura; siendo la altura inicial igual a 100 mm, y el incremento (Δh) entre sucesivos niveles de altura es 100 mm. Esta Fase finaliza cuando la abertura de fisura es mayor a 3 mm. Todas las alturas son medidas respecto a la cara superior de la probeta. En toda la prueba, luego de cada impacto, se mide la abertura de la fisura (COD) a 120 mm por debajo de la cara superior de la probeta. En este trabajo se empleó un microscopio digital (Dino-lite Premier AM4113T) sostenido con una base magnética frente a la muestra, que permitió medir la COD con una precisión de una centésima de milímetro. La gráfica resultante de este ensayo se denomina “Curva de Impacto” y se construye representando en el eje de las abscisas la COD medida luego de cada caída y en el eje de las ordenadas la energía acumulada (E^*) en dichos instantes. La energía de cada impacto se calculó como $m \times g \times h$, donde g es la aceleración de la gravedad, y la E^* se corresponde con la sumatoria de las energías de los impactos proporcionados hasta un punto específico del ensayo. Los parámetros resultantes de este ensayo, empleados para el análisis, son los siguientes: de la Fase 1 se obtiene la Energía de Fisuración (E_c), que es la energía acumulada hasta la aparición de la primera fisura y la abertura de dicha fisura inicial (COD_c). De la Fase 2 surgen la E_p , que es la energía acumulada posterior a la fisura y hasta el fin de la prueba, la V_c o la tasa de fisuración, que es la inversa de la pendiente de cuerda entre las aberturas 0,5 y 2,5 mm. El parámetro global del ensayo es la energía total (E_T), que se obtiene de la suma de $E_c + E_p$.

Análisis de los resultados

Se realizaron seis pruebas de impacto para cada hormigón, empleando las mitades resultantes de los ensayos de flexión EN14651 [5]. En la Figura 2 se muestran la media de las Curvas de Impacto de cada HRF. La forma de las curvas F, S y M se corresponde con lo hallado en anteriores investigaciones sobre HRF poliméricas [2]; luego de fisuradas, la Curva de Impacto se desarrolla convexa, lo cual es indicativo de un endurecimiento, hasta una abertura de fisura (COD) aproximada de 2 mm, cuando dicha concavidad se invierte hasta alcanzar la falla. Este comportamiento puede deberse a la capacidad de los filamentos de recuperar parcialmente la deformación luego del impacto, hasta que la energía de la caída sobrepasa cierto umbral, que es cuando comienza la cedencia generalizada de las fibras presentes en el plano de fractura. Este comportamiento no se observó en R,

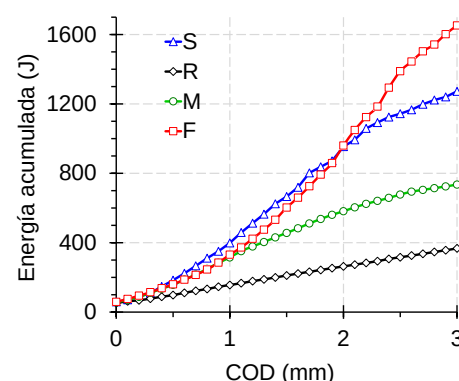


Figura 2 – Curvas de Impacto

posiblemente por un cambio en el mecanismo de falla de la fibra, que puede deberse a una menor adherencia con la matriz. En el HRF R se observó una linealidad de la Curva de Impacto en toda la prueba, y una menor energía total, se presume que en este caso, ocurrió el deslizamiento de las fibras.

Tabla 2: Resultados medios de los ensayos de impacto. Coeficientes de variación entre paréntesis.

Denominación	E_c (J)	COD_c (μm)	E_P (J)	V_c ($\mu m/J$)	E_T (J)
F	77 (36%)	182 (81%)	1603 (26%)	2 (34%)	1680 (25%)
S	78 (30%)	204 (62%)	1227 (39%)	2 (40%)	1304 (37%)
R	70 (25%)	228 (57%)	309 (24%)	10 (37%)	379 (21%)
M	74 (38%)	214 (97%)	681 (34%)	4 (51%)	756 (29%)

La Tabla 2 muestra los resultados promedios de los parámetros medidos en el ensayo de impacto. La E_c resultó prácticamente igual en todos los hormigones, constatando que, al igual que la f'_c , esta propiedad no es significativamente afectada por las fibras, sino que depende de las características de la matriz. Sin embargo, se observa que la E_c fue menor cuando se emplearon las fibras R y M. La COD_c usualmente resulta un parámetro muy variable, pero que proporciona información del efecto de control de fisuración de las fibras. La fibra que más redujo la abertura inicial de las fisuras fue la F mientras que la menos efectiva para controlar esta abertura inicial fue la R, una vez más, esto último puede deberse a una baja adherencia entre estas fibras y la matriz. La tasa de apertura de fisuras (V_c) es un parámetro útil para la caracterización en impacto de diversos HRF. Un menor valor de este parámetro, es indicativo de un mejor desempeño. Por lo tanto, las fibras F y S resultaron las más eficientes, además, aunque ambas registraron una misma tasa V_c , el HRF F alcanzó mucho mayor energía total (E_T). La V_c se determina entre aberturas COD de 0,5 y 2,5 mm, sin embargo, superadas estas aberturas el material podría continuar sobrellevando cargas de impacto. Probablemente el mejor desempeño de F se debe a que es una fibra más esbelta, que brinda mayor cantidad de filamentos por área de plano de fractura. Mientras que la performance de S es atribuible a la composición del filamento, en el microscopio se observó que consta de múltiples hilos (de menor sección) fusionados térmicamente. Debido a que en esta fusión se tuvo cuidado de producir una superficie de la fibra lo suficientemente rugosa, estas fibras también presentan una buena adherencia con la matriz. En el caso de M, la sinuosidad de la fibra también produce un adecuado anclaje a la matriz, pero por tratarse de un único filamento, no solo registra menor tenacidad estática el filamento, según se observa en las fichas técnicas del fabricante, sino que también esto se refleja frente a impactos. Como se mencionó, se presume que la fibra R brinda el menor anclaje mecánico y por ende su mecanismo de falla es probablemente el arrancamiento, lo que puede explicar el alto valor de V_c y la consecuente baja E_T . Cabe notar los mayores valores que exhibieron estos HRF en impacto en comparación con los observados en la prueba de flexión estática (Tabla 1). Esto se alinea con lo hallado en otras experiencias [2], y posiblemente se debe al mecanismo de falla típico de fibras poliméricas, en especial a la mencionada recuperación elástica. Sin embargo, la variación, en la mayoría de los casos, estuvo dentro de los valores típicos registrados con este tipo de material en flexión estática (alrededor de 30%). Obsérvese en la Tabla 1 que el CV de la f_{R3} del hormigón S fue del mismo orden.

Conclusiones

El método GIL resultó útil para evaluar y diferenciar la performance frente a impacto de HRF elaborados con igual dosis, pero diferentes tipos de fibras poliméricas. El desempeño del HRF, no sólo depende del tipo de polímero que constituye las fibras, sino también su geometría y capacidad de adherencia.

Referencias

- [1] Yoo, D.Y. y Banthia, N., "Impact resistance of fiber-reinforced concrete – A review", Cement and concrete composites, vol. 104, (2019), p. 103389.
- [2] Vivas, J.C., Zerbino, R., Torrijos, M.C., y Giaccio, G., "Effect of the fibre type on concrete impact resistance", Construction and building materials, vol. 264, (2020), p. 120200.
- [3] Vivas, J.C., "Evaluación de la respuesta al impacto del hormigón reforzado con fibras", Tesis Doctoral, Universidad Nacional de La Plata, La Plata, (2023).
- [4] Instituto Argentino de Racionalización de Materiales, "Norma IRAM 1546. Hormigón de cemento portland, Método de ensayo a compresión". Argentina, (1992), p. 7.
- [5] Technical Committee CEN/TC 229, "EN 14651:2005. Test method for metallic fibered concrete - Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual)", (2005), p. 17.
- [6] Zerbino, R., "Hormigón Reforzado con Fibras. 2da edición revisada y ampliada", AATH, (2022).
- [7] International Federation for Structural Concrete (fib), "Model Code Volume 1", (2012), p. 350.

Capítulo 2

Metodologías de ensayo

ADECUACIÓN DE CÁMARA DE CURADO SEGÚN NORMA IRAM 1597

Facundo Tomás Mendoza¹

¹ Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Av. Del Valle 5737, (7400) Olavarría - Buenos Aires – Argentina

Palabras clave: cámara de curado, carbonato de potasio, deshumidificador.

Introducción

En el presente trabajo se describe la tarea de gestión realizada, la cual tuvo como objetivo lograr el control de la Humedad Relativa (HR) en el interior de una cámara de curado de probetas de mortero y hormigón. En particular, se buscó mantener tal parámetro al $50\% \pm 2\%$ como estándar para el curado seco de acuerdo a la norma IRAM 1597 [1]. Esto también resulta útil para el ensayo de contracción restringida en morteros y hormigones de acuerdo a la norma ASTM - C157 [2]. Habitualmente, el control de la HR al 50 % en un ambiente de ensayo se hace con carbonato de potasio (K_2CO_3), un precursor químico regulado por el Sedronar [3] difícil de adquirir en cantidades reducidas.

La Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires cuenta con inscripción en el RENPRE (Registro Nacional de Precursores químicos) pero los transportistas locales carecen de vehículos utilitarios con habilitación para transportarla. Existen compañías de transporte en la zona que disponen de vehículos de mayor porte y cuentan con dicha habilitación, aunque el costo de su servicio implica un flete con carga completa, lo cual excede a las posibilidades presupuestarias y de almacenamiento en las instalaciones del Laboratorio de la Facultad de Ingeniería Civil.

Mediante la adquisición de un deshumidificador y habiendo acondicionado el compartimento de la cámara, se buscó una alternativa a la problemática planteada.

Justificación

En lo atinente a los distintos tipos de ensayos que se practican en probetas de morteros y hormigones, es importante dar cumplimiento a la Norma IRAM 1597 que en su artículo N° 6.2 define los requisitos para el “Almacenamiento seco de las probetas”. El control de la HR es fundamental para el curado de compuestos cementicios, ya que afecta directamente las propiedades físicas y mecánicas de los morteros y hormigones.

El propósito de utilizar un deshumidificador es que ofrece ventajas en términos de facilidad de uso, mantenimiento y costos en comparación al uso del K_2CO_3 como regulador de la HR en la cámara de curado.

En cuanto a costos, con respecto a abril 2023, la compra de 25 kg de carbonato de potasio costaba U\$S 120 sin contemplar el transporte, mientras que el precio del deshumidificador rondaba los U\$S 75. Por otra parte, con 25 kg de K_2CO_3 se puede controlar la humedad para el curado de 40 probetas de 2,5 cm x 2,5 cm x 40 cm y luego es necesario secar a estufa para quitar la humedad absorbida.

A continuación, se hace una breve descripción de las características de cada equipamiento.

Cámara de curado: Como se observa en la Figura 1, se trata de un mobiliario que mide 2,1 m de alto, 0,9 m de ancho y 0,6 m de profundidad. Las medidas internas de la cámara son 1,9 m de alto, 0,8 m de ancho y 0,55 m de profundidad, totalizando una capacidad de 0,9 m³.



Figura 1 – Mobiliario

Sus paneles están revestidos exteriormente con láminas de acero inoxidable e interiormente con láminas de acero galvanizado. En el frente, posee dos puertas con herraje de broche y cierre hermético

por burlete y, en la parte superior, tiene un motor de 850 W de potencia que recibe la señal de un bulbo termostático para mantener la temperatura interna a $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. En cada compartimento caben 20 moldes que portan pares de probetas de $1'' \times 1'' \times 10''$, lo que liberaría humedad a razón de 50 mL por probeta o 2000 mL en total.

Deshumidificador: Se trata de un artefacto del tipo electrodoméstico que mide 35 cm de alto, 25 cm de ancho y 15 cm de profundidad, tal como puede verse en la Figura 2, obtenida de catálogo. De acuerdo a sus especificaciones de fábrica, con el transformador incluido puede conectarse a 220 V y consume 65 W en espacios con un volumen de hasta 45 m³. Puede extraer 750 mL cada 24 horas hasta alcanzar la capacidad del recipiente de 2000 mL.

Está equipado con un sensor higrométrico que muestra por display la HR una vez encendido el aparato. El método de extracción de humedad es por el sistema Peltier que, en comparación a los equipos convencionales a compresor, ocupa un menor espacio.



Figura 2 – Artefacto de catálogo

Cuando los niveles de HR aumentan más allá de su nivel establecido, la máquina se enciende y cuando los niveles de HR bajan del rango establecido se apaga automáticamente. De forma predeterminada está configurada para trabajar llevando la HR al 50% y en el caso que su recipiente se llenase, también detendría la marcha.

Entorno de trabajo: El lugar donde se encuentra la cámara de curado es un ambiente cerrado con calefacción central por elementos radiadores, donde la temperatura se regula por un sistema de caldera para mantenerla a 22°C . El espacio donde está la cámara de curado mide 3 m de ancho y 6 m de largo, con altura de nivel de piso a cielorraso de 2,4 m y cuenta con un radiador, el cual es el más cercano a la caldera.

Metodología

La cámara contaba con una instalación eléctrica en su interior que servía a un portalámpara, y alrededor del cableado que atraviesa al panel trasero se encuentra sellado, ya que la función de la lámpara era aportar calor al interior en los momentos del año donde no puede garantizarse una temperatura del espacio de trabajo mayor a 18°C . Para suministrar corriente al deshumidificador, se reemplazó el borne del portalámpara por un toma corriente y se considera al aparato y su transformador como fuente de calor.

Siendo posible conectar el deshumidificador se reordenaron los estantes para que quepa el artefacto ubicándolo en la parte superior. Por cuestiones de espacio, no fue posible reubicar el material de otros ensayos al momento de la prueba, por lo que se dividió el interior de la cámara con paneles de poliestireno expandido de manera que no se vea afectado el ambiente interior que resguarda dicho material. Lo descripto puede verse en la Figura 3.



Figura 3 – Cámara

Resultados

Control de la humedad dentro de la heladera: En primera instancia, el deshumidificador registró una HR interior de 40 % debido a que no se había colocado ningún tipo de probeta. Para simular el entorno deseado se colocó en el estante inferior una bandeja con agua a 25°C con lo que la HR llegó al 60% y fue bajando hasta estabilizarse en 50%.

Es interesante notar que el aporte de humedad será necesario incluso cuando se coloquen probetas recién moldeadas (para el caso del ensayo de contracción restringida), debido a la baja HR presente en la cámara respecto a la tasa de evaporación de cementos y hormigones.

Ventajas del uso del deshumidificador sobre el carbonato de potasio: Al utilizar el deshumidificador en conjunto con la bandeja de agua, tal como puede verse en la Figura 3, se genera un régimen de humidificación y deshumidificación, aprovechando la capacidad del aparato para medir y regular la humedad relativa en el interior de la cámara. El K_2CO_3 requiere un recambio de material cada vez que se humedece, además a medida que eso ocurre pierde eficacia en la absorción.

Conclusiones

Con base en los resultados obtenidos y la comparación de los costos asociados, puede decirse que es viable utilizar un deshumidificador como sustituto del K_2CO_3 para mantener la humedad relativa al 50%, tanto para el ensayo de contracción restringida como para otros ensayos que requieran diferentes magnitudes de humedad.

Se confirma su eficacia y se comprueba que cumple con los requisitos técnicos y económicos.

Referencias

- [1] Instituto Argentino de Normalización y Certificación, "IRAM 1597 - Morteros y hormigones de cemento pórtland. Método de ensayo de cambio de largo", (1992).
- [2] American Society for Testing and Materials, "ASTM C157-75. Standard Test Method for Length Change Of Hardened Cement Mortar And Concrete", (1975).
- [3] http://renpre.servicios.pami.org.ar/portal_traza_renpre/pdfs/precursores_quimicos.pdf.

DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS REOLÓGICOS DE LODOS BENTONÍTICOS EMPLEANDO EL CONO DE MARSH. PARTE I: CALIBRACIÓN DEL EMBUDO

Juan Carlos Vivas¹, Adrián Guerrero¹, Claudio Rocco¹

¹ Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería UNLP, C.P. 1900, La Plata, Argentina

Palabras Clave: lodos, bentonita, cono de Marsh, reología, viscosidad.

Introducción

Los lodos bentoníticos son mezclas con diversas aplicaciones en la industria de la construcción, usualmente se emplean en el sostenimiento de las excavaciones de pilotes y muros colados. Estas suspensiones presentan un comportamiento tixotrópico, es decir, cuando el lodo se encuentra en movimiento su comportamiento es como el de un fluido, con poca consistencia, pero al estar en reposo la viscosidad aumenta y ofrece el soporte necesario para evitar el desprendimiento de las paredes de la fosa. El diseño de estos lodos y otras mezclas que incorporan bentonitas es un área de vacancia, en la literatura no se ofrecen criterios racionales para proyectar y optimizar las mismas. Por lo que la implementación de ellas en obras de ingeniería conlleva a extensas campañas de experimentación que demandan gran cantidad de tiempo y otros recursos.

Este artículo forma parte de los estudios preliminares de un proyecto de investigación en que, se pretende comprender el comportamiento reológico y mecánico de morteros y hormigones fluidos a base de bentonitas, y establecer leyes que puedan ser empleadas en un abordaje más racional de la selección y diseño de este tipo de mezclas. En este trabajo se indagó en la posibilidad de uso del cono de Marsh como un instrumento que permita la determinación indirecta de parámetros reológicos de mezclas con bentonitas, lo cuales son usualmente medidos con equipos de difícil adquisición, como reómetros o viscosímetros. En el artículo se resume el estado de la cuestión y se ejecuta el primer paso de la metodología planteada por Roussel y Le Roy [1], que es la ‘calibración’ del Embudo de Marsh. El resultado de esta investigación se empleará, en futuros trabajos, en la determinación de la tensión cedente y viscosidad plástica de lodos bentoníticos.

Antecedentes

El modelo de Buckingham-Reiner, describe el comportamiento de un fluido de Bingham dentro un cilindro de radio R , suponiendo que los efectos de la inercia son insignificantes y que la velocidad de flujo es igual a cero en la interfaz fluido-cilindro. En esta expresión (Ecuación 1) K_i es la “tensión de cedencia”, μ_p la viscosidad plástica, Q el caudal y A el motor de gradiente de presión del flujo. Para que el flujo ocurra, debe satisfacerse la Ecuación 2.

$$Q = \frac{\pi AR^4}{8\mu_p} \left(1 - \frac{4}{3} \left(\frac{2K_i}{AR} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{2K_i}{AR} \right)^4 \right) \quad (1)$$

$$\frac{2K_i}{AR} \leq 1 \quad (2)$$

El cono de Marsh posee dos partes, un cuerpo cónico y una nariz cilíndrica (Figura 1). La Ecuación 1 puede escribirse para ambas partes y obtener una relación entre el gradiente de presión A y el caudal Q . Como en un ensayo el caudal es constante en todo el cono, la combinación de estas dos ecuaciones resulta en la expresión del débito en boquilla, en términos de los parámetros geométricos del cono y del comportamiento del fluido ensayado. El débito puede relacionarse con la variación del nivel del cono en el tiempo [1, 2]. Si el fluido ensayado es *puramente viscoso*, la integración del caudal Q de la Ecuación 1 es posible. La disminución del nivel de fluido en la parte cónica se acelera a lo largo de la prueba y el tiempo de flujo t_v resulta proporcional a la viscosidad μ en función de la geometría del cono. Esto es lo que se expresa en la Ecuación 3, en la que ρ y g son respectivamente la densidad del fluido y la aceleración de la gravedad.

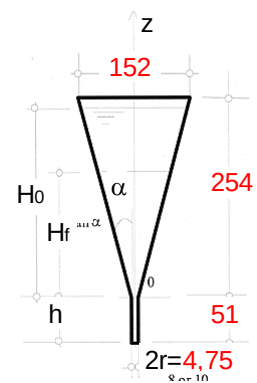


Figura 1 – Geometría del cono de Marsh (medidas en mm)

$$t_v = \frac{\mu}{\rho g} \cdot f(\alpha, r, H_0, h, H_f) \quad (3)$$

Pero si el fluido evaluado se comporta como un *fluido de Bingham* (el caso de los lodos bentoníticos), no solo no ocurrirá el flujo, o se detendrá, si no se cumple el criterio de la Ecuación 2 en algún punto del dispositivo, sino que, no ocurrirá flujo si la tensión cedente K_i del fluido, resultare mayor a un valor crítico propio del cono. En la situación crítica, donde no hay flujo, el gradiente de presión A , se calcula según la Ecuación 4, donde H es una altura variable entre H_0 y H_f . En el ensayo, a medida que $A(H)$ disminuye, desde $A(H_0)$ hasta $A(H_f)$, la Ecuación 2 puede no cumplirse y el flujo se detendrá.

$$A = \rho g \frac{H}{h} + \frac{8K_i}{3htan(\alpha)} \ln\left(\frac{r}{r+Htan(\alpha)}\right) \quad (4)$$

Cuando se evalúa un fluido tipo Bingham, no es posible hallar soluciones analíticas de las Ecuaciones 1 y 2. Al resolver numéricamente la Ecuación 2, se puede representar la altura del fluido en el cono (H) en términos del tiempo de flujo t para diferentes valores de K_i y un valor de viscosidad plástica μ_p constante (200 mPa.s), tal como se muestra en la Figura 2a. Nótese cómo la presencia de la tensión de fluencia (K_i) ralentiza el vaciado del cono (Figura 2b). El volumen V decrece linealmente durante aproximadamente la primera mitad del ensayo, fase en que el débito es constante. Según Roussel y Le Roy [1] en toda la prueba la fricción no varía, pero sí el gradiente de presión A , que es el responsable del flujo, éste disminuye durante la prueba a medida que se reduce el nivel de fluido en la parte cónica. Las variaciones del gradiente de presión al comienzo de la prueba son pequeñas, porque se presentan pequeñas variaciones de la altura del fluido, pero se vuelven más fuertes al final de la prueba cuando, por efectos geométricos el descenso de la altura se acelera. Esto conduce a un flujo constante durante la primera parte del ensayo, que disminuye solo al final del tiempo total necesario para vaciar el cono.

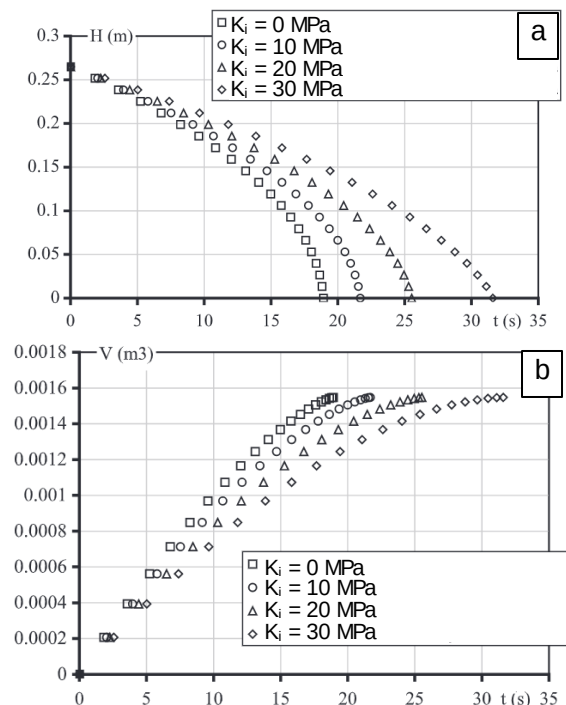


Figura 2 – a) Altura y b) volumen de un fluido de Bingham en función del tiempo [1]

Aunque la integración de la expresión del débito no es analíticamente posible, si el caudal se considera constante durante la primera parte de la prueba (en base al análisis anterior) se puede calcular Q a partir del nivel inicial H_0 . Debido a esta aproximación, el tiempo de flujo se subestima ligeramente, pero puede calcularse en términos de la tensión cedente K_i y la viscosidad plástica μ_p para un volumen dado V , como se muestra en la Ecuación 5. El tiempo de flujo es proporcional a la viscosidad, pero está inversamente afectado por K_i . Esta influencia de la tensión de cedencia en el tiempo de flujo puede explicar por qué Roussel y Le Roy [1] y otros autores no encontraron correlación entre el tiempo de flujo y la viscosidad plástica, o entre el tiempo de flujo y la misma tensión cedente en pastas cementicias que ensayaron. Se encontró correlación sólo entre el tiempo de flujo y los dos parámetros reológicos (K_i y μ_p) considerados en conjunto. Los parámetros a_v y b_v dependen de la geometría de cada cono, de la altura inicial de fluido H_0 y del volumen V que ha salido del cono al instante en que se toma la lectura del tiempo t_v , no dependen de las características del fluido.

$$t_v = \frac{a_v \mu_p}{\rho - b_v K_i} \quad (5)$$

Campaña experimental

Con la intención de indagar en la posibilidad de implementar este embudo como un aparato reológico fue necesario, en primera instancia, la determinación de las constantes a_v y b_v del cono disponible. La técnica consistió en determinar, para dos mezclas diferentes (A y B), la densidad ρ , los parámetros reológicos K_i y μ_p , y el tiempo de descarga t_v en el cono de Marsh. De modo que, al sustituir dichas magnitudes en la Ecuación 5 y resolver el sistema de ecuaciones, se hallarán los valores de a_v y b_v . Debido a que las constantes a_v y b_v varían con el volumen de descarga V , se aplicó esta metodología para tres volúmenes distintos, que fueron 1 litro, 0,946 litros (1/4 de galón) y 0,7 litros; valores usualmente empleados en la bibliografía y normativas. Los lodos (A y B) se prepararon a partir de la mezcla de agua desmineralizada comercial con 4% y 8% de bentonita sódica de origen nacional, respectivamente. El mezclado se realizó empleando un agitador mecánico para suspensiones con accesorio mezclador tipo hélice.

La viscosidad del fluido en movimiento μ_p y la tensión cedente K_i , fueron determinadas empleando un viscosímetro rotacional cilíndrico coaxial, marca Baroid®, modelo 286. Este equipo permite determinar viscosidades a diferentes velocidades de giro, entre 3 y 625 revoluciones por minuto (RPM). Antes de realizar una medición se dispone la mezcla en un recipiente propio del equipo y se introduce un tambor giratorio cilíndrico en el fluido, se configura el giro a 600 RPM durante de 5 segundos, luego se selecciona la velocidad del giro a la que se desea medir. Con el equipo en movimiento, se toma lectura de la viscosidad a través del dial analógico, cerciorándose que el mismo se encuentre estabilizado. El tiempo de estabilización del dial dependerá de cada mezcla evaluada. Con este equipo, la magnitud de la viscosidad μ_p (en centipoise) se determina como la diferencia entre las lecturas a 600 y 300 RPM, mientras que la tensión cedente K_i (en lb/100 pie²) se calcula restando la μ_p de la lectura a 300 RPM. La densidad ρ de los lodos fue determinada, registrando en una balanza la masa (m) de un volumen conocido de muestra (ϖ) y realizando el cociente m/ϖ . En esta instancia se empleó el recipiente calibrado del viscosímetro antes descrito. Para determinar el t_v se emplea el embudo normalizado, cuyas dimensiones se muestran en la Figura 1. Este cono debe mantenerse vertical y obturando orificio de salida con el dedo, deben verse 1500 ml de la mezcla, haciéndola pasar a través de un tamiz que el cono tiene adosado en su abertura superior, en aras de remover las impurezas y/o flóculos. El ensayo inicia cuando se desobtura la salida (se retira el dedo), mismo tiempo en que se activa un cronómetro. La prueba finaliza cuando se descarga el volumen específico, medidos en un recipiente graduado que recibe el fluido, momento en el que se detiene el cronómetro.

Análisis de resultados y conclusiones

En la Tabla 1 se muestra la caracterización de las mezclas, medidas a los 30 minutos de su preparación. Como era de esperarse, tanto la densidad, como la viscosidad y tensión de corte de la Mezcla B resultaron de mayor magnitud, sin embargo, el incremento de cada una fue particular. Duplicar la dosis de arcilla produjo un incremento del 3% en ρ , 130% en la μ_p y 200% en la K_i . La tensión cedente resultó el parámetro más afectado por la dosis de arcilla. En la Tabla 1 también se resumen los resultados del tiempo de flujo en el cono de Marsh. Los t_v de las mezclas con mayor contenido de arcilla resultaron mayores, y para los 3 volúmenes el incremento fue porcentualmente el mismo (24%). Esto se debe a que los volúmenes de descarga elegidos para el estudio se ubican en la parte lineal de la descarga (Figura 2). El de 1 L representa una descarga del 67%, los 0,946 L son 63%, y los 0,7 L un 47% del volumen total inicial (1,5 L).

Tabla 1: Caracterización de los lodos bentoníticos.

Mezcla	ρ (kg/m ³)	μ_p (mPa.s)	K_i (Pa)	t_{1L} (s)	$t_{0,946L}$ (s)	$t_{0,7L}$ (s)
A	1031	3	1,9	30,88	28,87	20,85
B	1060	7	5,7	38,21	35,75	25,77

Con los datos de la Tabla 1, empleando la metodología descrita en la sección anterior fueron determinadas las constantes a_v y b_v , los valores resultantes se muestran en la Tabla 2. El orden de magnitud de las constantes determinadas se corresponde con las presentadas por Roussel y Le Roy [1] para conos de similares dimensiones, aunque las presentes resultaron mayores. Nótese que, como era matemáticamente lógico, a_v se redujo con el volumen, a la vez, aunque b_v fue algebraicamente mayor, su participación en la Ecuación 5 conduce a tiempos de flujo menores a medida que el volumen es inferior, lo cual también se corresponde con el fenómeno físico. Preliminarmente se concluye que la metodología empleada para la calibración del cono disponible resultó satisfactoria, y se vislumbra como una opción viable para la determinación de la tensión cedente K_i y viscosidad plástica de lodos bentoníticos, empleando ecuaciones propuestas en la literatura.

Tabla 2: Constantes a_v y b_v para 1; 0,946 y 0,7 litros.

Parámetro	1 L	0,946 L	0,7 L
a_v (s ² /m ²)	$18,8 \times 10^6$	$17,5 \times 10^6$	$10,1 \times 10^6$
b_v (s ² /m ²)	-414	-413	-223

Referencias

- [1] Roussel, N. y Le Roy, R., "The Marsh cone: A test or a rheological apparatus?", Cement and concrete research, vol. 35, núm. 5, (2005), pp. 823-830.
- [2] Le Roy, R. y Roussel, N., "The Marsh cone as a viscometer: Theoretical analysis and practical limits", Materials and Structures/Materiaux et Constructions, vol. 38, núm. 275, (2005), pp. 25-30.

ESTUDIO DEL PROCESO DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO MEDIANTE LA TÉCNICA DE SPECKLE DINÁMICO: INFLUENCIA DEL ENTORNO Y TIPOS DE CEMENTO

Magdalena Zamateo¹, Francisco Oliva¹

¹ Centro de Investigación y Desarrollo para la Construcción y la Vivienda, Universidad Tecnológica Nacional Regional Santa Fe

Palabras clave: cemento, interferometría, speckle dinámico, hidratación.

Introducción

El proceso de hidratación del cemento comienza cuando entra en contacto con el agua. Esto desencadena diversas reacciones químicas entre los componentes del cemento (fundamentalmente silicato tricálcico, silicato bicálcico, aluminato tricálcico y ferroaluminato tetracálcico) y el agua, que originan la formación de cristales de diferentes formas y tamaños (principalmente silicato de calcio hidratado e hidróxido de calcio). Las reacciones mencionadas, que son de carácter exotérmico, tienen lugar en toda la masa, pero se originan en la superficie de los granos de cemento [1]. A medida que avanzan las reacciones de hidratación, se reduce la porosidad de la pasta debido a la formación de una matriz continua, rígida e interconectada de silicato de calcio hidratado. Las propiedades de las pastas de cemento en estado endurecido dependen en gran medida del desarrollo de la hidratación, por lo que todos los factores que la afecten tendrán una influencia decisiva sobre el comportamiento de la pasta [2]. Por este motivo, es de interés monitorear el desarrollo del proceso de hidratación.

El speckle dinámico es un método óptico no destructivo que se utiliza para evaluar la variación del patrón de moteado de materiales o piezas que experimentan cambios en su superficie. En trabajos previos se obtuvieron resultados que indican la posibilidad de considerar el speckle dinámico como una técnica factible de aplicación para monitorear dicho proceso, obteniendo registros de actividad en las primeras 24 horas del proceso de hidratación. Del análisis de los registros, se identificaron períodos de movilidad que podrían asociarse con el inicio y fin de fragüe [3].

El moteado o *speckle* es un fenómeno que se origina al iluminar la superficie de un objeto con luz coherente, que se refleja en el material. Esto provoca en un punto del espacio la superposición de luz proveniente de diferentes puntos del objeto, lo que se traduce en un patrón de zonas claras y oscuras de apariencia granular que posee información sobre la superficie en estudio, a una escala superior a la longitud de onda utilizada [4]. Los cambios en la superficie estudiada se reflejan en alteraciones del patrón, y la rapidez con la que se da esta variación en función del tiempo es lo que se llama grado de actividad o actividad speckle (SA) que es cuantificada por el índice de movilidad (IM / MI). Los resultados de la aplicación del método de speckle dinámico sobre muestras de cemento se plasman en gráficas IM vs tiempo. En las mismas se observan períodos de mayor variación que se corresponden con las primeras horas de la hidratación, momento en el que se están dando la mayor parte de las reacciones químicas entre los componentes del cemento y el agua.

En instancias anteriores, se utilizaba un armado óptico con equipos de alta precisión en laboratorios con condiciones controladas, situados en la Universidad Tecnológica Nacional Regional Paraná [3]. A partir del desarrollo de un prototipo portátil por parte del grupo de investigación, basado en los equipos anteriormente utilizados, surge la necesidad de evaluar el funcionamiento de dicho dispositivo. El objetivo principal de este estudio consiste en analizar las prestaciones del prototipo en diversos entornos, con el propósito de determinar el grado de influencia que estos ejercen sobre su desempeño, comparando resultados obtenidos paralelamente con el equipo de precisión sobre un cemento de una misma partida. Además, se busca evaluar el impacto del uso de diferentes tipos de cemento en los resultados obtenidos, manteniendo constante un entorno con características específicas.

Metodología

Prevía determinación de la cantidad de agua necesaria para la obtención de pasta de consistencia normal según Norma IRAM 1612:2006 [5], la metodología de ensayo comprende las siguientes etapas:

1. Se moldea la muestra de pasta de cemento según Norma IRAM 1619:2003 [6].
2. Se la posiciona inmediatamente dentro del prototipo, que captura 11 imágenes cada 5 minutos.

Como se muestra en la Figura 1, el prototipo cuenta con un microscopio digital de 2.0 MP con sistema de control automático, que captura las imágenes y las almacena en una tarjeta de memoria incorporada, y un láser semiconductor de 5 mW y 650 nm como fuente de luz que incide sobre la muestra colocada en el interior.



Figura 1 – Prototipo empleado en el ensayo de speckle dinámico

3. Luego se procesan las imágenes empleando el algoritmo “CECILIA” (definido por el grupo de investigación en proyectos previos) y se determina el índice de movilidad en función de la variación de la intensidad [7].

Para evaluar el impacto del entorno, se realizó el ensayo anteriormente descrito en tres recintos distintos dentro de la Universidad Tecnológica Nacional Regional Santa Fe (UTN-FRSF), donde se midieron las condiciones ambientales (Tabla 1), empleando muestras idénticas (pasta de cemento CPN de consistencia normal) y realizando la comparación de resultados expresados en gráficas de IM vs tiempo. El ensayo de speckle dinámico se realizó por triplicado en cada entorno y se registraron las primeras horas del proceso de hidratación.

Tabla 1: Condiciones de los distintos entornos.

Recinto	Temperatura (°C)	Humedad (%)	Flujo de personas
1	20 ± 1	72 ± 3	NO
2	16 ± 1	82 ± 3	SI
3	25 ± 2	60 ± 1	NO

Con la finalidad de evaluar la prestación del prototipo se realizó el mismo ensayo con equipamiento de precisión en el laboratorio de óptica de la Universidad Tecnológica Nacional Regional Paraná, empleado en la etapa inicial del proyecto (muestra “PATRÓN”). Debido a las diferentes características técnicas de los equipos, el rango de valores del índice de movilidad resultante varía según la sensibilidad de cada uno. Por otro lado, con el objetivo de evaluar la sensibilidad del prototipo frente a distintos tipos de cemento, se realizó por triplicado el ensayo utilizando Cemento Portland Normal (CPN), Cemento Portland con Filler (CPF) y Cemento Blanco (CB) en un mismo recinto dentro de la UTN-FRSF. Para esta etapa de la investigación, no se realizó el ensayo con equipo de precisión, ya que se comprueba en primer lugar la capacidad del prototipo de reproducir satisfactoriamente el ensayo.

Resultados y discusión

En la Figura 2 se muestra la variación en el tiempo del índice de movilidad (IM) de las tres muestras de CPN ensayadas en los distintos recintos. Tal como se mencionó, los valores de IM dependen de las sensibilidades de la fuente de luz y de la cámara utilizada, es por esto que los valores de dicho parámetro para la curva “PATRÓN” se encuentran en un rango diferente a los resultados obtenidos con el prototipo. Las curvas obtenidas con el prototipo presentan una tendencia similar a la obtenida con el equipo de precisión. Mediante la observación gráfica de las mismas, se aprecia que la correspondiente al “Recinto 1” es la que mejor se ajusta a la tendencia de la curva “PATRÓN”. Esto puede atribuirse a que dicho recinto presenta condiciones estables de temperatura y humedad, sin flujo de personas, condiciones similares a las del laboratorio de

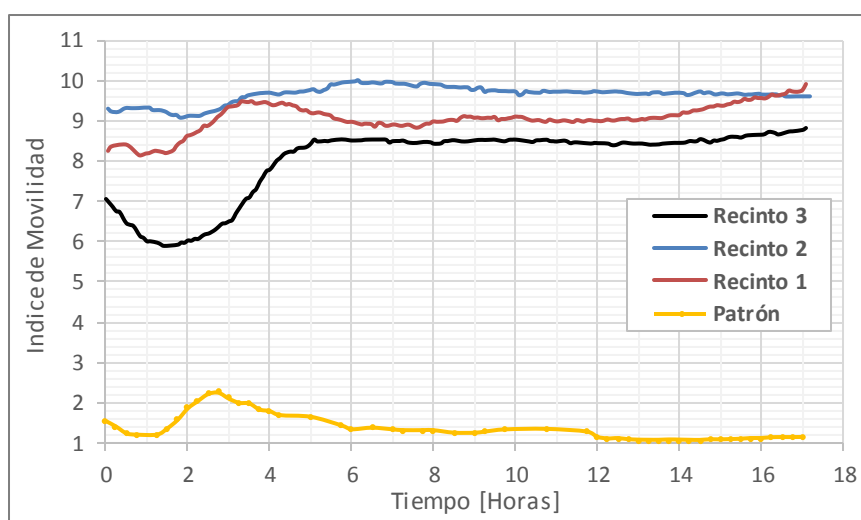


Figura 2 – Curvas de movilidad (IM) vs tiempo. Análisis de entornos

óptica de Paraná; por lo que se estima que en condiciones ambiente similares los registros de movilidad obtenidos con el prototipo son semejantes a los obtenidos mediante el equipo de precisión. Las disimilitudes entre curvas pueden asociarse tanto a las diferencias en las condiciones ambientales entre los recintos, que intervienen en el proceso de hidratación y por ende en la variación de la movilidad, como a las variaciones de flujo de personas, que generan vibraciones en el entorno inmediato. Esto permite confirmar una hipótesis inicial: que las variaciones del entorno afectan a los resultados del ensayo.

En base a lo antes mencionado, se selecciona el “Recinto 1” como el entorno fijo para evaluar la sensibilidad del equipo al monitorear el proceso de hidratación de distintos tipos de cemento. Siguiendo el procedimiento indicado anteriormente, se obtienen los registros que se indican en la Figura 3. Como puede observarse las curvas de movilidad obtenidas con el prototipo son diferentes para cada caso, lo que indica que la tecnología empleada en el dispositivo es sensible a las diferencias en los procesos de hidratación de distintos tipos de cementos.

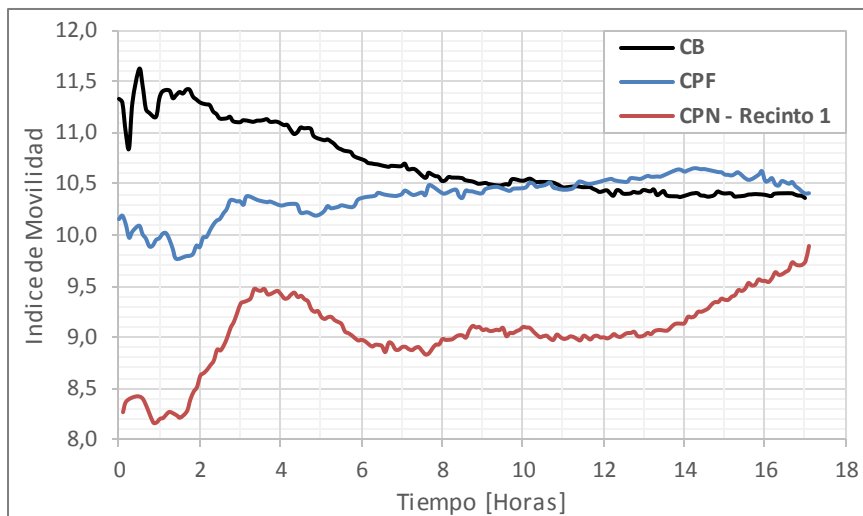


Figura 3 – Curvas de movilidad (IM) vs tiempo.
Análisis de tipos de cementos

Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos, se concluye que fue posible obtener registros de movilidad con el prototipo, que se corresponden con los obtenidos mediante los equipos de precisión. Del análisis comparativo se desprende que es posible que las variaciones en el entorno afecten a los resultados de ensayos realizados con el prototipo, por lo que sería necesario realizar mejoras en el diseño que permitan optimizar la estabilidad y la aislación del dispositivo. Si bien en trabajos anteriores se realizaron avances vinculados a la técnica de ensayo y al proceso que se pretende registrar, el presente trabajo permite establecer la potencialidad que presenta el método de ser transferido. Esto impulsa a continuar evaluando la posibilidad de emplear la técnica de speckle dinámico para el monitoreo del proceso de hidratación del cemento.

Referencias

- [1] Giovambattista, A., “Hormigón. Materiales, vida útil, criterios de conformidad y su consideración en el reglamento CIRSOC 201-2005”, Buenos Aires, Argentina, (2011), pp. 45-48.
- [2] Clariá, M.A., Irassar, E.F., Lopez, R., Bonavetti, V., “Cap. 2. Cementos”, en: “Ese material llamado hormigón”, Eds. Maldonado, N.G. y Carrasco, M.F., AATH, Buenos Aires, Argentina, (2012), pp. 19-77.
- [3] Gomez Arn, E., Bertoluzzi, L., Suri, F., Gervasoni, J., Freyre, C., Vincitorio, M., Gonzalez, D., Yoris, A., Guillarducci, A., Ulibarrie, N., “Estudio del fragüe del cemento mediante el patrón de speckle dinámico”, RAO optilas, Pucón, Chile, (2016).
- [4] Montalvo, R.A., Asmad, M., Choque, I., Baldwin, G., “Interferometría speckle para evaluar la flexión de una barra de aluminio”, Revista Mexicana de Física E, 62, (2016), pp. 125-134-
- [5] Instituto Argentino de Normalización y Certificación, “IRAM 1612. Cemento Portland. Método de determinación de la consistencia normal”, (2006).
- [6] Instituto Argentino de Normalización y Certificación, “IRAM 1619. Método de ensayo para la determinación del tiempo de fraguado”, (2003).
- [7] Budini, N., Mulone, C., Vincitorio, F. M., Freyre, C., López, A. J., Ramil, A., “Two simple methods for overall determination of mobility in dynamic speckle patterns”, Optik 124, (2013), Pages 6565-6569.

Capítulo 3

Mezclas con MCS y aditivos

MORTEROS ELABORADOS CON CAL HIDRÁULICA Y ARCILLAS CALCINADAS. ANÁLISIS DE LA CAPTACIÓN DE CO₂ AMBIENTAL, PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS, MECÁNICAS Y BIOLÓGICAS

Luisina Aristarán¹, Cecilia Paulo¹, Carolina Iraporda², Alejandra Tironi¹

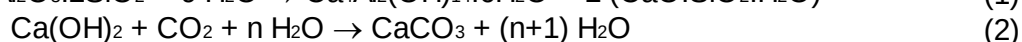
¹ Facultad de Ingeniería, CIFICEN – Centro de Investigaciones en Física e Ingeniería del Centro de la Provincia de Buenos Aires (UNCPBA-CICPBA-CONICET). Olavarría. Buenos Aires. Argentina

² Facultad de Ingeniería (UNCPBA), CP 7400, Olavarría, Argentina

Palabras Clave: cal hidráulica, arcillas calcinadas, carbonatación, transporte vapor de agua, crecimiento fúngico.

Introducción

El uso de morteros de cal hidráulica y materiales puzolánicos para la construcción de edificios data de la antigua Roma. En la actualidad, este tipo de morteros se pueden identificar en estructuras históricas correspondientes al siglo XIX y principios del siglo XX [1]. Durante el proceso de producción de cal hidráulica se generan emisiones de CO₂ debido a la descarbonatación de la calcita (CaCO₃) en la etapa de calcinación (1000°C – 1250°C), en la energía requerida para este proceso y en la molienda. Las emisiones provenientes de la calcinación constituyen un 70% de las emisiones totales de CO₂ asociadas a la producción de cal y no pueden ser modificadas [2]. En la actualidad, la industria de la construcción busca disminuir el impacto al medio ambiente invirtiendo en materiales y tecnologías que tengan menor huella de carbono, con el objetivo de contribuir a la mitigación de emisiones de CO₂. Por este motivo es de interés analizar las propiedades de materiales de construcción con menores emisiones asociadas, considerando el CO₂ emitido durante su producción y el capturado al ser puesto en servicio. Los materiales puzolánicos son compuestos silicoaluminosos que no poseen propiedades cementicias, ni actividad hidráulica por sí solos. Sin embargo, participan de la reacción puzolánica (Ec. 1) combinándose con el Ca(OH)₂, a temperatura ambiente y en presencia de agua, formando compuestos permanentemente insolubles y estables que se comportan como conglomerantes hidráulicos. Las puzolanas pueden obtenerse a partir de la activación térmica de arcillas. La temperatura de este proceso varía según el mineral arcilloso presente: para el caso de la caolinita, la deshixilación y formación de fase amorfa reactiva se produce entre los 500 y 800°C, mientras que para la illita se necesita una temperatura mayor, aproximadamente 950°C [3]. Ambas temperaturas son inferiores a la de producción de cal hidráulica (~1100 °C), lo que implica un menor consumo de energía y, además, no se libera CO₂ durante el proceso de activación térmica, es por esto que el reemplazo parcial de cal hidráulica por arcillas calcinadas, contribuye a disminuir las emisiones de CO₂. Sin embargo, este reemplazo también afecta la captación del CO₂ ambiental. Esta captura puede aumentar, mantenerse o disminuir debido a la competencia del uso de Ca(OH)₂ como reactivo en la reacción puzolánica (Ec. 1) [4] o en el proceso de carbonatación (Ec. 2) [5].



El objetivo del presente trabajo es evaluar cómo se modifican las propiedades fisicoquímicas (carbonatación, coeficiente de difusión de vapor de agua), mecánicas (resistencia a compresión) y biológicas (crecimiento fúngico) en morteros de cal hidráulica, cuando se utilizan reemplazos de hasta un 50% por arcillas calcinadas, a los 120 días de edad. Se determinará cómo influye el tipo de arcilla calcinada y el porcentaje de reemplazo en el desempeño del material y en la captación de CO₂ ambiental.

Materiales y Métodos

Se elaboraron morteros siguiendo los lineamientos de la Norma IRAM 1695 utilizando como materias primas cal hidráulica (CalH), arena estándar EN-NORMSAND DIN EN 196-1 y dos tipos de arcillas calcinadas (AC) como reemplazo en peso de la CalH: una con mayor actividad puzolánica y elevado contenido de aluminio (caolinita calcinada, KC) y otra con actividad puzolánica más lenta (illita calcinada, IC) [3]. Los porcentajes de reemplazo en peso fueron variando de 0 a 50%, con aumentos del 10% (CalH; 10-50 KC; 10-50 IC). Se utilizó una relación agua/(CalH/CalH+AC) de 0,62. Se confeccionaron cubos de morteros de 4 cm de lado, los cuales fueron curados por 7 días en cámara húmeda, luego sumergidos en agua hasta los 28 días. Una vez pasado ese tiempo se expusieron a carbonatación natural durante 3 meses en ambiente exterior rural protegido de la lluvia (120 días desde moldeo). Además, se prepararon pastas en moldes de 28 mm de diámetro y 10 mm profundidad, con las mismas formulaciones e igual

relación de agua, como complemento de los morteros para analizar la carbonatación. Las pastas fueron almacenadas sin cubrir durante 28 días en cámara húmeda (20°C y 80% humedad), luego de ese período se las expuso a carbonatación natural durante 3 meses en ambiente exterior rural protegido de la lluvia. A los 120 días desde su elaboración, se detuvo el proceso de hidratación-carbonatación utilizando alcohol isopropílico.

El contenido de CaCO_3 total en las pastas se determinó mediante termogravimetría (TG) y la captación de CO_2 ambiental (% CaCO_3 carbonatación) se calculó como la diferencia entre el contenido de CaCO_3 total en cada pasta (TG) menos el incorporado como constituyente de la CalH (28,5% CaCO_3), considerando el porcentaje en peso de esta materia prima en cada pasta. En forma complementaria se calcularon las toneladas de CO_2 captadas por tonelada de pasta, a partir del % de CaCO_3 formado por carbonatación. Se midió la profundidad de carbonatación en pastas y morteros utilizando un calibre y solución de fenolftaleína como indicador. Se realizó un corte transversal y se roció con la solución: cuando la región adquiere un color rosado fuerte indica que hay presencia de portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), pH mayor a 9; mientras que si no se produce un cambio en la coloración, se puede concluir que la portlandita fue carbonatada a calcita, por lo que se mide la profundidad de la región que no cambia su coloración.

Utilizando el método de la copa, se obtuvo el coeficiente de difusión de vapor de agua (D) en los morteros por duplicado: la resistencia al transporte de vapor de agua es mayor cuanto menor es el valor de este coeficiente [6]. Se midió resistencia a compresión en morteros por triplicado, empleando una prensa Instron 4485 (hasta 20 Tn), según norma IRAM 1695.

Para evaluar el crecimiento fúngico sobre los morteros se realizó un ensayo de durabilidad biológica [7]. Para ello se utilizó una cepa fúngica aislada de la superficie de una vivienda particular de la ciudad de Olavarría, la cual fue identificada a nivel de género como *Aspergillus sp.* La superficie de los morteros fue previamente esterilizada mediante luz UV durante 40 minutos y luego, inoculada con 1 mL de suspensión de esporas fúngicas ($2,1 \times 10^5$ esporas/mL). Los morteros se incubaron en recipientes cerrados con atmósfera húmeda a temperatura ambiente y se observaron los cambios en su superficie durante 1 mes de almacenamiento. Se tomaron imágenes de la superficie para evaluar el crecimiento fúngico utilizando cámara digital Nikon D5300, lupa Leica DMC4500 y microscopio óptico Leica DM2700M, con ocular de 10x y objetivo con aumento 10x, que al ser combinados proporcionan un aumento 100x.

Resultados y Discusión

La cantidad de carbonato de calcio (CaCO_3) obtenido a partir de la carbonatación de la portlandita en pastas (Ec. 2) y las toneladas de CO_2 captadas por tonelada de pasta, disminuyen a medida que aumenta el porcentaje de reemplazo de cal hidráulica por arcilla calcinada (Tabla 1). Esta tendencia es más marcada en las pastas elaboradas con arcilla caolínica calcinada, lo que indica una menor captación de CO_2 ambiental en estos materiales. Para las pastas elaboradas con KC, a partir de un 20% de reemplazo, la captación de CO_2 ambiental es menor a la pasta CalH; mientras que para las pastas elaboradas con IC, a partir del 30% de reemplazo. La profundidad de carbonatación en pastas y morteros, no sigue una relación directa con la cantidad de carbonato de calcio generado por carbonatación, ya que dicho valor depende del $\text{Ca}(\text{OH})_2$ disponible (Ec. 2) y de la porosidad del sistema. El coeficiente de difusión de vapor de agua disminuye a medida que aumenta el porcentaje de reemplazo de cal hidráulica por AC, mostrando un aumento a la resistencia al transporte de vapor de agua (Figura 1). La humedad generada en el material debido al transporte de vapor de agua puede provocar aparición de grietas y/o eflorescencia [8]. Cuando se utiliza AC como reemplazo de CalH aumenta la resistencia a compresión, siendo mayor para KC. Para los morteros elaborados con IC, a partir del 30% de reemplazo, se alcanza el valor máximo de resistencia a compresión; mientras que para los elaborados con KC, continúa en aumento (Figura 1).

La incorporación de arcillas calcinadas en morteros de cal hidráulica no inhibió el crecimiento fúngico (Figura 2), en todas las formulaciones de mortero se evidenció la presencia del micelio fúngico característico de este moho. No se observa que las adiciones minerales favorezcan o dificulten la colonización de *Aspergillus sp.*

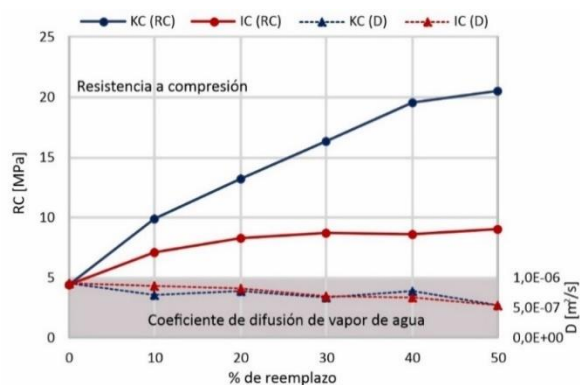
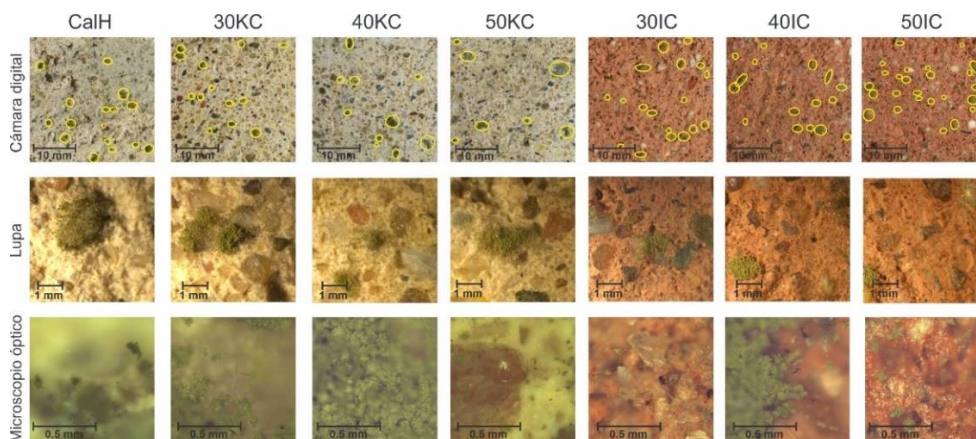


Figura 1 – Resistencia a la compresión y coeficiente de difusión de vapor de agua

Tabla 1: Porcentaje en masa de CaCO_3 en pastas. Profundidad de carbonatación en pastas y morteros.

Muestra		CalH	10 KC	20 KC	30 KC	40 KC	50 KC	10 IC	20 IC	30 IC	40 IC	50IC
Pastas	% CaCO_3 (total)	65,25	62,47	54,28	49,05	43,24	37,21	64,26	59,69	53,43	46,73	40,21
	% CaCO_3 (carbonatación)	36,78	36,84	31,50	29,12	26,16	22,97	38,63	36,91	33,50	29,65	25,97
	CO_2 [T CO_2 /T pasta]	0,16	0,16	0,14	0,13	0,12	0,10	0,17	0,16	0,15	0,13	0,11
	Prof. Carb. [mm]	5,35	5,25	4,60	6,10	7,10	10,00	4,40	6,35	10,00	10,00	10,00
Morteros	Prof. Carb. [mm]	6,57	2,43	1,48	3,97	4,94	6,14	2,35	3,25	6,11	8,16	8,22

**Figura 2** – Imágenes de la superficie de los morteros inoculados tomadas con cámara digital, lupa y microscopio óptico

Conclusiones

A partir del estudio de morteros elaborados con cal hidráulica (CalH) y hasta un 50% reemplazo por arcillas calcinadas (AC) a la edad de 120 días, se concluye que el agregado de estas puzolanas mejora las propiedades fisicoquímicas y mecánicas: menor coeficiente de difusión de vapor de agua, lo que implica una mayor durabilidad, y mayor resistencia a la compresión. Respecto a las propiedades biológicas, el agregado de AC no modifica la susceptibilidad al crecimiento fúngico. Los valores de resistencia a compresión son mayores cuando se utiliza arcilla caolinítica calcinada (KC), sin embargo, disminuye la captación de CO_2 ambiental. Para un 50% de reemplazo, cuando se utiliza KC la resistencia a compresión aumenta 4,5 veces respecto a CalH y 2,0 veces cuando se utiliza illita calcinada (IC); mientras que la captación de CO_2 ambiental disminuye respecto a CalH, 0,6 veces para KC y 0,7 veces para IC. Considerando la gran mejora en el desempeño de los morteros y la baja disminución en la captación de CO_2 ambiental cuando se reemplaza CalH por AC, se recomienda el uso de estas arcillas calcinadas, en particular KC con elevada actividad puzolánica.

Referencias

- [1] Lanas, J., Pérez Bernal, J.L., Bello, M.A., Álvarez Galindo, J.I., "Mechanical properties of natural hydraulic lime-based mortars", *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, (2004), 2191–2201.
- [2] The European Lime Association. "Innovation in the lime sector", (2017). Disponible online en <https://www.eula.eu/wp-content/uploads/2019/07/Innovation-in-the-Lime-Sector-.pdf> (12/06/2023)
- [3] Tironi, A., Sposito, R., Córdoba, G.P., Zito, S.V., Rahhal, V.F., Thienel, Ch., Irassar, E.F., "Influence of different calcined clays to the water transport performance of concretes", *Magazine of Concrete Research*, 74, N°14, (2022), 702-714.
- [4] Murat, M., "Hydration reaction and hardening of calcined clays and related minerals. I. Preliminary investigation on metakaolinite", *Cement and concrete research*, Vol. 13, N° 2, (1983), 259-266.
- [5] Zhang, D., Zhao, J., Wang, D., Wang, Y., Ma, X., "Influence of pozzolanic materials on the properties of natural hydraulic lime based mortars", *Construction and Building Materials*, Vol. 244, (2020), 118360.
- [6] Vejmelková, E., Koňáková, D., Doleželová, M., Scheinherrová, L., Svora, P., Keppert, M., "Effect of calcined Czech claystone on the properties of high performance concrete: Microstructure, strength and durability", *Construction and Building Materials*, Vol. 168, (2018), 966-974.
- [7] Iraporda, C., Silvestro, L.B., Ferreyro, F., Tironi, A., "Metodología de ensayo para la medición de un indicador de durabilidad biológico en morteros y hormigones", *X Congreso Internacional y 24° Reunión Técnica Ingeniera Eugenia Valiente, AATH – INTI*, ISBN 9789874703569, (2022), 433-440.
- [8] Ramirez, R., Ghiassi, B., Pineda, P., Lourenço, P. B., "Experimental characterization of moisture transport in brick masonry with natural hydraulic lime mortar", *Building and Environment*, Vol. 205, (2021), 108256.

EFFECTO DE EXTRACTOS DE PLANTAS EN LA HIDRATACIÓN DE MATRICES CEMENTICEAS

Natalia Delbianco^{1, 2}, Carla Priano², Edgardo F. Irassar³

¹ Becaria de doctorado - CONICET

² Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur

³ Facultad de Ingeniería, CIFICEN (UNCPBA-CICPBA-CONICET)

Palabras Clave: corrosión, extractos, plantas, armadura, hidratación.

Introducción

La corrosión de las armaduras es una de las patologías más frecuentes en estructuras de hormigón armado. Dicho proceso resulta casi imposible de evitar, pero sí es factible su control en el tiempo. Los inhibidores de corrosión tienen como objetivo extender el período inicial de incubación y, una vez iniciada la propagación de la corrosión, éstos reducen su velocidad para mantener el valor debajo de un límite tolerable. Los inhibidores de corrosión son sustancias químicas que, cuando están presentes en un sistema de corrosión en concentraciones adecuadas, reducen la velocidad de corrosión [1]. Estos aditivos se comenzaron a estudiar y utilizar hace varias décadas, como los nitritos, cuya primera referencia data de la década de 1950 [2]. Las sustancias usualmente comercializadas han demostrado su efectividad, pero últimamente se descubrió su toxicidad [3]. 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.

Los inhibidores orgánicos a base de plantas son una fuente rica en antioxidantes y, además, no son tóxicos, son biodegradables y abundantes en la naturaleza. Estas características los convierten en óptimos para reemplazar los inhibidores inorgánicos. Los extractos de plantas contienen compuestos como alcaloides, flavonoides, taninos, ácidos fenólicos, que tienen la propiedad de generar películas protectoras mediante enlaces con el metal. Extractos de banana [4], café [5], pimienta negra [6], 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 [7] y en hormigón armado [8]. El orégano (*Origanum vulgare*) presenta una importante actividad antioxidante *in vitro* [9] y ha demostrado inhibir la corrosión del acero de bajo contenido de carbono [10].

Existen variedad de trabajos que analizan el poder anticorrosivo de extractos vegetales 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. [11] analizaron el tratamiento con *Bambusa Arundinacea* de una mezcla de hormigón durante 360 días de exposición y demostraron que evitó la corrosión en la superficie del acero. Eyu et al. [12] 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. [13] estudiaron el extracto acuoso de yerba mate para ser incorporado en pinturas anticorrosivas. 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 anteriores de los autores, los extractos acuosos de orégano y yerba mate demostraron tener un efecto anticorrosivo sobre el acero en solución [14, 15]. El objeto de estudio es su incorporación como un aditivo en hormigón armado, por eso resulta necesario analizar el efecto y la alteración que éstos producen en la hidratación de matrices cementíceas, debido a que los extractos de plantas son materia orgánica. Es por ello que en este trabajo se realizó la comparación de curvas de hidratación de pastas de cemento patrón con pastas que tienen incorporado, en diferentes concentraciones, el extracto acuoso liofilizado de orégano o yerba mate.

Metodología

Se prepararon extractos acuosos de orégano y yerba mate a partir de material vegetal seco y agua. Esta mezcla se colocó en un baño ultrasónico por 2 horas a 40°C y luego en una centrifugadora para separar el extracto líquido. Por último, se liofilizó dicho producto para permitir su conservación óptima en el tiempo.

El calor de hidratación se estudió sobre pastas con una relación agua/material cementíceo de 0,5, durante las primeras 48 horas, empleando un calorímetro isotérmico de conducción, a una temperatura base de 20°C.

Se realizaron las pastas cementíceas con cemento CPN 40 y agua, en la cual se disolvía el extracto antes de hacer la mezcla. Las muestras estudiadas son: (1) Pasta patrón, (2) pasta con extracto de orégano en una dosis de 2,8 g/l, (3) pasta con extracto de orégano en una dosis de 1,4 g/l, (2) pasta con extracto de yerba mate en una dosis de 2,8 g/l, (3) pasta con extracto de yerba mate en una dosis de 1,4 g/l.

En la Figura 1 se observan las curvas obtenidas de velocidad de liberación de calor y las de calor total en función del tiempo.

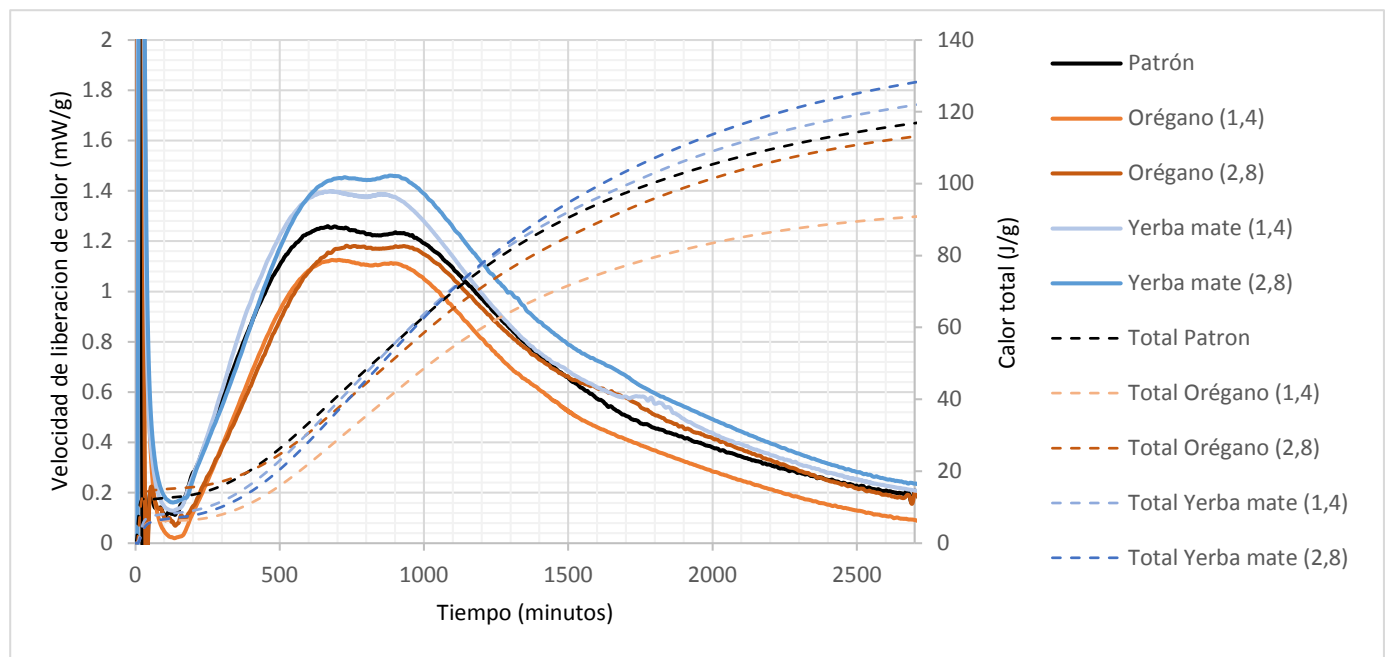


Figura 1 – Velocidad de liberación de calor y calor total en función del tiempo

La hidratación del cemento se puede observar en la curva de calor de hidratación, donde el primer pico de la curva corresponde a la formación de ettringita, el cual ocurre alrededor de los 10 minutos de realizada la pasta. El segundo pico, que corresponde a un mínimo de la curva, se relaciona con el inicio del fraguado y sucede próximo a los 150 minutos. En este punto, no se observan diferencias significativas entre las diferentes pastas ensayadas.

Con el aumento del tiempo de hidratación, la concentración de hidratos y el aumento de puntos de contactos restringen totalmente la movilidad de la pasta y se alcanza el fraguado final del cemento y empieza el período de endurecimiento donde la pasta comienza a ganar resistencia. El período de fraguado se caracteriza por una aceleración en la velocidad de hidratación hasta llegar al pico máximo que se relaciona con el fin de fragüe, y luego una desaceleración durante el período de endurecimiento [16]. En dicho pico, sí es posible observar un corrimiento tanto en edad como en valor de velocidad para las muestras con extractos con respecto a la muestra patrón. Las pastas que contienen yerba mate registran velocidades mayores al momento del fin de fragüe y la mayor concentración de aditivo genera un atraso de este parámetro.

Resulta interesante la comparación con las pastas que contienen el extracto de orégano, ya que éste produce que la velocidad de hidratación sea menor en todo el proceso. Sin embargo, se mantiene la tendencia referida a que el aumento de concentración de extracto genera un atraso en el fin del fragüe.

El siguiente pico máximo corresponde a la hidratación del aluminato tricálcico, dónde se observa una tendencia similar a lo expresado anteriormente con excepción de que la yerba mate genera un adelanto en la edad de dicho pico. Esto podría estar relacionado a un aporte de alúmina por parte del extracto de yerba mate.

Con respecto al calor total obtenido, se puede concluir que ambas muestras de yerba mate fueron mayores que la muestra patrón y ambas de orégano fueron menores. Además, todas las pastas con extracto registraron un aumento en el calor total a medida que se incrementa la concentración.

Conclusiones

Este trabajo forma parte de la base para profundizar en el conocimiento de los inhibidores de corrosión a base de plantas para estructuras de hormigón armado, los cuales siguen siendo foco de estudio para contar con una alternativa sustentable para protegerlas de la corrosión y, sin embargo, resta comprender variables de su mecanismo de acción. El estudio de su influencia en propiedades del hormigón armado en conjunto con los ensayos de corrosión resulta necesario para poder analizar dichos compuestos de forma global.

Los resultados obtenidos permitieron evidenciar que cada extracto de plantas se comporta de forma distinta, en base a los diferentes compuestos orgánicos que contengan en su estructura. Con respecto a su influencia en la hidratación del cemento, los extractos estudiados mostraron una baja influencia negativa, por lo que serían adecuados para ser utilizados como aditivo inhibidor de corrosión en estructuras de hormigón armado.

Para continuar su estudio de factibilidad de aplicación, está proyectado realizar análisis de las características de la capa generada por los extractos en el acero. 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] ISO 8044:2020, "Corrosión de metales y aleaciones – Vocabulario", 5, ISO, 29, (2020).
- [2] Moskwin, V., Alekseyeev, S., "Beton i Zhelezobeton", J. Impact, 2, 21, (1958).
- [3] Elsener, B., "Corrosion inhibitors for steel in concrete, State of the art report", European Federation of Corrosion, N° 35, Maney Pub., (2001), 74 p.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Raja, P., Sethuraman, M., "Inhibitive effect of black pepper extract on the sulphuric acid corrosion of mild steel", Materials Letters, 62, (2008), 2977–9.
- [7] 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.
- [8] Herrera-Hernández, H., Franco-Tronco, M.I., Miranda-Hernández, J.G., Hernández-Sánchez, E., Espinoza-Vázquez, A., Fajardo, G., "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.
- [9] Pérez, M., Banek, S., Croci, C., "Retention of antioxidant activity in gamma irradiated Argentinian sage and oregano", Food Chemistry, 126, (2011), 121-26.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Eyu, D.G., Esah, H., Chukwuekezie, C., Idris, J., 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.
- [13] Roselli, S., Bogdan, S., Deyá, C., Romagnoli, R., "Inhibidor anticorrosivo eco-amigable para recubrimientos acuosos protectoras del acero: *Ylex paraguariensis* (Yerba mate)", Avances en Ciencias e Ingeniería, 7, 3, (2016), 65-72.
- [14] 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.
- [15] Delbianco, N., Priano, C., 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.
- [16] Di Maio, A., Oshiro, A., Zega, C., Bascosy, D., Irassar, E., Fornasier, G., Balzamo, H., Sota, J., Traversa, L., Clariá, M., Carrasco, M., Maldonado, N., Cabrera, O., López, R., Zerbino, R., Checmarew, R., Bonavetti, V. y Rahhal, V., "Ese material llamado hormigón", Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, (2012).

ACTIVACIÓN ALCALINA DE UNA ARCILLITA CALCINADA CON ALTO CONTENIDO DE ESMECTITA

Roxana Lemma¹, Silvina Marfil², Viviana Rahhal¹

¹ Facultad de Ingeniería, CIFICEN (UNCPBA-CONICET-CICPBA), Olavarría, Bs. As.

² Dpto. de Geología - Universidad Nacional del Sur, CGAMA (CIC-UNS), Bahía Blanca, Bs. As.

Palabras Clave: Arcilla, esmectita, activación alcalina, activación mixta.

Introducción

Las arcillas activadas térmicamente 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 CO₂ al ambiente [1] y del consumo de energía, hasta el incremento de la producción de cemento, manteniendo su desempeño [2]. Esto hace que la incorporación de adiciones sea una buena solución desde el punto de vista ecológico y económico; como también tecnológico. Por todo esto y teniendo en cuenta que en Argentina, los depósitos de puzolanas naturales se encuentran alejados de los centros de producción cementera, cada vez más estudios se llevan a cabo para poder incrementar los porcentajes de reemplazo e incorporar nuevos SCM.

Dentro del grupo de arcillas activadas térmicamente se encuentran las esmectitas. Su activación térmica óptima se encuentra entre 600°C a 800°C [3, 4] y si bien sus mezclas producen un incremento en la demanda de agua, alcanzan valores aceptables de resistencia a edades avanzadas. Pero como es sabido, debido al efecto de dilución que genera el reemplazo de cemento por una arcilla calcinada y a su lenta ganancia de resistencia, presentan valores bajos de resistencia a edades tempranas. Es por esto que, en este trabajo, se busca lograr una mejora de la resistencia a edades tempranas a través de una activación mixta, es decir primero una activación térmica y luego una activación química (alcalina).

Materiales y metodología

Para realizar este estudio se utilizó una roca con alto contenido de esmectita (E-0), en particular montmorillonita, junto a otros componentes minoritarios como cuarzo y yeso [5]; y un cemento portland normal (CP). La composición química de E-0 y CP se determinó por fluorescencia de rayos X y se presenta en la Tabla 1. La muestra E-0 cumple con el requerimiento establecido por la ASTM C618 [6] para puzolanas naturales ($\%SiO_2 + \%Al_2O_3 + \%Fe_2O_3 > 70\%$) y una pérdida por calcinación (PPC) menor a 10%, tal como establece la IRAM 1668 [7], así como un retenido en el tamiz N°325 de 4,8%, lo cual es menor al 12% que establece como máximo la IRAM 1654 [8]. Por otra parte, la superficie específica Blaine del CP es de 364 m²/kg, su retenido en el tamiz N°325 es de 12,7%, su densidad 3,13 g/cm³ y su composición mineralógica potencial, calculada a partir de los resultados del análisis químico es la siguiente: 60,7% C₃S, 14,4% C₂S, 3,4% C₃A y 11,6% C₄AF.

Tabla 1: Composición química de los materiales cementíceos

Mat.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	PPC
E-0	62,82	17,39	6,80	2,31	1,18	0,03	0,66	2,47	0,71	0,79	0,06	5,28
CP	20,99	3,71	3,80	63,44	0,89	n.d.	2,71	0,05	1,06	n.d.	n.d.	3,04

La muestra E-0 fue tratada térmicamente a 300°C (E-3) y a 600 °C (E-6) [5], para las cuales se determinó tanto la densidad utilizando el volumenómetro de Le Chatelier (IRAM 1624 [9]), como los límites de Atterberg (IRAM 10501 [10] y 10502 [11]), los cuales se presentan en la Figura 1. En ella se aprecia un aumento de la densidad con el aumento de la temperatura de tratamiento, siendo su mayor valor para la muestra E-3, lo que puede deberse a la reducción del espaciado interlamilar y luego la destrucción de la estructura para E-6. Mientras que, los límites de Atterberg, disminuyen sus valores con el aumento de la temperatura de tratamiento, cayendo el índice de plasticidad de 114% para E-0 a 10% para E-6.

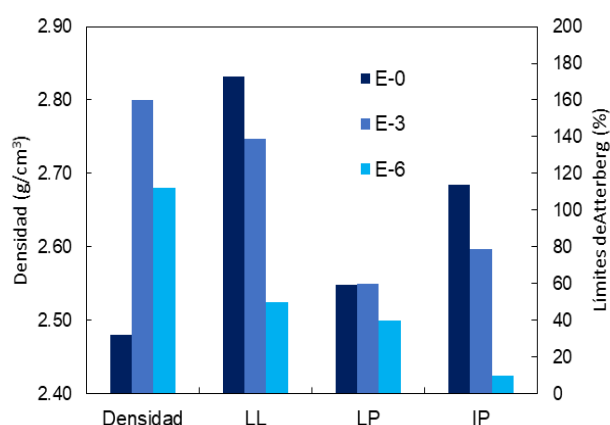


Figura 1 – Densidad y límites de Atterberg

Para lograr la activación mixta, en el moldeo se activó alcalinamente la muestra E-6 con una solución de 5 mM/L de NaOH. Para analizar la evolución de la hidratación desde los primeros minutos se utilizó un calorímetro de conducción isotérmica. La temperatura de base para las mediciones fue de 30°C y la relación agua material cementíceo (a/mc) empleada fue de 0,50. Los registros se completaron hasta las primeras 24 horas de hidratación, obteniéndose el calor total desarrollado hasta dicha edad como la integral bajo la curva velocidad de liberación de calor en función del tiempo. Se prepararon tres series de pastas: CP, realizada con CP y agua destilada, CA-E6, realizada con CP reemplazado con 25% de E-6 y agua destilada y finalmente CAN-E6 realizada con CP reemplazado con 25% de E-6 y reemplazo total del agua por la solución 5 mM/L de NaOH.

Finalmente se moldearon las tres series de morteros para la determinación de la fluidez según IRAM 1634 [12] y la resistencia a compresión según IRAM 1622 [13], para obtener así, a los 28 días, el índice de actividad puzolánica (IAP) según IRAM 1654 [8]. Para los morteros CP y CA-E6, el mezclado se realizó de acuerdo al procedimiento estipulado en la norma IRAM 1622 [13]. Y para el mortero CAN-E6 la forma de reemplazo del agua de mezclado por la solución activadora y el moldeo, se realizó según lo estipulado por Park et al. [14] para pastas, agregando luego la arena y sumando 90 segundos de mezclado a velocidad rápida. Una vez moldeadas las probetas se sellaron los moldes con papel film y se mantuvieron a 40°C, una vez desmoldadas se selló cada probeta individualmente permaneciendo a 40°C hasta las edades de ensayo.

Resultados

En la Figura 2 se presentan las curvas de calor de hidratación instantáneo y total para las pastas obtenidas por calorimetría de conducción isotérmica. Se puede apreciar que al reemplazar parte del CP por E-6 (muestras CA-E6 y CAN-E6) se produce una reducción del calor instantáneo y total, siendo la intensidad del segundo y tercer máximos del CP de 2,35 y 2,20 mW/g, respectivamente; y para las pastas CA-E6 y CAN-E6 de 1,74 y 1,41 mW/g y de 1,79 y 1,47 mW/g, respectivamente. El calor total a las 24 horas del CP alcanza 115 J/g, mientras que el de las pastas CA-E6 y CAN-E6 resulta de 101 y 99 J/g, respectivamente. Con respecto al tiempo en el cual se producen el segundo y tercer máximo, se observa un adelanto del segundo máximo y un retraso del tercer máximo al reemplazar parte del CP por E-6, siendo los mismos de 460 y 580 min para el CP, y de 360 y 680 min para las pastas CA-E6 y CAN-E6.

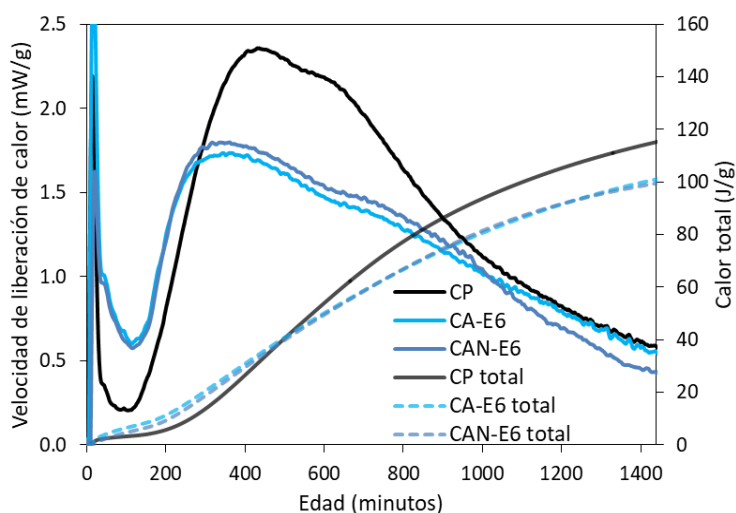


Figura 2 – Calor de hidratación de pastas

Los valores de fluidez fueron de 79%, 59% y 43% para los morteros CP, CA-E6 y CAN-E6, respectivamente. Este descenso de la fluidez puede estar asociado a la mayor demanda de agua al reemplazar parte del CP por E-6 debido a su menor densidad, lo que implica un volumen mayor al realizar el reemplazo en peso, y a la mayor finura observada en los valores de retenidos en el tamiz N°325, lo que implica una mayor superficie específica a mojar de las partículas. Por otra parte, la disminución de la fluidez entre CA-E6 y CAN-E6, puede deberse a la aceleración de las reacciones que se observa en las curvas de calor de hidratación al activar alcalinamente la muestra (aumento de la intensidad del segundo y tercer máximos de la pasta CAN-E6 respecto de la CA-E6).

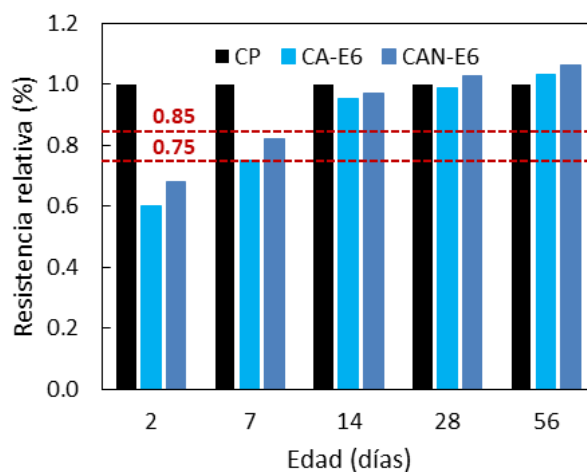


Figura 3 – Resistencia relativa de morteros

En la Figura 3 se presentan los resultados de la resistencia relativa de los morteros, se observa que los morteros CA-E6 y CAN-E6 tienen una resistencia relativa mayor a 75% desde los 7 días y mayor a 85% a partir de los 14 días, cumpliendo sobradamente a la edad de 28 días con un IAP > 75%. Finalmente, los morteros CA-E6 y CAN-E6 alcanzan a la edad de 56 días una resistencia relativa de 1,03% y 1,06%, respectivamente. Se observa para todas las edades valores levemente superiores para CAN-E6 respecto de CA-E6, siendo este incremento mayor a edades tempranas (13% a 2 días y 9% a 7 días).

Conclusiones

Con los materiales y metodologías utilizados en este trabajo se puede concluir que:

- Al activar térmicamente la muestra, se produce un incremento de la densidad y una disminución del índice de plasticidad.
- Al reemplazar un 25% de CP por E-6, se produce una reducción del calor instantáneo y total de las muestras y una aceleración del segundo máximo.
- Al realizar una activación mixta, la muestra CA-E6 se produce una aceleración de las reacciones en los primeros minutos y, un incremento del calor instantáneo tanto en el segundo como tercer máximo.
- La fluidez decae su valor al reemplazar 25% de CP por E-6. A su vez, la activación mixta provoca un decaimiento adicional de la fluidez.
- La resistencia de las muestras de los morteros CA-E6 y CAN-E6 supera el 75% del mortero CP desde los 7 días, superando al propio CP a los 56 días.
- La resistencia mecánica de la muestra con activación mixta presenta una mayor ganancia de resistencia que la muestra solo activada térmicamente, siendo este incremento del 13% a la edad de dos 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-CO₂ cement-based materials industry", *Cement and Concrete Research*, 114, (2018), 2–26.
- [3] Fernandez, R., Martirena, F., Scrivener, K. L., "The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: A comparison between kaolinite, illite and montmorillonite", *Cement and Concrete Research*, 41, 1, (2011), 113–122.
- [4] He, C., Osbaeck, B., Makovsky, E., "Pozzolanic reactions of six principal clay minerals: Activation, reactivity assessments and technological effects", *Cement and Concrete Research*, 25, 8, (1995), 1691–1702.
- [5] Lemma, R., Colasurdo, V., Marfil, S., Rahhal, V., "Lixiviación de álcalis de una roca con alto contenido de esmectita", 2^{da} Jornadas de Jóvenes Investigadores en Tecnología del Cemento y el Hormigón, (2021), 78-80.
- [6] ASTM C618, "Standard specification for coal ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete".
- [7] Instituto Argentino de Normalización y Certificación, "IRAM 1668. Puzolanas y cenizas volantes silíceas. Características y muestreo".
- [8] Instituto Argentino de Normalización y Certificación, "IRAM 1654. Puzolanas. Métodos de ensayo generales".
- [9] Instituto Argentino de Normalización y Certificación, "IRAM 1624. Cemento. Método de determinación de la densidad absoluta".
- [10] Instituto Argentino de Normalización y Certificación, "IRAM 10501. Mecánica de suelos. Métodos de determinación del límite líquido y del índice de fluidez".
- [11] Instituto Argentino de Normalización y Certificación, "IRAM 10502. Mecánica de suelos. Método de determinación del límite plástico e índice de plasticidad".
- [12] Instituto Argentino de Normalización y Certificación, "IRAM 1634. Cemento pòrtland. Método para la determinación del contenido de aire en morteros".
- [13] Instituto Argentino de Normalización y Certificación, "IRAM 1622. Cemento pòrtland. Métodos de determinación de las resistencias a la compresión y a la flexión".
- [14] Park, S., Park, S., Park, S., Pyo, S., "Thermodynamic modeling and mechanical properties of hybrid alkaline cement composites", *Construction and Building Materials*, 322, (2022), 126-381.

EVALUACIÓN DE LA ACTIVIDAD PUZOLÁNICA DE UN MATERIAL DE DESCARTE EN LA INDUSTRIA CEMENTERA, OLAVARRÍA, ARGENTINA

Lenís Madsen ^{1, 2}, Constanza Bournod ^{1, 2}, Viviana Rahhal ³, Silvina Marfil^{1, 2}

¹ CGAMA (CIC-UNS), San Juan 670, Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina

² Departamento de Geología – Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina

³ Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, CIFICEN (UNCPBA-CONICET-CICPBA), Olavarría, Buenos Aires, Argentina

Palabras Clave: Pozolanas naturales, cemento, pelitas.

Introducción

La tecnología del cemento continúa evolucionando en búsqueda de materiales que permitan reemplazar parcialmente al clinker en la fabricación de cementos adicionados, convirtiéndose así en materia de numerosos estudios. Existe un grupo de adiciones, con una importante actividad química, entre los que se encuentran las puzolanas las cuales mejoran el desempeño de morteros de cemento y hormigones. Esta mejora se da principalmente por la reacción entre la puzolana y el hidróxido de calcio liberado durante la hidratación del cemento. La incorporación de este tipo de materiales a su vez trae aparejado beneficios económicos, ecológicos y funcionales [1].

Las puzolanas de origen natural son productos minerales que se caracterizan por ser materiales silíceos/silico-aluminosos, con características estructurales y texturales que lo hacen apto para su utilización como sustituto parcial del cemento. Bajo estos conceptos, en el presente trabajo se estudió una roca pelítica, que actualmente constituye un material de descarte en una cementera de la zona de Olavarría, la cual, al extraer la materia prima (caliza) para la fabricación del cemento, acopia grandes cantidades de este material sin darle un uso final. Madsen et al. [2] estudiaron la potencial reactividad de estas rocas para su uso como agregado para hormigón. Si bien por sus características físico-mecánicas constituyen un material apto, la reactividad de estas rocas, ensayadas mediante el método de la barra de mortero basado en la norma IRAM 1674, arrojó valores 4 veces por encima del límite establecido por la normativa. Este comportamiento fue el punto de partida para evaluar su potencial puzolanidad.

El objetivo principal del presente trabajo es la caracterización preliminar de pelitas y lutitas que constituyen el material de descarte, para su uso como puzolana, mediante microscopía óptica, difracción de rayos X (DRX), espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) y el método Frattini siguiendo los lineamientos de la norma IRAM 1651:98 [3]. El desarrollo de esta investigación tiene gran relevancia para la industria ya que considera una alternativa al uso de este importante volumen de roca, que actualmente constituye un pasivo ambiental y que hasta ahora representa un costo adicional para el movimiento de la materia prima en las fábricas de cemento de la región, produciendo una reducción del impacto ambiental aparejado a los beneficios económicos de la industria.

Materiales y Métodos

Se recolectó material de acopio perteneciente a una cantera ubicada en proximidades de la ciudad de Olavarría (provincia de Buenos Aires). El material corresponde a una sucesión de facies pelíticas (Fm. Alicia) compuestas por lutitas rojas y limolitas gris oscuras a negras que se ubican estratigráficamente entre las sucesiones margosas (Fm. Avellaneda) y heterolíticas típicas de la Formación Cerro Negro [4]. Las muestras fueron reducidas por cuarteo y trituradas en laboratorio según los requerimientos de cada ensayo.

La composición mineralógica del material se realizó mediante DRX para determinar componentes principales y minerales de alteración. Se utilizó un difractómetro Rigaku D-Max III-C, a 35 kV y 15 mA con radiación de Cu K α 1,2, $\lambda = 1.541840 \text{ \AA}$, filtrada con monocromador de grafito en el haz difractado. La muestra se analizó por espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) en un espectrofotómetro Nicolet 520. Para ello se prepararon pastillas de KBr con la muestra. El espectro se realizó directamente sobre estas pastillas, considerando 100 barridos en modo transmitancia con una resolución de 4 cm^{-1} , en el rango de número de onda entre $4000 \text{ cm}^{-1} - 400 \text{ cm}^{-1}$ bajo atmósfera inerte de nitrógeno. Sobre secciones delgadas se realizaron estudios petrográficos utilizando un microscopio Leica DM 750P con cámara y sistema de captura de imágenes para la toma de fotomicrografías.

Para el ensayo de Frattini se mezclaron 15 g de cemento portland (CPN) + 5 g del material de estudio molido (FP) con 100 ml de agua destilada en recipientes de plástico. Los envases sellados se almacenaron durante 7, 14 y 28 días a 40 °C. En el momento de la prueba, las muestras se filtraron al vacío a través de un papel de filtro. El filtrado se analizó para $[\text{OH}^-]$ por titulación contra HCl diluido con indicador de naranja de metilo y para $[\text{Ca}^{2+}]$ por ajuste de pH a 13, seguido de titulación con solución de EDTA 0,025 M usando indicador de Murexide. La adición puzolánica se considera activa cuando la $[\text{CaO}]$ y la $[\text{OH}^-]$ determinados en la solución sobrenadante se ubican por debajo de la isoterma de solubilidad de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en solución alcalina a 40 °C.

Resultados

La caracterización mineralógica se realizó mediante DRX (Figura 1), debido al tamaño de grano fino que presenta la roca. Se identificó cuarzo, feldespato, calcita, muscovita/illita y cloritas.

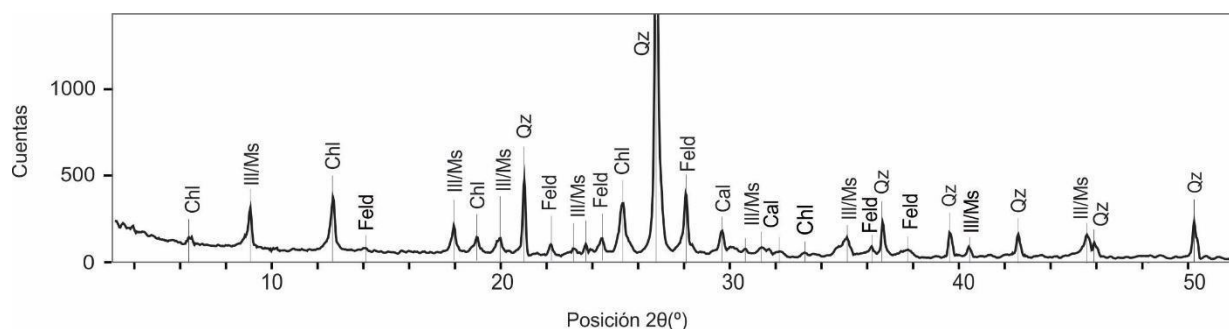


Figura 1 – Difractometría de rayos X (Qz: cuarzo, Feld: feldespato, Cal: calcita, MS: muscovita, Ill: illita, Chl: clorita)

La caracterización mediante FTIR es compleja debido a la presencia de varias especies que absorben en la misma región del infrarrojo medio, como calcita, cuarzo y feldespato, por lo que la interpretación de los picos se analizó teniendo en cuenta las posibles interferencias espectrales. En la Figura 2 se muestran las principales bandas de absorción en el espectro infrarrojo para los minerales identificados. Las vibraciones entre 900 cm^{-1} y 1000 cm^{-1} se corresponden a las generadas por los silicatos (enlace Si-O, Si-O-Al) como pueden ser cuarzo, feldespato y minerales secundarios [5]. Se corroboró la presencia de cuarzo con bandas de vibración características en 1080 cm^{-1} , 798 cm^{-1} , 778 cm^{-1} y 694 cm^{-1} (Si-O, Si-O-Si).

Las bandas ubicadas entre 3620 cm^{-1} y 1410 cm^{-1} indican la posibilidad del enlace hidroxilo. Sin embargo, una banda ancha en 3410 cm^{-1} y otra hasta 1700 cm^{-1} sugiere la posibilidad de agua de hidratación en el adsorbente en el espectro de las arcillas. La espectroscopía infrarroja es muy sensible al enlace hidroxilo a 3410 cm^{-1} (H-O-H) y 3620 cm^{-1} (Al---O-H) [6]. Esta característica es determinante en la identificación de minerales hidratados en muestras naturales como son los minerales mencionados anteriormente, en el espectro de la arcilla sugiere la posibilidad de agua de hidratación en el adsorbente [7-8]. Finalmente se determinó calcita con vibraciones características en 2512 cm^{-1} , 1798 cm^{-1} y 1418 cm^{-1} [9].

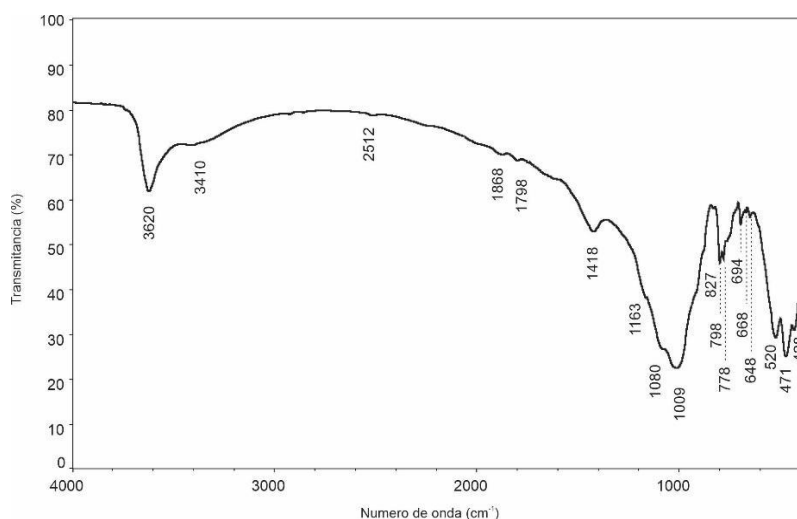


Figura 2 – Espectro FTIR para la muestra FP.

Bajo microscopio óptico se definió como una roca de grano muy fino con alternancias composicionales en la matriz, por sectores con abundante contenido de hierro, intercalada con bandas de matriz arcillosa (illita/clorita) (Figura 3a). Mineralógicamente se reconocen granos de cuarzo xenomórficos con tamaños de grano que varían entre $10\text{ }\mu\text{m}$ y $60\text{ }\mu\text{m}$, fragmentos de illita y micas del tipo muscovita de

formas alargadas y flexuradas. En escasos sectores se reconocen cúmulos de calcita con tamaño promedio $\sim 50\ \mu\text{m}$ (Figura 3a y 3b).

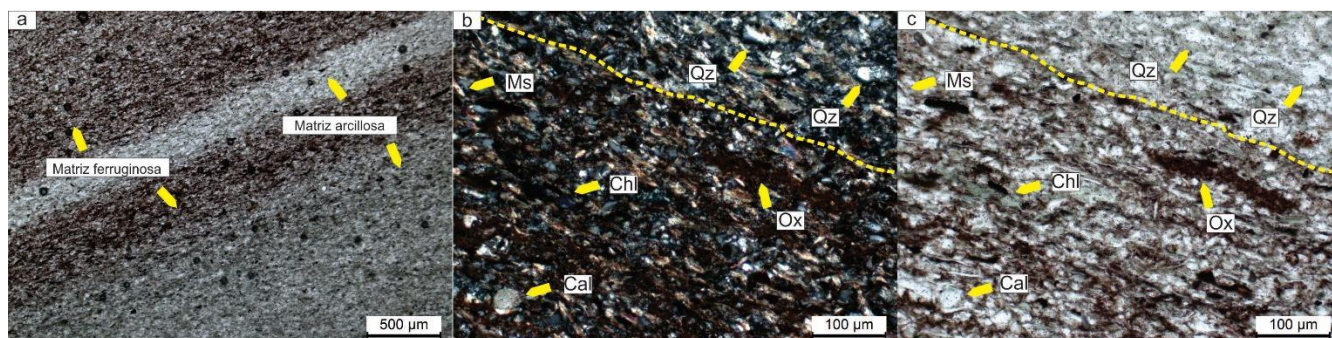


Figura 3 – Fotomicrografías de FP: a) Textura general de la roca, b) y c) minerales identificados en la sección delgada (con nicoles cruzados y paralelos, respectivamente)

Los resultados del ensayo de Frattini se presentan en la Figura 4. Para el CPN, los puntos que representan $[\text{CaO}]$ y $[\text{OH}^-]$ están por encima de la isoterma de solubilidad del calcio, lo que indica que la solución está saturada en portlandita. Para FP, el punto correspondiente a los 7 días está por encima de la isoterma de solubilidad del calcio, no revelando actividad puzolánica. Después de 14 días, los puntos caen por debajo de la isoterma, lo que indica que el material puzolánico reacciona con el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ disuelto a una velocidad elevada dando lugar a una solución sobrenadante insaturada. La $[\text{CaO}]$ es levemente superior en el CPN en los días ensayados, mientras que la $[\text{OH}^-]$ aumenta ligeramente.

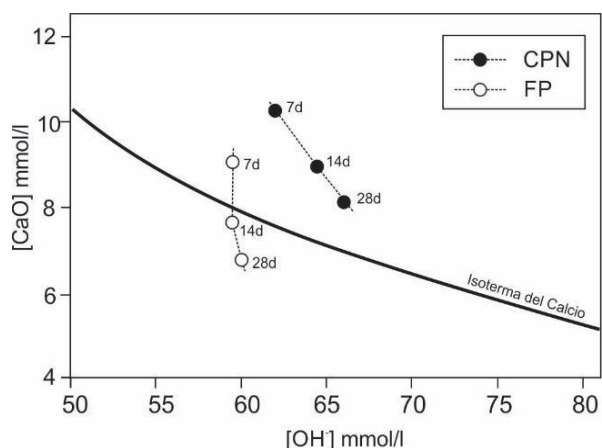


Figura 4 – Método de Frattini para CPN y FP

Conclusiones

La caracterización textural y mineralógica mediante microscopía óptica, DRX y FTIR, permitió definir una mineralogía regular de la roca, de grano muy fino, compuesta principalmente por cuarzo, feldespatos y fases hidratadas/hidroxiladas como muscovita, clorita e illita. La reacción puzolánica se puede atribuir principalmente a la alta reactividad del cuarzo microcristalino en condiciones alcalinas, mientras que las facies arcillosas contribuyen al transporte de iones para la reacción puzolánica. El ensayo de Frattini permitió determinar que el material tiene una buena actividad puzolánica y se clasifica como material puzolánico de reacción lenta.

Referencias

- [1] Castro, C.M.J., Albear, J.J.H., Alcivar, M.S.G., Brito, S., "Impacto de la utilización de puzolanas naturales ecuatorianas", *Revista de Investigaciones en Energía, Medio Ambiente y Tecnología*, 2, 1, (2017), 5p.
- [2] Madsen, L., Falcone, D., Rahhal, V., Marfil, S., "Evaluación de material de descarte de una cantera de la zona de Olavarría para uso como agregado en hormigón", *X Congreso Internacional y 24° Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón*, Buenos Aires, Argentina. ISBN 978-987-47035-6-9, (2022), 242-249p.
- [3] Instituto Argentino de Racionalización de Materiales, "IRAM 1533. Cemento Portland puzolánico. Métodos de ensayo", (1998), 15p.
- [4] Arrouy, M.J., Poiré, D.G., Gómez Peral, L.E., Canalicchio, J.M., "Sedimentología y estratigrafía del Grupo La Providencia (nom. nov.): cubierta superior neoproterozoica, Sistema de Tandilia, Argentina", *Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis*, vol. 22, 2, (2015), 171-189.
- [5] Nayak, P.S., Singh, B.K., "Instrumental characterization of clay by XRF, XRD and FTIR", *Bulletin of materials science*, 30, 3, (2007), 235-238.
- [6] Van der Marel, H.W., Beutelspacher, H., "Atlas of infrared spectroscopy of clay minerals and their admixtures". Elsevier Publishing Company, (1976), 404p.
- [7] Chukanov, N.V., "Infrared spectra of mineral species: extended library" Springer Science & Business Media (2013).
- [8] Madejová, J., Balan, E., Petit, S., "Application of vibrational spectroscopy to the characterization of phyllosilicates and other industrial minerals", (2010).
- [9] Gadsden, J.A., "Infrared spectra of minerals and related inorganic compounds", (1975), 127p.

RESISTENCIA AL ATAQUE DE SULFATOS EN MORTEROS DE CEMENTOS TERNARIOS CON FILLER CALCÁREO Y ARCILLA ILLÍTICA CALCINADA

Lucía Montani¹, Alejandra Tironi¹, Viviana Bonavetti¹, Edgardo F. Irassar¹

¹ Facultad de Ingeniería, CIFICEN (UNCPBA-CICPBA-CONICET), Av. del Valle, B7400JWI, Olavarría, Buenos Aires, Argentina.

Palabras Clave: cementos ternarios, material calcáreo, arcilla illítica calcinada, ataque de sulfatos, resistencia a compresión.

Introducción

La presencia excesiva de sulfatos en el agua o suelo de contacto ocasiona importantes problemas en la durabilidad de las estructuras de hormigón generando una degradación progresiva del material. La velocidad y evolución del deterioro del hormigón en contacto con aguas con sulfatos depende de variables externas e internas. Las variables externas incluyen la humedad de contacto, la temperatura ambiente, el tipo de sulfatos presente en el suelo o agua. Las variables internas incluyen la composición del cemento, el tipo y proporción de MCS (materiales cementicios suplementarios) usado y, especialmente la porosidad conectada del hormigón (baja permeabilidad). Los principales métodos para prevenir el ataque externo de sulfatos (AES) son: a) la reducción de la cantidad de C_3A en el cemento portland, b) la reducción de permeabilidad del hormigón, y c) el uso de MCS activos [1].

En el marco de la mitigación de los gases de efecto invernadero (GEI) generados en la producción del cemento, este estudio busca contribuir a la meta de "cero emisiones" que se espera alcanzar para el año 2050 al reducir el contenido de clinker en los cementos ARS (altamente resistentes a los sulfatos) reemplazando parte del clinker por MCS sin limitar su capacidad resistente frente al ataque externo de sulfatos ni reducir su resistencia a la compresión.

Los MCS empleados en este estudio son materiales de gran disponibilidad, bajo costo, y se encuentran en las propias canteras donde se extraen las materias primas para la fabricación del cemento. Estos MCS son filler calcáreo (FC), una adición hidráulicamente inactiva, y arcilla illítica calcinada a escala industrial (AIC), una adición hidráulicamente activa, que tienen origen y se producen en Olavarría, Buenos Aires.

Frente a la resistencia de sulfatos, una baja proporción de filler calcáreo (FC) podría contribuir a un mayor empaquetamiento (reduciendo los vacíos), reducir la relación a/mc (agua/material cementicio), acelerar la formación de productos de hidratación que rellenen los espacio entre partículas, y generar un "entorno" que favorezca la estabilización de la ettringita [2]. Sin embargo, una elevada proporción de FC podría aumentar la porosidad y permeabilidad de la pasta, y además de favorecer la formación de thaumasita [3]. Por otro lado, el uso de la puzolana (AIC) puede reducir la cantidad de hidróxido de calcio (CH) presente en la pasta de cemento hidratada y formar productos de hidratación más estables (C-S-H) con tamaño de granos más finos que favorecen a una menor porosidad y permeabilidad [4].

El objetivo de este trabajo es analizar la resistencia a compresión del mortero de cementos ternarios y su expansión al ser expuestos a una solución de sulfatos de sodio. Los cementos ternarios están constituidos por cemento portland (50 a 95%) y proporciones variables de filler calcáreo (5 a 20%) y arcilla illítica calcinada (15 a 30%).

Materiales y metodología de ensayos

Para realizar los ensayos se utilizaron cemento portland normal CPN40 (ARS), filler calcáreo (FC) y arcilla illítica calcinada (AIC). El cemento presentó una composición mineralógica de 58% de C_3S , 16% de C_2S , 4% de C_3A y 11% de C_4AF , y una finura Blaine de 336 m²/kg. La distribución de tamaños obtenida por granulometría láser es bimodal y sus parámetros d_{10} , d_{50} y d_{90} fueron 1,80, 18,30 y 67,21 μm , respectivamente. El filler calcáreo (FC) está constituido por un 85% de $CaCO_3$ determinado por medio de la pérdida por calcinación ($PxC = 37,6\%$) y como principal impureza cuarzo. La distribución de tamaños de partículas fue bimodal con un d_{10} , d_{50} y d_{90} de 1,23, 4,25 y 32,73 μm , respectivamente. La arcilla illítica calcinada (AIC) está compuesta por un elevado contenido de sílice (70,9%) y de hierro (8,9%), 15,7% de aluminio y 2,1% de álcalis totales. El estudio por DRX mostró que contenía cuarzo (Q), reflexiones de illita deshidroxilada (I), plagioclasa (P) y hematita (H). La distribución de tamaños de partículas fue unimodal

con un d₁₀, d₅₀ y d₉₀ de 1,82, 12,93 y 44,96 μm , respectivamente. Esta puzolana mostró un bajo requerimiento de agua (2%) y un índice de actividad puzolánica (IAP) con CPN a los 28 días de 103%.

El IAP se obtuvo como promedio de la resistencia de tres probetas 4 x 4 x 16 cm³, previamente ensayadas a flexión, siguiendo el procedimiento de la norma IRAM 1654-1. La resistencia a compresión de los cementos se evaluó según lo indicado en la norma IRAM 1622 empleando a/mc de 0,50, probetas de 4 x 4 x 5 cm³ y los resultados corresponden al promedio de seis determinaciones por edad. La resistencia potencial al AES se realizó siguiendo la norma ASTM C1012 registrando la expansión promedio de seis barras de 2,5 x 2,5 x 28,5 cm³ por cada cemento estudiado, sumergidas en solución de sulfatos de sodio (50 g/L), en un recipiente herméticamente cerrado y a una temperatura de 20 $\pm$ 2 °C.

Cementos mezclas estudiados: Los cementos con MCS se obtuvieron por reemplazos variables en peso de cemento CP por arcilla illítica calcinada y filler calcáreo. Se estudiaron el cemento CP y ocho cementos (Tabla 1) identificados con el contenido de puzolana (P) seguido por el contenido de filler (F).

Tabla 1: Composición porcentual en peso y resistencia a compresión de los cementos estudiados.

Composición porcentual en peso de los cementos (%)				Resistencia a compresión (MPa)							
Mezcla	CPN	AIC	FC	2 días	s, %	7 días	s, %	28 días	s, %	90 días	s, %
CPN	95,0	0,0	5,0	24,0	4,5	34,9	3,0	43,9	3,6	50,2	5,0
CPF12.5	87,5	0,0	12,5	26,3	4,2	38,6	1,5	44,6	2,8	46,4	7,5
CPF20	80,0	0,0	20,0	23,0	5,9	32,8	5,5	37,1	3,9	44,4	6,9
CPP15	80,0	15,0	5,0	21,7	3,5	32,1	4,0	38,1	6,2	48,6	3,9
CPC15P12F	72,5	15,0	12,5	20,0	4,0	30,3	5,1	36,1	3,3	48,2	4,9
CPC15P20F	65,0	15,0	20,0	16,3	1,1	25,9	3,8	32,2	1,9	39,7	3,5
CPP30	65,0	30,0	5,0	17,2	6,8	26,2	5,3	34,2	3,9	44,5	3,7
CPC30P12F	57,5	30,0	12,5	13,8	5,2	22,8	4,2	31,4	3,0	37,7	5,2
CPC30P20F	50,0	30,0	20,0	11,2	7,1	18,9	4,2	28,6	2,6	33,5	1,9

Resultados y discusión

Resistencia a compresión de morteros (IRAM 1622): La Tabla 1 muestra la evolución de la resistencia a compresión de los morteros estudiados hasta los 90 días y su desvío estándar porcentual (s). La resistencia de los morteros con filler muestra que el reemplazo de 12,5% de FC generó mayores resistencias (10% mayor al patrón) en los primeros días, demostrando un claro efecto de estimulación por parte de las partículas finas del FC, mientras que en edades avanzadas alcanzó valores similares al CPN indicando un leve efecto de dilución. Cuando el reemplazo de FC fue de 20% la resistencia fue 10 a 15% menor al CPN, atribuible al efecto de dilución que ocurre al reemplazar por un material hidráulicamente inactivo incapaz de producir C-S-H e incrementa la porosidad [5]. Las mezclas con 15% de AIC con 5 y 12,5% de FC presentaron una resistencia inicial relativamente menor al patrón, pero luego de los 28 días mejoraron notablemente alcanzando valores similares al CPN, atribuible a la actividad puzolánica de la AIC. Sin embargo, cuando el reemplazo de FC fue de 20%, las resistencias fueron mucho menores al mortero patrón. Finalmente, la resistencia de los morteros con 30% de AIC presentó una reducción apreciable con respecto al mortero CPN, especialmente cuando se incrementa el contenido de filler calcáreo, debido a la baja reactividad puzolánica de esta arcilla calcinada con elevada presencia de materiales cristalinos.

Resistencia a los sulfatos (Na₂SO₄): La Figura 1 muestra la expansión promedio obtenida hasta los 12 meses de ensayo de los cementos con distinto contenido de filler y puzolana artificial. Para los morteros sin puzolana, la incorporación de 12,5 y 20% de filler calcáreo causó un ligero incremento de la expansión a partir de los 28 días y superó el límite de 0,05% a los 6 meses y el del 0,10% a los 12 meses (Figura 1a) debido a que este es un material hidráulicamente inactivo que generalmente conduce a una mayor porosidad y mayor permeabilidad que la mezcla de control [5]. Los CPP con 15% y 30% de puzolana (Figura 1b y 1c) desarrollaron una expansión menor a la registrada por el CPN a todas las edades, atribuible a la reacción puzolánica que reduce la disponibilidad de CH para la formación de yeso y ettringita a edades tardías. Al incrementar el contenido de FC en 12,5% y 20%, la expansión de las barras fue mayor. La incorporación de FC desde un 12,5% en el CPP30 produjo una expansión que superó el límite de 0,05% y 0,10% a los 6 y 12 meses, respectivamente, y se atribuye no sólo al material inactivo del FC,

sino también a la elevada proporción de material inactivo (cristalino) en la puzolana que aumenta la porosidad del mortero.

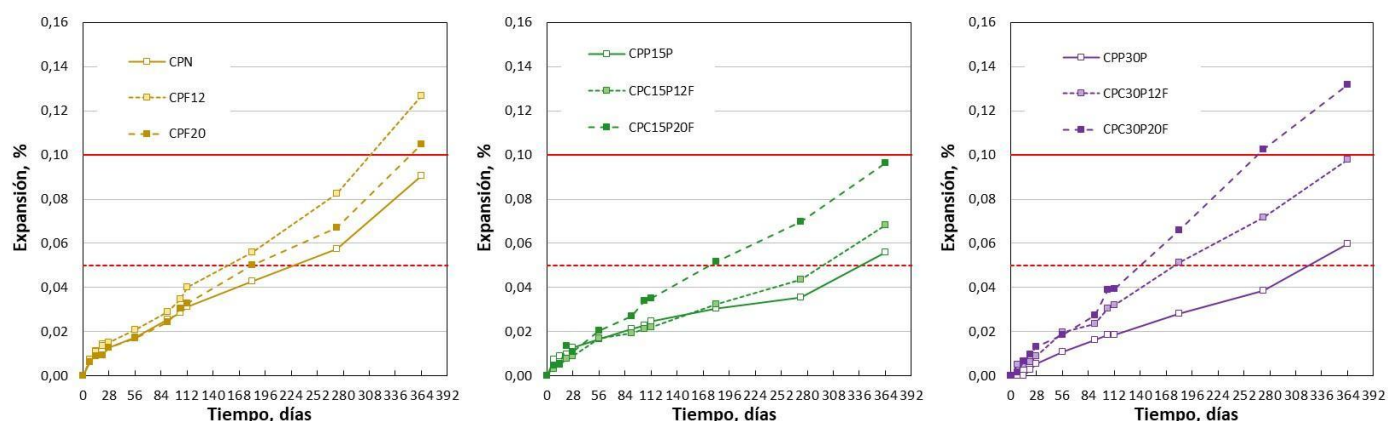


Figura 1 - Expansión de las barras de mortero de cementos con: a) 0%, b) 15% y c) 30% de puzolana

Conclusiones

Los resultados obtenidos en los cementos estudiados permiten esbozar las siguientes conclusiones preliminares:

- Para un reemplazo de 12,5% de FC, la resistencia mejora aproximadamente un 10% en los primeros días y mantiene valores similares al CPN en edades más avanzadas. Sin embargo, cuando el reemplazo de FC es 20%, la resistencia a edades tardías se reduce aproximadamente 10 a 15%.
- Cuando el reemplazo de AIC fue superior al 15%, con o sin combinar con FC, la resistencia a compresión fue inferior al CPN para todas las edades.
- Reemplazos de FC mayor al 12,5% incrementaron la expansión del mortero superando el límite establecido por la norma a los 6 y 12 meses, indicando que los mismos no son ARS.
- Los cementos con reemplazos del 15% y 30% de AIC mantuvieron expansiones inferiores al límite establecido por la norma, de forma que pueden considerarse como ARS.
- Los cementos ternarios con hasta 35% de MCS, como es el caso de los cementos con 15% de AIC combinado con 12,5% o 20%, cumplen con la expansión límite de 0,10% a los 12 meses, indicando que ambos cementos son ARS.
- Los cementos ternarios con 30% de AIC registran una expansión que supera ambos límites de la norma (0,05% y 0,10% a los 6 y 12 meses, respectivamente) indicando que los mismos no son ARS.

Para lograr una reducción del factor clinker del 50%, empleando esta puzolana se deben explorar soluciones adicionales como la activación química de la puzolana a temprana edad conjugado con un diseño de molienda que permita una mayor hidratación temprana del clinker.

Referencias

- [1] Fernandez Luco, L., Klaric, M., Irassar, E.F., Batic, O.R., Sota, J.D., Traversa, L.P., Giovambattista, A., "Durabilidad del hormigón estructural", 2da edición, Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, (2001), 111-140.
- [2] De Weerd, K., Ben Haha, M., Le Saout, G., Kjellsen, K.O., Justnes, H., Lothenbach, B., "Hydration mechanisms of ternary Portland cements containing limestone powder and fly ash", Cement and Concrete Research, 41, 3, (2011), 279-91. doi: 10.1016/j.cemconres.2010.11.014.
- [3] Irassar, E.F., "Sulfate attack on cementitious materials containing limestone filler — A review", Cement and Concrete Research, 39, 3, (2009), 241-54. doi: 10.1016/j.cemconres.2008.11.007.
- [4] Cordoba, G., Irassar E.F., "Sulfate performance of calcined illitic shales", Construction and Building Materials, 291, (2021), 123215. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123215.
- [5] Panesar, D.K., Zhang, R., "Performance comparison of cement replacing materials in concrete: limestone fillers and supplementary cementing materials - A review", Construction and Building Materials, 251, (2020), 118866. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118866

Capítulo 4

Tecnologías constructivas

ESTUDIO DE LA COLORACIÓN DE HORMIGONES LIVIANOS A PARTIR DE LA ADICIÓN DE PIGMENTOS DE ORIGEN NATURAL Y ARTIFICIAL

Gabriel Agostini¹, Joana Avalos¹, Daiana Galimberti¹, Carolina Domizio^{1, 2}, Gerardo González del Solar^{1, 2}

¹ Departamento de Ingeniería Civil, Facultad Regional Mendoza, Universidad Tecnológica Nacional

² CeReDeTeC, Facultad Regional Mendoza, Universidad Tecnológica Nacional

Palabras Clave: hormigón arquitectónico, hormigón liviano, resistencia mecánica, pigmentos naturales, pigmentos artificiales.

Introducción

El hormigón, inventado como una necesidad puramente estructural, ha ido aumentando su popularidad como elemento arquitectónico a través de la incorporación de pigmentos que le confieren un extraordinario valor estético [1, 2]. En los últimos años una nueva concepción urbanística se está imponiendo con gran fuerza. El hormigón en sus diferentes formas, se encuentra directamente afectado por este deseo de humanización de las estructuras como componentes urbanos indispensables. Añadir color a las estructuras grises de hormigón es una manera de quitarles monotonía, darles calor y alegría, lo cual se puede lograr simplemente pintando la superficie endurecida. Sin embargo, el uso de pigmentos añadidos al hormigón es lo que produce un efecto más eficaz ya que el color se integra en la mezcla, requiriendo un bajo mantenimiento para que el mismo perdure.

La fabricación del hormigón coloreado no difiere del proceso tradicional empleado para producir hormigones sin pigmentos, no obstante, algunos factores deben ser considerados durante su producción con el objeto de optimizar el color y la calidad deseada. La libertad en el diseño, la posibilidad de lograr innumerables acabados, una construcción costeable, integridad estructural y el bajo costo de su mantenimiento justifican el aumento de la popularidad de los hormigones pigmentados en las diversas áreas de la construcción [3].

El objetivo de la investigación fue el estudio de la influencia en la coloración de diferentes pigmentos, naturales y artificiales. Dichos pigmentos fueron añadidos en hormigones ejecutados con cemento blanco y alivianados a partir de la incorporación de perlita volcánica y expandida.

Metodología

Se realizaron 7 dosificaciones y se confeccionaron probetas cúbicas de 7 cm de lado, siguiendo las indicaciones de la norma ASTM C-109 [4], para evaluar resistencia a compresión a 3, 7, 14, 21 y 28 días, y su aspecto estético en estado fresco y endurecido. En todas las mezclas se utilizó perlita volcánica y expandida para obtener hormigones livianos, con la adición de *silica fume* para elevar su resistencia mecánica y un aditivo hiperfluidificante para reducir la cantidad de agua. En la Figura 1 se muestran las tonalidades logradas con cada uno de los pigmentos evaluados; utilizando en todos los casos cemento blanco para obtener mejores colores. En primer lugar, se probaron pigmentos naturales: zumo de remolacha (D1) y cúrcuma (D2). Luego se usaron pigmentos artificiales: colorantes comestibles en pasta (D4) y líquidos (D6), violeta genciana (D5) y anilinas (D7); también se realizó una dosificación sin coloración (D3) como muestra patrón.

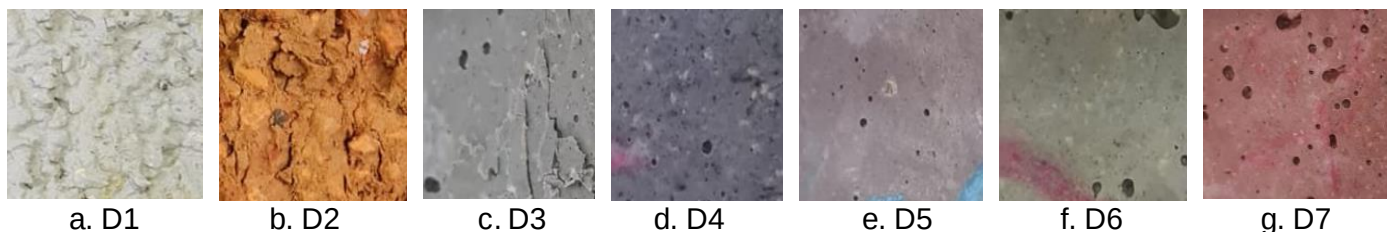


Figura 1. Tonalidades obtenidas en las probetas con cada pigmento, a. D1: remolacha, b. D2: cúrcuma, c. D3: sin pigmento, d. D4: colorante comestible en pasta azul, e. D5: violeta genciana, f. D6: colorante comestible líquido verde, g. D7: anilina roja

La Tabla 1 resume las dosificaciones que se llevaron a cabo. Tal y como puede observarse, las dosificaciones D1 y D2 emplearon perlita volcánica como material liviano; en tanto que en el resto se

incorporó además perlita expandida para tener un material con menor densidad. Asimismo, las dosificaciones D3 a D7 son similares entre sí variando la cantidad y tipo de pigmento incorporado en la mezcla.

Tabla 1: Dosificaciones evaluadas.

Material	Dosificaciones (kg/m ³)						
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
Cemento Blanco	584	527	640	640	640	640	640
Agregado Fino	236	213	221	221	221	221	221
Perlita volcánica	472	426	332	332	332	332	332
Perlita expandida	-	-	28	28	28	28	28
Silica fume	75	67	70	70	70	70	70
Agua	249	319	349	349	349	349	349
Aditivo hiperfluidificante	1	1	5	5	5	5	5
Remolacha	106	-	-	-	-	-	-
Cúrcuma	-	53	-	-	-	-	-
Pigmento	-	-	-	1	2	1	12
PESO UNITARIO	1723	1605	1645	1646	1647	1646	1657
rel a/c	0,61	0,61	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55
f'c (28 días) (MPa)	0	2	28	26	26	28	24

Resultados y Discusiones

Las dosificaciones presentadas fueron ensayadas a compresión uniaxial con el fin de caracterizar la resistencia mecánica. La Figura 2 presenta los resultados obtenidos a distintas edades.

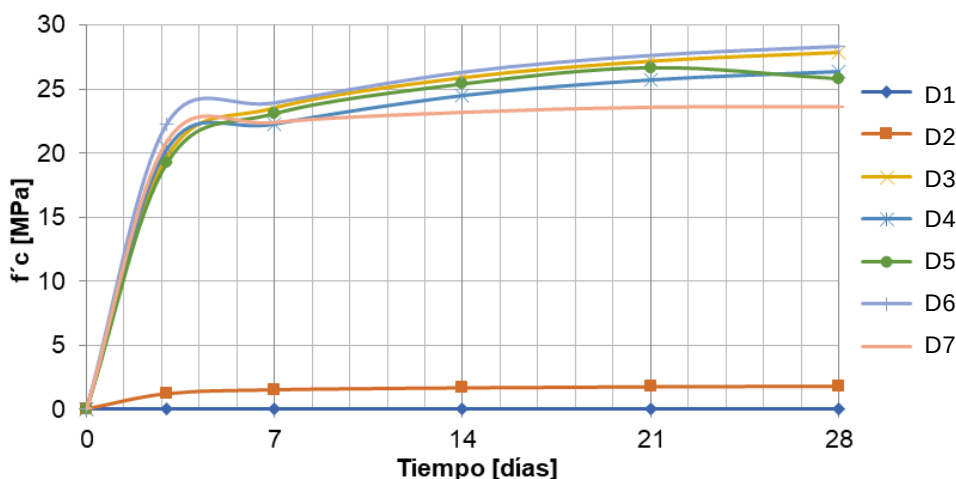


Figura 2. Resistencia a compresión de probetas cúbicas de 7 cm de lado

Se observa que la incorporación de pigmentos naturales en los morteros dio lugar a valores muy bajos de resistencia a compresión. La dosificación D1, a la cual se agregó zumo de remolacha como colorante, presentó una coloración verde claro bien definida, sin embargo, tuvo un efecto de retardante de fragüe dando lugar a la disgregación de las probetas en los recipientes de curado. Por otro lado, la dosificación D2 obtenida a partir de cúrcuma tiñó de manera adecuada la mezcla en estado fresco y endurecido, pero la resistencia mínima a 28 días fue cercana a los 2 MPa.

Los pigmentos artificiales incorporados en D4 a D7 permitieron obtener mayores resistencias a compresión siendo del orden de 20 MPa, 23 MPa y de 24 a 28 MPa a los 3, 7 y 28 días, respectivamente. Los colorantes comestibles en pasta (D4) y líquidos (D6), y el tinte de violeta genciana (D5) tiñeron adecuadamente las mezclas en estado fresco, pero perdieron su intensidad en estado endurecido. Con las anilinas (D7) se lograron buenas tonalidades en ambos estados de las mezclas, frescas y endurecidas.

Conclusiones

No podemos adjudicar la caída de los valores de resistencia a los pigmentos, debido a que durante el proceso se fueron variando las dosificaciones y no se mantuvieron constantes las demás variables, sin embargo, haciendo esta salvedad, determinamos algunas conclusiones.

Los pigmentos de origen natural estudiados no permitieron obtener resistencias a compresión adecuadas. En el caso del zumo de remolacha, su contenido de azúcar inhibió el fraguado de la mezcla obteniendo un color verde claro debido al pH alcalino del cemento. Por otro lado, la presencia de cúrcuma en la mezcla dio lugar a una buena coloración, pero con una resistencia a compresión despreciable.

Los pigmentos artificiales fueron dispares al momento de dar coloración a las mezclas, destacando que su presencia no afectó a la resistencia mecánica. Se observa que los mejores resultados en términos de coloración y resistencia se obtuvieron con anilinas.

Los resultados obtenidos son alentadores y motivan futuras investigaciones sobre el uso tanto de colorantes sintéticos de uso comercial como pigmentos no convencionales de origen natural.

Referencias

- [1] Quijije Lage, M. B., "Análisis comparativo de la resistencia a compresión entre el hormigón tradicional y el hormigón con pigmentos naturales", Universidad Técnica De Ambato, Ecuador, (2017).
- [2] Giraldo, C., Tobón, J. I., Restrepo, J. C., Restrepo Baena, O. J., "Resistencia a la compresión de morteros pigmentados con azul ultramar", Scientia et Technica, ISSN 0122-1701, Vol. 4, Nº 36, (2007), pp. 893-896.
- [3] Carvalho, F., "Estructuras de hormigón coloreado", Simposio Internacional sobre Concretos Especiales, (2002), pp. 4-5.
- [4] American Society for Testing and Materials, "ASTM C-109. Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars".

ANÁLISIS DE CONTRASTE EN DEMARCACIÓN HORIZONTAL SOBRE HORMIGÓN MEDIANTE LÁSER

A. Benitez¹, A. Gotte¹ y F. Vincitorio¹

¹ Grupo de Investigación en Física Aplicada a la Ingeniería (GIF). Facultad Regional Paraná (FRP) – Universidad Tecnológica Nacional (UTN), Almafuerde 1033, E. R., Argentina

Palabras Clave: hormigón, grabado láser, demarcación horizontal, señalización vial.

Introducción

Actualmente se han logrado grandes avances dentro de la ingeniería de materiales gracias a la implementación de la tecnología láser, tecnología que en los últimos años se ha masificado como consecuencia de la reducción de costos. Hoy es posible encontrar en el mercado diferentes tipos de láser (semiconductor, CO₂, láser de fibra) con potencias de unos pocos watts a potencias del orden de 4,5 KW. En todos los casos acoplados a sistemas de posicionamiento controlado por software.

La utilización de esta herramienta permite mejorar propiedades a través del texturizado superficial, tales como adherencia, fricción, permeabilidad, conductividad eléctrica y térmica, entre otras. En el ámbito de la construcción es fundamental controlar los aspectos mencionados anteriormente, ya que conlleva a realizar edificaciones óptimas tanto en su proceso constructivo como en su posterior puesta en servicio y a lo largo de su vida útil.

El estado del arte, relacionado a la aplicación de los laser de potencia a materiales de construcción se focaliza en la aplicación sobre metales [1] y materiales compuestos [2]. El estudio de materiales a base de cemento frente a esta tecnología es escaso, pero de gran interés. El hormigón y el cemento son predominantes en la industria constructora e impactan negativamente al ambiente tanto en su producción como utilización. Cualquier mejora en las propiedades del cemento, que implique el perfeccionamiento de sus características, su resistencia y vida útil colaborará a minimizar el impacto ambiental. Simultáneamente se reducirían costos y lograría la optimización de procesos.

Un caso de interés es la demarcación horizontal en pavimentos rígidos. Su ejecución involucra el uso de pinturas y máquinas que producen una gran emisión de gases contaminantes y de efecto invernadero. Además, se requiere de personal capacitado y equipamientos de alto coste, los cuales suelen sufrir un gran desgaste y por consiguiente requieren de un mantenimiento constante.

En este trabajo se presenta un proceso experimental de marcado sobre superficies de hormigones mediante el uso de láser de semiconductor de potencia baja y de longitud de onda corta (450 nm). El mismo tiene como objetivo implementar una nueva tecnología para el marcado de señalización horizontal sobre pavimentos.

Metodología

Como objeto de estudio se utilizaron probetas rectangulares de hormigón H25, las dimensiones de las mismas son 17 cm x 21 cm x 4,5 cm de forma tal de optimizar el área de trabajo del CNC. Dicho material se conformó a partir de los componentes que se visualizan en la Tabla 1 y su resistencia a la compresión verifico a los 32 días dando como resultado 28,2 Mpa.

Tabla 1: Dosificación Hormigón H25

Componentes	Densidad Relativa Kg/m ³	Relación material/cemento
Cemento Portland (CPC50)	3100	1
Arena Silíceas 2 – 4 (50% gruesa; 50% fina)	2630	3,2
Canto Rodado 10 – 20	2630	3,3
Agua	1000	0,5

En los ensayos realizados se utilizó un láser de la marca Neje, modelo N30820 de 450 nm y 5.5 W. El mismo fue montado sobre un CNC Neje Master S2, el cual es comandado mediante el software LaserGRBL para ejecutar las rutinas de grabado. En todos los casos, los grabados realizados presentan

una densidad de diez líneas por milímetro, parámetro que permite tratar la superficie sin modificarla en su totalidad. El láser empleado posee un spot rectangular, el cual se debe focalizar sobre la superficie a tratar a fin de transmitir la mayor cantidad de energía al concreto. Por este motivo, se debió procurar que las superficies a grabar sean lo más planas posibles, a fin de que el foco se mantenga constante durante el proceso.

En las primeras pruebas se atacó las muestras al 50% de la potencia del láser con una velocidad de barrido máxima de 1000 mm/min (Figura 1a). Para esta configuración los cambios producidos no son significativos a simple vista, por lo que se aumentó gradualmente la potencia hasta llegar al 100% mientras se mantuvo la velocidad constante (Figura 1b).

En las siguientes pruebas se fijó la potencia al 100% mientras se redujo la velocidad de barrido, de esta forma se aumentó la densidad de radiación a la cual se expuso el sustrato. Empleando una velocidad de 500 mm/min aumentó el contraste resultante junto a la definición de los trazos realizados sobre el material (Figura 1c). Reduciendo este parámetro a 50 mm/min se pudo obtener el máximo contraste al mismo tiempo que se observa una mayor remoción del material en el área tratada (Figura 1d).

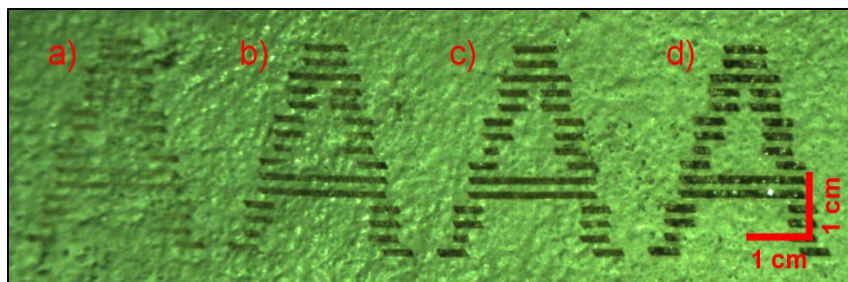


Figura 1 – Proceso de calibración empleando la potencia [%] y velocidad [mm/min] de barrido como variables de control. a) 50% - 1000 mm/min. b) 100% - 1000 mm/min. c) 100% - 500 mm/min. d) 100% - 50 mm/min

Los efectos que se observan superficialmente en las probetas se deben a que luego de hacer incidir el haz del láser sobre las mismas, el cemento sufre cambios químicos causados por distintos mecanismos, como la deshidratación del hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) y la descomposición térmica del carbonato de calcio (CaCO_3) [3]. En el caso del agregado fino, al no ser irradiado con la suficiente energía no se visualizan modificaciones estructurales. Esto ocurre, ya que su elevado punto de fusión hace que sea menos susceptible a procesos físicos y químicos, como por ejemplo el proceso de calcinación. Respecto al agregado grueso tampoco se han apreciado modificaciones en su estructura.

Posteriormente se realizaron pruebas en donde se mantuvo la potencia al 100% y la velocidad de procesamiento en 70 mm/min, aumentando la cantidad de ciclos de grabado superpuestos entre sí (Figura 2). Al incrementar la cantidad de ciclos de grabado se observaron microfisuras en el agregado grueso, mientras que los demás componentes del hormigón sufrieron los mismos efectos descriptos anteriormente.

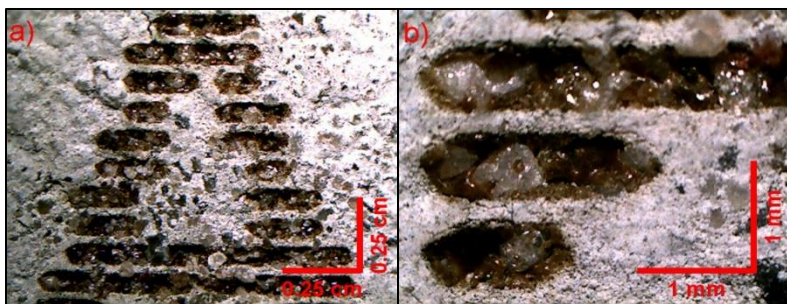


Figura 2 – Grabado con dos ciclos de grabado superpuesto al 100% de potencia y una velocidad de barrido de 70 mm/min. a) Vista de microscopio x1, b) Vista de microscopio x3

A modo de evaluar los cambios producidos en las propiedades superficiales del hormigón, se optó por realizar un ensayo de permeabilidad. En el mismo se colocó una columna de agua sobre una superficie sin grabar y otra grabada con líneas paralelas, realizadas con una potencia del 100% y una velocidad de grabado de 50 mm/s. Al cabo de una hora se observó que en la superficie sin tratar el agua permeó un 50% más que en la superficie atacada con láser. Transcurridas dos horas del inicio del ensayo se observa que el volumen de agua que permeo en ambas superficies es idéntico, indicando que ambas muestras alcanzaron la saturación.

En cualquier proceso de demarcación el objetivo principal es poder comunicar de forma eficiente determinada información, lo que se logra mediante mensajes cortos y de fácil reconocimiento. De esta forma, un componente fundamental al momento de grabar una superficie de hormigón es garantizar un adecuado nivel de contraste entre la superficie original y aquella atacada por el láser. Para estudiar este aspecto en las muestras tratadas se realizó un script en Matlab®, la rutina desarrollada recorta una sección de interés en la imagen de la muestra, la convierte a escalas de grises y luego realiza un perfil de

intensidad a lo largo de toda la región de interés (Figura 3). Los resultados indican la intensidad del perfil en valores porcentuales, en donde 0 representa el color negro y 100 el blanco.

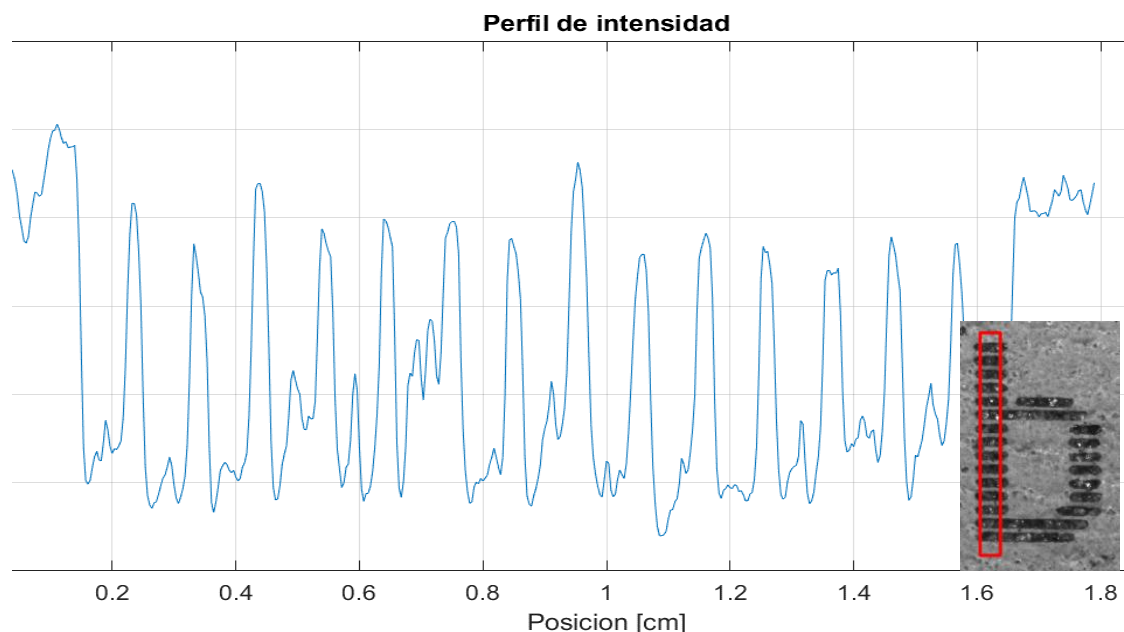


Figura 3 – Perfil de intensidad en la región vertical de una letra “b”, grabada con dos ciclos superpuestos al 100% de potencia y una velocidad de barrido de 30 mm/min

Para realizar este análisis se tomó una imagen con la cámara Moticam M1000 en modo automático de regulación de intensidad. De la imagen se seleccionó la región vertical de una letra “b” para estudiar el contraste de intensidad en la superficie. Al aplicar este análisis, las diferencias de intensidades entre las regiones tratadas mediante láser y el hormigón limpio se promedian en 30 puntos. De esta forma, se observa una diferencia de contraste cercana al 70% entre ambas superficies.

Conclusiones

Los resultados obtenidos hasta el momento muestran la capacidad del láser de semiconductor de baja potencia de generar un grabado sobre el hormigón con un excelente nivel de contraste, sin afectar notablemente la estructura del material. Estos resultados indicarían que el proceso de grabado podría ser utilizado como método alternativo de demarcación de pavimentos rígidos. En la siguiente etapa se prevé realizar una caracterización en profundidad de las superficies afectadas por el láser. Propiedades tales como rugosidad y coeficiente de rozamiento serán determinadas mediante ensayos con perfilómetro mecánico y tribómetro respectivamente. Además, se prevé estudiar la posibilidad de refusión de materiales con el fin de lograr coloración sobre la superficie o explorar alternativas sobre pavimentos flexibles.

Referencias

- [1] Cao, X., Jahazi, M., Immarigeon, J. P., and Wallace, W., "A review of laser welding techniques for magnesium alloys", *Journal of Materials Processing Technology* 171, N° 2, (2006), 188-204.
- [2] Dubey, A.K., Yadava, V., "Laser beam machining - A review", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48, N° 6, (2008), 609-628.
- [3] Lee, D., Seo, Y., Pyo, S., "Effect of laser speed on cutting characteristics of cement-based materials", *Materials*, 11, N° 7, (2018), 1055.
- [4] Seo, Y., Lee, D., Pyo, S., "High-power fiber laser cutting for 50-mm-thick cement-based materials", *Materials*, 13, N° 5, (2020), 1113.
- [5] Ansari, M.A., Erfanzadeh, M., Mohajerani, E., "Mechanisms of laser-tissue interaction: II. Tissue thermal properties", *Journal of lasers in medical sciences*, 4, N° 3, (2013), 99-106.
- [6] Lee, D., and Pyo, S., "Experimental investigation of multi-mode fiber laser cutting of cement mortar", *Materials*, 11, N° 2, (2018), 278.
- [7] Seo, Youngjin, Dongyoung Lee, and Sukhoon Pyo, "The interaction of high-power fiber laser irradiation with intrusive rocks", *Scientific Reports*, 12, N° 1, (2022), 680.
- [8] Long, N.P., Daido, H., Matsunaga, Y., Yamada, T., Nashimura, A., Hasegawa, N., Kawachi, T., "Experimental evaluation of performance of concrete removal in pulsed laser irradiation", *35th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO)*, Vol. 2016, N° 1, (2016), 2006.

GROUTEO EN FUNDACIONES DE AEROGENERADORES

Guido Marconi¹, Bruno Marconi¹

¹ *Tecnoservicios BAHÍA S.A.*

Palabras Clave: grout, aerogenerador, fundación, WTG (Wind Turbine Generator).

Introducción

El grout es un mortero cementicio de ultra resistencia, autonivelante que se utiliza para rellenar bases, anclajes y pequeños espacios entre estructuras metálicas y de hormigón. En el caso de estudio, se analiza el uso en la construcción de parques eólicos justo debajo del ala de la torre, por encima de la fundación. Este en particular es un material de transición, diseñado para tener una alta resistencia a la fatiga. Todas las cargas dinámicas deben ser transferidas y absorbidas por el grout, conectando así la torre con los cimientos.

Se vierte en un canal de dimensiones reducidas, formado entre la fundación y el primer tramo de la torre. La conexión entre esta última y su cimentación puede realizarse mediante elementos flexibles e independientes entre sí, que están formados por una serie de cables tesados. Cada uno de estos cables se encuentra en el interior de unos medios de alojamiento vertical que quedan embebidos en la cimentación y en el grout.

La base de hormigón armado transmite las cargas de peso propio y sobrecargas actuantes en la estructura del Wind Turbine Generator (WTG) hacia el suelo portante. Esta se encuentra bajo tierra en casi su totalidad, sobre el nivel del suelo se encuentra una superficie de un diámetro tal que apoya la columna montante metálica del aerogenerador.

El grout tiene como propiedades principales la ausencia de retracción, la obtención de altas resistencias a edades tempranas, baja porosidad y absorción de agua. Gracias a esta elevada resistencia a corto plazo se logra un pretensado más temprano de los anclajes, lo que lleva a tiempos de instalación cortos y una operación más temprana del parque eólico.

Metodología

La metodología descrita a continuación hace referencia al procedimiento [1] utilizado al aplicar el producto SikaGrout 3350 [2, 3]. Pueden existir procedimientos que difieran de este, en varios puntos, dependiendo del colocador y del producto.

En primer lugar, se accede a la zona de trabajo para preparar la superficie. Se quitan restos de encofrados y espuma utilizados para la formación del canal, además de escombros, basura y cualquier elemento que pueda presentar una futura interrupción del grout o evite un correcto llenado.

Una vez lista la superficie se llena la totalidad del canal con agua, al menos 24 horas antes de iniciar el vertido del grout. Esto tiene como fin, obtener una superficie de la fundación saturada con superficie seca y, de este modo, evitar que el hormigón absorba el agua de mezclado del grout.

En la Figura 1 se puede ver como se prepara. Se debe tener especial cuidado con las condiciones climáticas, debido a que el grout necesita encontrarse entre 5°C y 35°C al momento de ser vertido para alcanzar sus propiedades. Para esto se toman



Figura 1 – Preparación

diversas medidas. En clima cálido: vertido de noche, la utilización de hielo para el agua de mezclado, montaje de carpa para evitar el efecto de sol directo sobre la base y llenado de canal con agua fría. Por otro lado, en clima frío: utilización de mantas térmicas y llenado de canal con agua caliente.

En cuanto al control de calidad del producto, se mencionan dos ensayos relevantes. Antes de comenzar el llenado se lleva a cabo el ensayo de fluidez, donde se llena un Cono de Abrams sobre una batea metálica. Una vez retirado el Cono, se mide el diámetro de la circunferencia formada por el grout al esparcirse en dos direcciones ortogonales, y así se obtiene un promedio. Este resultado debe compararse con el exigido por el fabricante, quien asegura una apropiada fluidez del grout si se lo respeta. Una vez que el ensayo arroja un resultado satisfactorio se determina el porcentaje de agua a utilizar ese día, el cual afecta directamente al grado de fluidez del grout. Este ensayo debe realizarse previo a cada grouteo debido a que el material es sensible a los cambios climáticos, por lo que el porcentaje de agua necesario puede cambiar. Además, el fabricante determina un rango de 6,5% a 8%, lo que se traduce como 1,63 l a 2 l por 25 kg de grout en polvo. Dicho ensayo, se lleva a cabo bajo la Normativa Europea BS EN 12350-8 [4].

El segundo control de calidad es el ensayo a compresión de probetas cúbicas, según la Normativa Europea BS EN 12390-3 [5]. Dependiendo de los requerimientos del procedimiento, modelo de aerogenerador y cliente, puede variar el tamaño de las probetas y edades a ensayar. Generalmente se confeccionan 3 probetas por edad, ensayando a 1 día, 3, 7 y 28 días, dejando una de testigo.

Por otro lado, se registran datos que deben cumplir con las exigencias impuestas por el fabricante: temperatura ambiente, humedad ambiente, temperatura del sustrato, temperatura del agua de mezclado y temperatura de la mezcla.

En primer lugar, se lubrica la manguera de impulsión con Cemento Portland Normal fluido, pudiendo utilizarse superfluidificante como aditivo. Luego, comienza a prepararse el grout. Para esto, se utiliza una bomba con mezcladora incluida, pudiendo sumar de estas últimas, para asegurar el llenado continuo de la base. En cuanto a los tiempos de mezclado, estos son estrictos para que el grout pueda activar los plastificantes y se homogenice la mezcla. Al mismo tiempo no debe ser excesivo para evitar la segregación, siendo 5 minutos lo óptimo para el SikagROUT 3350.

Para asegurar un correcto llenado se utiliza un “encofrado temporal”, el cual asegura el vertido en un solo sentido, impidiendo la formación de burbujas de aire debajo de la torre y evitando también, la formación de capas de grout fresco sobre endurecido, es decir, juntas frías. Este encofrado se quita una vez completado el canal. Además, se coloca la salida de la manguera cerca del fondo del canal para mantener una corriente y movimiento de impulsión hacia arriba. A medida que el nivel alcanza la parte superior del canal, se avanza con la manguera siempre en el mismo sentido, para evitar la formación de capas mencionada anteriormente.

El producto exige un tiempo límite de 3 horas de llenado, debido a que pasado este tiempo comienza el fragüe del mismo, pudiendo producir juntas frías que se traducen en posibles fisuras.

Una vez finalizado el llenado se procede a una minuciosa limpieza de los equipos y mangueras, debido a que es un material de rápido endurecimiento que puede llegar a generar problemas si no se lo quita a tiempo.



Figura 2 – Llenado de canal

Se debe prestar especial atención al curado del grout. En este procedimiento se fabrican moldes con una altura de 10 cm, los cuales se colocan formando una circunferencia, tanto dentro como fuera del aerogenerador. Los mismos se encuentran alejados 5 cm de los bordes del canal. Una vez que se detecta que el grout forma una superficie más “dura” al tacto, se procede a llenar con agua los moldes dejando así, el grout cubierto con una capa de 10 cm de agua por 48 hs. Así, se asegura el curado impidiendo la evaporación del agua y permitiendo que el grout finalice las reacciones químicas con éxito.

En la Figura 2 se observan diferentes elementos a los que se hizo referencia en la metodología descripta. Encofrado temporal (6), cables a tesar (7), manguera (8), moldes para agua de curado (9), canal (10), grout (11), fundación (12).

Resultados

Deben controlarse minuciosamente las condiciones climáticas y del entorno para lograr alcanzar sus características deseadas, como lo son la fluidez y resistencias, entre otras.

Se exponen a continuación resultados obtenidos del Grouteo realizado en el Parque Eólico Buena Ventura, en Adolfo Gonzales Chaves, partido homónimo, Provincia de Buenos Aires.

En el mismo se realiza el grouteo de 24 aerogeneradores, utilizando para su preparación una bomba con mezcladora incluida. Adicionalmente, se cuenta con dos más de estas últimas, para asegurar un flujo continuo y cumplir el tiempo de llenado requerido. El consumo ronda las 185 bolsas de 25 kg por base.

Antes de iniciar el llenado se efectúa el ensayo de fluidez. El mismo, debe arrojar un valor de 700 mm de diámetro como mínimo para que el grout tenga una fluidez adecuada. En la Tabla 1 se adjunta un registro en el cual se exponen las condiciones climáticas y resultados obtenidos en un grouteo determinado.

Tabla 1: registro de condiciones climáticas y ensayo de fluidez.

N° PRUEBA	TEMP. AMBIENTE	HUMEDAD AMBIENTE	% AGUA/MASA	D1	D2	SF
1	10,3 °C	93 %	7,3 %	250	250	250
2						
3						
4						
5						
% AGUA / MASA A UTILIZAR EN APLICACIÓN				7,3		

Para el ensayo de resistencia a compresión se confeccionan 7 cubos de 100 x 100 x 100 mm, de los cuales 3 se ensayan a 3 días, 3 a 28 días y 1 queda de testigo. En esta obra se requieren 40 MPa a 3 días y 80 Mpa a 28 días. En la Tabla 2 se exponen los resultados obtenidos a 3 días.

Tabla 2: resultados de ensayos a compresión a 3 días.

RESULTADOS						
Máquina	AMSLER 200 toneladas N° 79/128					
Escala	200 toneladas					
Velocidad de aplicación de carga:	SEGÚN NORMA IRAM 1546					
Carga máxima (kg)	89400	99100	94700			
Resistencia a la compresión (kg/cm ²)	879	984	921			
Tipo de fractura	Normal	Normal	Normal			
Defectos en la probeta	No presenta	No presenta	No presenta			

Como se menciona anteriormente, se pueden apreciar las altas resistencias tempranas que se obtienen con el grout. Por otro lado, en la misma obra se registran resistencias de 1200/1300 kg/cm² a 28 días. Esto refleja como el material gana un gran porcentaje de su resistencia final en los primeros días de edad.

Referencias

- [1] Marconi, B., "Procedimiento Operativo PEBV 01 Rev04", Tecnoservicios BAHIA S.A., V1, (2022), 28 págs.
- [2] Jiménez, B., "Método de ejecución SikaGrout -3350", Sika Spain, V4, (2022), 20 págs.
- [3] Sika, "Hoja de datos del producto SikaGrout -3350", V06.01, 4 págs.
- [4] UNE Normalización Española, "BS EN 12350", V8, (2020), 13 págs.
- [5] UNE Normalización Española, "BS EN 12390", V3, (2003), 19 págs.

ESTUDIO DE LA INCORPORACIÓN DE POLÍMEROS SUPERABSORBENTES EN LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE MORTEROS

Gonzalo Pardal¹, Rocío Mercado¹, Teresita Salinas¹, Carolina Domizio^{1,2}, Gerardo González del Solar^{1,2}

¹ Departamento de Ingeniería Civil, Facultad Regional Mendoza, Universidad Tecnológica Nacional, Rodríguez 273, Mendoza, Argentina

² Centro Regional de Desarrollos Tecnológicos para la Construcción, Sismología e Ingeniería Sísmica (CeReDeTec), Facultad Regional Mendoza, Universidad Tecnológica Nacional, Rodríguez 273, Mendoza, Argentina

Palabras Clave: SAP, resistencia a compresión, contracción autógena, consistencia.

Introducción

El objetivo de este trabajo es estudiar la influencia de la incorporación de polímeros superabsorbentes (SAP) en la resistencia a compresión de morteros cementicios. Para ello se elaboraron tres dosificaciones, la primera se trató de una muestra patrón sin incorporación de SAP con una relación agua/cemento de 0,40; la segunda con un agregado de 0,5% de SAP respecto del peso de cemento y relación agua/cemento de 0,40; y la tercera con una incorporación del 1% de SAP y una relación agua/cemento de 0,45 de manera de obtener una consistencia similar a las anteriores. Las muestras fueron ensayadas a compresión [1] en probetas cúbicas de 71 mm de lado, a las edades de 3, 7 y 28 días; estudiando a la vez la fluidez de las dosificaciones mediante el ensayo de consistencia [2].

Los SAP son polielectrolitos reticulados que aumentan su volumen al entrar en contacto con agua u otras soluciones acuosas, lo que da como resultado la formación de un hidrogel [3, 4]. En la actualidad existen varios tipos de SAP que se encuentran disponibles en el mercado los cuales difieren en su composición química, producción, tamaño de partícula, forma y propiedades de absorción/desorción. Su presencia en morteros y hormigones modifica la reología de las mezclas, mitiga la contracción autógena y plástica, mejora la resistencia a la congelación/deshielo, el autosellado y la autorreparación de materiales a base de cemento [3, 4].

A edades tempranas las mezclas cementicias experimentan una contracción autógena, esto es la reducción relativa de su volumen debido a la hidratación de las partículas de cemento y la autodesecación por evaporación de parte del agua de mezclado. Este fenómeno es más pronunciado con relaciones agua/cemento inferiores a 0,40, con materiales cementicios y agregados más finos, mayores contenidos de silicato tricálcico y aluminato tricálcico en el clinker, y temperaturas de exposición altas [5, 6]. La restricción de estos cambios volumétricos genera tensiones internas que pueden provocar fisuras si superan la resistencia a la tracción del material. Por otro lado, los SAP tienen la capacidad de absorber líquidos los cuales liberan paulatinamente. Este comportamiento puede ser aprovechado para controlar la contracción autógena al considerar que la liberación del agua en el tiempo puede beneficiar el curado interno provocando el aumento de la resistencia mecánica [6].

La dosificación de SAP necesaria para mitigar la retracción autógena depende de sus propiedades, especialmente de su capacidad de absorción de la solución de poros dentro de las mezclas cementicias. La capacidad de absorción de SAP aplicable al curado interno de morteros y hormigones suele estar dentro del rango de 10 a 30 g de solución porosa por gramo de SAP [6].

La resistencia a la congelación/deshielo describe la capacidad de resistir ciclos alternos de congelación y deshielo en presencia de agua como líquido de prueba. Durante el proceso de hidratación del hormigón, el SAP se comprime al liberar el agua absorbida, creando espacios donde el agua puede expandirse al congelarse. Esta propiedad protege al hormigón de los daños causados por las heladas, ya que el agua se expande aproximadamente un 10% de su volumen provocando fisuras cuando la dilatación se encuentra restringida en la mezcla [4].

Sin embargo, existen algunos efectos negativos cuando se adiciona SAP a morteros y hormigones que deben ser considerados al momento del diseño de mezclas. Los SAP forman cavidades vacías después de liberar el agua aumentando la porosidad y disminuyendo la resistencia mecánica. Por otro lado, la incorporación de SAP en la mezcla, al absorber parte del agua de amasado, puede reducir su

fluidez si no se considera adecuadamente en la relación agua/cemento debiendo analizar cuidadosamente este aspecto mediante ensayos de laboratorio [3, 4, 6, 7].

Metodología

Con el fin de evaluar los efectos del SAP en la resistencia mecánica de morteros, se diseñaron tres mezclas y se moldearon probetas cúbicas de 71mm de lado, siguiendo los lineamientos de la norma ASTM C-109 [1], las que fueron ensayadas a compresión a 3, 7 y 28 días. Se realizaron 3 probetas para cada edad de ensayo por dosificación, y el curado fue realizado bajo inmersión en recipientes con agua a temperatura ambiente en el laboratorio.

Las dosificaciones se diferencian en función de la cantidad de SAP incorporado a la mezcla. La dosificación patrón se obtuvo a partir de la combinación de 500 g de cemento CPC 40, 1500 g de arena tamizada a fin de obtener la curva granulométrica de una arena normalizada, 200 cm³ de agua (relación agua/cemento de 0,40) y 1,92% de aditivo hiperfluidificante de uso comercial [8] (porcentaje con relación al peso de cemento). Esta mezcla se caracterizó por la ausencia de SAP. La segunda dosificación presentó una composición similar a la muestra patrón diferenciándose por la incorporación de 0,5% de SAP con relación al peso del cemento. Finalmente, la tercera dosificación se obtuvo empleando la misma cantidad y tipo de cemento y arena, sin embargo, y con el fin de obtener una consistencia similar a las dosificaciones anteriores, fue necesario incrementar la cantidad de agua y de hiperfluidificante incorporados a la mezcla, siendo de 225 cm³ (relación agua/cemento: 0,45) y 3,31%, respectivamente. Inmediatamente después de realizar las mezclas, se evaluó su consistencia según la norma IRAM 1570 [2]. Respecto a la cantidad de hiperfluidificante incorporado, cabe señalar que, si bien los límites recomendados por el fabricante son del 0,6% al 1,8% del peso de cemento, las pruebas de diseño relacionadas a tiempos de fragüe y disgregación de la mezcla permitieron la incorporación de aditivo por encima de los valores recomendados.

La Figura 1 presenta el procedimiento de elaboración de mezclas, ensayo de consistencia, confección de probetas y ensayo de rotura a compresión.

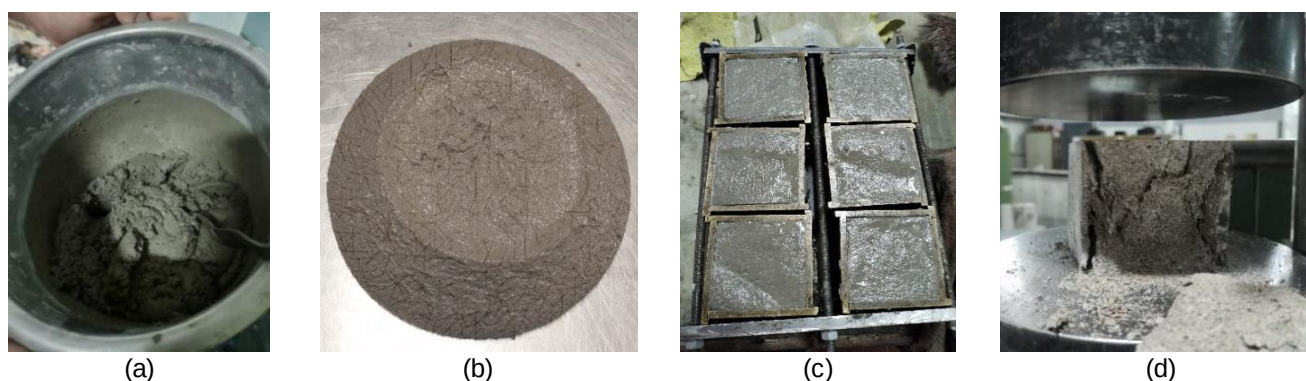


Figura 1 – a. Elaboración de la mezcla, b. Ensayo de consistencia, c. Confección de probetas, d. Ensayo a compresión en máquina universal

Resultados

Los resultados del ensayo de consistencia en las 3 mezclas fueron 41,43%, 20% y 5,71% para las incorporaciones de SAP del 0% (muestra patrón), 0,5% y 1%, respectivamente. Se destaca que, aun cuando se aumentó el contenido de agua y aditivo hiperfluidificante, al incrementar el contenido de SAP se registra una disminución de la consistencia en las mezclas.

Por otra parte, las probetas fueron ensayadas a compresión uniaxial a diferentes edades. Los resultados presentan que la resistencia a 3 días es similar para las distintas dosificaciones presentando un valor medio de 27,1 MPa. Las probetas ensayadas a 7 días mostraron que la dosificación patrón y la dosificación con 0,5% de SAP poseen una resistencia similar con una media de 32,7 MPa. Este valor es un 14,6% mayor que la resistencia obtenida para la dosificación con 1% de SAP (28,5MPa). Finalmente, a los 28 días de curado la muestra patrón desarrolla una resistencia de 37,8 MPa, en tanto que la dosificación con incorporación del 0,5% de SAP alcanza una magnitud 13,4% mayor, siendo de 42,90 MPa y la dosificación con 1% de SAP desarrolla una reducción en la resistencia del 9%, esto es de 34,4 MPa. La Figura 2 presenta las resistencias desarrolladas para cada dosificación.

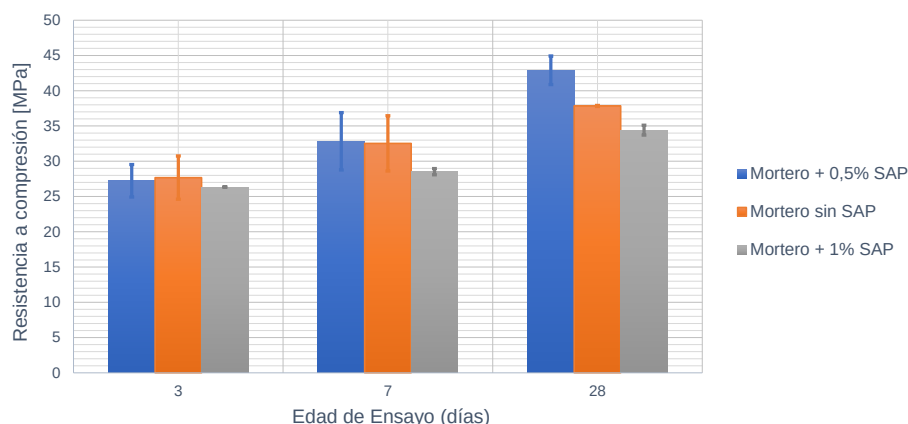


Figura 2 – Resistencia a compresión de las dosificaciones estudiadas

Conclusiones

El objetivo propuesto para este trabajo fue estudiar la influencia en la resistencia a compresión de la incorporación de SAP en morteros cementicios, evaluando tres dosificaciones diferentes: sin SAP (muestra patrón), con 0,5% y con 1% de SAP (porcentajes con respecto al peso de cemento) y sometiendo las muestras a ensayos de consistencia y de compresión uniaxial.

Al evaluar la consistencia de las mezclas, se observó que la fluidez se ve disminuida al incrementar los porcentajes de SAP, respuesta que se verificó aun cuando se aumentó la relación agua/cemento y la cantidad de aditivo hiperfluidificante. Dicho fenómeno encuentra su origen en el hecho que para hidratar un mayor número de partículas de polímeros se requiere un incremento considerable en la cantidad de agua y aditivo incorporados en la mezcla. Sin embargo, ambos fluidos tienen un límite definido por las características mecánicas esperadas en la mezcla tanto en estado fresco como en estado endurecido.

Los resultados en términos de resistencia a compresión de las mezclas analizadas mostraron que al incorporar un 1% de SAP se produjo una reducción en su capacidad a compresión respecto a las dosificaciones con 0,5% de SAP y la muestra patrón. Este comportamiento se debe a que al deshidratarse las partículas del polímero durante el curado de la mezcla, genera un incremento en la porosidad que resulta ser más influyente respecto a la resistencia adicional obtenida por una hidratación prolongada del cemento. Sin embargo, dicho fenómeno se invierte al incorporar el SAP en 0,5%, en estas condiciones la resistencia es mayor respecto a la muestra patrón, tal como lo evidencian los resultados a los 28 días.

Las conclusiones presentadas en esta investigación se obtienen a partir de resultados parciales dados en el marco de un proyecto de investigación que continuará con la caracterización de las mezclas cementicias con incorporación de SAP. En este sentido, se espera realizar estudios complementarios de permeabilidad al aire, succión capilar y optimización de la dosificación del aditivo fluidificante.

Referencias

- [1] American Society for Testing and Materials, "ASTM C-109. Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars".
- [2] Instituto Argentino de Normalización y Certificación, "IRAM 1570. Morteros para mampostería. Determinación de la consistencia", (1994).
- [3] Snoeck, D., "Superabsorbent polymers to seal and heal cracks in cementitious materials", RILEM Technical Letters 3, (2018), 32-38.
- [4] Mechtcherine, V., Schroeßl, C., Reichardt, M., Klemm, A.J., Khayat, K.H., "Recommendations of RILEM TC 260-RSC for using superabsorbent polymers (SAP) for improving freeze-thaw resistance of cement-based materials". Materials and structures 52, 75, (2019), pp. 7. Disponible online en: <https://doi.org/10.1617/s11527-019-1375-4>
- [5] Maurelo Porras, J.F., Mondragon Aguja, K.N., Romero Mora, J.C., "Principales tipos de contracción, efectos sobre el concreto y sus métodos de mitigación, (2020), pp. 52.
- [6] Wyrzykowski, M., Igarashi S., Lura, P., Mechtcherine, V., "Recommendation of RILEM TC 260-RSC: using superabsorbent polymers (SAP) to mitigate autogenous shrinkage", Materials and structures, 51, 135, (2018), pp 7. Disponible online en: <https://doi.org/10.1617/s11527-018-1241-9>
- [7] Snoeck, D.; Schröfl, C.; Mechtcherine, V., "Recommendation of RILEM TC 260-RSC: testing sorption by superabsorbent polymers (SAP) prior to implementation in cement-based materials", Rilem Technical Committee, (2018), pp. 7.
- [8] LEGAmix® hiperflux 355. <https://legatec.com.ar/wp-content/uploads/fichas/LEGAMIX-HIPERFLUX-355.pdf>

Capítulo 5

Hormigones sustentables y uso de residuos

MORTEROS CON ADICIÓN DE FIBRAS RECICLADAS. EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO

Fiamma J. Bossio¹, Rosa C. Andrada¹, Virginia Mugetti¹, Vanina L. Ceballos¹, Bruno Fulginiti¹

¹ CINTEMAC, UTN-FRC, Córdoba, Argentina

Palabras Clave: morteros, fibras, adición, sustentabilidad.

Introducción

En el presente proyecto se apuntó a utilizar un mortero con fibras con el fin de ser aplicados en mayores prestaciones que el asiento de mampostería o revestimiento. Se pensó para ser utilizado como reparación de morteros agrietados y contrapisos de bajas cargas. Por lo anterior, y tratando de lograr un material de alta resistencia a la tracción que permita cumplir con tales exigencias, se planteó la inclusión de fibras. Las fibras pueden proporcionar una adecuada resistencia mecánica a los esfuerzos internos de la mezcla. Al encontrarse homogéneamente distribuidas dentro de un mortero, constituyen una micro-armadura que, por un lado, se muestra extremadamente eficaz para contrastar el ya conocido fenómeno de fisuración por retracción y, por otro, confiere a la mezcla una ductilidad que puede llegar a ser considerable en la medida en que sea elevada la resistencia misma de las fibras. A su vez, alineados con la tendencia mundial de la economía circular [1, 2] y acorde a este concepto, se pensó este material como un mortero capaz de albergar fibras recicladas.

Metodología

La solución técnica propuesta es desarrollar morteros con la incorporación de fibras de acero, provenientes de virutas que hoy constituyen un *scrap* o un residuo de herrerías, con distintos porcentajes, 5% al 20% denominado MF. Se los comparó con un mortero referencia MP y con un mortero con adición de fibras recicladas plásticas provenientes de escobillones fuera de uso, respetando el porcentaje recomendado para fibras comerciales plásticas de características similares, denominado ME.

En todos los casos se utilizó un cemento portland compuesto CPC40 y arenas naturales provenientes de la provincia de Córdoba. La arena es una arena mezcla con un 40% de arena fina y 60% de arena gruesa, de manera de lograr la granulometría deseada cuya curva granulométrica se encuentra entre los límites A y B de la norma IRAM 1520 [3]. En la tabla 1 se pueden ver las dosificaciones utilizadas para las diferentes muestras.

Tabla 1: Dosificación de los morteros.

Designación	Cemento (gr)	Agregados (gr)	Fibras (gr)	Relación A/C
MP	450	1350	0	0,56
MF5			22,5	
MF7,5			33,75	
MF10			45,00	
MF15			67,50	
MF20			90,00	
ME			3,28	

Se evaluaron de todos estos morteros las propiedades en estado fresco mediante el ensayo de consistencia, fue el parámetro utilizado para dosificar el mortero patrón, de acuerdo a lo establecido en la Norma IRAM 1570 [4]. La determinación se realizó utilizando el método del escurrimiento en la mesa *Flow Table*. Manteniendo fijas las cantidades de agregados y cemento, la variable es el agua necesaria para obtener escurrimiento de 210 cm que equivale a una consistencia de 110 %.

Las propiedades en estado endurecido se evaluaron mediante los ensayos de masa, en el que se determina la masa real seca, medidas sobre un volumen constante, utilizando probetas de 4 x 4 x 16 cm³. La resistencia a la flexión, mediante ensayos a 7 y 28 días en probetas prismáticas de 4 x 4 x 16 cm³ según lo indica la Norma IRAM 1622 [5]. Y la resistencia a compresión determinadas también a 7 y 28 días en probetas prismáticas cortadas a la mitad ensayadas previamente a flexión según Norma IRAM 1622 [5]. En las Figuras 1, 2 y 3 se presentan las gráficas con los resultados obtenidos de los diferentes ensayos.

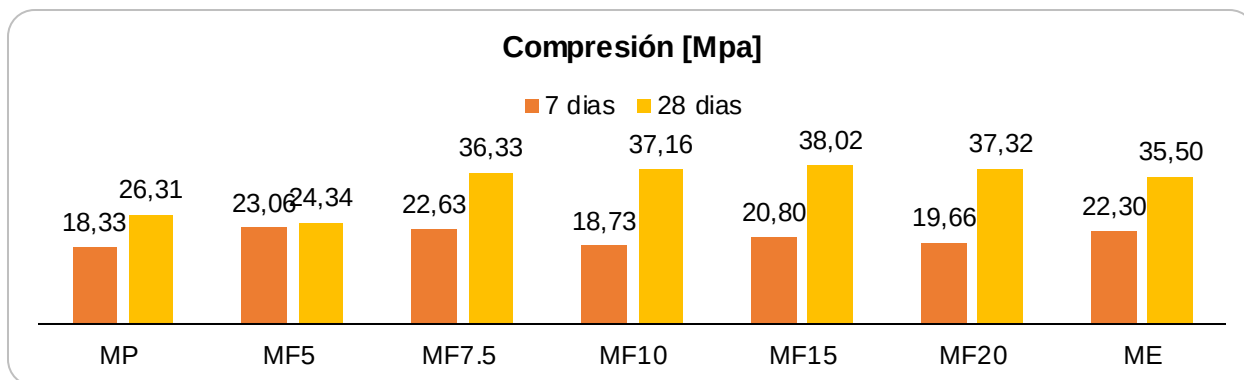


Figura 1 – Resultados de ensayos a compresión a 7 y 28 días

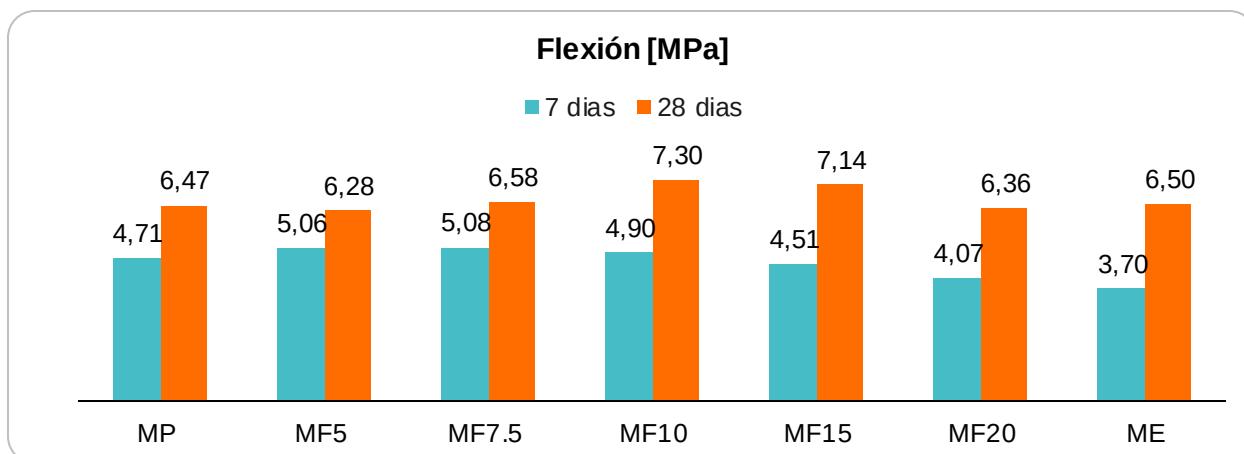


Figura 2 – Resultados de ensayos a flexión a 7 y 28 días

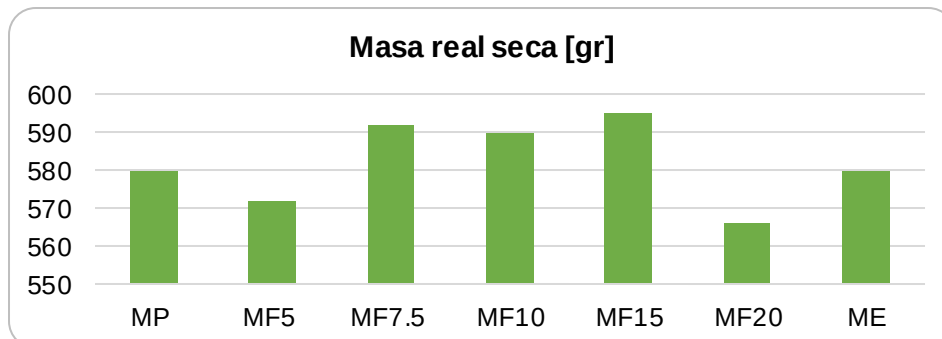


Figura 3 – Resultados de masa real seca de las diferentes muestras

Conclusión

De los resultados obtenidos se puede analizar, en primer lugar, del ensayo en estado fresco que los morteros con fibras de virutas de acero disminuyeron su trabajabilidad respecto del mortero patrón. Esta tendencia no se visualiza en el mortero con fibras plásticas.

Se observa una mejora generalizada en los resultados de morteros con fibras respecto del mortero patrón, en los ensayos en estado endurecido. En el ensayo a compresión, en todos los casos fueron superiores las resistencias a 7 y 28 días excepto en el MF5 a 28 días. Los ensayos a flexión por el contrario presentaron mayores variaciones, se puede observar que para los 7 días las muestras MF5, MF7.5 y MF10 superan al MP. En cambio, para el resto de los morteros disminuye. A 28 días se observa un leve aumento de las resistencias en las muestras MF10 y MF15 respecto del MP, el resto de las muestras tienen un comportamiento similar al patrón. Se puede observar que los valores de masa no muestran variaciones considerables, con una variación máxima entre masas extremas del 5% aproximadamente.

Los MF5, MF7.5, MF10, MF20 y ME se clasifican como morteros tipo E de calidad elevada siendo su destino muros portantes y otros usos con mayores requerimientos según Norma IRAM 1676 [6].

Como conclusión, se puede decir que es viable la utilización de ambos tipos de fibras ya que son químicamente estables y compatibles con la matriz cementicia. Respecto de las características, en algunos porcentajes se observan mejoras en cuanto a la resistencia del mortero, especialmente para las muestras MF10 y MF15. Todos los morteros con fibras cumplen con la normativa IRAM 1676 [6], siendo de calidad elevada. Desde el punto de vista de la sostenibilidad, permite reutilizar residuos que hoy debido a que son generados a baja escala no tienen un destino de economía circular definido.

Referencias

- [1] Andrada, R., Baronetto, C., Positieri, M., Oshiro, A., “Estudio de morteros elaborados con agregado de reciclado de residuos de la construcción”, 51º Congresso Brasileiro do Concreto, Brasil, (ISBN 978-987-21660-3-8), (2009), pp 53-60.
- [2] Andrada, R., Baronetto, C., Positieri, M., Oshiro, A, Romero A, Borioni, C., “Uso de cenizas de cáscaras de girasol y maní como adición en morteros”, Anais do 53º Congresso Brasileiro do Concreto, (2011).
- [3] Instituto Argentino de Normalización y Certificación, “IRAM 1505. Agregados. Análisis granulométrico”, (2003).
- [4] Instituto Argentino de Normalización y Certificación, “IRAM 1570. Morteros para mampostería. Determinación de la consistencia. Método de escurrimiento”, (1994).
- [5] Instituto Argentino de Normalización y Certificación, “IRAM 1622. Cemento portland: método de determinación de las resistencias a la comprensión y a la flexión”, (2006).
- [6] Instituto Argentino de Normalización y Certificación, “IRAM 1676. Morteros para mampostería. Clasificación y requisitos”, (2012).

DESARROLLO DE APLICACIÓN DESTINADA A MEJORAR LA GESTIÓN DE RESIDUOS DE LA CONSTRUCCIÓN

Emanuel Cuchán¹, Romina Meneses², Juan Manuel Moro²

¹ Alumno de Ingeniería Civil. Departamento de Ingeniería. Universidad Nacional del Sur

² Departamento de Ingeniería. Universidad Nacional del Sur

Palabras Clave: aplicación, residuos de construcción y demolición, reciclado.

Introducción

Las actividades ligadas a la industria de la construcción generan uno de los mayores impactos sociales, ambientales y económicos, esto se debe a diversos factores como, la elevada demanda de materias primas, la generación de un importante gasto energético mundial y la emisión de gases de efecto invernadero. Por este motivo, la búsqueda de un desarrollo sostenible mediante prácticas y métodos de construcción que disminuyan los impactos negativos es un área importante de estudio actual, teniendo en cuenta, además, la creciente destrucción del medio ambiente, el calentamiento global y el agotamiento de la capa de ozono [1].

La construcción sostenible busca minimizar el uso de los recursos y promueve la utilización de técnicas constructivas innovadoras con materiales de bajo impacto en el ambiente y reduce la demanda energética y de recursos durante su utilización. Una de las posibles soluciones, es el reciclado de residuos de construcción y demolición (RCD), y esto ha tenido diferentes enfoques e implementaciones en diversos países del mundo [2].

Por otro lado, en base a los estándares para la acreditación de carreras de ingeniería en la República Argentina [3], se busca fortalecer a los estudiantes en habilidades relacionadas con los ejes y enunciados multidimensionales y transversales establecidos, en particular con el punto 10: “Generación de desarrollos tecnológicos y/o innovaciones tecnológicas”. En este sentido, en la cátedra de Práctica Profesional Supervisada – Módulo Medio Ambiente, perteneciente a la carrera de Ingeniería Civil de la UNS, se desafió a los alumnos a generar de manera teórica, una aplicación que brinde solución a diferentes problemáticas ambientales generadas por la industria de la construcción, entre ellas, la gestión de RCD.

En este trabajo se muestra el desarrollo que está efectuando el alumno Emanuel Cuchán, en respuesta al trabajo práctico mencionado anteriormente. El mismo, implica la ejecución de una aplicación llamada “Forge”, destinada a mejorar la gestión de los RCD, generando una plataforma de encuentro entre generadores y recicladores de estos residuos. Es importante destacar que esta aplicación está siendo desarrollada, en etapa de programación, con un avance del 60%.

Problemática

De acuerdo a estudios de investigación comparativos entre países de la región [2], en los que se incluyen Argentina, Brasil, Colombia y México, nuestro país es el más rezagado en cuanto a la promulgación de normativas y adopción de medidas para mejorar la gestión de residuos de la construcción. En todos los casos, excepto en nuestro país, las estrategias de gestión están encaminadas a la implementación de planes y programas que permitan el adecuado manejo de los RCD priorizando la no generación, seguido por el reciclaje y recuperación de éstos y como última alternativa la disposición final adecuada; en este sentido se promueve la aplicación de beneficios y sanciones que estimulen la gestión integral [4-9]. Cabe destacar, que aproximadamente el 80% de los residuos generados en una construcción son reciclables y el 45% de los residuos mundiales son ocasionados por esta práctica.

En el año 2009, en la ciudad de Bahía Blanca, se desarrolló un estudio destinado a cuantificar los RCD generados [10], en particular de residuos de hormigón. En el mismo, se analizaron los vertederos en los que se arrojaban dichos residuos y la dinámica de contenedores destinados a transportarlos, y en base a esta información se pudo hacer una determinación cualitativa y cuantitativa de los mismos. Se observó que el volumen generado era elevado y que sería importante la aplicación de políticas destinadas al ordenamiento y gestión de los mismos, situación que no ha cambiado en la actualidad, considerando además que la ciudad de Bahía Blanca se encuentra en constante crecimiento, debido a que cuenta con

un polo industrial y con instituciones terciarias y universitarias que implican el asentamiento de estudiantes en forma permanente.

En nuestro país, y en particular en la ciudad de Bahía Blanca, si bien no existe ninguna aplicación destinada exclusivamente al reciclado de RCD, se utilizan plataformas alternativas tipo *MarketPlace* para hacer intercambios de este tipo de bienes, además de los que se desarrollan en la informalidad.

Haciendo un análisis de lo mencionado en los párrafos anteriores, la generación de una aplicación que pueda colaborar con el reciclado de RCD, vinculando a los actores intervinientes, es decir, generadores y recicladores de RCD, es una iniciativa interesante para poder brindar un ordenamiento y fomento de estas prácticas que colaboran con la construcción sustentable de nuestro país.

Desarrollo de Forge

El objetivo de la aplicación propuesta, llamada Forge, es brindar una solución que mejore y genere un beneficio importante en la gestión y reciclado de RCD. Por un lado, los datos de la realidad revelan la necesidad de realizar construcciones sustentables, esto implica entre otras cosas, reciclar los RCD. Por otro lado, existe un mercado importante de los mismos que no está visibilizado ni ordenado, por lo cual, un instrumento que favorezca este orden, no solo va a mejorar el mercado de RCD, sino que va a posibilitar su expansión y su mejora continua.

Durante el análisis de las variantes de utilización de la aplicación surgió la necesidad de discriminar los posibles usuarios, lo que dio lugar a que se instrumenten otras opciones en la misma, como es el caso de la generación de una base de datos de profesionales y oficios de la construcción, vinculados a este tipo de prácticas de reciclado.

En base al análisis y objetivo planteado, la aplicación Forge se está desarrollando en función a diferentes premisas que se detallan a continuación:

- **Transparencia:** cada usuario contará con un perfil que se creará a partir de su DNI o CUIL, garantizando la existencia de una persona o empresa real detrás de cada uno (Figura 1-a).
- **Perfiles diferenciados:** cada usuario tendrá su perfil que lo identificará como generador y/o reciclador de RCD, así como también si presta algún servicio en el rubro de la construcción. La aplicación generará notificaciones de acuerdo a sus preferencias (Figura 1-b).
- **Sencillez y precisión:** la aplicación permitirá orientar las preferencias del usuario según:
 - Ubicación: para evaluar la cercanía entre usuarios y evaluar criterios de transporte
 - Publicación programada: para coordinar tiempos entre generadores y recicladores.
 - Contactos Directos: para permitir el diálogo, comercialización y coordinación entre usuarios (Figura 2-a)
 - Separación efectiva de los residuos: para premiar y mejorar

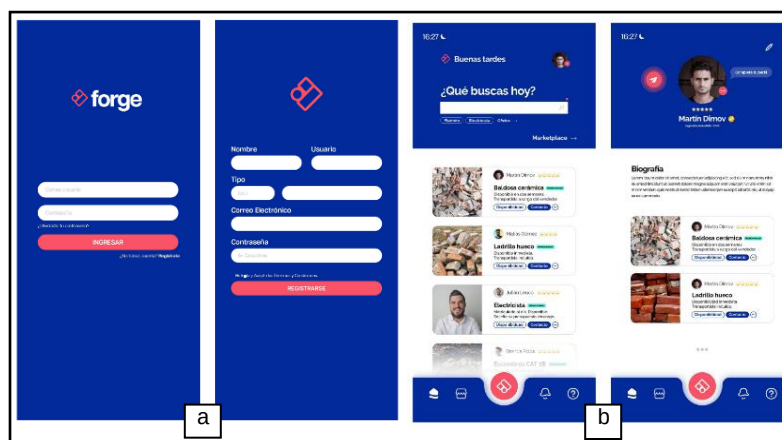


Figura 1 – a) Generación de perfil de usuario.
b) Diferenciación y personalización de usuarios.

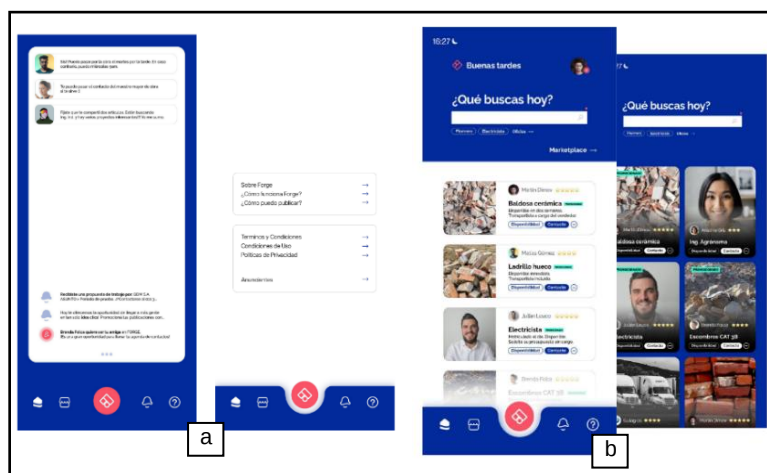


Figura 2 – a) Contactos / diálogos entre usuarios
b) Perfiles calificados

la calidad del servicio de quienes realicen dicha separación.

- **Perfiles Calificados:** los usuarios podrán ser calificados cuando realicen alguna interacción, lo que permitirá evaluar su desempeño ante otros usuarios (Figura 2-b)
- **Verificación por Matriculación y/o Título Proveedor Verificado:** los usuarios podrán certificar su profesión mediante avales que lo acrediten.

- **Publicaciones y oficios:** los usuarios podrán publicar los residuos que están comercializando o donando a través de fotos y descripciones que aclaren la calidad, precio y características de los mismos. Además, como esta aplicación va a estar muy relacionada al rubro de la construcción, podrá ser utilizada como medio de contacto y selección de profesionales del rubro, por lo tanto, los usuarios podrán generar en su perfil, el servicio que prestan y su experiencia (Figura 3).

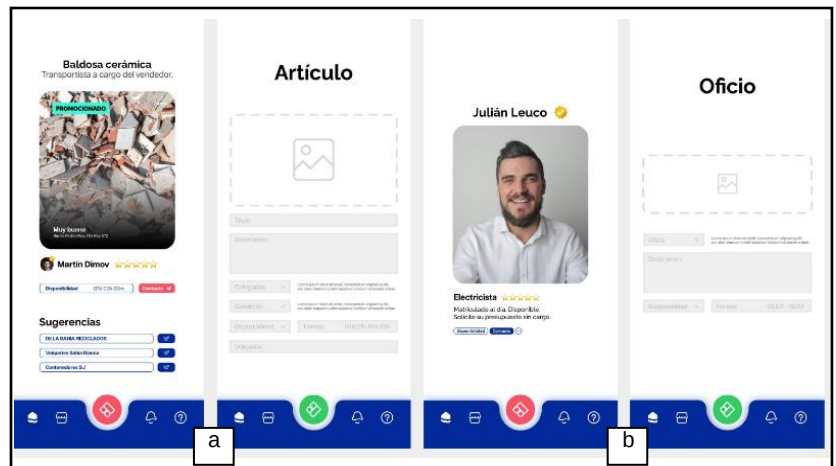


Figura 3 – a) Publicación de residuos a intercambiar
b) Generación de perfiles de oficio

Consideraciones y expectativas

La aplicación Forge es una herramienta moderna que podrá ser parte de una transformación en los mecanismos de reciclado de RCD en nuestro país. Uno de los beneficios más importantes que puede surgir del uso de la aplicación es que, al hacer visible la comercialización de los RCD, los actores que forman parte del rubro de la construcción, desarrollen mecanismos y actividades que potencien el reciclado y retroalimenten la construcción sustentable, con la consecuente reducción del impacto ambiental. También podría mejorar y ordenar el sistema de oferta de servicios del rubro de la construcción.

La utilización de la aplicación, podría dar lugar, a través de la intervención de empresas y municipios, a la generación políticas y medidas que fortalezcan la construcción sustentable.

Referencias

- [1] Krizmane M., Slihte S., Borodinecs A., "Key criteria across existing sustainable building rating tools", Energy Procedia, 96, (2016), pp. 94-99.
- [2] Alzate Rodríguez, A., "Análisis comparativo de la gestión de residuos de construcción y demolición (RCD) en cuatro países latinoamericanos", Universidad del Valle, Colombia, (2022), pp. 202284.
- [3] Igarza, A. S., "Aprendizaje por competencias, un nuevo viejo enfoque", Reddi: Revista Digital del Departamento de Ingeniería, 3, (1), (2018), 1-6. Disponible online en: <http://reddi.unlam.edu.ar/index.php/ReDDi/article/view/59/113>
- [4] Robayo-Salazar, R., Matthey, P., Silva, Y., Burgos, D., y Delvasto, S., "Los residuos de la construcción y demolición en la ciudad de Cali: un análisis hacia su gestión, manejo y aprovechamiento", Tecnura 19, (2015), 157-170.
- [5] Nasser, J., y Sabaini, F., "Evaluación de la gestión de residuos de construcción y demolición en la ciudad de Córdoba", Congreso Argentino de Enseñanza de la Ingeniería, Córdoba, (2018).
- [6] Vargas Hernández, M. J., "Investigación sobre el manejo de residuos en construcción entre Europa, América, y Colombia", Universidad Militar Nueva Granada, (2019). Disponible online en: <http://hdl.handle.net/10654/21255>
- [7] Fernández Rubio, M., "Smartcrush pone en marcha la primera planta completa para tratamiento y valorización de RCD de Colombia", Ingeopres: Actualidad técnica de ingeniería civil, minería, geología y medio ambiente, N° 274, (2019), 47-49.
- [8] Nunes, K.R.A., y Mahler, C.F., "Comparación de la gestión de residuos de construcción y demolición entre Brasil, Unión Europea y EE. UU", Gestión e investigación de residuos, 38, 4, (2020), 415-422.
- [9] Cantor Sanabria, B.E., y Mateus Quitian N. Y., "Modelos implementados en el manejo, tratamiento, aprovechamiento y disposición final de residuos de construcción y demolición en Latinoamérica. (Estado del arte)", Universidad Distrital Francisco José de Caldas, (2017). Disponible online en: <http://hdl.handle.net/11349/6890>
- [10] Moro, J.M., Meneses, R., y Ortega N. F., "Demolished concrete recycling possibilities in the city of Bahía Blanca, Argentina", Waste Management, 34, 2, (2014), 564-565.

ASERRÍN COMO AGENTE FORMADOR DE POROS EN LA OBTENCIÓN DE AGREGADOS LIVIANOS

Cecilia Martinefsky¹, Anabella Mocciaro², Fabián Irassar¹, Alejandra Tironi¹

¹ Facultad de Ingeniería, CIFICEN (CONICET, CICIPBA, UNCPBA), Olavarría, Buenos Aires, Argentina

² Centro de Tecnología de Recursos Minerales y Cerámica (CONICET-CICIPBA-UNLP), Manuel B. Gonnet, Buenos Aires, Argentina

Palabras Clave: lutitas, aserrín, agregados livianos, propiedades tecnológicas.

Introducción

La industria de los agregados es la mayor proveedora de materias primas para la construcción. Los requisitos anuales de agregados en el mercado mundial de la construcción alcanzaron los 55 mil millones de toneladas en 2020 y podría llegar a duplicarse en la próxima década. La escasez de agregados naturales será un problema en un futuro próximo. Además, la creciente conciencia medioambiental y el desarrollo de economías sostenibles han incrementado el interés en el uso de hormigones livianos [1]. La utilización de agregados livianos en la elaboración de placas, baldosas y hormigones mejora su capacidad de aislación térmica y acústica, a la vez que implica un menor consumo de energía durante su manipulación, debido a la menor densidad obtenida. Las arcillas naturalmente disponibles tienen un enorme potencial para ser utilizadas como materia prima para agregados livianos artificiales [2]. En la región de Olavarría se cuenta con amplios depósitos de lutitas, que contienen los minerales arcillosos illita y clorita, como descarte proveniente del destape de canteras de calizas. El agregado liviano artificial consiste en pequeñas esferas con una corteza, generalmente densa y poco permeable, que contienen un interior poroso. La porosidad del agregado dependerá de la materia prima y del tratamiento térmico: es fundamental lograr la formación de una capa exterior con la viscosidad adecuada para retener los gases generados a partir de la deshidroxilación de los minerales arcillosos, o mediante la descomposición de otra especie [3]. En este sentido existe la posibilidad de incorporar un agente formador de poros proveniente de residuos de diversas industrias, como por ejemplo aserrín, para favorecer la generación de gases. El objetivo de este trabajo es evaluar la eficacia del aserrín como agente formador de poros para obtener agregados livianos a diferentes temperaturas de sinterizado, cuando se utiliza lutita como materia prima.

Metodología

Se utilizó una lutita proveniente del destape de canteras de caliza de la región de Olavarría, provincia de Buenos Aires. Se determinó la composición química mediante fluorescencia de rayos X (XRF) y espectroscopía de emisión óptica en un equipo Axios FAST PANalytical. Se identificaron los minerales presentes mediante difracción de rayos X (DRX) en un equipo Bruker D2 phaser con radiación Cu-K α ($\lambda = 0,154$) a 30 kV y 10 mA. El aserrín empleado proviene del proceso de lijado de una industria maderera. Se determinó la granulometría de la lutita molida y el aserrín mediante un analizador de distribución de tamaño de partículas por difracción láser Malvern Mastersizer 2000E, con unidad de dispersión en seco Sirocco 2000M. Se elaboró una pasta de lutita (95%) con aserrín (5%) y agua, se moldearon esferas de aproximadamente 0,6 mm de diámetro y se secaron en estufa a 105°C. Las esferas se sinterizaron a diferentes temperaturas (1125, 1150, 1175 y 1200°C), colocando las mismas en la mufla una vez alcanzada la temperatura objetivo, con un tiempo de permanencia de 10 minutos y posterior enfriamiento rápido. Se analizó el cambio de fases producido luego del sinterizado mediante DRX. Se determinó la absorción y la densidad de partícula aparente de los agregados mediante picnometría (EN 1097-6). Se midió la resistencia a la compresión directa de las esferas en una máquina de ensayos universal, INSTRON 5985, con una velocidad de desplazamiento de 0,5 mm/min. Se observó un corte de los agregados en lupa con cámara Leica DMC4500 y en microscopio óptico Leica DM2700M, con ocular 10x y objetivo 10x, que al ser combinados proporcionan un aumento de 100x. Se compararon las propiedades de los agregados sinterizados con las medidas en un agregado liviano comercial Liapor® 6,5.

Resultados y análisis de resultados

La composición química de la lutita en porcentajes en masa es: 62,22% SiO₂, 16,68% Al₂O₃, 6,54% Fe₂O₃, 1,12% CaO, 3,75% K₂O, 2,23% MgO, 1,72% Na₂O y 0,84% TiO₂, con una pérdida por calcinación de 4,40%. El diagrama ternario de Riley (1951) [4] es utilizado como diagrama de referencia para predecir la formación de poros y expansión de materiales que contienen minerales arcillosos según la relación de alúmina-sílice y agentes fundentes y, de acuerdo a este diagrama, la lutita estudiada se encuentra dentro

del área delimitada como adecuada para la expansión. Se identificaron mediante DRX los minerales arcillosos illita (I) y clorita (Ch), cuarzo (Q), calcita (Cc) y feldespato albita (F) en la lutita (Figura 1). La distribución de tamaños de partículas obtenida por granulometría láser presentó un d_{10} , d_{50} y d_{90} (tamaños de partículas por debajo del cual queda el 10, 50 y 90% del volumen de la muestra) de 2,12, 14,17 y 89,94 μm , respectivamente, para la lutita; y de 24,81, 110,22 y 513,32 μm para el aserrín.

Los cambios mineralógicos identificados por DRX luego del sinterizado de las esferas a las distintas temperaturas (Figura 1) son: los picos asignados a las fases clorita, illita y albita en la materia prima no se encuentran presentes; la intensidad de los picos asignados al cuarzo disminuye aproximadamente a la mitad a 1125°C y en mayor proporción al aumentar la temperatura hasta 1200°C. Estos cambios evidencian la mayor formación de fase amorfa con el aumento de la temperatura. Se identifica también una fase espinela de hierro y magnesio (S, $\text{Fe}_{0,25}\text{Mg}_{0,75}\text{Al}_2\text{O}_4$) en todas las esferas sinterizadas y hematita (H, Fe_2O_3) en los agregados a 1125, 1150 y 1175°C. Cuando se comparan los agregados elaborados con lutita y aserrín, con aquellos elaborados únicamente con lutita [5], se observa una menor intensidad de los picos asignados a la hematita en los primeros, concluyendo que el agregado de aserrín favorece la incorporación del hierro en fase amorfa. Este efecto es mayor al aumentar la temperatura de sinterizado.

La Figura 2 presenta las propiedades determinadas en los agregados. Para todas las temperaturas de trabajo se obtuvieron agregados porosos que clasifican como livianos en cuanto a densidad $\leq 2 \text{ g/cm}^3$ [6]. A medida que aumenta la temperatura de sinterizado, los agregados presentaron una disminución de la densidad, de la absorción y de la resistencia a compresión. Al comparar los resultados de los agregados sinterizados con un agregado comercial de calidad internacional (Liapor® 6,5) de tamaño similar, se observa que: la densidad de los agregados sinterizados a 1175 y 1200°C es menor (resultado favorable); la absorción y la resistencia a compresión de todos los agregados es menor (resultado favorable y no favorable, respectivamente, para su uso en hormigones). Los agregados livianos con resistencia a compresión menor a 3 MPa (1150, 1175 y 1200°C) pueden ser utilizados en materiales de construcción no estructurales, como por ejemplo placas [1]. Los agregados sinterizados a 1125°C, a pesar de tener densidad mayor que el agregado comercial, cumplen con el requisito de densidad para agregado liviano y presentan valores de absorción y resistencia a compresión cercanos a los del agregado comercial.

Del análisis de las imágenes de corte en lupa y microscopio óptico (Figura 3) se observa que la

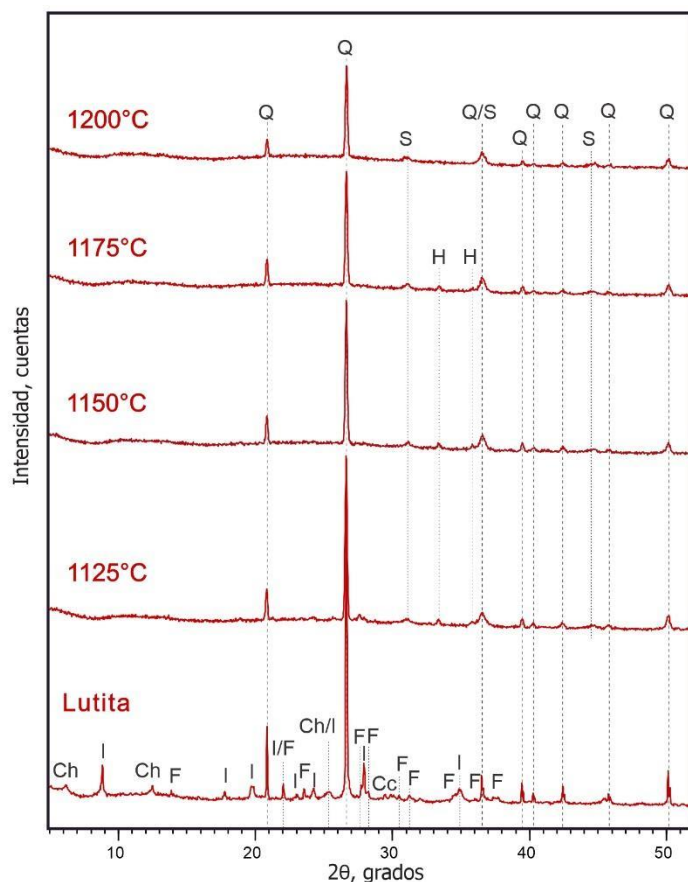


Figura 1 – DRX de la lutita y de los agregados con 5% aserrín obtenidos a diferentes temperaturas (I = illita, Ch = clorita, Q = cuarzo, Cc = calcita, F = feldespato (albita), H = hematita, S = espinela de Fe y Mg)

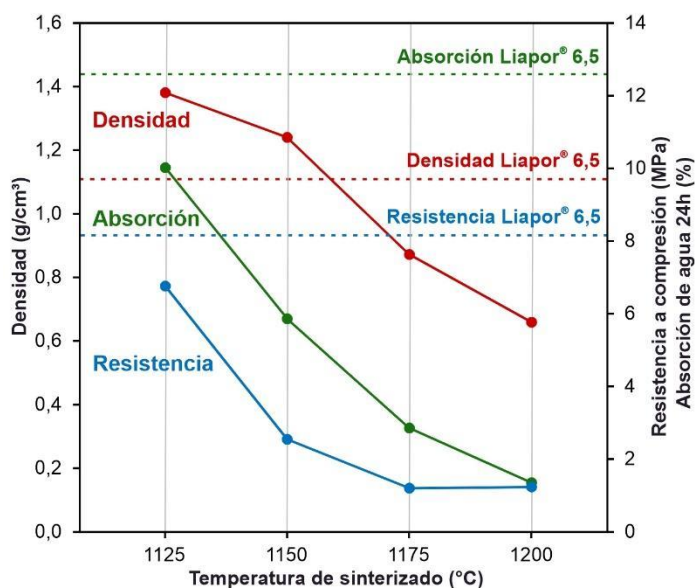


Figura 2 – Propiedades de los agregados sinterizados a diferentes temperaturas y referencia de valores de Liapor® 6,5

disminución de densidad se corresponde con un aumento en el tamaño de poros. En todos los agregados sinterizados se diferencia un interior color negro de mayor porosidad y una corteza rojiza de menor porosidad. El espesor de la corteza disminuye con el aumento de la temperatura de sinterizado. El agregado comercial presenta un tamaño de poros menor que los agregados sinterizados y un espesor de la corteza similar al agregado sinterizado a 1200°C. El mayor espesor de la corteza junto al menor tamaño de poros en el interior negro en el agregado sinterizado a 1125°C, contribuyen a un desarrollo de resistencia a compresión comparable al agregado comercial.

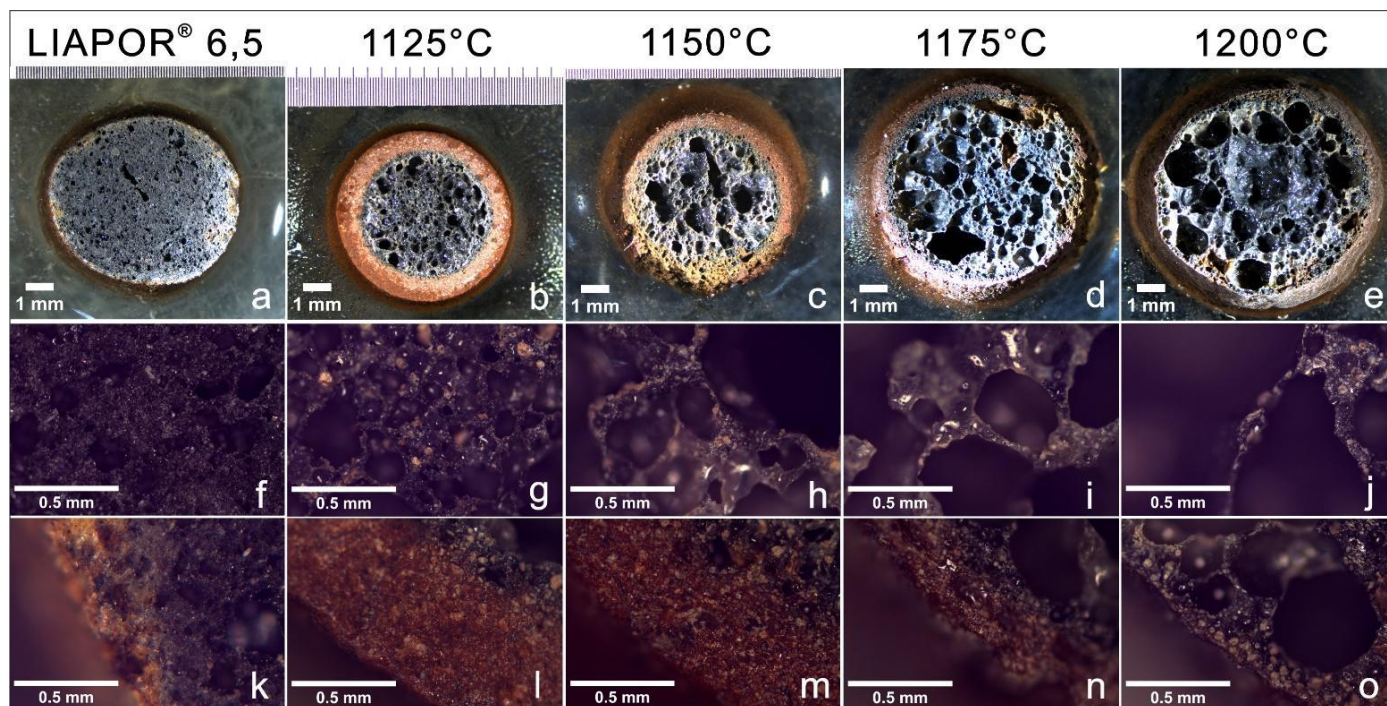


Figura 3 – Corte de los agregados Liapor® 6,5 y los agregados sinterizados a diferentes temperaturas: a-e imágenes en lupa, f-j imágenes del interior en microscopio, k-o imágenes de la corteza en microscopio

Conclusiones

De los resultados obtenidos se concluye que el aserrín generado como descarte de la industria maderera es un adecuado agente formador de poros para obtener agregados livianos, cuando se utiliza lutita proveniente del destape de canteras como materia prima. Fue posible sinterizar agregados livianos con un interior negro poroso y corteza rojiza similar a un agregado liviano comercial. La temperatura de sinterización de los agregados influye en el tamaño de poros y espesor de la corteza, factores determinantes de las propiedades: a mayor temperatura menor densidad, absorción y resistencia a compresión. Los agregados sinterizados a 1125°C, a pesar de tener densidad mayor que el agregado comercial, cumplen con el requisito de densidad para agregado liviano y presentan valores de absorción y resistencia a compresión cercanos al agregado comercial. A partir de los resultados obtenidos, se propone para próximas instancias modificar factores como porcentaje de aserrín incorporado o un menor tamaño de partículas de aserrín, en la búsqueda de alcanzar un espesor de corteza, tamaño de poros y propiedades equivalentes a los agregados comerciales.

Referencias

- [1] Hussain, F., Rehman, F., Khushnood, R.A., Khan, S.A., Hamza, A., "Study of physical and mechanical behavior of artificial lightweight aggregate made of Pakistani clays", *Construction and Building Materials*, 378, (2023), 131103.
- [2] 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.
- [3] Bernhardt, M., Justnes, H., Tellesbø, H., Wiik, K., "The effect of additives on the properties of lightweight aggregates produced from clay", *Cement & Concrete Composites* 53 (2014) 233–238.
- [4] Riley, C.M., "Relation of chemical properties to the bloating of clays", *Journal of the American Ceramic Society*, 34, 4, (1951), 121-128.
- [5] Martinefsky C., Mocciaro A., Tironi, A., Irrasar, E.F., "Evaluación de dos tratamientos térmicos para la obtención de agregados porosos a partir de lutitas", *X Congreso Internacional y 24ª Reunión Técnica de la AATH*, (2022), 125-132.
- [6] Thienel, K.C., Haller, T., Beuntner, N., "Lightweight Concrete - From Basics to Innovations", *Materials*, 13, (2020), 1120.

EVALUACIÓN DE HORMIGONES CON SOBRANTES TRITURADOS DE HORMIGÓN ELABORADO EN PLANTAS COMO SUSTITUTO PARCIAL DEL AGREGADO GRUESO

Aldana Olmos¹, Leslie Azcurra¹, Sebastián Manzi¹, Renzo Labarba¹

¹ Estudiante de la Carrera de Ingeniería Civil, Facultad Regional Mendoza, Universidad Tecnológica Nacional, Argentina

Palabras Clave: hormigón, agregado grueso reciclado, propiedades físicas y mecánicas.

Introducción

La construcción representa una actividad que demanda importante consumo de materiales, siendo una alta generadora de residuos y de contaminación, hechos que han motivado a diferentes industrias e investigadores de este sector alrededor del mundo, a modificar los métodos conocidos como convencionales de producir y fabricar materiales, de diseñar, construir, operar y demoler los proyectos civiles para contribuir al desarrollo sostenible que actualmente se promueve en todas las economías del planeta.

En ese sentido, el uso de materiales reciclados provenientes de desechos de demolición es una alternativa cada vez más aceptada en la industria de la construcción. Además de conservar los recursos naturales y reducir el área de tierras destinadas a la disposición final de residuos, es una forma de disminuir el consumo de energía y por lo tanto, el costo de una obra. En Argentina, desde 2016, con la norma IRAM 1531 [1], se permite hasta un 20% de reemplazo del agregado grueso natural (AGN) por agregado grueso reciclado (AGR) para la elaboración de hormigones en masa de hasta 30 MPa. No obstante, no existe una implementación generalizada de la estrategia de reciclado, y parte de las limitaciones se deben a que no existen las plantas necesarias para efectuar la trituración, la separación de gruesos y finos, y la limpieza de contaminantes [2].

El AGR es un material heterogéneo que está constituido por dos fases: mortero y roca. Sus partículas pueden estar conformadas únicamente por agregado natural, por mortero del hormigón que se trituró adherido al agregado natural o solo por mortero. En general, los agregados reciclados que provienen de hormigón triturado, consisten en un 65-70% en volumen de agregado natural, y un 30-35% en volumen de pasta cementícea del hormigón original. La principal característica que los diferencia de un agregado natural, es el mortero adherido que poseen [3].

El presente proyecto de investigación se encuadra en el marco de la asignatura Proyecto Final de Grado de la Carrera de Ingeniería Civil, Facultad Regional Mendoza, Universidad Tecnológica Nacional. El objetivo del mismo es poder evaluar el efecto que produce en las propiedades más relevantes del hormigón, la incorporación de sobrantes triturados de hormigón elaborado en plantas, AGR, como sustituto parcial del AGN.

A partir de lo indicado, a continuación se hará una descripción de los principales aspectos metodológicos que se han tenido en cuenta en el proceso de investigación a llevarse a cabo, así como también, los avances obtenidos a la fecha.

Metodología

Se procedió en primer lugar a la búsqueda y obtención del AGR. Para ello, se contactó una planta dosificadora de hormigón la cual proveyó el material sobrante. En la Figura 1 se muestra la depositación en planta de dicho material.

A partir de la información suministrada por la planta, se pudo establecer que se disponía de sobrante de hormigón de clases H-17, H-21 y H-30, los cuales fueron adoptados para la investigación. Una vez obtenidas las muestras, se comenzó con la trituración de las mismas. Si bien estaba prevista la trituración mediante una trituradora de mandíbulas en una empresa dedicada a la trituración de áridos, cuestiones operativas impidieron dicho proceso, por lo cual la



Figura 1 – Depositación de material sobrante en planta

trituration mecánica fue realizada manualmente con una maza de 5 kg hasta obtener aproximadamente el tamaño requerido (Figura 2).



Figura 2 – Obtención mecánica del AGR

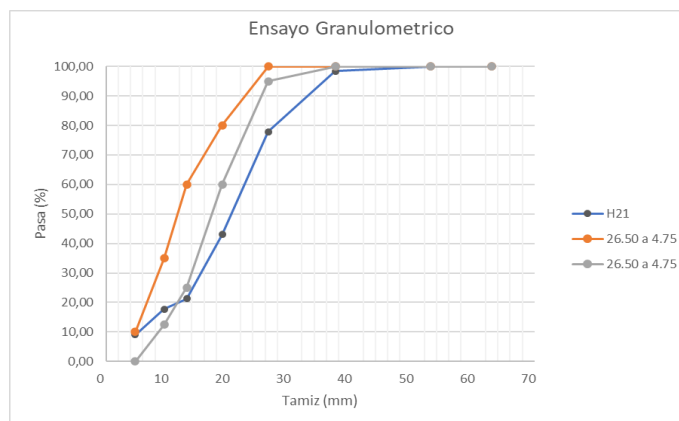


Figura 3 – Análisis granulométrico del AGR

Una vez obtenido los tres AGR, (AGR 17, AGR 21 y AGR 30), se continuó con la caracterización física de los mismos, obteniendo en cada caso el tamaño máximo nominal. En la Figura 3 se presenta la curva granulométrica [4] del AGR 21 y las curvas límites de referencia dada por CIRSOC 201 [5] correspondientes al tamaño máximo nominal del AGR.

En la Tabla 1 se presentan los resultados de las propiedades físicas obtenidas para el AGR y evaluados de acuerdo a norma [6].

Tabla 1: Caracterización del AGR.

Designación	TMN [mm]	Absorción [%]	Humedad [%]
AGR 17	26,5	10,7	5,3
AGR 21	26,5	9,0	4,7
AGR 30	26,5	6,5	3,6

Habiendo entonces caracterizado al AGR, se continuó con el diseño de las mezclas de estudios. A fin de evaluar el efecto de la incorporación de dichos AGR sobre mezclas pobres y ricas en cemento, se adoptaron dos relaciones a/c (0,55 y 0,75). Por otra parte, y como condición de diseño para el hormigón en estado fresco, se consideró para todos los casos un asentamiento de diseño de 100 mm. En cuanto a los porcentajes de sustitución parcial del AGN por el AGR, estos resultaron ser del 10 y 20 % en masa. El proceso de dosificación correspondió al método racional propuesto por el ACI-211 [7]. En la Tabla 2 se presentan las mezclas de estudio y sus correspondientes dosificaciones obtenidas.

Tabla 2: Dosificaciones de las mezclas de estudio.

Designación	a/c	Cemento [kg/m³]	Agua [lts/m³]	AFN [kg/m³]	AGN [kg/m³]	AGR [kg/m³] [%]	
M-55	0,55	373	205	728	960	0	0
M-75	0,75	273		809		0	0
M-55-AGR 17/10	0,55	373		728	864	96	10
M-55-AGR 17/20					768	192	20
M-75-AGR 17/10	0,75	273		809	864	96	10
M-75-AGR 17/20					768	192	20
M-55-AGR 21/10	0,55	373		728	864	96	10
M-55-AGR 21/20					768	192	20
M-75-AGR 21/10	0,75	273		809	864	96	10
M-75-AGR 21/20					768	192	20
M-55-AGR 30/10	0,55	373		728	864	96	10
M-55-AGR 30/20					768	192	20
M-75-AGR 30/10	0,75	273		809	864	96	10
M-75-AGR 30/20					768	192	20

Conclusiones

La trituración mecánica manual del sobrante de planta permitió establecer que a menor calidad de la clase de hormigón origen que formaba parte de este, mayor era el material resultante que pasaba a través del tamiz N° 4. Con lo cual, el AGR 17 dio lugar a la generación de más material fino reciclado que el que produjo el AGR 30.

En cuanto a la absorción, a menor calidad del sobrante origen del AGR mayor resultó ser su capacidad de absorción. En este caso, el AGR 17 presentó un 65% más de capacidad de absorción que el AGR 30. Dependiendo del porcentaje de sustitución adoptado para el AGR y de la calidad origen del mismo, esta condición podría dar lugar a cambios en la trabajabilidad de las mezclas.

Por otra parte y respecto a lo anterior, resulta relevante en el proceso de dosificación de mezclas con sustitución parcial de AGN por AGR, tener en cuenta la absorción de los mismos, ya que estos poseen una capacidad de hasta más de 5 veces las del agregado natural.

Actualmente y habiendo concluido con el diseño de las mezclas de estudio, se está llevando a cabo la elaboración de las mismas. A partir de ello, se comenzará con la fase experimental oportunamente prevista.

Al respecto, se prevé evaluar el comportamiento de las mezclas a partir de la comparación de resultados obtenidos tanto para el estado fresco: asentamiento, contenido de aire y peso unitario; como para el estado endurecido: resistencia a compresión, resistividad eléctrica, succión capilar y permeabilidad al aire.

Esto último permitirá establecer tendencias de comportamientos de dichas propiedades evaluadas en función del efecto que el AGR produzca sobre las mismas.

Referencias

- [1] Instituto Argentino de racionalización de materiales, "IRAM 1531. Agregado grueso para hormigón de cemento", (2016).
- [2] Maselli, L., Villagrán, Y., San Juan, G., "Consideraciones preliminares al análisis de ciclo de vida de estructuras de hormigón elaborado con agregados reciclados en Provincia de Buenos Aires", Ciencia y Tecnología de los Materiales, N° 10, (2020).
- [3] Priano, C., Señas, L., Moro, J., Marfil, S., "Agregados reciclados pretratados para uso en hormigón", Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente, N° 36, (2016), 77-86.
- [4] Instituto Argentino de racionalización de materiales, "IRAM 1505. Agregados. Análisis granulométrico", (2005).
- [5] CIRSOC 201, "Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón", INTI CIRSOC, (2005).
- [6] Instituto Argentino de racionalización de materiales, "IRAM 1533. Agregados gruesos. Método de laboratorio para la determinación de la densidad relativa real, de la densidad relativa aparente y de la absorción de agua", (2002).
- [7] American Concrete Institute, "ACI 211.1-91 (Reapproved 2002), Standard Practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete", (2002).

ESTUDIO PRELIMINAR DE LA UTILIZACIÓN DE TAMICES MOLECULARES EN HORMIGÓN DRENANTE

Rocío Peralta Ring^{1, 2}, Ignacio Enriquez², Juan Verney², Carla Priano², Viviana Rahhal³

¹ Becaria de doctorado CONICET

² Departamento de Ingeniería, UNS

³ Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires

Palabras Clave: residuo, tamices moleculares, hormigón drenante, sustentabilidad.

Introducción

Las inundaciones son uno de los problemas ambientales que afectan a las sociedades actuales. Las principales causas son las lluvias intensas y la saturación de los suelos al no poder almacenar agua. El desarrollo de áreas urbanas y la utilización de estructuras impermeables que impiden la absorción de agua favorecen estos eventos y agravan la situación. En los últimos años se ha desarrollado a nivel mundial un modo alternativo de diseñar pavimentos, construyendo estructuras que permiten el paso del agua a través de la capa superficial hacia el interior de la estructura, para evitar la acumulación de agua en su superficie y el escurrimiento superficial aguas abajo, condiciones que generan los dos problemas asociados a pavimentos impermeables [1]. Los hormigones drenantes han cobrado cierto interés y aplicación en el ámbito de los pavimentos permeables, especialmente para ser utilizados en vías peatonales y de circulación vehicular con bajo tránsito, áreas de estacionamiento o incluso otras aplicaciones como terrazas de edificios o invernaderos [2].

El hormigón permeable es un hormigón especial que se caracteriza por permitir el pasaje del agua debido al porcentaje de poros interconectados que posee. La nula o poca presencia de finos en la mezcla le permite mejorar su permeabilidad debido a un aumento en su volumen de vacíos, generando la capacidad de filtrar el agua [3]. La estructura interna de un hormigón drenante puede describirse como un conjunto de partículas de agregado grueso unidas entre sí por puentes constituidos por mortero (cemento y agregado fino) o pasta cementicia. Estos puentes son los responsables de proporcionarle la resistencia al hormigón [4]. Es por esto que el pavimento permeable es una opción sostenible que permite la filtración de agua en su interior gracias al gran número de poros interconectados.

La realización de materiales amigables con el medio ambiente es importante y necesaria ya que generan un menor impacto ecológico para el planeta. Para disminuir la huella de carbono, además de la utilización de hormigones permeables en los pavimentos, se utilizan diversos residuos como agregados [5]. La escasez de arenas naturales aptas para la elaboración de hormigones es una problemática que se presenta habitualmente en la provincia de Buenos Aires, poniendo de manifiesto la necesidad de utilizar arenas de trituración o agregados reciclados [6]. Por esta razón, el reciclado de desechos para la elaboración de nuevos productos ha tomado un rol importante en la industria de la construcción [7, 8] y permite que su ciclo de vida sea más eficiente y acorde con las tendencias actuales de protección del ambiente. La incorporación de residuos dentro de mezclas cementicias, además de generar modificaciones en las características propias de la matriz, forma parte de una solución para la disposición final de los desechos sin afectar el medio ambiente.

En trabajos previos [9, 10], se relevaron residuos industriales de empresas cercanas a la ciudad de Bahía Blanca, donde se encontraron tamices moleculares utilizados en torres de adsorción de gas. Una alternativa de uso consistiría en incorporarlos en matrices cementicias para elaborar hormigón drenante, debido a su característica monogranular. Para caracterizar al material es necesario medir su permeabilidad, la cual está relacionada directamente con el contenido, tamaño, distribución y conectividad entre los poros. Este parámetro se obtiene a partir de un permeámetro, el inconveniente de este equipo es la variación de los resultados según la columna de agua inicial y final que se utilice. Según estudios recientes, la permeabilidad también se puede medir a través de permeámetros de carga constante. Los resultados obtenidos para cada metodología son diferentes, por lo que es necesario mencionar cuál es la utilizada en el ensayo [11].

En el presente trabajo se estudia la permeabilidad de mezclas de mortero con residuos obtenidos de la empresa de transporte de gas de la ciudad de Bahía Blanca a partir del desarrollo en laboratorio de un permeámetro de carga variable.

Metodología

En un trabajo previo [10] se caracterizaron los tamices moleculares (TM), obtenidos de una planta de transporte de gas cercana a la ciudad de Bahía Blanca (Figura 1). En esta etapa, se decidió incorporarlos en hormigones sin finos para evaluar su capacidad drenante mediante un permeámetro de carga variable.



Figura 1. Tamices moleculares

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, tamices moleculares. Se dosificaron mezclas con relaciones en peso de agua/cemento de 0,36 y agregado/cemento de 4.

El equipo utilizado (Figura 2) para el ensayo fue realizado en el Laboratorio de Estudio y Ensayo de Materiales de la Universidad Nacional del Sur, según lo establecido en la norma ACI 522-R [12]. Para realizar el ensayo, se recubrió la probeta de hormigón en todo su perímetro con un material impermeable. Luego, se colocó en el tubo de polietileno de alta densidad para dejar fluir el agua desde una altura inicial de 290 mm hacia una altura final de 70 mm y medir el tiempo que demora en filtrar la columna de agua a través de la probeta. A partir del tiempo (t) obtenido para cada ensayo se pudo calcular el coeficiente de permeabilidad (k) con la ecuación (1) donde “a” depende de los parámetros geométricos del permeámetro y se define como ecuación (2), donde L es la altura de la probeta, A1 es el área de la sección transversal de la columna de agua sobre la probeta y A2 el área de la sección transversal de la probeta (en este caso son iguales).

$$k = a / t \quad (1)$$

$$a = \frac{A_1}{A_2} \cdot L \cdot \ln \left(\frac{h_1}{h_2} \right) \quad (2)$$



Figura 2. Permeámetro

Resultados

En la Tabla 1 se observan los valores de permeabilidad obtenidos después de 28 días de edad desde la elaboración de las mezclas. Se tiene la posibilidad de comparar los resultados obtenidos en esta investigación con los valores de estudios y artículos internacionales. Los valores del coeficiente de permeabilidad (k) suelen variar entre 0,2 cm/s y 1,2 cm/s, medidos in situ. Los resultados en laboratorio pueden ser más altos, llegando a obtenerse valores de hasta 2,5 cm/s [13]. En este caso, todas las muestras tienen un coeficiente k mayor a los obtenidos por otros autores, por eso resultan con una capacidad drenante superior.

Tabla 1: Valores de permeabilidad.

Muestra	k (cm/s)
1	4,3
2	3,9
3	2,5
4	2,9

Conclusiones

La utilización de tamices moleculares en la elaboración de hormigones afecta significativamente los valores de permeabilidad a los 28 días de edad. La diferencia de valores entre las muestras podría deberse a la heterogeneidad del residuo. El reemplazo de estos desechos no sólo proporciona una mayor permeabilidad, sino que podría ser una alternativa posible para realizar la disposición final de un desecho industrial sin afectar al ambiente.

Está proyectado para trabajos futuros, determinar las densidades, resistencias a compresión y tracción de las muestras para complementar y evaluar la posibilidad de incorporar los tamices moleculares en hormigones drenantes. Además, se analizará el agua de curado para evaluar la lixiviación de materiales peligrosos.

Referencias

- [1] Castro, J., De Solminihaç, H., Videla, C., Fernández, B., "Estudio de dosificaciones en laboratorio para pavimentos porosos de hormigón", Revista Ingeniería de la construcción, 24, 3, (2009), 271-284.
- [2] Calo, D., Polzinetti, M., "Manual de pavimentos urbanos de hormigón", 1° Edición, Camueira, (2016), 162 pág.
- [3] Segura, L., "Estudio de las características del Hormigón Permeable y su implementación en el Uruguay", Tesis de grado, UdelaR, Montevideo, (2020), 77 pag.
- [4] Carrasco, M.F., Rautenberg, D.P., Positieri, M.J., "Hormigón drenante: diseño, características y aplicaciones", Revista Hormigón, 61, (2022), 5-23.
- [5] Ayala Lopez, J.E., Gil Ahumada, E., Comejo Ramos, R.D., Munoz Perez, S.P., "Methodologies to produce pervious concrete partially using recycled materials as aggregates: a literature review", Tecnológicas, 25, 53, (2021), 19 pag.
- [6] Cabrera, O.A., Traversa, L.P., Ortega, N.F., "Effect of crushed sand on mortar and concrete rheology", Construction Materials, 61, 303, (2011), 401-416.
- [7] Zega, C.J., "Hormigones reciclados: caracterización de los agregados gruesos reciclados", Mg. Tesis, UNCPBA, Olavarría, (2008), 135 pag.
- [8] Moro, J.M., Meneses, R., Ortega, N.F., "Chapter 1: Variants in Recycled Concrete Elaboration to Improve their Durability", Concrete and Concrete Structures, A Review and Directions for Research, Eds Dorian, T. and Pascual, V., Nova Publishers, (2017), 1-42.
- [9] Peralta Ring, R., Ortega, N.F., Priano, C., "Relevamiento de residuos industriales factibles de reciclar, para uso en hormigón", IV Congreso Nacional de Ciencia y Tecnología Ambiental, (2019), 6 pág.
- [10] Peralta Ring, R., Priano, C., Ortega, N.F., "Estudio de factibilidad de la utilización de tamices moleculares en mezclas cementicias", IX Congreso Internacional y 23ª Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, (2020), 213-220.
- [11] Majewski, Q., Yang, D., "Water permeability of pervious concrete is dependent on the applied pressure and testing methods", Advances in Materials Science and Engineering, 2015, (2015), 6.
- [12] American Concrete Institute, "ACI 522R-10 - Report on Pervious Concrete", Farmington Hills, MI, (2010), 48331.
- [13] Alaica, A.L., Dolatabadi, M.H., Sucic, A., Shehata, M., "Optimizing the strength and permeability of pervious concrete", Conference of the transportation association of Canada, (2010).

EQUILIBRIO ENTRE LA REDUCCIÓN DEL FACTOR CLÍNKER, LA CAPTURA DE CARBONO POTENCIAL Y EL DESEMPEÑO POR CARBONATACIÓN EN MORTEROS SUSTENTABLES

Carlos Pico-Cortés^{1, 2}

¹ Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica (LEMIT), La Plata

² Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), CCT-La Plata

Palabras Clave: Carbonatación acelerada, factor de sustentabilidad simplificado, materiales cementíceos suplementarios, mortero.

Introducción

La corrosión es causa principal de la disminución de la vida útil en las estructuras de hormigón armado. Evitar su desarrollo con foco en los mecanismos causantes, como la carbonatación, es necesario desde el diseño de la mezcla. Actualmente, y cada vez con mayor frecuencia, se utilizan cementos con factor clínker reducido. La justificación de su uso está asociada a aspectos ambientales y técnicos. Sin embargo, en cuestión de alcalinidad y en presencia de dióxido de carbono (CO_2), la deficiencia o consumo excesivo de hidróxido de calcio (portlandita) puede causar inconvenientes tanto desde el enfoque de resistencia mecánica como de propiedades de transporte [1].



Figura 1 – Reacción del mortero ante la solución con fenolftaleína

En cuanto a la carbonatación de mezclas con materiales cementíceos suplementarios (MCS), se ha observado históricamente un aumento de la velocidad de carbonatación relacionada con el porcentaje de reemplazo de cemento Portland normal (CPN) [2]. Cementos con escoria de alto horno (EAH), filler calcáreo (FC) y algunos cementos ternarios han presentado comportamientos variables. A pesar de una tendencia hacia una mayor velocidad de carbonatación [3, 4], se encontraron algunos resultados prometedores (mejora de sus propiedades al carbonatarse), tanto para EAH [3] como para FC [4]. La ventaja que puede llegar a tener el uso de EAH en cuanto a la reserva alcalina se deriva de su contenido de CaO potencialmente reactivo. El CaO contenido en el FC no es reactivo, con todo, este compuesto no es el único carbonatable, ya que las fases aluminatos (Aft y Afm) también lo son en menor medida. Además del factor químico, el factor físico relacionado con la porosidad de la matriz es fundamental en la resistencia al ingreso de sustancias al hormigón. Por esta razón no debe descartarse la posibilidad de mejora a través de una densificación de la matriz cementícea. Es allí donde cabe la importancia de los MCS de reacción puzolánica [5]. Sin embargo, para estos materiales se presenta rápido consumo de portlandita, y el porcentaje de reemplazo de CPN necesario para una reacción completa se da entre 6% y 35% [1].

Encontrar un equilibrio entre el aprovechamiento de MCS, la recarbonatación del material y la durabilidad a través de la resistencia a la carbonatación, es indispensable para aumentar la sustentabilidad. Históricamente se han propuesto diversos índices de sustentabilidad, algunos basados en la cantidad de emisiones y otros en propiedades preliminares. Recientemente, se han propuesto índices basados en desempeño, como el de apatía o intensidad de energía [6], como forma de seleccionar mezclas, aunque requieren de un análisis de ciclo de vida. Los factores de sustentabilidad pueden basarse no solo en desempeño mecánico sino también en desempeño durable. Por esta razón, en este trabajo se propone la implementación de un factor simplificado que relaciona la sustitución de clínker por MCS y la captura potencial de CO_2 con el desempeño por carbonatación (SCO_2). Este factor relaciona implícitamente las emisiones de CO_2 que se reducen en la fabricación de cementantes al reemplazar CPN por MCS (primer término del numerador) y las emisiones que dicha mezcla puede llegar a absorber en servicio (segundo término del numerador), con la profundidad de carbonatación (X_c) relativa determinada en morteros con ensayo acelerado (denominador). Para tener en cuenta tanto las emisiones por uso de combustibles como por calcinación en la clinkerización, el primer término de SCO_2 se puede expresar en función de CPN reemplazado ($1 - F_{\text{clínker}}$). En el segundo término, se tiene en cuenta la relación existente entre la absorción potencial de CO_2 y el CaO carbonatable (CaO reactivo) [7, 8]. Se propone así, el estudio aplicado a mezclas con arcilla calcinada illítica (AC) y puzolana natural (PN) como alternativas del CPN, además de las ya mencionadas EAH y FC.

Materiales y metodología

Para determinar la resistencia a la carbonatación, se elaboraron barras de morteros de 40 x 40 x 160 mm con cementantes de origen diverso: CPN40 y CPN50 de alta resistencia inicial (ARI) como referencias, con sustituciones parciales por los MCS antes mencionados: PN, AC, EAH y FC. Se definieron distintas mezclas para dos grupos clasificados en la Tabla 1. El Grupo 1 de cementantes (filas color azul) conformado por CPN40, EAH y FC. El Grupo 2 conformado por CPN50-ARI, AC (filas color naranja oscuro) ó PN (filas color naranja claro) y FC. Para cada mezcla, se calculó el CaO reactivo al sumar el CaO presente (ponderado) en los constituyentes, asumiendo hidratación completa y descontando el CaO del FC [9]. Complementariamente, a 28 días se determinaron la resistencia a la compresión, absorción y contenido de portlandita de cada mezcla mediante termogravimetría (TGA) (Tabla 1).

Tabla 1: Contenidos de distintos MCS para cada mezcla, CaO reactivo y resultados de ensayos a 28 días.

MEZCLA	CPN	EAH	AC/PN	FC	Absorción (%)	f _c (MPa)	Ca(OH) ₂ (%)	CaO reactivo (%)
C100a (CPN40)	100	-	-	-	8,1	48,1	11,79	66,05
C100b (CPN50ARI)	100	-	-	-	8,4	50,6	11,39	66,11
C40E60	40	60	-	-	6,9	39,9	3,13	51,60
C60P40	60	-	40	-	10,9	36,5	6,36	40,30
C50E40F10	50	40	-	10	7,8	45,1	5,00	49,81
C60ES20F20	60	20	-	20	9,4	42,6	6,45	48,02
C40E40F20	40	40	-	20	10,1	38,6	4,28	43,20
C30E60F10	30	60	-	10	9,7	38,8	2,34	44,99
C50P40F10	50	-	40	10	11,3	26,5	5,94	33,72
C60P20F20	60	-	20	20	10,7	38,8	7,58	40,00
C40P40F20	40	-	40	20	11,3	18,6	4,42	27,11
C60Pn40	60	-	40	-	9,1	49,2	6,02	39,96
C50Pn40F10	50	-	40	10	10,4	37,5	5,41	33,34

Para cada mezcla se midió la profundidad de carbonatación acelerada a 56 días, previo curado y preacondicionamiento, bajo las siguientes condiciones: concentración de CO₂ 1,5%, temperatura 20°C y humedad relativa 60%. Las profundidades de carbonatación se determinaron sobre una superficie fracturada, la cual se roció con solución de fenolftaleína al 1% en etanol-agua (Figura 1), midiendo el frente incoloro a partir de las cuatro caras de cada prisma. El factor S_{CO2} se determinó a partir de la ecuación 1, expresada como:

$$S_{CO2} = \frac{(1 - F_{clinker}) + (CaO \text{ reactivo})}{X_c \text{ relativa}} [Ad] = \frac{(\%MCS + \%CaO \text{ reactivo})/100\%}{X_{c \text{ Mezcla}}/X_{c \text{ CPN}}} \quad (1)$$

Resultados y Discusión

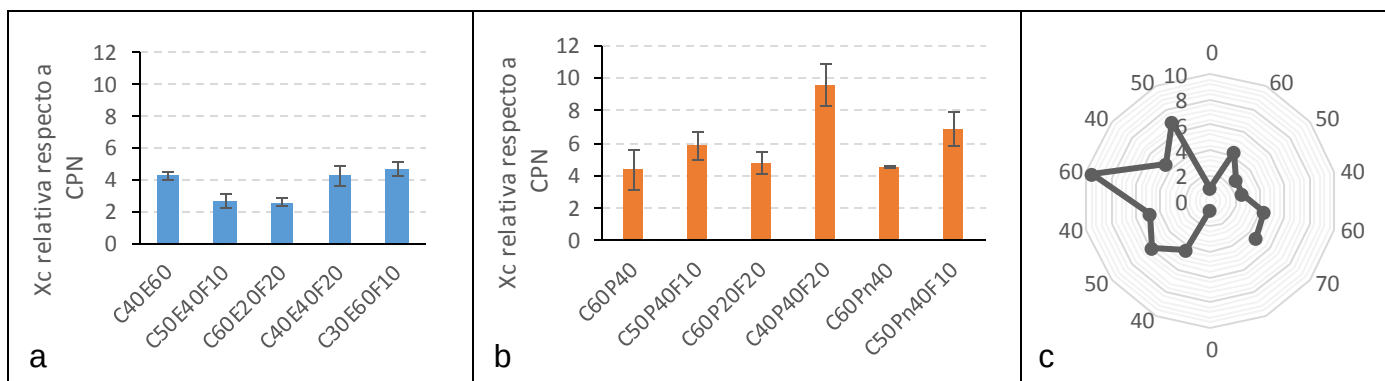


Figura 2 – Profundidad de carbonatación relativa para: a) mezclas Grupo 1, b) mezclas Grupo 2, y c) Carbonatación relativa (eje radial) para distintos porcentajes de reemplazo de CPN por MCS (eje angular)

En la Figura 2 se presentan los resultados de carbonatación relativa, definida como el cociente entre la profundidad de carbonatación para una mezcla y la profundidad de carbonatación del mortero de referencia a 56 días. En estos resultados se observa una ventaja en cuanto a la resistencia a la

carbonatación de los morteros con escoria, sobre los morteros con puzolanas, ya sea con o sin FC. Sin embargo, se hace pertinente el estudio del S_{CO_2} como aporte a la selección de las mejores alternativas. En la misma figura se observa que la mera reducción del factor clinker no es adecuada para medir sustentabilidad, debido a los diferentes desempeños que se obtienen para un mismo nivel de clinker reemplazado. Es necesario tener en cuenta las variables ambientales en cada tipo de MCS y cada mezcla, además de realizar ensayos con el fin de proyectar un desempeño adecuado.

En la Figura 3 se presentan los S_{CO_2} de las mezclas evaluadas. Las mezclas con MCS que presentaron un equilibrio más optimizado entre los tres aspectos sustentables fueron: C50E40F10 y C60E20F20. Mención especial para las otras tres mezclas con EAH. Entre las mezclas del Grupo 2, las de mayor equilibrio fueron las binarias C60P40 y C60Pn40 y la ternaria C60P20F20, que presentan S_{CO_2} mayor a 0,15, a pesar del bajo CaO reactivo.

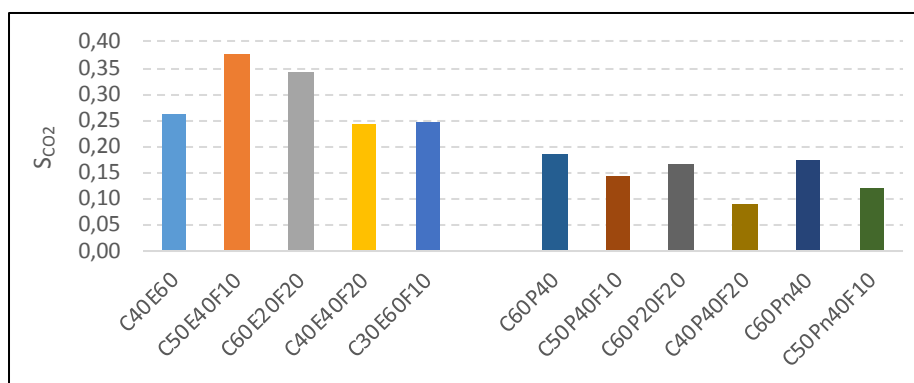


Figura 3 – Factor simplificado S_{CO_2} para mezclas de Grupo 1 y Grupo 2

Conclusiones

En general, las mezclas con EAH y FC presentaron una ventaja por resistencia a la carbonatación con respecto a las mezclas con puzolana. La ventaja en cuanto a la sustentabilidad potencial se confirmó con el factor simplificado. Las dos mezclas más destacadas fueron C50E40F10 y C60E20F20, la primera con S_{CO_2} un poco más alto que la segunda (0,38 y 0,34 respectivamente). Es necesario estudiar más las mezclas C40E40F20 y C30E60F10 debido a su interesante bajo contenido de clinker. Entre las mezclas con puzolanas, no se evidencia una clara ventaja de alguna de ellas, en especial al analizar únicamente sus desempeños. Sin embargo, las mezclas binarias C60P40 y C60Pn40 se destacaron por un S_{CO_2} mayor que las demás, y en segunda medida la ternaria C60P20F20. Es necesario verificar correlaciones entre la carbonatación acelerada y los ensayos complementarios a fin de plantear factores de sustentabilidad precisos. Estos factores tomarían lugar si no se tiene la posibilidad de realizar el ensayo de carbonatación acelerada o como complemento del mismo.

Referencias

- [1] von Greve-Dierfeld, S., Lothenbach, B., Vollpracht, A., Wu, B., et al., "Understanding the carbonation of concrete with supplementary cementitious materials: a critical review by RILEM TC281-CCC", Materials and structures, 53, 136, (2020).
- [2] Elgalhud, A.A., Dhir, R.K., Ghataora, G.S., "Carbonation resistance of concrete: Limestone addition effect". Magazine of concrete research, 69, 2, (2017), 84-106.
- [3] Mo, L., Zhang, F., Deng, M., Jin, F., Al-Tabbaa, A., Wang, A., "Accelerated carbonation and performance of concrete made with steel slag as binding materials and aggregates", Cement and concrete composites, 83, (2017), 138-45.
- [4] Shao, Y., Rostami, V., He, Z., Boyd, A.J., "Accelerated carbonation of Portland limestone cement", Journal of materials in civil engineering, 26, 1, (2014), 117-24.
- [5] Villagrán-Zaccardi, Y.A., Taus, V.L., Di Maio, A.A., "Propiedades de transporte de hormigón con cemento puzolánico", Ciencia y Tecnología de los Materiales, 6, (2016), 29-40.
- [6] Gettu, R., Pillai, R.G., Santhanam, M., Basavaraj, A.S., Rathnarajan, S., Dhanya, B.S., "Sustainability-based decision support framework for choosing concrete mixture proportions", Materials and Structures, 51, 6, 165, (2018).
- [7] Andrade, C., "Evaluation of the degree of carbonation of concretes in three environments", Construction and building materials, 230, (2020).
- [8] Pade, C., Guimaraes, M., "The CO₂ uptake of concrete in a 100 year perspective", Cement and concrete research, 37,9, (2007), 1348-1356.
- [9] Leemann, A., Moro, F., "Carbonation of concrete: the role of CO₂ concentration, relative humidity and CO₂ buffer capacity". Materials and structures, 50, 30, (2017).

EMPLEO DE BACTERIAS UREOLÍTICAS PARA LA ELABORACIÓN DE BIO HORMIGÓN

Sharon Rupp¹, Catalina Cerutti¹, Augusto Baque¹

¹ Centro de Investigación y Desarrollo para la Construcción y la Vivienda (CECOVI), Facultad Regional Santa Fe, Universidad Tecnológica Nacional

Palabras Clave: bacterias, bio hormigón, propiedades.

Introducción

El hormigón, material ampliamente utilizado en la construcción, puede experimentar fisuras debido a sollicitaciones que superan su capacidad resistente. Estas fisuras, que pueden aparecer a lo largo de la vida útil de las estructuras, no solo alteran la apariencia estética, sino también aumentan el riesgo de degradación de la matriz y comprometen la resistencia. De no ser reparadas a tiempo, permiten el ingreso de agua, gases y sustancias nocivas, acelerando el deterioro y afectando la durabilidad del hormigón. Para abordar este desafío, se han investigado hormigones autorreparantes [1].

La biomineralización es un proceso por el cual los organismos vivos producen minerales [2]. En el caso de la mineralización inducida biológicamente, los minerales se forman extracelularmente como resultado de la actividad metabólica del organismo. Numerosos trabajos de investigación han destacado el gran potencial que tiene el desarrollo de materiales cementicios autorreparantes a partir de la precipitación de carbonato de calcio (CaCO_3) inducido por microorganismos. Esto permitiría que el material selle las fisuras desde el mismo momento de su generación, preservando la integridad de las estructuras y protegiéndolas de otras patologías [3, 4]. El resultado de esta combinación de materiales se denomina bio hormigón. Una de las formas en que se puede lograr la biomineralización dentro de la matriz de materiales cementicios es a partir del empleo de bacterias ureolíticas. En trabajos previos se confirmó la factibilidad del uso de la cepa bacteriana *Lysinibacillus sphaericus* 2362, un bacilo ureolítico con el que se pretende inducir la precipitación CaCO_3 en el hormigón [5]. En el presente informe se busca analizar la afectación sobre las propiedades del hormigón al incorporar una concentración establecida de bacterias a través del agua de amasado.

Metodología

Existen diferentes metodologías de incorporación de bacterias en el hormigón para generar un material autorreparante. En este trabajo se analiza la incorporación de bacterias directamente a la mezcla de hormigón durante el proceso de elaboración, mediante el agua de amasado. La calidad y cantidad de impurezas del agua pueden afectar las propiedades más significativas del hormigón, razón por la cual el agua de amasado debe cumplir con la norma IRAM 1601:2012. Esta norma establece los requisitos y los métodos de ensayo del agua destinada a la preparación y/o curado de morteros y hormigones de cemento Portland. Dentro de los requisitos químicos, establece límites en cuanto a contenido de residuo sólido, materia orgánica, pH, sulfatos, cloruros y hierro. Si se exceden los valores límites de materia orgánica, el agua puede ser utilizada si cumple con los requisitos físicos establecidos.

Se denomina solución UB al agua de amasado en estudio, a través de la cual se pretende incorporar la materia biológica al hormigón. La misma está compuesta por una disolución de urea en agua destilada hervida a la que se le adiciona un concentrado de bacterias *Lysinibacillus sphaericus* 2362. En trabajos previos se pudo concluir que el contenido de sulfatos y cloruro de la solución biológica no supera lo establecido en la norma IRAM 1601:2012, mientras que el contenido de residuo sólido y materia orgánica sobrepasan el máximo permitido [5, 6]. A raíz de esto se modifica el método de preparación de la solución biológica, denominando a esta nueva preparación UB, estimando que de esta forma se reduce un 50% el contenido de materia orgánica. En este contexto, se evalúa en el presente trabajo la solución UB para determinar su aptitud como agua de amasado en hormigones y morteros. De acuerdo con los requisitos de la norma IRAM 1601:2012, cuando las aguas en análisis superen el límite de materia orgánica se debe evaluar la afectación en las propiedades físicas en morteros, siendo necesario determinar el tiempo de fragüe de acuerdo con la norma IRAM 1619:2006 y la resistencia mecánica a compresión a 7 días de acuerdo a la norma IRAM 1622, empleando UB y agua destilada hervida (agua para análisis).

Previo a la elaboración del hormigón, se realizó la caracterización del agregado fino y el agregado grueso, otro componente indispensable para la elaboración del hormigón. En los mismos se realizaron ensayos de granulometría (según IRAM 1505:2005), densidad y absorción de agregados (según IRAM

1533:2002 para agregado grueso e IRAM 1520:2002 para agregado fino) y densidad a granel (según IRAM 1548:2003).

Luego de la caracterización de todos los materiales, se procede a elaborar hormigón con cemento Portland normal para realizar el moldeado de probetas cilíndricas de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura sobre las cuales se evalúan las propiedades. Se moldearon probetas de hormigón elaboradas con solución UB y probetas patrón para las cuales se utilizó como agua de amasado agua destilada hervida. Sobre estas muestras se realizaron ensayos de absorción, succión capilar (de acuerdo con norma IRAM 1871:2021), carbonatación y resistencia a compresión a 28 días (de acuerdo con norma IRAM 1546:2013). Se evalúa la resistencia a compresión con el objetivo de determinar si el empleo de bacterias afecta el desempeño del material.

La precipitación de carbonato de calcio provoca una reducción de la cantidad de poros en la matriz del hormigón y consecuentemente una disminución de la porosidad [1], con intenciones de confirmar dicha hipótesis se realizaron ensayos de succión capilar y absorción. Este último ensayo pretende determinar el porcentaje de absorción que tiene el hormigón endurecido. Para ello se emplearon probetas cilíndricas de 28 días de edad. Las mismas se pesaron y se pusieron a secar en estufa (100°C - 110°C) hasta peso constante. Luego se sumergen las probetas en agua a 21°C por un periodo de 48 hs y se determinan los pesos, este procedimiento se repite hasta que la diferencia de pesos sea menor al 0,2%.

La carbonatación en el hormigón es la disminución de pH producto de la reacción del dióxido de carbono (CO₂) con el hidróxido de calcio que se encuentra disponible dentro de los poros del hormigón, en presencia de la humedad, formando carbonato de calcio. El hormigón, con su ambiente altamente alcalino, protege al acero de la armadura contra la corrosión. A valores menores de pH, es posible que empiece la corrosión, resultando finalmente en fisuración de la pasta. El proceso químico que se da en la biomineralización produce carbonato de calcio, que tiende a neutralizar el pH del hormigón, y amonio, que genera un aumento del pH [5]. El ensayo de carbonatación pretende observar si la tasa de generación de amonio durante el proceso de biomineralización es suficiente para compensar la disminución de pH generado por el carbonato de calcio. Para ello se moldearon probetas que se tuvieron en cámara de curado por 7 días y luego se expusieron a condición ambiente, protegidas de la lluvia y se evaluó a los 5 meses con una solución de fenolftaleína el pH de la matriz. Este ensayo se utilizó además para ver el comportamiento del avance de carbonatación considerando que al reducir la permeabilidad se reducen las vías de acceso del dióxido de carbono que genera la carbonatación.

Resultados y Conclusiones

Los resultados obtenidos en la caracterización del agua de amasado se indican en la Tabla 1. De los mismos se observa que el contenido de materia orgánica y de residuos sólidos de la solución UB superan ampliamente los requisitos establecidos por la norma IRAM 1601, por lo que se determina la resistencia mecánica a 7 días y los tiempos de fragüe a los fines de verificar si se cumple con las salvedades indicadas en la norma. La norma IRAM 1601 establece que no se debe producir una reducción mayor que el 10% en los valores de resistencia a la compresión a 7 días, obtenidos con las probetas moldeadas de la pasta preparada con el agua en examen, respecto de los obtenidos con las probetas preparadas con la pasta amasada con agua patrón. Aunque las muestras UB presentan valores inferiores en comparación con las muestras patrón, cumplen con lo establecido en la norma. En relación al nivel de pH, se ha observado que la solución UB cumple con el límite mínimo establecido por la norma. Dicho esto, puede ser utilizado como agua de amasado para la preparación y/o curado de morteros y hormigones de cemento Portland.

Tabla 1: Caracterización del agua de amasado.

Muestra	Contenido de materia orgánica [mg/l]	Contenido de residuos sólidos [mg/l]	PH	Tiempo de inicio de fragüe [min]	Tiempo de fin de fragüe [min]	Resistencia mecánica a 7 días [MPa]
Patrón	0	0	5,53	230	375	25,90
UB	9786	7673	8,97	260	405	25,60
Límites IRAM1601	5000	3	Min: 5,50	Min 45 min 230±57,50	Max 720 min 375±93,75	25,90±2,59

En la Tabla 2 se indican las características del agregado empleado para la elaboración de los hormigones experimentales.

Tabla 2: Caracterización de los agregados empleados en la elaboración de hormigones.

Agregado Grueso	IRAM 1505	TMN	19 mm
		Módulo de finura	6,38
	IRAM 1548	Densidad Granel	1580 g/cm ³
		Densidad Granel SSS	1650 g/cm ³
		Volumen de vacíos	44 %
	IRAM 1533	Densidad relativa real	3,08 g/cm ³
		Densidad relativa aparente del agregado seco	2,73 g/cm ³
		Densidad relativa aparente del agregado saturado superficie seca	2,84 g/cm ³
		Absorción	4,11 %
Agregado Fino	IRAM 1505	TMN	4,75 mm
		Módulo de finura	2,90
	IRAM 1520	Densidad relativa real	2,74 g/cm ³
		Densidad relativa aparente del agregado seco	2,70 g/cm ³
		Densidad relativa aparente del agregado saturado superficie seca	2,67 g/cm ³
		Absorción	0,48 %

En la Tabla 3 se indican los resultados de las propiedades evaluadas del hormigón. En la misma se puede observar que para igual dosificación el asentamiento del hormigón preparado con solución UB es mayor al patrón. Con respecto a la resistencia a compresión no se observan diferencias significativas entre las dos muestras. No se observa carbonatación en ninguna de las muestras. La permeabilidad del hormigón UB es sensiblemente menor que la de la muestra patrón. Ambas muestras presentan el mismo porcentaje de absorción.

Tabla 3: Caracterización del hormigón.

Muestras		Patrón	UB
IRAM 1536	Asentamiento	18 [cm]	22 [cm]
IRAM 1546	Resistencia a compresión	25,70 [MPa]	24,25 [MPa]
UNE 12390	Carbonatación	No presenta	No presenta
IRAM 1871	Permeabilidad	6307 [g/m ²]	6169,31 [g/m ²]
	Absorción	6,25 [%]	6,26 [%]

A partir de los resultados obtenidos de la comparación entre el hormigón patrón y hormigón con bacterias (UB) se puede indicar que la incorporación de bacterias a través del agua de amasado modifica las características reológicas del hormigón en estado fresco, pero no representa una alteración significativa en las características del material en estado endurecido. La afectación de las propiedades reológicas del material, genera la necesidad de evaluar hormigones con igual asentamiento en lugar de comparar hormigones con igual dosificación, como se hizo en este estudio. En trabajos anteriores, la presencia de bacterias dentro de la matriz del material se ha evidenciado por la modificación del tiempo de fraguado y la permeabilidad. Sin embargo, en este caso no se observaron cambios en estas propiedades, lo que lleva a suponer que la concentración de bacterias en la solución UB pudo no haber sido adecuada. Dicho esto, queda para trabajos futuros el cambio de concentración bacteriana de la solución UB.

Referencias

- [1] Rupp, S y Cerutti, C., "Biohormigones: viabilidad de las bacterias y su afectación en las propiedades físico-mecánicas del hormigón", Jornada Jóvenes Investigadores Tecnológicos, (2021), 1-2.
- [2] Pérez Gonzalez, T., Valverde Tercedor, C., Jiménez López, C., "Biomíneralización bacteriana de magnetita y aplicaciones", Seminario SEM., 7, (2004), 58-74.
- [3] Tiano, P., Biagiotti, L., Mastromei, G., "Bacterial bio-mediated calcite precipitation for monumental stones conservation: methods of evaluation", Journal of microbiological methods, 36, 1-2, (1999), 139-145.
- [4] Samani, A.K., Berenjian, A., "Bioconcrete: next generation of self-healing concrete", Applied microbiology and biotechnology, 100, (2016), 2591-2602.
- [5] Gonzalez, D., Guillarducci, A., Grether, R., Guerrero, S., Andrés, F., "Precipitación de carbonato de calcio inducida por microorganismos. Evaluación de su utilidad en la reparación de fisuras en morteros de experimentación", Encuentro latinoamericano y europeo de edificaciones y comunidades sostenibles, 3, (2019), 947-953.
- [6] Rupp, S., y Cerutti, C., "Biohormigones: evaluación del agua de amasado", Jornada Jóvenes Investigadores Tecnológicos, (2022), 1-7.

EXPANSION DE PRISMAS DE HORMIGÓN RECICLADO EXPUESTOS AL ATAQUE EXTERNO POR SULFATOS

Lautaro Santillán¹, Claudio Zega²

¹ IITCI, CONICET-UNCo

² LEMIT, CONICET

Palabras Clave: hormigón reciclado, agregado reciclado, ataque por sulfatos, durabilidad.

Alcance

En este trabajo se presentan los resultados preliminares de una campaña experimental cuyo objetivo es la evaluación de hormigones reciclados (HR), expuestos al ataque externo por sulfatos. Los resultados presentados en este trabajo son una actualización de los resultados experimentales presentados en la tesis de grado de referencia [1]. El tipo de exposición es en estado de saturación en sulfato de sodio, y el parámetro de evaluación presentado en este trabajo es la variación longitudinal en el tiempo.

Metodología

En la Tabla 1 se presentan las propiedades de los agregados reciclados (AR) utilizados para dosificar los hormigones reciclados. Los agregados gruesos reciclados AGR-A y AGR-B, fueron elaborados en el laboratorio, moldeando probetas y triturándolas luego de 28 días de curado. El AGR-A proviene de un hormigón de origen con un cemento de buena calidad química (cA: CPN-50-ARS). El agregado AGR-B en cambio, proviene de un hormigón con cemento de mala calidad química (cB: CPF-50-B) pero similar nivel resistente. El agregado AGR-C proviene de la trituración de probetas residuales de ensayos de compresión de rutina del LEMIT-CICPBA. En este caso, no se tiene la trazabilidad del hormigón origen, pero se puede estimar que se trata de hormigones con niveles de resistencia para hormigón armado estructural ($f_c \sim 20$ a 30 MPa).

En términos generales se observa una mayor absorción del AGR-C, explicado por un mayor contenido de mortero de menor calidad. Los ensayos de desgaste y durabilidad dan cuenta de la peor calidad de mortero adherido. Luego, los AGR-A y AGR-B presentan similares densidades y contenidos de polvo, incluso una menor absorción para el AGR-B. Sin embargo, se observa un peor desempeño del AGR-B en el ensayo de durabilidad, lo que puede deberse al elevado contenido de aluminatos de su pasta de cemento (reactividad potencial del agregado).

Tabla 1: Propiedades de los agregados reciclados.

Propiedad	Norma	AGR-A	AGR-B	AGR-C
Absorción, %	IRAM 1533	4,6	4,2	5,4
Densidad, t/m ³	IRAM 1533	2,39	2,4	2,32
Pasa tamiz 75, %	IRAM 1540	1,15	1,23	0,5
Desgaste LA, %	IRAM 1532	24,4	28,8	37,0
Durabilidad, %	IRAM 1525	15,6	24,0	35,6
Contenido de mortero, %	Sin norma	47,6	44,0	50,9

Con los agregados obtenidos, se elaboraron 24 mezclas de hormigón, utilizando diferentes grados de reemplazo, y diferentes calidades en su matriz. En cuanto a la matriz, se elaboraron hormigones con dos relaciones a/c diferentes: la Serie 1 (S1) fue diseñada con una relación agua/cemento de 0,45, que es acorde a las prescripciones del reglamento CIRSOC 201 para hormigones expuestos a un ambiente de agresividad en términos de durabilidad; la Serie 2 (S2) fue diseñada con una relación a/c de 0,60, que no cumple con las prescripciones de durabilidad pero permite al hormigón alcanzar niveles resistentes acordes a un hormigón estructural (> 20 MPa).

En ambas series se diseñaron mezclas con los mismos cementos usados para la obtención de AGR: cemento de buena calidad química (cA) y cemento de mala calidad química (cB). De esta manera tenemos cuatro matrices cementíceas para los packs de agregados. Por otro lado, los porcentajes de reemplazo fueron seleccionados en base a los valores permitidos por algunos reglamentos vigentes en el plano

internacional (20% y 50%). Con fines experimentales, también se realizaron algunas mezclas con un 100% de reemplazo de AR. El resumen de las mezclas es presentado en la Tabla 2.

Con todos los hormigones se moldearon prismas de 75 x 75 x 285 mm, con pernos de acero incrustados en los extremos para tomar mediciones de expansión. Todos los prismas fueron desmoldados a las 24 h de colados, y puestos 27 días a curar en cámara húmeda (HR > 95%; T: 23 ± 2°C). Luego de curados, se los cubrió en los extremos con una pintura epoxi impermeable, para evitar la concentración del ataque cerca de los pernos. Luego de pintados fueron etiquetados apropiadamente y sumergidos en una solución saturada de cal por 3 días. Finalmente, se tomaron las mediciones iniciales de longitud y peso, y se sumergieron en la condición de exposición: solución de sulfato de sodio 50 g/L, con circulación forzada y a una temperatura de 21°C ± 2°C. En la Figura 1 se muestra una fotografía de los prismas en exposición y un esquema del funcionamiento de las bachas. Las mediciones de expansión y variación de peso se realizaron cada una semana durante el primer mes, mensualmente durante los primeros 6 meses, y cada 3 meses de allí en adelante. El pH de la solución fue monitoreado con cada medición de las probetas, y fue corregido mediante la adición de una solución de ácido sulfúrico.

Tabla 2: Resumen de diseño de hormigones reciclados.

Mezcla	a/c	Cemento	% de reemplazo por tipo		
			AGR-A	AGR-B	AGR-C
A4-0	0.45	A	-	-	-
A4-20A	0.45	A	20	-	-
A4-50A	0.45	A	50	-	-
A4-20B	0.45	A	-	20	-
A4-50B	0.45	A	-	50	-
A4-20C	0.45	A	-	-	20
A4-50C	0.45	A	-	-	50
A4-100C	0.45	A	-	-	100
B4-0	0.45	B	-	-	-
B4-20A	0.45	B	20	-	-
B4-50A	0.45	B	50	-	-
B4-20B	0.45	B	-	20	-
B4-20C	0.45	B	-	-	20
A6-0	0.6	A	-	-	-
A6-20B	0.6	A	-	20	-
A6-50B	0.6	A	-	50	-
A6-100B	0.6	A	-	100	-
B6-0	0.6	B	-	-	-
B6-20A	0.6	B	20	-	-
B6-20B	0.6	B	-	20	-
B6-20C	0.6	B	-	-	20
B6-50C	0.6	B	-	-	50

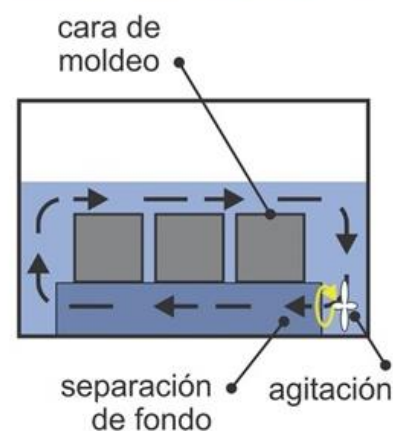


Figura 1 – Exposición de prismas a solución de sulfato de sodio 50 g/L (T: 21°C, pH 7)

Resultados y análisis

En la Figura 2 se muestran las expansiones de los prismas de ambas series, hasta los 3 años de exposición. En términos generales, para el tiempo de exposición evaluado el efecto del agregado reciclado se encuentra limitado por la calidad física de la matriz en primer orden, y por la calidad química de la matriz en segundo orden. Para los hormigones de la Serie 1, no se observan diferencias considerables entre los hormigones patrones y los hormigones reciclados. De hecho, las expansiones parecieran haberse equilibrado en la mayoría de los hormigones, indicando que el ataque externo por sulfatos no se ha desarrollado en el tiempo de ensayo. Para los hormigones de matriz A4 se observaron inclusive, menores expansiones para algunos hormigones reciclados que para el hormigón patrón (A4 50A, A4 50C y A4 100C). En los hormigones de matriz B4 si se observa un pequeño incremento relativo de la mezcla B4 20B en las últimas mediciones, pero futuras mediciones son necesarias para confirmar esta tendencia. Los resultados presentados indican que la mayor calidad física alcanzada por una baja relación a/c (menor porosidad) inhibe el posible efecto de los agregados reciclados, inclusive utilizando AR y cemento de baja calidad química (alto contenido de C₃A).

En cuanto a los hormigones de la Serie 2, si se observan algunos efectos del AR. Para los hormigones de matriz A6, se observa un efecto del contenido de AGR-B, aunque los efectos no son lineales. Se observa una mayor expansión en los hormigones con un 100% y un 20% de reemplazo, mientras que para el hormigón con un 50% de reemplazo las expansiones observadas son similares a las del patrón. Los resultados indican que parte de los AR reaccionaron con los sulfatos externos produciendo expansión en los prismas. Sin embargo, los AR tienen otros efectos en el ataque por sulfatos [2, 3, 4]. La mayor porosidad de los agregados reciclados no solo puede producir un incremento en las propiedades de transporte del hormigón, sino que además puede significar en una menor restricción interna al confinamiento producido por la precipitación de fases expansivas (etringita, yeso). La forma en que los efectos negativos y positivos de los AR se superponen en el desempeño final del material parecen depender de otros factores que requieren profundizar en las investigaciones.

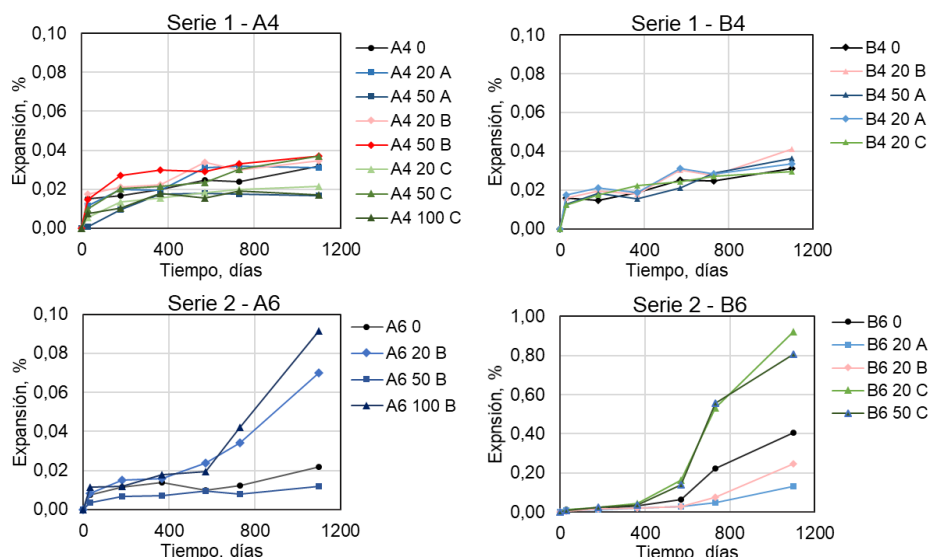


Figura 2 – Expansión de barras de hormigón expuestas a 5% Na_2SO_4

En cuanto a los hormigones de matriz B6, como era de esperar debido a la mala calidad física y química de la matriz, se observan expansiones mucho mayores a las observadas en las otras series (notar la diferente escala utilizada en el eje vertical). En este caso también se observa un efecto del agregado reciclado, pero más vinculado a las características físicas que a las características químicas del mismo. De tal forma, los hormigones con AGR-A y AGR-B mostraron expansiones menores a las del patrón, indicando un efecto resultante positivo gracias a la menor restricción interna de los correspondientes hormigones. Los hormigones con AGR-C mostraron expansiones significativamente mayores a la del patrón, lo que indica que el efecto negativo de una mayor permeabilidad a los sulfatos resultó más determinante.

Conclusiones

Los resultados presentados en este trabajo son un punto de referencia en una temática que aún se encuentra aún bastante inexplorada. Los resultados preliminares señalan que el efecto de los agregados reciclados se encuentra fuertemente controlado por la calidad de la matriz, lo que redundaría en que se podrían elaborar hormigones con agregados reciclados, inclusive de mala calidad química, con las prácticas de buen diseño que existen actualmente. Los resultados de esta campaña experimental en el largo plazo pueden confirmar o desechar estas conclusiones parciales.

Referencias

- [1] Santillán, L.R., "Durabilidad del hormigón reciclado frente al ataque por sulfatos," Universidad Nacional de La Plata, (2020).
- [2] Zega, C.J., Santillán, L.R., Sosa, M.E., Villagrán Zaccardi, Y.A., "Durable Performance of Recycled Aggregate Concrete in Aggressive Environments", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 32, N° 7, (2020), pp. 1-10.
- [3] Boudali, S., Kerdal, D.E., Ayed, K., Abdulsalam, B., Soliman, A.M., "Performance of self-compacting concrete incorporating recycled concrete fines and aggregate exposed to sulphate attack", *Construction and Building Materials*, vol. 124, (2016), pp. 705-713. Disponible online en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.058>.
- [4] Lee, S., Swamy, R.N., Kim, S., Park, Y., "Durability of Mortars Made with Recycled Fine Aggregates Exposed to Sulfate Solutions", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 20, N° 1, (2008), pp. 63-70.

ISBN 978-631-90193-0-8



9 786319 019308