

Revista **ALCONPAT**

Revista Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y
Recuperación de la Construcción

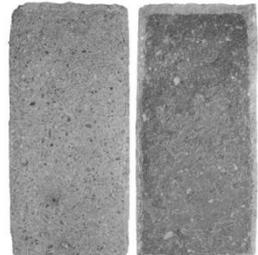
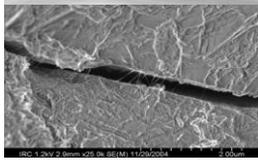
Número Completo DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v5i2>
revistaalconpat@gmail.com

eISSN: 2007-6835

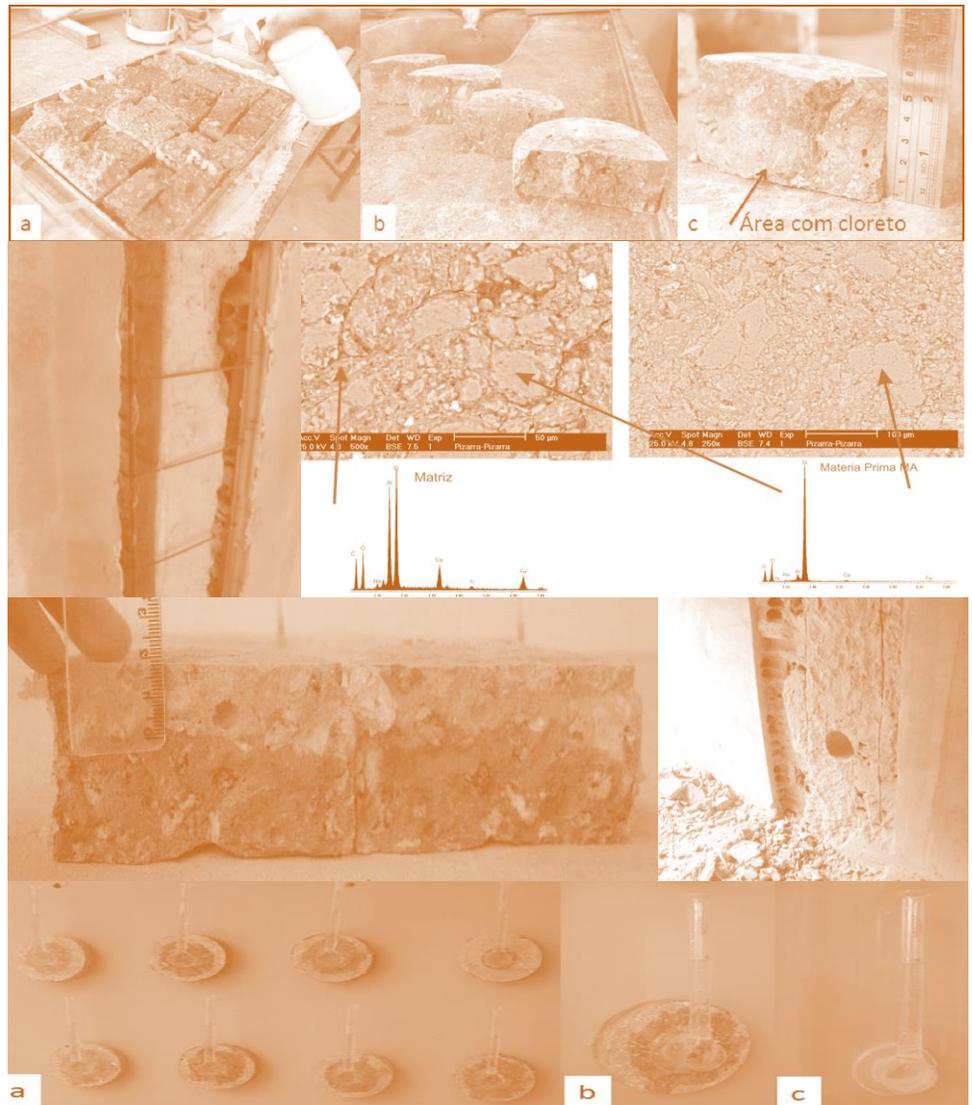
Volumen 5

Mayo – Agosto 2015

Número 2



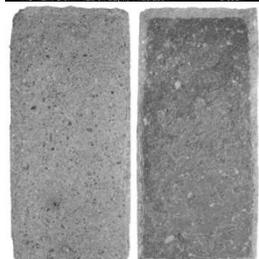
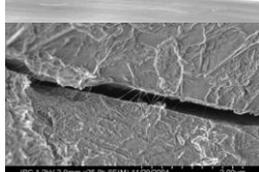
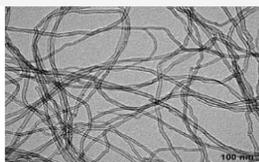
2% aos 28 dias 2% aos 56 dias



Revista Latinoamericana de Control, de Calidad Patología y
Recuperación de la Construcción

<http://www.revistaalconpat.org>





2% aos 28 dias 2% aos 56 dias

CONTENIDO

Página

E. F. Irassar, V. L. Bonavetti, G. Menéndez, M. F. Carrasco: Hidratación y propiedades de cementos ternarios con filler calcáreo y escoria. 83

C. G. N. Marcondes, M. H. F. Medeiros, J. Marques Filho, P. Helene: Nanotubos de carbono en concreto de cemento Portland. Influencia de la dispersión en las propiedades mecánicas y en la absorción de agua. 96

D. Martínez-Vásquez, D. E. Ortega-Zavala, G. Vargas Gutiérrez, A. F. Fuentes, J. I. Escalante-García: Potencial del método de síntesis de materiales cerámico-cementicios procesados por vías alternativas. 114

D. C. S. Amorim, D. R. C. Oliveira: Refuerzo estructural de una edificación histórica en la Ciudad de Rio Branco- Acre. 124

Artículos de Revisión:

G. T. Ferraz, J. De Brito, V. P. De Freitas, J. D. Silvestre: Sistemas de gestión técnica integrada de edificios: inspección y reparación de elementos no estructurales. 137

L. V. Real, D. R. B. Oliveira, T. Soares, M. H. F. Medeiros: Método colorimétrico por aspersión de nitrato de plata para la evaluación de la penetración de cloruros en concreto: estado del arte. 149

ALCONPAT Internacional

Miembros Fundadores:

Liana Arrieta de Bustillos – **Venezuela**
Antonio Carmona Filho - **Brasil**
Dante Domene – **Argentina**
Manuel Fernández Cánovas – **España**
José Calavera Ruiz – **España**
Paulo Helene, **Brasil**

Junta Directiva Internacional:

Presidente de Honor

Paulo Do Lago Helene, **Brasil**

Presidente

Angélica Ayala Piola, **Paraguay**

Director General

Pedro Castro Borges, **México**

Secretario Ejecutivo

José Manuel Mendoza Rangel, **México**

Vicepresidente Técnico

Pedro Garcés Terradillos, **España**

Vicepresidente Administrativo

Margita Kliewer, **Paraguay**

Gestor

Bernardo Tutikian, **Brasil**

Revista ALCONPAT

Editor en Jefe:

Dr. Pedro Castro Borges
Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del
Instituto Politécnico Nacional, Unidad Mérida
(CINVESTAV IPN – Mérida)
Mérida, Yucatán, **México**

Co-Editor en Jefe:

MSc. Sergio Raúl Espejo Niño
PhD en Estructuras UPM, Gestión Civil Ingeniero
Bogotá, **Colombia**

Editor Ejecutivo:

Dr. José Manuel Mendoza Rangel
Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de
Ingeniería Civil
Monterrey, Nuevo León, **México**

Editores Asociados:

Dr. Manuel Fernandez Canovas
Universidad Politécnica de Madrid.
Madrid, **España**

Ing. Raúl Husni

Facultad de Ingeniería Universidad de Buenos Aires.
Buenos Aires, **Argentina**

Dr. Paulo Roberto do Lago Helene

Universidade de São Paulo.

São Paulo, **Brasil**

Dr. José Iván Escalante García

Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del
Instituto Politécnico Nacional (Unidad Saltillo)
Saltillo, Coahuila, **México**.

Dr. Mauricio López.

Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción,
Escuela de Ingeniería,
Pontificia Universidad Católica de Chile
Santiago de Chile, **Chile**

Dra. Oladis Troconis de Rincón

Centro de Estudios de Corrosión
Universidad de Zulia
Maracaibo, **Venezuela**

Dr. Fernando Branco

Universidade Técnica de Lisboa
Lisboa, **Portugal**

RAV5N2, Mayo - Agosto 2015

Mensaje del Editor en Jefe

REVISTA LATINOAMERICANA DE CONTROL DE CALIDAD, PATOLOGÍA Y RECUPERACIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN

<http://www.revistaalconpat.org>

Es motivo de satisfacción y alegría para el equipo de la Revista ALCONPAT ver publicado el segundo número de nuestro quinto año al aire.

El objetivo de la Revista ALCONPAT (RA) es la publicación de casos de estudio relacionados con los temas de nuestra asociación, o sea control de calidad, patología y recuperación de las construcciones motivando desde luego la presentación de investigaciones básicas o aplicadas que pudiesen tener aplicación con los casos de estudio.

En este V5N2, iniciamos con nuestro artículo especial invitado procedente de **Argentina**. Edgardo F. Irassar y colegas discuten la hidratación y propiedades de cementos ternarios con filler calcáreo y escoria. Sus resultados mostraron una limitación del contenido de filler para obtener una respuesta adecuada de la resistencia mecánica y durable a largas edades, y del contenido de escoria para obtener valores apropiados a temprana edad

En el segundo trabajo, C. G. N. Marcondes y sus colegas de **Brasil** discuten la influencia de la dispersión en las propiedades mecánicas y la absorción de agua de nanotubos de carbono en concreto de cemento Portland. La técnica ultrasónica fue relevante para obtener la dispersión de los nanotubos y con ello una mejora de las propiedades mecánicas

El tercer artículo D. Martínez-Vásquez y colegas de **México** estudian el potencial del método de síntesis de materiales cerámico-cementicios procesados por vías alternativas. Entre sus resultados reportan que el procesamiento propuesto fue prometedor para obtener altas propiedades mecánicas en tiempos de curado cortos.

Nuestro cuarto artículo viene de **Brasil**, donde Denis Cley S. Amorim y Dênio Ramam C. Oliveira muestran un trabajo de Refuerzo Estructural de un Edificio Histórico en la Ciudad de Río Blanco en

Arce. Es de destacar y discutir el aspecto del encamisamiento de elementos para el refuerzo

El quinto trabajo de este número lo escriben Goncalo T. Ferraz, Jorge de Brito y sus colegas de **Portugal**, realizan un trabajo de sistemas de gestión integrada en edificios. Llama mucho la atención su modelo en donde toman en cuenta diversos cuadros de patología para la gestión de edificios

En el sexto artículo proveniente de **Brasil**, J. Ligia. V. Real y colegas presentan el estado del arte sobre el método colorimétrico por pulverización de nitrato de plata para evaluar la penetración de cloruros en el concreto. Entre sus resultados reportan la influencia del tipo de cemento en la respuesta del método colorimétrico

Cada número de RA busca balancear la participación de temas afines al objeto social de la ALCONPAT Internacional. Sin duda, los artículos de este número constituirán una referencia importante para el público.

Agradecemos a nuestros autores de este número su voluntad y esfuerzo para cumplir con la calidad y tiempos establecidos.

Cada número de la revista aparecerá con los artículos en su idioma original, y antes del siguiente número se darán de alta las versiones en los demás idiomas. Los idiomas oficiales de la Revista ALCONPAT son Inglés, Español y Portugués

Por el Consejo Editorial



Pedro Castro Borges
Editor en Jefe



Hidratación y propiedades de cemento ternarios con filler calcáreo y escoria

E. F. Irassar¹, V. L. Bonavetti¹, G. Menéndez², M. F. Carrasco³

¹ Facultad de Ingeniería - CIFICEN (CONICET-UNCPBA) - B7400JWI - Olavarría, Argentina

² Actualmente en la Universidad Tecnológica Nacional, Puerto Madryn, Chubut, Argentina

³ Actualmente en la Universidad Tecnológica Nacional, Regional Santa Fe, Argentina

Información del artículo

DOI:

<http://dx.doi.org/10.21041/ra.v5i2.79>

Artículo recibido el 22 de Diciembre de 2014, revisado bajo las políticas de publicación de la Revista ALCONPAT y aceptado el 23 de Abril de 2015. Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el segundo número del año 2016 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del primer número del año 2016.

© 2015 ALCONPAT Internacional

Información Legal

Revista ALCONPAT, Año 5, No. 2, Mayo – Agosto 2015, es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A.C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat_int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org
Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida Yucatán, C.P. 97310, fecha de publicación: 30 de mayo de 2015.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor. Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

RESUMEN

El filler calcáreo produce un incremento de la hidratación temprana debido al efecto físico (relleno y nucleación heterogénea). El efecto de dilución contrarresta este beneficio y limita su contenido. La escoria reacciona lentamente, provoca el refinamiento de granos y poros, y mejora las propiedades mecánicas y durables. En este trabajo se estudia la hidratación de cementos con filler (0 a 20 %) y Escoria (0 a 35%), empleando el modelo de Powers ampliado por Chen & Browsers para escoria. A partir de los resultados de la hidratación, se analizan la resistencia mecánica del hormigón ($a/mc = 0.50$), y el proceso de segmentación de poros en relación con la tasa de absorción capilar. Los resultados muestran una limitación del contenido de filler para obtener una respuesta adecuada de la resistencia mecánica y durable a largas edades, y del contenido de escoria para obtener valores apropiados a temprana edad.

Palabras clave: filler calcáreo; escoria; resistencia; absorción capilar; hidratación.

ABSTRACT

Limestone filler (F) produces an increase of early hydration due to the physical effect (filling and heterogeneous nucleation). The dilution effect reduces this benefit limiting the F content. Granulated blast furnace slag reacts slowly causing the grain and pore size refinements, and improve mechanical and durable properties. In this paper, the hydration of cements with F (0-20%) and GBFS (0-35%) is studied using the model of Powers extended by Chen & Browsers for slag. From the results of the hydration, the mechanical strength of concrete ($w/cm = 0.50$), and the pore segmentation process is analyzed in relation to the sorptivity rate. Results show that filler content should be limited for an adequate mechanical strength and long term durable properties and slag content should be limited for appropriate early properties

Keywords: calcareous filler; slag; resistance; capillary absorption; hydration.

RESUMO

Filler calcáreo produz uma aceleração da hidratação nas primeiras idades devido ao efeito físico (compactação e nucleação heterogênea). O efeito de diluição neutraliza os benefícios e limita o seu conteúdo. A escória reage lentamente, fazendo com que o refinamento dos grãos e poros, e melhora as propriedades mecânicas e duráveis. Neste trabalho a hidratação do cimento com filler (0-20%) e escória (0-35%) é estudada usando o modelo de Powers ampliado por Chen Browsers para escória de alto forno. A partir dos resultados de hidratação, é analisada a resistência do concreto (com $a/c = 0,50$), e o processo de segmentação de poros é analisado com relação a taxa de absorção capilar. Os resultados mostram que o teor de filler deve ser limitado para obter uma resposta de resistência mecânica e de durabilidade. Também o conteúdo de escória deve ser limitado para obter propriedades adequadas nas primeiras idades.

Palavras chave: filler calcáreo; escória; resistência; absorção capilar; hidratação.

Autor de contacto: Edgardo Fabian Irassar (irassar@fio.unicen.edu.ar)

1. INTRODUCCIÓN

Las adiciones minerales han cobrado vital importancia en la formulación de mezclas cementíceas debido a la necesidad de reducción del consumo de energía, la protección de los recursos minerales naturales y la disminución de emisiones de gases que contribuyen al efecto invernadero. Para lograr los objetivos sostenibilidad, también es necesario que la mezcla formulada contribuya a una mayor vida útil de las estructuras de hormigón del cual formará parte.

Durante las últimas décadas, los esfuerzos para conocer el comportamiento del hormigón con adiciones minerales naturales (puzolanas, filler calcáreo), adiciones activadas térmicamente (arcillas calcinadas) o subproductos industriales (cenizas volante, escoria de alto horno, humo de sílice) se han incrementado (CEMBUREA, 2000 – 2010). Para formular cementos binarios se han utilizado distintas combinaciones de adiciones minerales en función de los recursos disponibles en cada región o país. A partir de 1990, el uso de los cementos ternarios o compuestos formulados con clinker portland y dos adiciones minerales ha crecido porque presentan varias ventajas sobre los cementos binarios. La norma de cementos europea (EN 197-1), mexicana (NMX C-414-0) y argentina (IRAM 5000) han normalizado los cementos compuestos que contienen hasta el 35 % en peso de una combinación de dos adiciones y actualmente se planea aumentar esta proporción hasta el 55 %. En EE.UU., la norma ASTM C 1157 incorporó los cementos hidráulicos basados en el rendimiento que no limitan el tipo y la cantidad de adiciones minerales que puede mezclarse con el cemento portland.

Las adiciones a combinar se eligen de manera que la deficiencia de una adición mineral sea compensada por la virtud de la otra y la sinergia producida mejore el comportamiento del material cementíceo ternario. Finalmente, las propiedades mecánicas y durables del hormigón dependerán del proceso de hidratación que determinará la porosidad y la conectividad de la estructura porosa de la matriz, como así también del mejoramiento de la interfaz pasta-agregado (Soroka, 1979).

La hidratación del cemento portland es un proceso de naturaleza fisicoquímica compleja en el cual influyen factores propios del cemento portland (composición mineralógica, álcalis, sulfatos, finura, etc), de las condiciones de la mezcla (relación a/c, contenido unitario de cemento) y del ambiente (temperatura y humedad relativa). Cuando se incorporan adiciones minerales al cemento portland, los efectos que producen sobre la hidratación pueden separarse arbitrariamente en tres (Cyr et al, 2006):

- El **efecto de dilución** es la consecuencia del reemplazo parcial de una parte del cemento por la adición mineral, que disminuye la cantidad de cemento y, consecuentemente produce un aumento en la relación agua/cemento efectiva. Para un mismo grado de hidratación del material cementíceo, este efecto implica un menor volumen de productos hidratados del cemento.

- Los **efectos físicos** que producen las adiciones finamente molidas son: el efecto filler y la nucleación heterogénea. El efecto filler produce que las partículas finas de las adiciones rellenen el espacio vacío entre los granos de cemento modificando su empaquetamiento granular que implica un cambio en la porosidad inicial de la pasta. Este efecto modifica positivamente o negativamente la demanda de agua requerida para mantener una trabajabilidad dada de acuerdo a la granulometría y la proporción de adiciones.

- El **efecto químico** que es la propia reacción puzolánica o cementante de la adición mineral en la cual participan en distinto grado las fases previamente hidratadas como es el caso del hidróxido de calcio (CH). En el caso particular del filler calcáreo, la reacción del carbonato de calcio y el aluminato tricálcico del clinker portland produce la formación de carboaluminato de calcio hidratado

(generalmente fase AFm: Aluminoferrito monosustituido) (Bonavetti et al, 2001); sin embargo, esta adición no genera durante su hidratación silicato de calcio hidratado (CSH) (Sersale, 1992).

Cuando se utilizan adiciones minerales inactivas, la influencia de los dos primeros efectos es fácil de cuantificar con el agua químicamente combinada y el modelo de Powers and Brownyard (Powers, 1948; Browsers, 2004, 2005) como es el caso del filler calcáreo ya presentado (Bonavetti et al, 2003; Bentz et al, 2009; Bonavetti et al, 2013). Mientras que cuando la adición presenta un efecto químico resulta más compleja su cuantificación y se requiere de modelos que permitan determinar el aporte de la adición a este parámetro.

Las propiedades del hormigón y su evolución en el tiempo dependen en gran medida del avance de la hidratación del cemento que determina la evolución de la porosidad de la matriz (Bentz et al, 2009). En los cementos ternarios compuesto por filler y escoria este proceso depende en gran medida de la proporciones relativas de los componentes. El filler contribuye a la hidratación en la etapa inicial y la escoria contribuye con su hidratación en el mediano plazo, y las propiedades del hormigón que constituyen varían de acuerdo a la evolución de este proceso.

El objetivo de este trabajo es analizar la resistencia a compresión y de la tasa de absorción capilar en hormigones elaborados con cemento compuestos que contienen filler calcáreo y escoria de alto horno en relación con los procesos de hidratación del material cementíceo.

2. PROCEDIMIENTO

En los hormigones estudiados se ha utilizado cemento portland normal (CPN, IRAM 50000) de clase resistente CP40 ($f'c > 40$ MPa a 28 días) con bajo contenido de C_3A ($< 3\%$). Las adiciones utilizadas son filler calcáreo (F) y escoria granulada de alto horno (E). F proviene de una caliza con alto contenido de calcita molido a una finura Blaine de $522 \text{ m}^2/\text{kg}$. E es una escoria enfriada y molida a una finura Blaine aproximada de $450 \text{ m}^2/\text{kg}$. La escoria es clasificada como de alta actividad de acuerdo al índice con cemento determinado de acuerdo a la norma ENV 196-1. Las combinaciones de los cementos binarios y ternarios utilizados se informan en la Tabla 1.

Los hormigones se elaboraron en dos etapas utilizando arena silíceo de río como agregado fino y piedra granítica triturada como agregado grueso (tamaño máximo 19 mm), el contenido de material cementíceo (CUMC) fue de 350 y $360 \text{ kg}/\text{m}^3$ y en todos los casos la relación a/mc (agua/material cementíceo) de 0,50. Los detalles completos de los hormigones de la primera etapa y segunda etapa han sido previamente publicados (Menéndez et al, 2006, 2007; Carrasco et al, 2003).

La resistencia se determinó en probetas cilíndricas (100 x 200 mm) curadas 24 horas en los moldes y posteriormente en agua saturada con cal a 20 ± 1 °C hasta alcanzar la edad de ensayo. Los valores informados son el promedio de cinco probetas. Para los hormigones de la primera etapa, la resistencia a compresión se determinó a 3, 7, 28, 90 y 360 días, y para los de la segunda etapa a 2, 7 y 28 días.

En los hormigones de la primera etapa, el coeficiente de absorción capilar se determinó en probetas prismáticas cuyas las caras laterales fueron pintadas con pintura epoxi excepto la cara correspondiente al moldeo en la cual se dejó sin pintar un área de 100 cm^2 . Seguidamente Los prismas fueron sumergidos a una profundidad constante de 1 cm. La cantidad de agua absorbida se midió como la ganancia de peso a 1, 5, 10, 15, 30, 60, 120, 240, 360, 720, 1440 y 2880 minutos, y la tasa de absorción capilar (S) de los hormigones como la pendiente de la gráfica entre la cantidad de agua absorbida por unidad de área versus la raíz cuadrada del tiempo en la zona comprendida entre 1 hora y mientras se mantenga la linealidad (Menéndez et al, 2002).

La cantidad de agua no evaporable (W_n) se determinó de acuerdo al procedimiento propuesto por

Powers (Powers, 1949; Escalante-Garcia, 2005) de los fragmentos obtenidos de las probetas ensayadas. Para la composición mineralógica promedio de los cementos portland utilizados, la cantidad de agua no evaporable del cemento empleado para lograr la hidratación total es 0.195 g de agua por g de cemento. Asumiendo las hipótesis del modelo de hidratación propuesto por Chen & Brouwers (2007a), para la hidratación total de la escoria utilizada, se requiere de 0.20 g de agua por g de escoria. Para este caso particular, debido a la pequeña diferencia que existe entre el W_n total para la hidratación del tipo de cemento utilizado (bajo C_3A) se asume un valor de 0.20 g/g para el cemento y la escoria. Al hacer coincidir los valores del W_n total es posible calcular el grado de hidratación del conjunto del material cementíceo. Con el grado de hidratación calculado, a partir del modelo de Powers (Powers, 1948; Brouwers, 2004, 2005) y del modelo de Chen & Brouwers (2007b) para los cementos con escoria es posible estimar los volúmenes de las fases hidratadas asumiendo que el filler calcáreo es hidráulicamente inactivo y que la totalidad de la escoria incorporada reacciona. Calculando el volumen de productos hidratados y conociendo el espacio libre generado por la razón agua/cemento efectiva y se puede calcular la relación gel-espacio (X) y la porosidad capilar (ϕ) de la matriz cementíceo del hormigón siguiendo las expresiones descriptas previamente (Bonavetti et al, 2013).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 1 muestra los resultados obtenidos para el agua combinada (W_n), la resistencia a compresión (f'_c) y de la tasa de absorción capilar (S) para los distintos hormigones y edades incluidas en el presente estudio. Como era de esperar, el transcurso del tiempo de curado incrementa el contenido de agua combinada, la resistencia a la compresión y disminuye la tasa de absorción capilar.

En relación con el hormigón de referencia (CP o CPN) se puede observar que el filler calcáreo contribuye al contenido de W_n de temprana edad y que la contribución de la escoria es apreciable luego de los siete días de hidratación días. Para los hormigones con cementos binarios con filler calcáreo, la cantidad de W_n relativa al contenido de material reactivo aumenta cuando se incrementa el nivel de reemplazo a temprana edad (Figura 1a) y luego el progreso de la hidratación de la fase portland tiende a minimizar esta ventaja. Para los cementos binarios con escoria (Figura 1b), la incorporación de escoria produce una disminución relativa del W_n a temprana edad. A partir de los 7 días, la escoria reacciona lentamente y el W_n relativo aumenta alcanzando a los 28 días un valor similar al del cemento portland de referencia.

Tabla 1. Composición del material cementíceo, agua combinada (Wn), resistencia a compresión (f'_c), tasa de absorción capilar (S); grado de hidratación (α), relación gel/espacio (X) y porosidad capilar (ϕ) de los hormigones en estudio.

Hormigón	CUMC,kg/m ³	F, %	E, %	Edad días	Wn	f'_c MPa	S, g/cm ² h ^{1/2}	a/c efect	α	X	ϕ , %
CP	350	0	0	3	10.04	18.3	0.222	0.50	0.515	0.536	30.9
				7	11.77	25.5	0.181		0.604	0.603	27.7
				28	13.29	36.0	0.100		0.682	0.657	24.8
				90	16.76	39.0	0.081		0.859	0.768	18.2
				360	17.71	41.3	0.081		0.908	0.796	16.4
CPN	360	0	0	2	10.66	15.9	--	0.50	0.547	0.561	29.8
				7	11.74	27.4	--		0.602	0.602	27.7
				28	14.91	34.0	--		0.764	0.711	21.7
CP12F	350	12	0	3	10.96	20.6	0.214	0.57	0.562	0.520	36.0
				7	14.21	28.3	0.126		0.729	0.630	29.9
				28	15.41	34.5	0.093		0.790	0.667	27.6
				90	17.85	38.4	0.063		0.915	0.736	22.9
				360	18.28	39.6	0.065		0.937	0.748	22.1
CP18F	350	18	0	3	11.36	20.9	0.288	0.61	0.583	0.506	39.5
				7	15.32	27.2	0.214		0.786	0.631	32.0
				28	16.50	35.2	0.097		0.846	0.665	29.7
				90	18.20	37.7	0.068		0.933	0.711	26.5
				360	18.91	38.0	0.062		0.970	0.730	25.2
CPN15F	360	15	0	2	11.66	18.0	--	0.59	0.598	0.531	36.7
				7	12.70	27.0	--		0.651	0.566	34.7
				28	16.10	32.7	--		0.826	0.671	28.3
CP20E	350	0	20	3	9.18	16.6	0.288	0.50	0.471	0.501	32.6
				7	11.72	25.0	0.214		0.601	0.601	27.8
				28	13.72	34.7	0.097		0.704	0.672	24.0
				90	16.95	41.5	0.068		0.869	0.774	17.8
				360	18.46	43.5	0.062		0.947	0.817	15.0
CPN35E	360	0	35	2	8.31	11.1	--	0.50	0.426	0.464	34.2
				7	10.78	21.4	--		0.553	0.566	29.5
				28	13.81	29.0	--		0.708	0.675	23.8

Tabla 1. (Continuación)

Hormigón	CUMC, kg/m ³	F, %	E, %	Edad días	Wn l	f' _c MPa	S, g/cm ² h ^{1/2}	a/c efect	α	X	φ, %
CP12F10E	350	12	10	3	10.39	19.4	0.208	0.57	0.533	0.500	37.1
				7	13.27	28.4	0.147		0.681	0.600	31.6
				28	14.33	36.6	0.111		0.735	0.634	29.6
				90	17.97	39.4	0.069		0.922	0.740	22.7
				360	18.55	40.0	0.063		0.951	0.755	21.6
CP12F20E	350	12	20	3	9.18	15.6	0.236	0.57	0.471	0.453	39.4
				7	11.72	28.2	0.194		0.601	0.547	34.6
				28	13.72	36.9	0.113		0.704	0.614	30.8
				90	16.95	39.3	0.050		0.869	0.711	24.7
				360	18.46	39.7	0.047		0.947	0.753	21.8
CP18F10E	350	18	10	3	11.14	19.1	0.238	0.61	0.571	0.499	39.9
				7	14.55	26.1	0.196		0.746	0.609	33.4
				28	15.68	35.4	0.137		0.804	0.642	31.3
				90	18.27	38.3	0.105		0.937	0.713	26.4
				360	19.13	38.8	0.086		0.981	0.735	24.8
CP18F20E	350	18	20	3	10.92	15.3	0.249	0.61	0.560	0.491	40.3
				7	14.15	24.4	0.199		0.726	0.596	34.2
				28	15.50	34.6	0.126		0.795	0.637	31.6
				90	17.62	37.7	0.061		0.904	0.696	27.6
				360	18.65	38.2	0.062		0.956	0.723	25.7
CPN6F22E	360	6	22	2	9.05	16.3	--	0.53	0.464	0.472	36.0
				7	13.25	27.1	--		0.680	0.628	28.0
				28	14.16	36.9	--		0.726	0.658	26.3
CPN11F11E	360	11	11	2	10.46	18.7	--	0.56	0.536	0.506	36.3
				7	12.89	27.8	--		0.661	0.592	31.7
				28	16.21	34.4	--		0.831	0.696	25.4
CPN22F6E	360	22	6	2	9.84	14.2	--	0.64	0.504	0.435	45.4
				7	14.53	24.6	--		0.745	0.587	36.5
				28	15.42	29.6	--		0.791	0.613	34.8

La contribución de la escoria al Wn corresponde a la reacción cementante de la escoria cuyos principales productos de hidratación son el silicato de calcio aluminio (C-A-S-H) con una menor relación C/S que la correspondiente al C-S-H, hidrocalcita (M_5AH_{13}) y ettringita ($C_3A.3CS.H_{32}$) (Chen & Brouwers, 2004). Esta reacción es inicialmente estimulada por la solución alcalina que contiene el CH provisto por la hidratación del cemento portland.

Para los hormigones con cementos ternarios de bajo (Figura 1c) y alto contenido de filler (Figura 1d) con contenido variable de escoria se observa que Wn es ligeramente mayor al hormigón de referencia para el primer caso y mucho mayor a temprana edad para el segundo caso y tiende a converger a las 90 días.

En consonancia con los resultados previos sobre morteros acerca de la hidratación del sistema cementos binarios y ternarios con filler calcáreo y escoria (Menendez et al, 2003; Carrasco et al, 2007), se puede observar que los efectos de las adiciones (dilución, efectos físicos y químicos) causan variaciones del Wn.

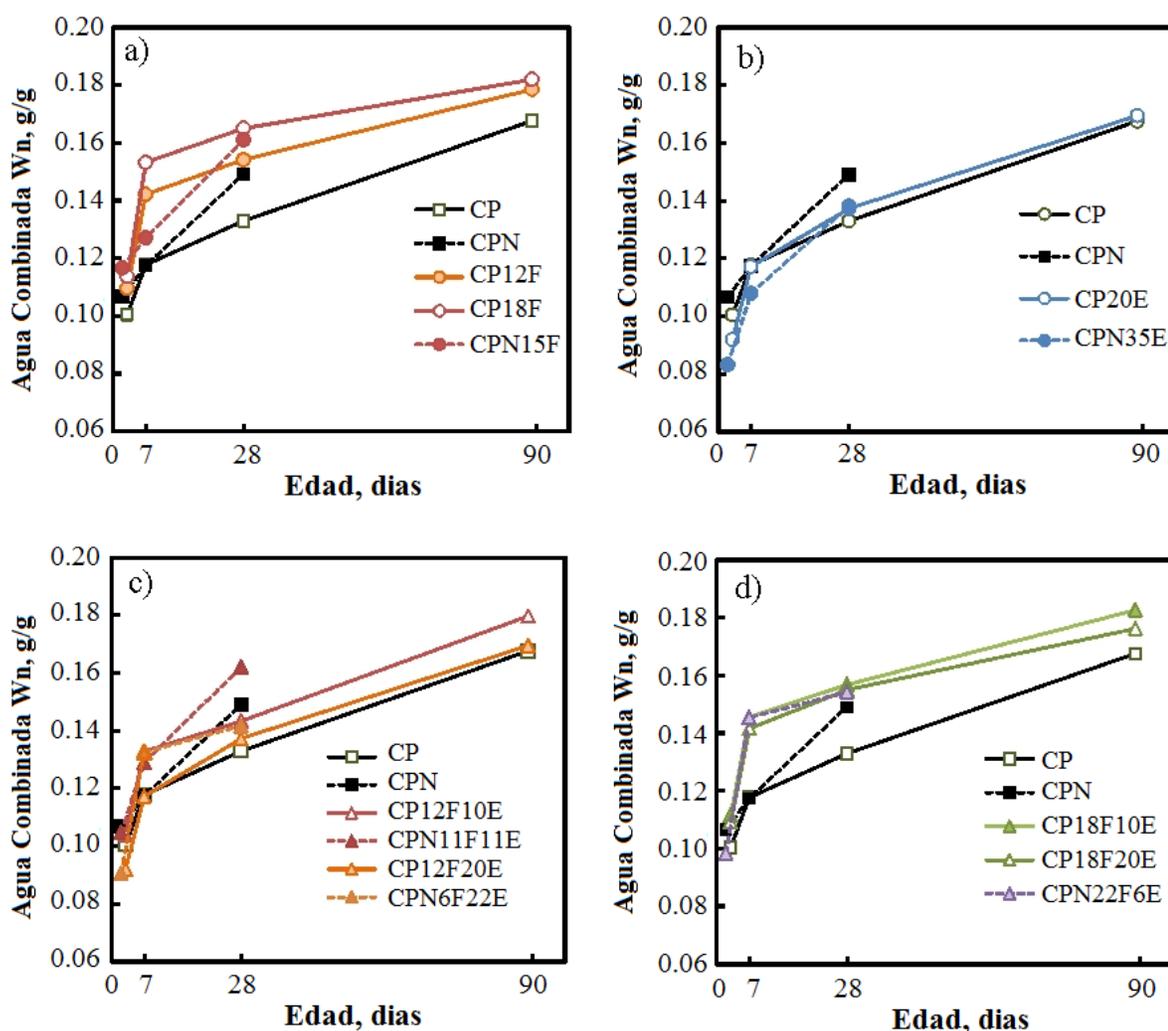


Figura 1. Evolución del agua no evaporable (Wn) en la matriz del hormigón en función del tiempo. a) Cementos binarios con filler calcáreo; b) Cementos binarios con escoria; c) Cementos ternarios con baja proporción de filler, d) Cementos ternarios con alta proporción de filler.

Los efectos físicos aparecen fundamentalmente durante los primeros días de hidratación y la contribución química de la escoria es apreciable luego de los siete días de hidratación. La dilución es un efecto presente en todas las edades.

El incremento del porcentaje de adición mineral en el cemento portland causa el efecto de dilución que disminuye la cantidad de cemento portland y consecuentemente produce un cambio de la relación agua/cemento efectiva. Para el caso del sistema filler calcáreo-escoria, el mismo puede ser calculado como lo indica la ecuación (1).

$$a/c_{\text{efectiva}} = A / (C + \chi_f F + \chi_E E) \quad (1)$$

Donde A, C, F y E es la cantidad en peso de agua, cemento portland, filler calcáreo y escoria utilizados en la mezcla. χ_f y χ_E son el factor de eficiencia del filler calcáreo y de la escoria utilizada, respectivamente. Este factor representa una medida del comportamiento relativo de cada adición comparada con el cemento portland y el mismo depende del tipo de cemento portland utilizado, la edad, el tipo y la cantidad de adición usada en la mezcla y la relación a/c inicial (Cyr et al, 2000).

Cuando se considera que el filler calcáreo es una adición mineral inactiva, el factor de eficiencia χ_f tiende a 0 y por lo tanto produce un incremento de la relación a/c efectiva proporcional al contenido de adición en el cemento. Para la escoria el valor de χ_E varía en el tiempo, el nivel de reemplazo y el cemento usado. A largas edades (>90 días), el valor de $\chi_E > 1$ incrementando la resistencia y disminuyendo la permeabilidad. A los 28 días, el valor χ_E varía de 0.79 a 1.5 para un 50% de reemplazo siendo necesario aumentar el CUMC y reducir la a/mc para alcanzar una resistencia similar a la del cemento portland (Boukhatem et al, 2011). Para simplificar los cálculos, en este trabajo se asume que el χ_f es nulo y que $\chi_E = 1$ para todas las edades.

Para un mismo grado de hidratación del cemento portland, el efecto de dilución causado por el filler ($\chi_f = 0$) produce un menor volumen de productos hidratados y por lo tanto una menor cantidad de agua combinada con respecto al total del material cementíceo incorporado. La reducción del volumen de productos de hidratación en las primeras edades para elevados porcentajes de adición conduce a una menor resistencia a compresión. Para bajos porcentajes de adición (Menendez et al, 2003), la nucleación heterogénea incrementa el grado de reacción de material cementíceo y puede compensar en parte la dilución. El efecto filler produce que las partículas finas de las adiciones rellenen el espacio vacío entre los granos de cemento modificando su empaquetamiento granular que implica un cambio en la porosidad inicial de la pasta y consecuentemente la resistencia también puede incrementarse levemente.

En este estudio se ha utilizado una relación a/mc constante en la mezcla de hormigón, por lo tanto el espacio a ocupar por parte de los productos de hidratación será el mismo. La diferencia estará dada por la cantidad de material que ha reaccionado a cada edad que determina la relación gel/espacio del sistema. Consecuentemente, para conocer la influencia del contenido de adición sobre cualquier propiedad resistente o durable, es necesario estudiar el volumen de productos de hidratación que se produce, de acuerdo al grado de hidratación (α) del material cementíceo.

En la Tabla 1 se informan los valores de la relación a/c efectiva calculados para cada uno de los hormigones estudiados asumiendo las hipótesis planteadas. Partiendo del W_n se puede estimar el grado de hidratación del cemento portland dividiendo este valor por el agua total necesaria para hidratar la totalidad del cemento portland. Mientras que para la escoria, el grado de hidratación fue calculado a partir de la diferencia entre el agua combinada total menos el agua combinada de

la fracción de cemento portland en la mezcla, dividido el agua total necesaria para hidratar la totalidad de la escoria. Seguidamente se calculó el volumen de los productos de hidratación según el modelo de Chen & Brouwers (2007b) y finalmente la relación gel/espacio (X) cuyos valores se informan en la Tabla 1.

La resistencia a compresión de un material de base cementícea (f'_c) se puede calcular como la resistencia intrínseca (f_0) del material afectada por la relación gel/espacio (X) elevado a la n (2).

$$f'_c = f_0 X^n \quad (2)$$

La Figura 2 muestra la relación que existe entre la resistencia a compresión y la relación gel/espacio obtenida utilizando este modelo simplificado. Los coeficientes de la ecuación (2) obtenida mediante la mejor aproximación por mínimos cuadrados, para cada tipo de cemento se informan en la Tabla 2. Para todos los grupos se observa que el valor de la resistencia intrínseca de este material de base cementícea (hormigón) es aproximadamente 75 MPa y el coeficiente n varía de 2.0 a 2.3 cuyos valores se encuentran dentro de los informados por la literatura.

Esta buena correlación entre los resultados experimentales de la resistencia a compresión de los hormigones elaborados con distintos materiales cementíceos, con proporciones variables de filler calcáreo y escoria, en mezclas binarias y ternarias, confirman que los postulados de los modelos de hidratación simplificados de Powers que luego han sido revisados y ampliados por Chen & Brouwers son aceptables para el sistema estudiado. Esta observación cobra importancia para el diseño de hormigones con cementos multicomponentes que permiten el diseño de los reemplazos a partir del objetivo resistente o durable buscado.

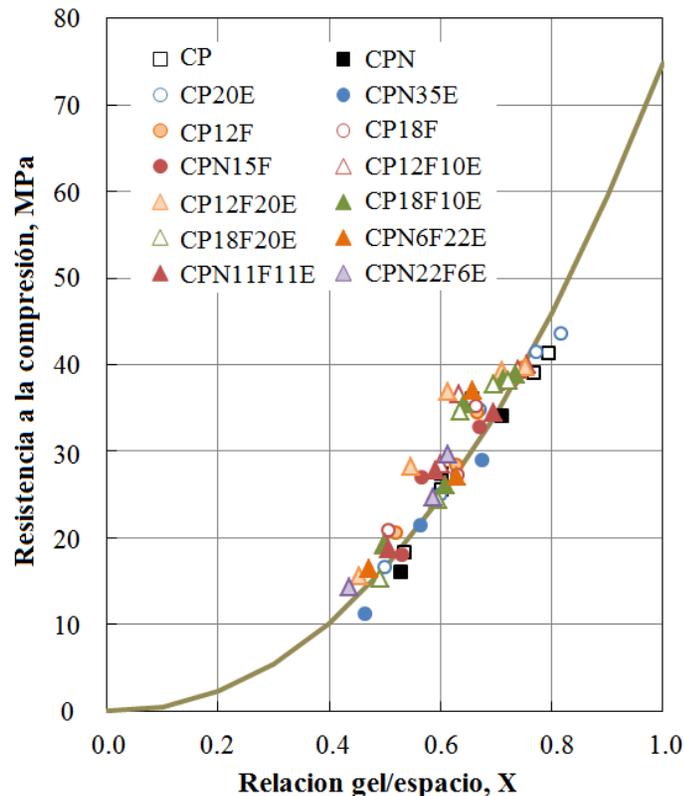


Figura 2. Resistencia a compresión vs relación gel espacio para todos los hormigones estudiados.

Tabla 2: Coeficientes de la ecuación que relaciona $f'c$ y la relación gel/espacio.

Hormigones incluidos en la correlación	f_0	n	R^2
Cemento Portland (CP, CPN)	74.1	2.2	0.84
Cementos binarios con filler calcáreo (CP12F, CP18F, CP15F)	76.7	2.1	0.95
Cementos binarios con escoria (CP20E, CPN35 E)	75.8	2.3	0.96
Cemento ternarios	76.3	2.0	0.92
Todos los cementos	74.9	2.06	0.90

Para asegurar el comportamiento durable del hormigón frente a los procesos de deterioros, la primera medida que se debe tomar es la reducción de los procesos de transporte de agua y sustancias agresivas en su masa. Para los hormigones de cemento portland se ha asumido que una disminución de la relación a/c por debajo de 0.53 produce una disminución drástica de la permeabilidad cuando el mismo ha sido correctamente curado y está relacionado con la porosidad capilar (Soroka, 1979).

La porosidad capilar (ϕ) según el modelo de Powers para el cemento portland depende de la relación a/c y del grado de hidratación (α) del mismo (3).

$$\phi (\%) = (a/c - 0.37 \alpha) * 100 \tag{3}$$

En términos de conectividad de poros, la reducción de la permeabilidad ocurre cuando el volumen de poros capilares en la mezcla es menor al 18 % (Winslow et al, 1994). Para el caso del cemento portland, con una relación a/mc de 0.50 se requiere de un grado de hidratación de 0.70 para lograr una porosidad capilar de 18 % y de esa manera segmentar los poros impidiendo el transporte de agua. En los hormigones de cemento binario o ternario el cálculo de la porosidad capilar también surge del análisis del contenido de material cementíceo hidratado en función del espacio disponible a ser llenado. Por esta razón, la porosidad capilar aumenta con el incremento de la a/c efectiva y disminuye cuando se incrementa el grado de hidratación del material cementíceo. En función de este modelo, es posible estimar los volúmenes de las distintas fases que se encuentran presentes en la pasta de cemento en cualquier etapa de su hidratación.

La Figura 3 muestra que para los hormigones CP y CP20E, cuando se logra el 18.5% de porosidad capilar ocurre la segmentación de poros y la tasa de absorción capilar cambia muy poco después de los 28 días una vez que se alcanza el grado de hidratación que produce la segmentación de poros. Entre 90 y 360 días, la tasa de absorción capilar no cambia significativamente. Para todos los cementos binarios y ternarios que contiene 12 y 18 % de filler calcáreo, a pesar de que el grado de hidratación es mayor, la tasa de absorción presenta un valor mayor hasta los 28 días, debido al aumento de la relación a/c efectiva. Sin embargo, el umbral de porosidad capilar que no produce cambios significativos en la tasa de absorción capilar es mayor (22 a 24%). Esta situación es atribuible a que, los modelos utilizados no tienen en cuenta el efecto de bloqueo de los poros que pueden producir las partículas de filler calcáreo incorporadas.

De esta manera puede concluirse que para obtener un hormigón impermeable con baja tasa de transporte de agua por capilaridad sólo puede lograrse cuando se produce la segmentación de los poros de la matriz cementícea, ya sea por reducción de la relación a/mc o el aumento del grado de hidratación del material cementíceo.

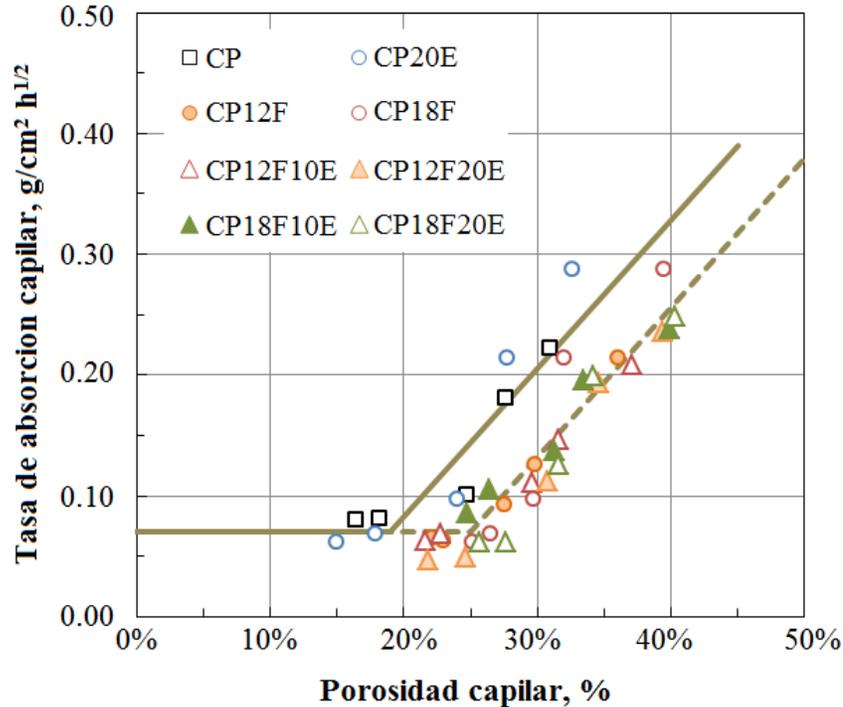


Figura 3. Relación entre la tasa de absorción capilar y la porosidad capilar de la matriz.

4. CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados experimentales y suposiciones realizadas para aplicar los modelos de hidratación existentes, se pueden expresar las siguientes conclusiones:

- La evolución de la hidratación de la matriz cementícea del hormigón determina el desarrollo de la estructura porosa y con ello la resistencia a compresión y tasa de absorción capilar con independencia de la formulación de mezcla de cemento utilizada.
- Para los cementos compuestos binarios se puede controlar y modificar la evolución de la hidratación del cemento con filler calcáreo o del cemento con escoria mediante el cambio de la finura y las proporciones en la mezcla. En general se observa que el filler calcáreo apropiadamente molido contribuye a la hidratación temprana y la escoria a la hidratación tardía. Esta complementación permite el desarrollo de cementos ternarios
- El modelo de Powers y las consideración de Chen & Brouwers para la hidratación de la escoria permiten modelar la relación gel/espacio y la porosidad capilar de la matriz en los cementos ternarios. La relación que existe entre los resultados de los modelos y las propiedades del hormigón determinadas experimentalmente concuerdan razonablemente.

5. REFERENCIAS

- Bentz, D.P.; Irassar, E.F.; Bucher B.; Weiss, W.J. (2009), “*Limestone Fillers Conserve Cement; Part 1: An analysis based on Powers’ model*”, Concrete International, V.31, No. 11, pp. 41-46.
- Bonavetti, V.L.; Rahhal, V.; Irassar, E.F. (2001), “*Studies on the carboaluminate formation in limestone filler blend cements*”, Cement and Concrete Research, V.31, No. 6, pp. 883-859.
- Bonavetti, V.L.; Donza, H.A.; Menéndez, G.; Cabrera, O.A.; Irassar, E.F. (2003) “*Limestone filler cement in low w/c concrete: A rational use of energy*”, Cement and Concrete Research, V.33, No. 6, pp. 865–871.
- Bonavetti, V.L.; Castellano, C. C.; Donza, H.A.; Rahhal, V.F. Irassar, E.F. (2013) “*El modelo de Powers y los límites del contenido de adición de material calcáreo en los cementos portland*”, Concreto y Cemento. Investigación y Desarrollo, V.5, No. 1, pp. 40 -50.
- Boukhatem, B.; Ghrici, M.; Kenai, S.; Tagnit-Hamou, A. (2011), “*Prediction of efficiency factor of ground-granulated blast-furnace slag of concrete using artificial neural network*”; ACI Materials Journal, V.108, No. 1, pp. 55-63.
- Brouwers, H.J.H. (2004) “*The work of Powers and Brownyard revisited: Part 1*”; Cement and Concrete Research V.34, No. 9, pp. 1697–1716, (en español Cemento-Hormigón 2007 N° 904 pp 4-28)
- Brouwers, H.J.H. (2005), “*The work of Powers and Brownyard revisited: Part 2*”, Cement and Concrete Research, V.35, No. 10, pp. 1922 – 1936.
- Carrasco, M.F.; Bonavetti, V.L.; Irassar, E.F. (2003) “*Contracción por secado de Hormigones elaborados con cementos binarios y ternarios*”, in: Proc. 15a Reunión Técnica de la AATH, Santa Fe, Argentina T-26 - CDROM, 8p.
- Carrasco, M.F.; Menéndez, G, Bonavetti, V.L.; Irassar, E.F. (2005) “*Strength Optimization of Tailor Made Cements with Limestone Filler and Granulated Blast Furnace Slag*”, Cement and Concrete Research, V.35, No. 7, pp. 1324-1331.
- CEMBUREA, Domestic deliveries by cement type CEMBUREAU 2000 – 2010
- Chen, W.; Brouwers, H.J.H. (2007a); “*The hydration of slag, part 1: reaction models for alkali-activated slag*”, Journal of Materials Science V.42, No. 2, pp. 428–443.
- Chen, W.; Brouwers, H.J.H. (2007b), “*The hydration of slag, part 2: reaction models for blended cement*”, Journal of Materials Science, V.42, No. 2, pp. 444–464.
- Cyr, M.; Lawrence, P.; Ringot, E. (2006), “*Efficiency of mineral admixtures in mortars: Quantification of the physical and chemical effects of fine admixtures in relation with compressive strength*”, Cement and Concrete Research, V.36, No. 2, pp. 264–277.
- Cyr, M.; Lawrence, P.; Ringot, E.; Carles-Gibergues, A. (2000), “*Variation des facteurs d’efficacité caractérisant les additions minérales*” Materials and Structures, V.33, No. 7, pp. 466-472.
- Escalante-Garcia, J.I. “*Nonevaporable water from neat OPC and replacement materials in composite cements hydrated at different temperatures*”, Cement and Concrete Research, V.33, No. 11, pp 1883-1888.
- Menéndez, G.; Bonavetti, V.L.; Irassar, E.F. (2002), “*Absorción Capilar en Hormigones con cementos compuestos*”, Hormigón, No. 38, pp. 25-34.
- Menéndez, G.; Bonavetti, V.L.; Irassar, E.F. (2003) “*Strength development of ternary blended cement containing limestone filler and blast-furnace slag*”, Cement and Concrete Composites, V.25, No. 1, pp. 57-63.

Menéndez, G.; Bonavetti, V.L.; Irassar, E.F. (2006), “*Hormigones con cementos compuestos ternarios. Parte I: estado fresco y resistencia mecánica*”, *Materiales de Construcción* V.56, No. 284, pp. 55-67.

Menéndez, G.; Bonavetti, V.L.; Irassar, E.F. (2007), “*Hormigones con cementos compuestos ternarios. Parte II: Mecanismos de transporte*”, *Materiales de Construcción*, V.57, No. 285, pp. 31-43.

Powers, T.C.; Brownyard, T.L. (1948), “*Studies of the physical properties of hardened Portland cement paste*”, in Bulletin 22, Research Laboratory of Portland Cement Association, Skokie, IL, U.S.

Powers, T.C. (1949) “*The non-evaporable water content of hardened portland cement paste*”. ASTM Bulletin, No. 158, pp. 68-75.

Soroka, I (1979), “*Portland Cement Paste and Concrete*”, Macmillan Press, 338 p.

Winslow, D. N.; Cohen, M. D.; Bentz, D. P; Snyder, K.A.; Garboczi, E. J. (1994) “*Percolation and pore structure in mortars and concrete*”, *Cement and Concrete Research*, V.24, No. 1, pp. 25-37.

Sersale, K. (1992), “*Advances in portland and blended cement*”, Proc. of the 9th International Congress of the Chemistry of Cement. New Delhi, India, I pp. 277 – 279.



Nanotubos de carbono en concreto de cemento Portland. Influencia de la dispersión en las propiedades mecánicas y en la absorción de agua

C. G. N. Marcondes¹, M. H. F. Medeiros², J. Marques Filho², P. Helene³

¹ Universidad Pontificia Católica de Paraná (PUCPR), Brasil.

² Departamento de Construcción Civil, Universidad Federal de Paraná (UFPR), Brasil.

³ Universidad de São Paulo (USP), Brasil.

Información del artículo

DOI:

<http://dx.doi.org/10.21041/ra.v5i2.80>

Artículo recibido el 27 de Diciembre de 2014, revisado bajo las políticas de publicación de la Revista ALCONPAT y aceptado el 27 de Abril de 2015. Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el segundo número del año 2016 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del primer número del año 2016.

© 2015 ALCONPAT Internacional

Información Legal

Revista ALCONPAT, Año 5, No. 2, Mayo – Agosto 2015, es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A.C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat_int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org
Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida Yucatán, C.P. 97310, fecha de publicación: 30 de mayo de 2015.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

RESUMEN

Los nanotubos de carbono (NTC) son estructuras de carbono que se obtienen en forma cilíndrica a escala nanométrica. Este artículo presenta una evaluación de la adición de NTC a hormigón de cemento Portland, centrándose en la importancia de llevar a cabo la dispersión de los NTC en el agua con el uso del ultrasonido antes de su incorporación en la masa de hormigón. Para ello, se prepararon tres mezclas de hormigón sin NTC (referencia) y dos con NTC (con una serie previa de dispersión en agua y el aditivo con el uso de ondas ultrasónicas y otras sin dispersión). A continuación, se analizaron las propiedades de fluidez, resistencia a la compresión, tracción y absorción del agua. El contenido de NTC añadido fue de 0,30% con respecto a la masa de cemento. En todos los casos, la dispersión previa de NTC usando ultrasonido potenció el efecto de la adición de nanotubos de carbono, siendo importante para la eficiencia de este material cuando se añade al cemento.

Palabras clave: nanotubo de carbono; concreto; resistencia; absorción del agua.

ABSTRACT

Carbon nanotubes (CNTs) are carbon structures that take the shape of cylinders in nanometric scale. This paper presents an evaluation about addition of CNTs in Portland cement concrete, focused in the importance of performing the CNTs dispersion in water using ultrasound before its incorporation to the concrete mass. For that, three concrete mixtures were prepared, one without CNT (reference series) and two with CNTs (one mixture with previous dispersion in water and additive using ultrasound and the other without dispersion). Then properties of fluidity, compressive and tensile strength and water absorption were analyzed. The amount of CNT added was 0.30% with respect to cement mass. In all cases, the previous dispersion of CNTs using ultrasound potentiated the effect of CNTs addition, demonstrating to be important for the efficiency of this material when added to cement.

Keywords: carbon nanotubes; concrete; strength; water absorption.

RESUMO

Os nanotubos de carbono (NTCs) são estruturas de carbono que obtêm forma de cilindros em escala nanométrica. Este trabalho apresenta uma avaliação da adição dos NTCs em concreto de cimento Portland, com foco na importância da realização de dispersão dos NTCs à água com uso do ultrassom antes de sua incorporação a massa de concreto. Para isto, três traços de concreto foram preparados sendo um sem NTC (série de referência) e dois com os NTCs (uma série com dispersão prévia em água e aditivo com o uso de ultrassom e outra sem dispersão). Analisou-se então as propriedades de fluidez, resistência à compressão, tração e absorção de água. O teor de NTC adicionado foi de 0,30% em relação à massa de cimento. Em todos os casos a dispersão prévia dos NTCs usando o ultrassom potencializou o efeito da adição de NTCs, mostrando-se importante para a eficiência deste material, quando adicionado ao cimento.

Palavras chaves: nanotubo de carbono; concreto; resistência; absorção de água.

Autor de contacto: Marcelo H. F. Medeiros (medeiros.ufpr@gmail.com)

1. INTRODUCCIÓN

Investigaciones realizadas en el área de nanotecnología y cemento han demostrado que algunas adiciones de nano compuestos al cemento permiten modificaciones importantes en su microestructura lo que a su vez proporciona la producción de concretos más resistentes, menos porosos y más durables (Marcondes, 2012). Dentro de la categoría de posibles nano materiales se encuentran los nanotubos de carbono (NTC), enfoque de este trabajo.

Los nanotubos de carbono (NTCs) son estructuras de carbono que, después de sintetizadas, se obtienen de cilindros en escala nanométrica y miden aproximadamente 3nm de diámetro por 1000 mm de largo (Couto, 2006).

Desde el punto de vista estructural, existen dos tipos de nanotubos de carbono: los de pared simple, constituidos por una única hoja de grafeno enrollada sobre sí misma para formar un tubo cilíndrico, y los de paredes múltiples, que comprenden un conjunto de nanotubos de carbono coaxiales, con varias hojas de grafeno enrolladas en forma de tubo (Zarbin, 2007). Los nanotubos de carbono de paredes simples (NTCPS) son más difíciles de ser sintetizados, lo que eleva su costo y prácticamente impide su aplicación a gran escala (Herbst et al., 2004).

El presente trabajo utilizó los NTCs de paredes múltiples, en función de su menor costo y disponibilidad con relación a los de paredes simples. Los mismos fueron adquiridos de una empresa en Bélgica y adicionados al concreto, con el objetivo de estudiar el efecto de los NTCs en la absorción de agua, en la fluidez del concreto en estado fresco y las propiedades mecánicas de resistencia a compresión y tracción y por compresión diametral.

2. ADICIÓN DE NTC EN MEZCLAS DE CEMENTO PORTLAND

La adición de NTCs a compuestos cementicios es un tema que viene siendo estudiado en diversas universidades nacionales e internacionales como se ilustra en la Tabla 1.

Tabla 1. Algunas de las principales universidades actuantes en la investigación de nano materiales aplicados a compuestos cementíceos.

Institución	Departamento	Investigadores
BRASIL		
Universidade Federal de Minas Gerais – MG	Departamento de Física / Departamento de Engenharia de Estruturas	M. Pimenta; Luis Orlando Ladeira; André F. Ferlauto e José M. Fonseca Calixto
Universidade Federal do Paraná - PR	Departamento de Construção Civil	Carlos G. Nastari Marcondes e Marcelo H. F. de Medeiros
Universidade Federal de Santa Catarina - SC	Departamento de Ingeniería Civil	Philippe J. P. Gleize e Wellington L. Repette
INTERNACIONAL		
University of Minnesota Duluth, USA	Department of Mechanical and Industrial Engineering / Department of Civil Engineering	Xun Yu; Eil Kwon
Chiang Mai University, Tailândia	Department of Physics and Materials Science	Arnon Chaipanich

The State University of New Jersey, USA	Department of Civil and Environmental Engineering	P.N. Balaguru
Universidade de Berkeley, USA	Department of Civil Engineering, Structural Engineering and Structural Mechanics (SESM)	Paulo Monteiro
University Shanto, China	Department of Civil Engineering, Shantou	Geng Ying Li; Pei Ming Wang; Xiaohua Zhao
Politecnico di Torino, Itália	Physics Department / Structural Engineering Department	Simone Musso; Giuseppe Ferro
Northwestern University, USA	Center for Advanced-based Materials	Surendra P. Shah
Democritus University, Grécia	Department of Civil Engineering	Maria S. Konsta-Gdoutos

Lo que justifica la investigación en esta área es que algunos estudios (tales como los realizados por: Marcondes (2012), Batiston et al (2010), Makar et al (2005), Chaipanich et al (2010), Melo et al (2011) y Li et al (2004) comprueban el buen desempeño de las nano partículas cuando son adicionadas en mezclas y morteros de cemento portland. Debido a su tamaño minúsculo, tales partículas contribuyen para rellenar los espacios vacíos y en consecuencia, para la mejora de diversas propiedades de esos materiales. Por tanto todavía existen algunas barreras que deben superarse. De acuerdo con Batiston et al (2010), los dos principales desafíos para la introducción de nanotubos de carbono en mezclas de concreto son: la homogenización y distribución de los nanotubos en la mezcla y estudiar la interacción de los NTCs con los compuestos resultantes de la hidratación del cemento. Este último aspecto puede ser interpretado como la necesidad de entender las mudanzas proporcionadas por la adición de las NTCs en compuestos de cemento portland tales como: alteraciones en la microestructura, en la cinética de las reacciones de hidratación, en la adherencia pasta agregados entre otras.

En lo que respecta a la distribución de los NTCs en una mezcla de cemento, diversos métodos vienen siendo utilizados destacándose la zonificación y funcionalización de los NTCs utilizando las mezclas de ácido nítrico y ácido sulfúrico (Li et al., 2004; Konsta-Gdoutos et al., 2010).

Para los investigadores Koshio et al (2001), el ultrasonido puede ser considerado una técnica eficaz para la dispersión de nanotubos de carbono en agua, aceite o polímeros. Para esos investigadores las fuerzas de cizallamiento generadas por ultrasonido superan las fuerzas de conexión entre los nanotubos, siendo capaz de separarlos. Esto fue comprobado por los investigadores Konsta et al (2010) que obtuvieron una dispersión eficiente por medio de la aplicación de energía ultrasónica y con el uso de un surfactante. Los resultados muestran que hubo dispersión adecuada con la aplicación de energía ultrasónica y que los nanotubos de carbono de paredes múltiples pueden reforzar la mezcla de cemento al aumentar la cantidad de C-S-H y reducir la porosidad.

Chaipanich et al (2010) estudiaron la adición de nanotubos de carbono en morteros de cemento portland (0,5% y 1% en relación a la masa de cemento). Los NTCs fueron inicialmente dispersados en agua utilizando ultrasonido por un tiempo de 10 minutos. En dicho trabajo los autores utilizaron cemento con cenizas volantes y la resistencia de los compuestos (pasta y mortero) fue investigada. La investigación demostró que el uso de nanotubos de carbono elevó la resistencia de los compuestos de cemento Portland con 20% de ceniza volante. La más alta resistencia se obtuvo con la adición de 1% de NTC, donde la resistencia a compresión a los 28 días fue de 51,8 MPa representando un incremento de 10% en la resistencia a compresión cuando se compara la mezcla patrón sin nanotubo de carbono que dió una resistencia de 47,2 MPa. Además de eso, de acuerdo con Chaipanich et al

(2010) el análisis con microscopio electrónico de barrido mostró también una buena interacción entre los nanotubos de carbono y el cemento con cenizas volantes cuando se compara con la mezcla sin el NTCs.

3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Las investigaciones publicadas hasta el momento están concentradas en estudios de la influencia de los NTCs en pastas y morteros de cemento portland y este trabajo se enfocó a estudiar el efecto de la adición de NTCs en el concreto de cemento portland. La intención fue explorar la viabilidad del uso de la NTC en la dosificación de concretos convencionales con resistencia a la compresión entre 25 y 40 MPa, así como medir algunos efectos relativos a la resistencia mecánica y transporte de agua por la red de poros del concreto con y sin adición de NTC.

3.1 Materiales Utilizados.

3.1.1 Cemento.

El cemento usado fue el cemento Portland CPV-ARI. El uso de este cemento minimiza retrasos de pega, cuando el empleo del aditivo es como cuando no posee ceniza volcánica y contiene mayor cantidad de clinker en composición, se elimina con eso otra variable del estudio, ya que los materiales puzolánicos pueden interactuar con los NTCs e interferir en los resultados. (Chaipanich et al., 2010).

Las características químicas y físicas del cemento usado pueden ser observadas en la Tabla 2. El peso específico promedio del cemento fue de 3,12 gr/cm³, en el ensayo de acuerdo con la norma NBR NM 23/2001 (NBR NM, 2001).

Tabla 2. Caracterización del cemento CPV-ARI.

Ensayos Químicos											
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Perda Fogo	CaO Livre	Resíd. Insol.	Equiv. Alcal	
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	
CPV - ARI	4,12	18,34	2,52	59,72	5,35	3,05	3,2	1,49	0,63	0,62	
Ensayos Físicos											
	Exp. Quente	Início de pega	Fim de pega	Cons. Norma l	Blaine	# 200	# 325	1 día	3 días	7 días	28 días
	mm	h:min	h:mi n	%	cm ² /g	%	%	MPa	MPa	MPa	MPa
CPV - ARI	0,5	02:15	03:00	27,6	4370	0,10	2,80	23,40	37,60	42,70	51,10

3.1.2 Agregados.

La arena empleada como agregado fino es una arena natural proveniente de la ciudad de Balsa Nova, Paraná. Su Caracterización de acuerdo con las normas nacionales, está representada en la Tabla 3.

Tabla 3. Resultados de ensayos en la arena.

Ensayo	Resultado	Método de Ensayo
Dimensión Máxima (mm)	4,8	NM 248/2001
Módulo de Finura	2,92	NM 248/2001
Material Molido en polvo (%)	2,00	NM 46/2003
Peso Específico SSS (g/cm ³)	2,61	NM 52/2009
Peso Unitario Suelto (g/cm ³)	1,487	NM 45/2006
Absorción (%)	0,37	NBR 9777/1987
Impureza Orgánica (ppm)	< 300	NM 49/2001
Terrones de Arcilla (1%)	0,1	NBR 7218/1987

La arena coincide en la clasificación de zona utilizable conforme la NBR 7211(2005)- Agregados para el concreto-especificaciones. Para producir el concreto se utilizó una piedra oriunda de la piedra del granito. El agregado grueso escogido para la investigación está conforme a la norma de la ABNT NBR 7211 (2005). El agregado grueso inicialmente fue lavado para retirar las impurezas y materiales con polvo que estuvieran adheridos a su superficie y, posterior a eso, fue secado en estufa hasta alcanzar peso constante. Su caracterización fue llevada de acuerdo con la normativa nacional y se representa en la Tabla 4.

La granulometría del agregado grueso se enmarca entre los límites normativos de los tamices 4,8 / 12,5 y 9,5 / 25, en la denominación comercial antigua, se trata de una piedra 1.

Tabla 4. Resultados de los ensayos del agregado grueso.

Ensayo	Resultado	Método de Ensayo
Peso Específico SSS (g/cm ³)	2,62	NM 52
Peso Unitario Suelto (g/cm ³)	1,348	NM 45

3.1.3 Nanotubos de carbono y aditivo súper plastificante..

Los NTCs usados en esta investigación fueron adquiridos de la empresa Nanocyl S.A., localizada en Bélgica. El valor cancelado por el producto en polvo fue de 120 € por kilo. Se trata de NTCs de paredes múltiples sintetizados por el método de deposición química a vapor también llamado CVD-Chemical Vapor Deposition. Comercialmente el producto es llamado NC 7000. La figura 1 muestra una imagen de este material con el uso del microscopio electrónico de barrido (MEV).

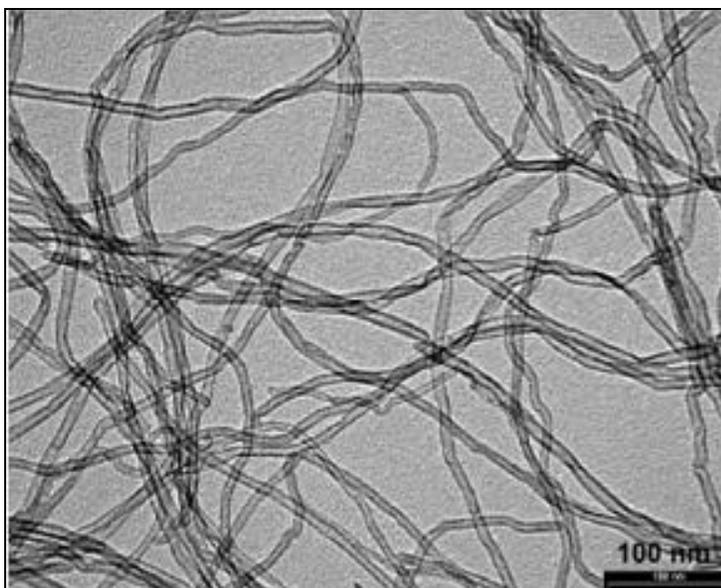


Figura 1. Imagen producida a partir del MEV de los nanotubos de carbono de paredes múltiples fabricados en la Nanocyl S.A.

Sus características y su composición constan en las Tablas 5 y 6. Para la realización del experimento, fue usado un aditivo superplastificante a base de policarboxilato, empleado para regular la consistencia deseada.

El aditivo usado en la elaboración del experimento está constituido por polímeros de éteres carboxílicos modificados en un rango de concentración de 49%. Este atiende a los requisitos de la norma ASTM C 494 (2011) (Tipo A y F), ASTM 1017 (1998) y NBR 11768 (2011).

Los policarboxilatos son macromoléculas utilizados como dispersantes de alta eficiencia en la composición cementícea reduciendo la viscosidad de la suspensión y minimizando la cantidad de agua para el procesamiento (Mehta; Monteiro, 2008).

Algunas de sus propiedades pueden ser visualizadas en la Tabla 7.

Tabla 5. Características físicas en los NTCs.

PROPIEDAD	UNIDAD	VALOR
Diámetro promedio	Nanómetros	9,5
Largo promedio	Mícron	1,5
Área superficial	m ² /g	250-300
Densidad Promedio	g/l	60

Tabla 6. Composición del producto.

COMPONENTES	% (peso)
Grafito sintetizada (NTC)	90%
Óxido de cobalto	< 1%
Óxido metálico	10%

Tabla 7. Informaciones del aditivo superplasticante suministrados por el fabricante.

Dosis Recomendada (sobre peso de cemento)	pH (ABNT 10908)	Masa específica (ABNT 10908)
0,3% a 2%	5,5 + 1,0	1,10 + 0,02 g/cm ³

3.2 Procedimientos usados para confeccionar las mezclas patrones.

En la parte experimental con concreto, se fijó una muestra de referencia, REF (sin la adición de NTCs), para permitir la comparación de ésta con los concretos con adición de NTCs. De este modo, fue simplemente adoptada una mezcla de concreto convencional como referencia y entonces se reprodujeron las series adicionando los NTCs. Los patrones establecidos pueden ser observados en la Tabla 8. Se debe notar que el rango de NTC en relación al peso del cemento fue mantenido en 0,3% para todas las dosificaciones. Esta delimitación fue hecha basándose en estudios de Melo et al (2011), que indican que el contenido optimo es de 0,3% del peso del cemento.

La nomenclatura empleada en la Tabla 8 se refiere al REF, como mezcla de referencia sin nanotubos de carbono, al CD como la mezcla con la incorporación de los nanotubos de carbono y aditivo (con la dispersión previa en agua y aditivo en ultrasonido); y al SD, la mezcla conteniendo solo el NTC en polvo (sin la pre dispersión en el aditivos y sin aplicación de la energía ultrasónica, mezclando en polvo al cemento usando solo el aspa mezcladora acoplada al taladro.

La relación agua/ cemento usada en este trabajo fue fijada en 0,55. Durante la realización de esta investigación, se notó que la adición de NTC al concreto provocó la reducción de la fluidez para la mezcla SD, que perjudicó su trabajabilidad e imposibilitó el uso de valores menores de relación agua/cemento, Con todo esto se considera éste el valor límite especificado por la NBR 6118 (2007) para la aplicación en concretos en ambientes marinos.

Tabla 8. Mezclas y dosificaciones usadas para elaborar los concretos.

MEZCLA	CEMENTO	NTC*	ARENA	PIEDRA	α	C	a/c	ADITIVO*
	(kg)	(g)	(kg)	(kg)	%	(kg/m ³)		(g)
MEZCLA UNITÁRIO	1,00	0,30%	2,25	2,75			0,55	1%
REF	10,9	0	24,4	29,8	58	352	0,55	108,5
CD	10,9	32,55	24,4	29,8	58	352	0,55	108,5
SD	10,9	32,55	24,4	29,8	58	352	0,55	108,5

*con relación a la masa del cemento.

El consumo de cemento para las mezclas de la Tabla 8 es de 353 kg por m³ de concreto y atiende el consumo ponderado por la Norma NBR 12655 (2006), que en el caso de concretos insertos en la clase de agresividad III, establece el límite mínimo de 320Kg de cemento por metro cubico de concreto.

Para realizar los ensayos fueron hechas tres mezclas en el trompo mezclador, una para cada mezcla y para la preparación de la solución a ser usada para la confección de la mezcla CD se hizo una adición de los NTCs al agua con el aditivo superplasticante y se siguió con la aplicación de la zonificación. El tiempo de aplicación de las ondas fue de una hora. Este tiempo fue predeterminado con base a trabajo realizado por Marcondes (2012) en función de un análisis visual que indico que posterior a los 60 minutos, las muestras no presentaban alteraciones en cuanto a su tonalidad o turbidez.

Además de esto, a partir de los 40 minutos de zonificación las muestras no presentaban (visualmente) decantación de NTCs transcurrido el tiempo de 24h en reposo de la solución como puede ser observado en la Figura 2.

El equipamiento de ultrasonido utilizado fue de baja frecuencia, modelo 0-14 C/I del fabricante Thornton Inpec Eletrónica S.A. con frecuencia nominal 40 kHz y potencia 100W. La solución dispersa fue utilizada por aproximadamente 30 minutos posterior a la zonificación.



Figura 2. Análisis visual de las muestras con tiempo de zonificación de 40 minutos transcurridas 24 h de reposo (MARCONDES 2012).

3.3 Ensayos realizados.

3.3.1 Ensayo de resistencia à la compresion.

La resistencia a la compresión es una de las principales propiedades mecánicas para evaluar concretos de cemento Portland. El vaciado de los probetas fue ejecutado de acuerdo con a NBR 5738 (2003), utilizando moldes cilíndricos de Ø 10 x 20 cm y compactación ejecutada manualmente con varilla metálica estándar. Seis probetas para cada mezcla fueron preparadas, totalizando 18 probetas. Las fases de aplicación de carga en los corpos de prueba (topes inferior y superior) fueron rectificadas de acuerdo con lo descrito en la norma NBR 5738 (2003).

3.3.2 Ensayo de resistencia à traccion por compresion diametral.

El ensayo de resistencia a la tracción por compresión fue realizado de acuerdo con la norma NBR 7222 (2011). Este ensayo tiene como objetivo evaluar la resistencia a la tracción en los concretos estudiados mediante la aplicación de una carga de compresión diametral a la probeta. De la misma manera que el ensayo anterior, fueron preparadas 6 probetas cilíndricas de Ø 10 x 20 cm para cada mezcla.

Para el cálculo da tracción por compresión diametral se utilizó la Ecuación 1:

$$f_{t,D} = \frac{2.P}{\pi.d.L} \quad (1)$$

Dónde: P = carga máxima aplicada, kN; d = diámetro del probeta, mm; L = altura del probeta, mm.

3.3.3 Ensayo de absorción de agua por inmersión.

El ensayo de absorción por inmersión fue realizado sobre la base de la norma NBR 9778 (2005) y fue ejecutado de acuerdo con las etapas a continuación descritas:

1 - Secado de las probetas hasta alcanzar el peso constante (la temperatura de secado fue de 60 °C para evitar temperaturas muy altas, que pueden generar microfisuras de las probetas e influenciar los resultados);

2 - Completado el secado en estufa es determinado el peso seco, se procede a sumergir la muestra en agua a temperatura de 23 ± 2 °C, durante un total de 72 h. Las muestras fueron mantenidas con 1/3 de su volumen inmerso en las primeras 4 h y 2/3 en las 4 h siguientes, siendo completamente inmerso en las 64 h restantes;

3 - Se determinó el peso de las probetas luego de las 24 h, 48 h en 72 h de inmersión. Las determinaciones fueron ejecutadas posterior al secado superficial de la superficie de la muestra con un paño

La absorción de agua por inmersión fue definida por la Ecuación 2.

$$\frac{M_{sat} - M_s}{M_s} \times 100 \quad (2)$$

Dónde: Msat = peso del probeta saturado; Ms = peso del probeta seco en estufa.

3.3.4 Ensayo de absorción de agua por el método de la pipeta.

Este ensayo es también conocido como ensayo de la pipa o ensayo de la pipeta RILEM (Test Method II.4: Water absorption tube test, 2006). Fue propuesto por el investigador alemán Karsten y aprobado por la RILEM (Reunion Internationale des Laboratoires d'essais et de Recherches sur les Matériaux et les Constructions) (Rilem, 2006) para el control de infiltración en paredes.

Cada probeta fue cortada en rebanadas de 5 cm de espesor. Estas rebanadas fueron colocadas en estufa a una temperatura de 60 °C durante cuatro días. Entonces, las pipetas fueron fijadas en la superficie circular de las probetas con pegamento de silicona conforme es ilustrado en la Figura 3. Fueron usadas cuatro rebanadas de cada mezcla formulada para las lecturas.

Con las pipetas fijadas, estas fueron llenadas con agua hasta el nivel cero de la graduación (más alta) y la entrada de agua en los substratos fue monitoreada a partir de la disminución del nivel de agua en la escala graduada (Figura 3). Las lecturas fueron hechas en intervalos de 15 minutos hasta completar 2,5 horas de ensayo y posterior a esto, se procede a leer a las 24h, 48h e 72h.

Como forma de considerar la pérdida de agua por evaporación, fue utilizada una pipeta fijada en una placa de vidrio considerando la variación de nivel de agua, en este caso, como agua evaporada. Estos valores de evaporación fueron posteriormente descontados de todas las series de los concretos evaluados.

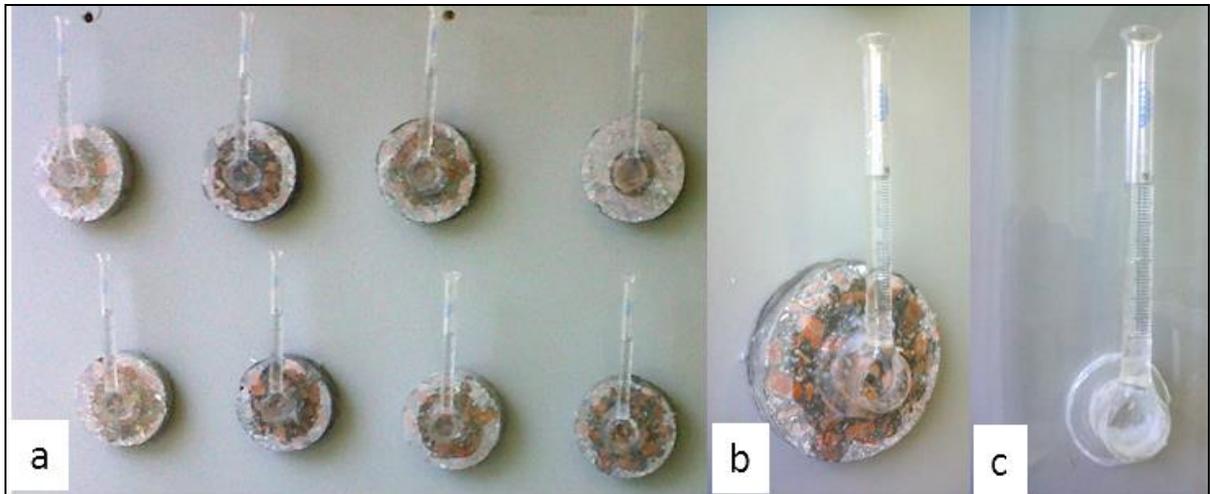


Figura 3. a) Posicionamiento de las pipetas; b) Detalle de la pipeta; c) Pipeta fijada en el vidrio.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se presentan los resultados y los análisis hechos a partir de éstos. Para mayor confiabilidad en los datos fue realizado un tratamiento estadístico de los resultados de resistencia a la compresión, a tracción por compresión diametral por medio de aplicación del análisis de varianza (ANOVA) para 95% de confiabilidad de los resultados obtenidos.

4.1 Influencia en la consistencia.

Los resultados de consistencia de las mezclas de concreto fresco obtenidas por el ensayo de asentamiento del cono para las mezclas determinados para este trabajo están presentados en la Figura 4.

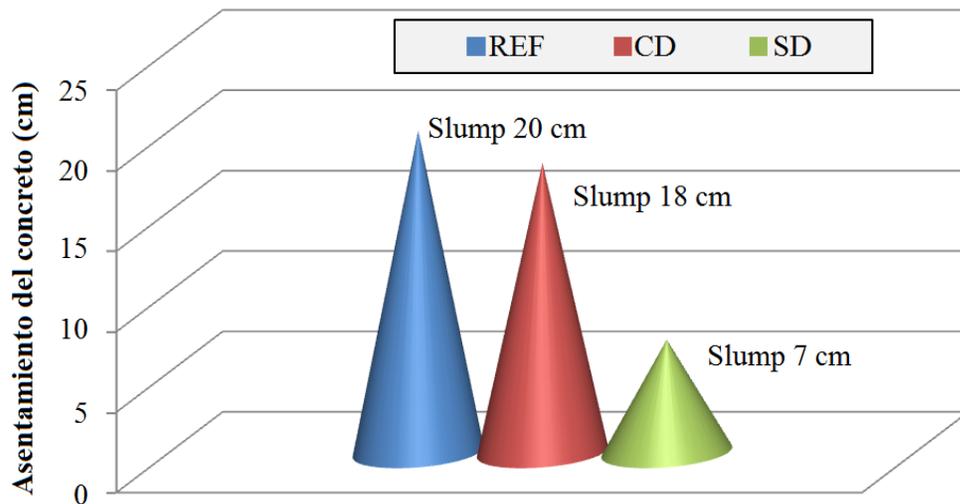


Figura 4. Consistencia por el asentamiento de tronco de cono de los concretos (cm).

Los resultados del ensayo de asentamiento demostraron que la forma de dispersión y la presencia de los NTCs en el concreto poseen fuerte influencia en la consistencia. Conforme puede ser visualizado en la Figura 4, la presencia de los NTCs sin dispersión elevó la consistencia del concreto (redujo su asentamiento), mientras la mezcla con presencia de los NTCs en la forma dispersa por ultrasonido

presentó un resultado semejante a la mezcla de referencia. En comparación con la mezcla patrón, la mezcla en polvo sin dispersión logró que el asentamiento fuese alterado de 20 cm para 7 cm.

Estos resultados demuestran la dificultad de convertir el concreto en un material trabajable con los NTCs, indicando de esta forma que esto solo es posible con el uso de aditivos químicos que aumenten la plasticidad del concreto, en función de la alta cantidad de agua requerida para que el concreto quede trabajable con los NTCs. Con todo, cabe destacar que la dispersión previa por zonificación redujo de forma considerable el efecto de cohesión de la masa fluida presentado por la adición de los NTCs en polvo.

Se cree que la disminución del asentamiento con la adición de NTCs en polvo se debe a la gran superficie específica del material (250-300 m²/g), cerca de 650 veces mayor que la del CP V-ARI usado en esta investigación. Esa elevada superficie consume mucha agua para la hidratación de toda el área de las partículas de los NTCs adicionados. La mejora del asentamiento con el uso de la técnica de dispersión por ultrasonido (mezcla CD) está relacionada con la mejor distribución de los NTCs en el aditivo en un medio acuoso y la incorporación de los polímeros presentes en los aditivos en la superficie de los NTCs. Es decir, la dispersión con ultrasonido se mostró importante para garantizar una hidratación previa y eficiente del área de las partículas de nanotubos de carbono.

4.2 Resistencia a la compresión.

Los resultados del ensayo de resistencia a la compresión a los 28 días de curado húmedo pueden ser observados en la Figura 5.

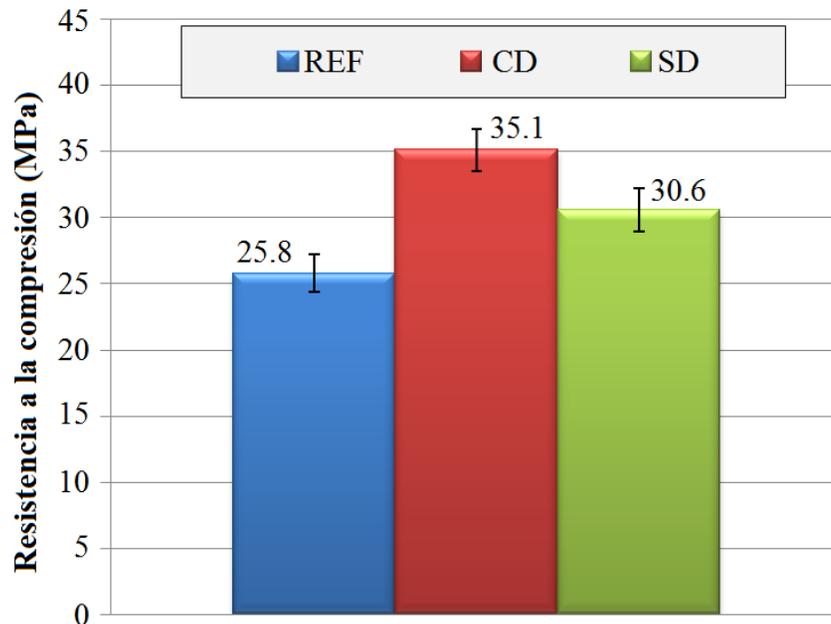


Figura 5. Resistencia a la compresión (MPa) para la serie de referencia y las dos formas de adición de NTC.

Los datos demuestran que en los dos casos donde se los NTCs hubo mejoras significativas en la propiedad de resistencia a la compresión. Para validar estos resultados de herramienta de análisis de varianza (ANOVA) y se verificó que los promedios son significativamente diferentes, con 95% de confianza. Los datos de la ANOVA pueden ser visualizados en la Tabla 9 y la diferencia entre los promedios es confirmada por el hecho de que F es mayor que $F_{crítico}$.

Tabla 9. Análisis de la varianza (ANOVA) entre los valores de resistencia a la compresión

Anova: factor único				
RESUMEN				
Grupo	Conteo	Suma	Promedio	Varianza
Coluna 1	6	154,6	25,8	2,0
Coluna 2	6	210,5	35,1	2,6
Coluna 3	6	183,3	30,5	2,7

ANOVA						
Fuente de Variación	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	260,5	2	130,2	54,0	1,4E-07	3,7
Dentro de los grupos	36,2	15	2,4			
Total	296,6	17				

La mezcla con mayor elevación de la resistencia a la compresión fue representada por la mezcla CD, donde se obtuvo un incremento de 37% en la resistencia a la compresión cuando se compara con la mezcla de referencia. La mezcla sin dispersión (mezcla SD) presentó un 19% de aumento de resistencia a compresión con relación a la serie de referencia.

Los resultados evidencian que la dispersión con el ultrasonido es extremadamente importante para potenciar los beneficios ocasionados por la adición de NTCs en el concreto de cemento Portland.

4.3 Resistencia a tracción por compresión diametral.

La Figura 6 muestra los resultados de la resistencia a la tracción por compresión diametral de las series de concretos investigadas en este trabajo.

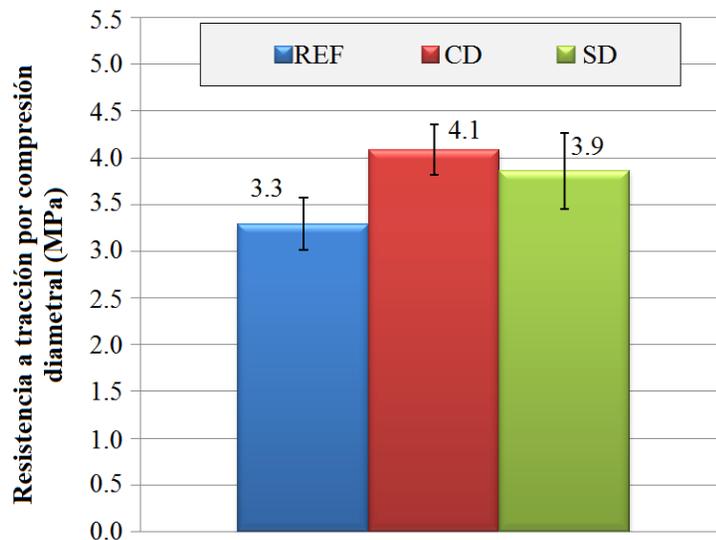


Figura 6. Resistencia a tracción por compresión diametral para la serie de referencia de las dos formas de adición de NTC.

Estos resultados indican que también hubo incremento de la resistencia mecánica con relación a la adición de los NTCs al concreto con aumento de la resistencia a tracción entre 18 y 24 % con relación a la serie de referencia. Aun cuando la mezcla SD tenga resultado en el crecimiento de la resistencia a la tracción próxima de la proporcionada por la serie con dispersión, la serie SD presenta la mayor desviación patrón entre las muestras estudiadas. Eso indica que la adición de los NTCs en polvo en el trompo mezclador resulta en menor uniformidad de distribución de los NTCs en la masa de concreto generando una variabilidad mayor en los ensayos de resistencia a la tracción del concreto.

Para mayor confiabilidad en la comparación entre las series de concretos del estudio, se utilizó la herramienta ANOVA, que indicó con 95% de confiabilidad que existen diferencias significativas entre los resultados. Este hecho puede ser mejor visualizado en la Tabla 10, con F mayor que $F_{crítico}$.

Tabla 10. Análisis de varianza (ANOVA) entre los resultados de tracción por compresión diametral para 95% de significancia.

Anova: factor único				
RESUMO				
Grupo	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Coluna 1	6	19,75127	3,291879	0,079457
Coluna 2	6	23,49777	3,916295	0,068453
Coluna 3	6	23,14968	3,85828	0,163137

ANOVA						
Fonte de variación	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	1,428143	2	0,714072	6,887118	0,007554	3,68232
Dentro dos grupos	1,555233	15	0,103682			
Total						
	2,983377	17				

4.4 Absorción de agua por inmersión.

La Figura 7 se aprecia que en las muestras con los NTCs, hubo mejoras con relación a las propiedades de absorción por inmersión. Esto puede estar relacionado con una mejor distribución de los poros, traduciendo en reducción de la macroporosidad. No en tanto, para esta comprobación se hace necesario otros ensayos que no fueron abordados en esta investigación, como el ensayo de porosimetría de mercurio que es capaz de cuantificar mejor el tamaño de los poros.

Es fácil notar la tendencia de reducción de la absorción provocada por la adición de NTC en los concretos estudiados en esta investigación. Con todo, el nivel de reducción no tan elevado como lo esperado, representa una reducción de 4,4% para la serie SD es de 3,9% para la serie CD.

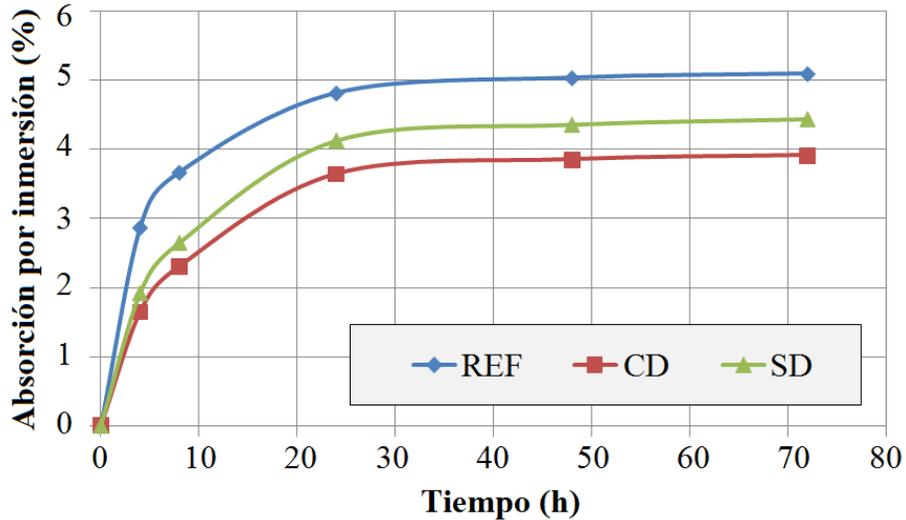


Figura 7. Absorción por inmersión (%) X Tiempo (h) para la serie de referencia y las dos formas de adición de NTC.

4.5 Absorción de agua por el método de la pipeta.

La absorción por el método de la pipeta fue realizada como tentativa de agregar más conocimiento acerca de la absorción de agua de los concretos producidos con adición de NTCs. Sus resultados pueden ser observados en la Figura 8. Se nota que la mezcla de referencia REF y la mezcla SD presentan los peores resultados demostrando una vez más la importancia del uso de la dispersión, con ultrasonido, de los NTCs en el aditivo y agua antes del amasado del concreto.

El ensayo fue ejecutado en la cara cortada, por lo tanto se atenta para el hecho de que la presencia del agregado grueso en el concreto puede influenciar en la absorción de agua por este método. Por tanto, el ensayo también evidenció la importancia de la dispersión en la variación de los resultados de penetración de agua y demostró tendencia de reducción de la absorción con el uso de NTCs dispersos previamente con la técnica de ultrasonido.

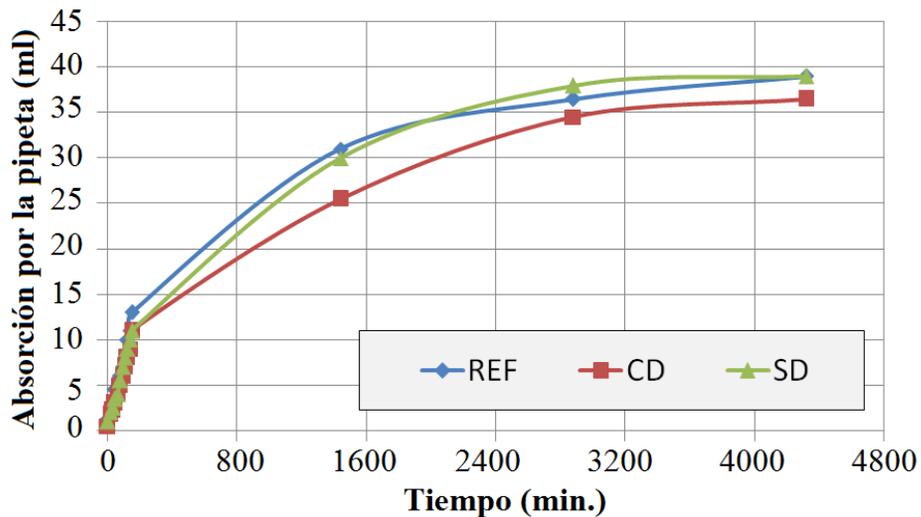


Figura 8. Absorción por el método de la pipeta para la serie de referencia y las dos formas de adición de NTC.

4.6 Discusión de los resultados.

El estudio de Chaipanich et al. (2010) comprobó que la adición de nanotubos de carbono aumentó la resistencia de cementos compuestos con cenizas volantes. En su investigación, fueron analizados los rangos de 0,5% y 1% de NTCs en relación al peso del cemento, siendo que el segundo con 20% de ceniza volante presentó 10% de aumento en la resistencia a la compresión. Comparando los datos del estudio aquí presentado con los datos de Chaipanich et al. (2010), se verifica que en el primer caso fue obtenido mayor nivel de elevación de la resistencia a la compresión (19 a 37% de elevación) y eso probablemente se debe al uso de mayores rangos de NTC en la investigación de Chaipanich et al. (2010). Debido a su elevada superficie específica, el NTC tiende a tornar la mezcla cementicia menos fluida, llegando al punto de dificultar el vaciado y compactación de la probeta y ésta puede ser un causante de diferencias entre los resultados de las dos investigaciones. Por ello no es posible comparar el efecto de los NTCs en la fluidez en ambas porque el estudio de Chaipanich et al. (2010) fue realizado en mezclas y no fueron relatados datos de medidas de fluidez.

Del mismo modo que ocurrió en la presente investigación, Melo (2009) mostró en su trabajo un aumento de la resistencia a compresión de la tracción en mezclas de cemento Portland como adición de NTCs. Melo (2009) e Nochaiya; Chaipanich (2011) probaron en sus respectivos estudios una reducción de tamaño medio de poro causado por la incorporación de pastas de NTC de cemento Portland lo que puede aumentar la durabilidad de estructuras de concreto, ya que diámetros menores tienden a dificultar la circulación de agentes agresivos dentro del concreto. En el trabajo de Melo (2009), el rango de 0,3% de nanotubos presentó la mayor capacidad de incremento de la resistencia. De acuerdo con Makar et al. (2005), el aumento en la durabilidad de concretos u morteros con adición de NTCs se debe a puentes de adherencia que se forman en la microestructura de la pasta (Figura 9). Ellas controlan las fisuras generadas en la matriz cementicia, en consecuencia, promueven mayores resistencias y disminución en la porosidad. Li et al. (2004) también citan una conexión entre el cemento hidratado y los nanomateriales en una de las justificaciones del aumento de la resistencia en morteros que tuvieron la incorporación de nanotubos de carbono. Las otras explicaciones citadas en los trabajos de Li et al. (2004) y Nochaiya; Chaipanich (2011) implican el hecho de que las nanopartículas rellenan los vacíos de la pasta de cemento aumentando la resistencia mecánica del compuesto cementiceo.

A pesar de ser usados en diversas áreas, los nanotubos de carbono todavía presentan alto costo, lo que puede ser un obstáculo para el uso de este material en compuesto cementiceos. Se cree que con el aumento de la demanda y con la posibilidad de sintetizar los NTCs en la fabricación del clínquer, lo que está siendo estudiado en la UFMG como fue relatado por Ludving et al. (2011) y Melo et al. (2011), el material se tornara más accesible. De ese modo, aun cuando el costo del material sea un aspecto negativo en la actualidad, la tendencia es que este inconveniente sea superado a lo largo del tiempo.

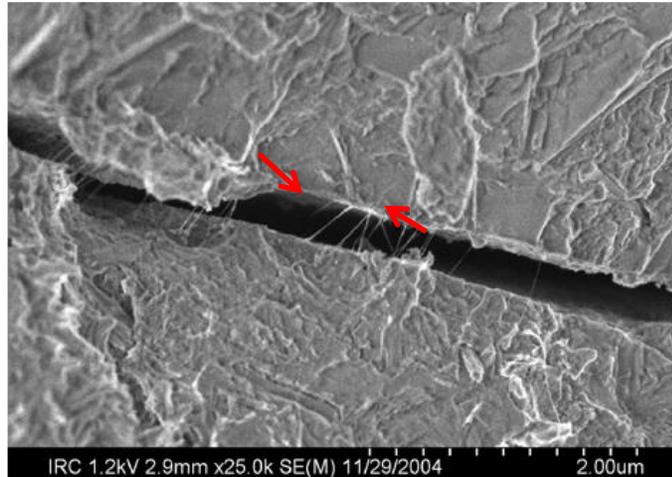


Figura 9. Microfisura en la pasta de cemento con adición de NTCs actuando como puentes de adherencia (Makar et al., 2005).

4. CONCLUSIONES

El presente trabajo tuvo la finalidad de contribuir con estudios referentes al efecto de la adición de nanotubos de carbono en los concretos de cemento Portland. Ya que este es un campo de estudio en desarrollo y es prometedor, y con algunos pocos resultados iniciales disponibles en la literatura. Estos datos son aplicados en estudios sobre pastas y morteros de cemento Portland y este trabajo presenta como diferencial la aplicación de los NTCs en concreto de cemento Portland.

El trabajo fue elaborado con base en la defensa de maestría de Marcondes (2012), desarrollada en el Programa de Post Grado en Ingeniería de Construcción Civil de la Universidad Federal del Paraná y alienta la importancia de la realización de la dispersión de los NTCs en agua y aditivo con el uso del ultrasonido antes de su incorporación en la masa de concreto. En ese sentido, las principales conclusiones de este trabajo se pueden observar a continuación:

- Con 95% de significancia, se evidenció que las propiedades mecánicas de resistencia a la compresión y a tracción por compresión diametral, son afectadas por la eficiencia de la dispersión de los nanotubos de carbono en el concreto de cemento Portland.
- Fue constatado el incremento de la resistencia a compresión y a tracción por compresión diametral que los NTCs proporcionan. En esta investigación el aumento representó 19% para la mezcla SD y 37% para la mezcla CD de incremento de resistencia a compresión, y 17% para la mezcla SD y 19% para la mezcla CD de aumento de la resistencia a tracción por compresión diametral;
- La adición de NTCs al concreto redujo la fluidez de este material. En el caso de la adición de los NTCs con la dispersión previa en ultrasonido, esta reducción fue muy pequeña, permitiendo enmarcar al concreto como del mismo rango de consistencia del concreto patrón, que obtuvo una disminución de 20 ± 3 cm. Ya la adición de NTCs en polvo directamente en el trompo mezclador y sin la dispersión previa, provocó una caída brusca en la trabajabilidad del concreto, disminuyendo su asentamiento a 7 cm, lo que afecta a la aplicabilidad de este material. En ese caso, sería necesaria la adición de agua o de más aditivo para la adecuación de la consistencia.
- La adición de NTCs redujo la absorción de agua por inmersión y por el ensayo de la pipa. En este caso también fue verificado que la serie con la dispersión por ultrasonido potenció las ventajas ocasionadas por la incorporación de NTCs.

5. AGRADECIMENTOS

Los autores agradecen el apoyo del Programa de Post grado en Ingeniería de Construcción Civil de la Universidad Federal del Paraná (PPGECC-UFPR) y de la Pontificia Universidad Católica del Paraná (PUC PR) y el Consejo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (CNPq).

6. REFERENCIAS

- Marcondes, C. G. N. (2012), *Adição de nanotubos de carbono em concretos de cimento portland – absorção, permeabilidade, penetração de cloretos e propriedades mecânicas*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil.
- Couto, G. G. (2006), *Nano partículas de níquel: síntese, caracterização, propriedades e estudo de sua utilização como catalisadores na obtenção de nano tubos de carbono*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil.
- Zarbin, A. J. G. (2007), Química de nano materiais. *Química Nova*, v.30, n.6, p. 1469-1479.
- Herbst, M. H; Macêdo, M. I. F; Rocco, A. M. (2004), *Tecnologia dos nanotubos de carbono: tendências e perspectivas de uma área multidisciplinar*. *Química Nova*, v.27, n.6, p. 986-992.
- Batiston, E. R., Hampinelli, D., Oliveira, R. C., Gleize, P. J. P. (2010), “*Funcionalização e efeito da incorporação de nano tubos de carbono na cinética de hidratação em matrizes cimentícias*” in: Congresso Brasileiro do Concreto, 52., Ibracon, Fortaleza (Brasil), pp. 1-12.
- Makar, J., Margeson, J., Luh, J. (2005), “Carbon nanotube / cement composites – early results and potential applications” in: International Conference on Construction Materials: Performance, Innovations and Structural Implications, v.3., pp. 1-10.
- Chaipanich, A., Nochaiva, T., Wongkeo, W., Torkittikul, P. (2010), *Compressive strength and microstructure of carbon nanotubes-fly ash cement composites*. *Materials Science and Engineering: A*, v.527, n.4-5, p. 1063–1067.
- Melo, V. S., Calixto, J. M., Ladeira, L. O., Silva, A. P., Oliveira, S. (2011), *Desempenho de argamassas de cimento Portland contendo nanotubos de carbono e aditivo de melamina*. *Revista Construindo*, v.3, n.2, p. 21-26.
- Li, H., Xiao, H. G., Ou, J. P. (2004), *A study on mechanical and pressure-sensitive properties of cement mortar with nanophase materials*. *Cement and Concrete Research*, v.34, n.6, p. 435-438.
- Konsta-Gdoutos, M. S., Zoi, S. M., Surendra, P. S. (2010), *Highly dispersed carbon nanotube reinforced cement based materials*. *Cement and Concrete Research*, v.40, n.7, p. 1052-1059.
- Koshio, A., Yudasaka, M., Zhang, M., Iijima, S. (2001), *Uma maneira simples de reagir quimicamente Nanotubos de carbono de parede simples com materiais orgânicos usando a ultrasonificação*. *Nano Letters*, v.1, n.7, p. 361-363.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica – Método de ensaio. NBR NM 23, Rio de Janeiro, 2001.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. Agregados para concreto – Especificação. NBR 7211, Rio de Janeiro, 2005.
- American Society for Testing and Materials. Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete. ASTM C 494 / C 494M, USA, 2011.
- American Society for Testing and Materials. Standard Specification for Chemical Admixtures for Use in Producing Flowing Concrete. American ASTM C 1017/C 1017M, USA, 1998.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos. NBR 11768, Rio de Janeiro, 2011.

- Mehta, P. K., Monteiro, P. (2008), “*Concreto – Estrutura, Propriedades e Materiais*” (São Paulo, Brasil: IBRACON), 3ed., p. 674.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. Agregados - Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio. NBR NM 248, Rio de Janeiro, 2001.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem – Método de ensaio. NBR NM 46, Rio de Janeiro, 2003.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente – Método de ensaio. NBR NM 52, Rio de Janeiro, 2009.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios – Método de ensaio. NBR NM 45, Rio de Janeiro, 2006.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. NBR NM 30, Rio de Janeiro, 2001.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. Agregado miúdo - Determinação de impurezas orgânicas – Método de ensaio. NBR NM 49, Rio de Janeiro, 2001.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. Agregados — Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis – Método de ensaio. NBR 7218, Rio de Janeiro, 1987.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. NBR 6118, Rio de Janeiro, 2007.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. Concreto – Preparo, controle e recebimento – Requisitos. NBR 12655, Rio de Janeiro, 2006.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova - Procedimento. NBR 5738, Rio de Janeiro, 2003.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos – Método de ensaio. NBR 7222, Rio de Janeiro, 2011.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. Argamassa e concreto endurecido - Determinação da absorção de água por imersão – Índice e vazios e massa específica – Método de ensaio. NBR 9778, Rio de Janeiro, 2005.
- Reunion Internationale des Laboratoires D’Essais et de recherches sur les Materiaux et les Constructions. RILEM Test Method II.4: Water absorption tube test, 2006.
- Melo, V. S. (2009), *Nanotecnologia aplicada ao concreto: efeito da mistura física de nanotubos de carbono em matrizes de cimento Portland*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil.
- Nochaiya, T., Chaipanich, A. (2011), *Behavior of multi-walled carbon nanotubes on the porosity and microstructure of cement-based materials*. Applied Surface Science, v. 257, n. 6, p. 1941–1945.
- Ludvig, P., Calixto, J. M., Ladeira, L. O., Gaspar, I. C. P. (2011), *Using Converter Dust to Produce Low Cost Cementitious Composites by in situ Carbon Nanotube and Nanofiber Synthesis*. Materials, v. 4, n.3, p. 575-584.
- Melo, V. S., Calixto, J. M. F., Ladeira, L. O., Silva, A. P. (2011), *Macro- and Micro-Characterization of Mortars Produced with Carbon Nanotubes*. ACI Materials Journal, v. 108, n. 3, p. 327-332.



Potencial del método de síntesis de materiales cerámico-cementicios procesados por vías alternativas

J. D. Martínez-Vásquez¹, D. E. Ortega-Zavala¹, G. Vargas Gutiérrez¹, A. F. Fuentes¹, J. I. Escalante-García¹

¹ Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN, Unidad Saltillo, México.

Información del artículo

DOI:

<http://dx.doi.org/10.21041/ra.v5i2.81>

Artículo recibido el 17 de Diciembre de 2014, revisado bajo las políticas de publicación de la Revista ALCONPAT y aceptado el 07 de Marzo de 2015. Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el segundo número del año 2016 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del primer número del año 2016.

© 2015 ALCONPAT Internacional

Información Legal

Revista ALCONPAT, Año 5, No. 2, Mayo – Agosto 2015, es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A.C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat_int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org
Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida Yucatán, C.P. 97310, fecha de publicación: 30 de mayo de 2015.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

RESUMEN

Se estudiaron formulaciones de materiales cerámicos ligados termoquímicamente empleando materias primas silicoaluminosas. Se prepararon mezclas con baja relación agua:sólidos y se procesaron mediante prensado hasta de 30 MPa. Las probetas se curaron a temperaturas de 200°C por 2 horas. Se evaluó la resistencia a la flexión después del tratamiento térmico; los valores registrados alcanzaron entre 6.9 y 15.7MPa, lo cual es superior a los cementos procesados por rutas convencionales. Las microestructuras obtenidas indicaron la formación de matrices densas, sugiriendo una respuesta favorable de las materias primas al proceso de activación. Las propiedades mecánicas variaron con la cantidad y tipo de materiales mezclados. La difracción de rayos X indicó que no hubo formación de fases zeolíticas y las fases cristalinas no reaccionaron durante el proceso de curado. El procesamiento propuesto es prometedor para obtener altas propiedades mecánicas en tiempos de curado cortos.

Palabras clave: geopolímeros; cerámicos químicamente ligados; arcillas activadas; prefabricados.

ABSTRACT

Formulations of thermochemically bonded ceramics based on silicoaluminate raw materials were characterized. The mixtures were prepared using low water:solid and these were pressed under up to 30MPa. The specimens were cured for 2 hours at 200°C and were further characterized. The flexural strength registered 6.9-15.7 MPa, which was higher than common cements conventionally processed. The microstructures were dense, suggesting a favorable response of the mixtures to the activation process. The flexural strength varied with the type and amount of mixed raw materials. X-ray diffraction indicated that the crystalline phases from the raw materials did not react; the formation of zeolites was not observed. The proposed processing is promising in order to obtain high strength in short curing times.

Keywords: geopolymers; ceramics chemically bound; activated clays; precast products.

RESUMO

Estudaram-se o comportamento mecânico de cerâmicos-cimentício silicoaluminosos, ligados termo químicamente. Empregou-se traços com baixa relação água/sólidos que foram prensados com até 30MPa, para obtenção dos corpos de prova. As amostras foram curadas a temperaturas de 200°C por 2h. Avaliou-se a resistência a flexão depois do tratamento térmico; os valores registrados alcançaram entre 6,8MPa e 15,7MPa, o qual é superior ao normalmente obtido com esses cimentos à temperatura ambiente. As microestruturas observadas indicaram a formação de matrizes densas, sugerindo uma resposta favorável das matérias primas ao processo de ativação. As propriedades mecânicas variaram com a quantidade e tipo de materiais utilizados. A difração de raios X indicou que não houve formação de fases zeolíticas e as fases cristalinas não reagiram durante o processo de cura. O processamento proposto é promissor para obter altas propriedades mecânicas em curtos períodos de cura.

Palavras-chave: geopolímeros; cerâmicos termoquímicamente ligados; arcillas activadas; produtos prensados.

Autor de correspondencia: José Iván Escalante García (ivan.escalante@cinvestav.edu.mx)

1. INTRODUCCIÓN

La industria de producción de losetas cerámicas es una gran consumidora de agua y energía debido a las diversas operaciones de molienda, secado y cocción; en estas últimas se pueden alcanzar temperaturas mayores que 1000°C. Dichas operaciones repercuten de forma importante en el costo de fabricación de los productos, por lo que la reducción en el número de éstas es importante desde la perspectiva de la logística. Adicionalmente, para incrementar la sostenibilidad ambiental de dicha industria, es de interés reducir el consumo de combustibles fósiles, lo que directamente repercute en menos emisiones de gases de efecto invernadero. Esto puede lograrse con el diseño de rutas alternativas que permitan preservar en lo posible las cualidades específicas del producto; es decir, manteniendo la calidad y propiedades funcionales como la resistencia mecánica y la resistencia al desgaste.

Una familia de materiales cementicios son aquellos considerados también como cerámicos químicamente ligados (CQL), también conocidos como geopolímeros, cuyo inicio de desarrollo se atribuye a Davidovits, quien registró varias patentes desde los años 80 (Davidovits, 1982, Davidovits, 1991). Los CQL son polímeros inorgánicos que son también identificados como cementos activados por álcalis; sin embargo, el nombre de “geopolímeros” se ha generalizado aunque con desacuerdos en la literatura respecto a la relevancia del nombre. En este artículo se les referirá como CQL. Los CQL pueden ser de sistemas silicoaluminosos que consisten de compuestos con estructuras a base de tetraedros de SiO_4 y AlO_4 ligados compartiendo oxígenos en diversas configuraciones, dependiendo de la composición química. Los CQL poseen propiedades de materiales cerámicos-cementicios y se consolidan por la co-polimerización de las especies referidas, que resultan de la disolución de materias primas selectas en condiciones de alto pH y generalmente se sintetizan a temperaturas relativamente bajas.

1.1 Materias primas para la obtención de CQL.

Las materias primas para CQL silicoaluminosos deben cumplir con algunas características esenciales: (1) Composición de rica en SiO_2 y Al_2O_3 ; (2) Fase amorfa abundante: fundamental para que sea susceptible al ataque alcalino; (3) Tamaño de partícula pequeño para incrementar su reactividad.

Las arcillas son compuestos a base de silicoaluminatos, los cuales son las materias primas más abundantes en la corteza terrestre. Las arcillas calcinadas han sido usadas como materia base para la producción de CQL (Barbosa et al, 2000), los desarrollos iniciales se han basado en metacaolín ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7$) (Davidovits, 1982), el cual proviene de calcinación de la caolinita ($2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Ésta última es una arcilla una silicoaluminosa de configuración 1:1 (Rowles y O’connor, 2003), conformada por de una capa de átomos de Silicio en coordinación tetraédrica con oxígenos y una capa átomos de Aluminio en coordinación octaédrica con Oxígenos y iones OH^- (llamada también gibsita). La caolinita tiene una composición química en %e.p.: SiO_2 46.54%; Al_2O_3 39.50%; H_2O 13.96%, es prácticamente químicamente inerte bajo condiciones ambientales normales. Sin embargo, al calcinar la caolinita a 650-900°C, se pierden los grupos OH^- de la capa del Al (Shvarzman et al, 2003), la capa del Si permanece inerte, mientras que la del Al colapsa y cambia a coordinación tetraédrica (Kakali et al, 2001); el producto es metacaolín el cual es amorfo a la difracción de rayos-X. Esta conversión aumenta la reactividad química en medios alcalinos a temperatura ambiente. Los minerales de caolinita pueden contener impurezas como cuarzo y otras arcillas, así como sustitución de hierro y/o titanio por el aluminio; diversos trabajos previos realizados en Cinvestav Saltillo (Arellano-Aguilar et al., 2014, Burciaga-Diaz et al., 2012, Burciaga, 2014) han mostrado la viabilidad de usar minerales de diferentes purezas.

1.2 Procesamiento de materiales CQL.

Comparado con los cementos convencionales, los CQL presentan menores emisiones ambientales y mejores propiedades tecnológicas; adicionalmente pueden prepararse partiendo de materias primas abundantes y procesando materiales de consistencia tipo resina moldeable. Los CQL endurecen mediante reacciones químicas que ocurren gradualmente, desarrollando propiedades de interés para muchas aplicaciones. El procesamiento de los CQL depende de diversos factores, cuyos efectos no han sido entendidos completamente en la literatura, estos son:

- | | |
|--|------------------------------|
| (a) Tipo y cantidad de activantes químicos | (b) Tratamiento térmico |
| (c) Composición de la materia prima | (d) Grado amorfo del mineral |
| (e) Tamaño de partícula | (f) Cantidad de agua |

La composición química de la formulación es de crucial importancia en la definición de las propiedades mecánicas (Burciaga-Díaz et al, 2012); ésta se define con base en relaciones molares como: $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{M}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ y $\text{M}_2\text{O}/\text{H}_2\text{O}$ (Burciaga-Díaz y Escalante-García, 2004). La literatura reporta rangos variables para diversas materias primas; los valores reportados en las patentes originales de Davidovits, no resultan siempre en las mejores propiedades. La composición química puede hacerse reportando la concentración de las materias primas y álcalis empleados. Los agentes activantes más comunes son silicatos alcalinos del tipo $\text{M}_2\text{O}:\text{xSiO}_2$ para promover altos niveles de pH (Palomo et al, 1999; Davidovits, 1984), donde M puede ser Na o K.

Se han propuesto que las reacciones de los materiales CQL de silicoaluminatos ocurren en 3 etapas: **(1)** Destrucción de la estructura atómica. El medio alcalino ofrece un estímulo químico, como la variación de la fuerza iónica del medio que ocurre al agregar metales alcalinos que tienen características de electro-donadores. Esto conlleva al rompimiento de enlaces Me-O, Si-O-Si, Al-O-Al y Al-O-Si. El rompimiento de los enlaces sucede por la alteración de la densidad electrónica alrededor de los átomos de silicio y Aluminio. Algunas de las especies que se forman son: ácido silícico ($\text{Si}(\text{OH})_4$), aniones Si-O^- , $\text{Al}(\text{OH})_4^-$, $\text{Al}(\text{OH})_5^{2-}$ y $\text{Al}(\text{OH})_6^{3-}$. **(2)** Los productos de la etapa anterior entran en contacto e inicia la policondensación de nuevos productos. Puede observarse endurecimiento y ocurre una reducción del pH, posiblemente por la interacción de los hidrosilicatos e hidroaluminatos con los álcalis. **(3)** Precipitación de productos derivada de las partículas formadas en la etapa anterior. Se incrementan las propiedades mecánicas. La disminución del pH provoca la condensación del gel de sílice, favoreciendo las propiedades mecánicas.

La síntesis convencional de materiales CQL implica el mezclado de los polvos de materia prima con las soluciones activantes, con el posterior vaciado para someterlas a curado y lograr la solidificación; ésta última etapa ocurre a temperaturas entre la ambiental hasta 120°C (Barbosa y McKenzie, 2003; de Vargas et al, 2011; Burciaga-Díaz et al, 2012). El curado a alta temperatura permite rápida ganancia de resistencia mecánica, algunos autores reportan que a mayores temperaturas se obtienen mayores resistencias, por ejemplo 60MPa por curado de 24 horas a 85°C (Palomo et al, 1999, Rowles y O'connor, 2003); sin embargo, también se ha reportado que en fechas posteriores a las 24 h de curado a alta temperatura, la ganancia de resistencia mecánica es mínima (Arellano-Aguilar et al, 2014). La información sobre el curado a temperaturas mayores que 100°C es escasa en la literatura.

1.3 Esta investigación.

Existe en la literatura un gran número de investigaciones relacionadas con la síntesis de materiales geopoliméricos a partir de desechos industriales como escorias metalúrgicas, cenizas, lodos, etc., así como con el uso de arcillas calcinadas de alta pureza. Sin embargo, existe un número limitado de investigaciones sobre la preparación de materiales CQL a base de minerales arcillosos de baja pureza (Burciaga-Díaz et al., 2012; Arellano-Aguilar et al., 2014); para éstas existe un gran

potencial y la oportunidad debe explorarse (Davidovits, 2002), tal es el caso de esta investigación. Por otro lado, al respecto de la fabricación de materiales CQL, existen muy pocas publicaciones que combinen las condiciones de procesamiento propuestas en esta investigación (Asbridge et al., 2002, Zivica et al., 2011), a decir: el uso de bajas cantidades de agua y la compresión uniaxial. Así, en esta investigación se exploró una estrategia de fabricación de materiales CQL en forma de plaquetas utilizando materias primas similares a las usadas por la industria cerámica, pero de baja pureza comparadas con las comúnmente reportadas para la síntesis de materiales cementicios. En contraste con la industria de la cerámica tradicional, este artículo propone el uso de una ruta de procesamiento más simple, con menos pasos y con menores requerimientos de agua y temperaturas de procesamiento térmico, con potencial de igualar las propiedades mecánicas de las losetas producidas convencionalmente, pero de forma más sustentable.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Por razones de protección de propiedad intelectual se omiten algunos parámetros experimentales y de procesamiento de los materiales investigados.

2.1 Materias Primas.

Algunos detalles experimentales se omiten por protección de propiedad intelectual y secreto industrial. Se emplearon tres minerales silicoaluminosos etiquetados como MA, MB y MC; la MA se sometió a calcinación a 700°C y se etiquetó como MAc. La Tabla 1 presenta la composición química de las materias primas empleadas obtenida mediante fluorescencia de rayos X (FRX); puede notarse que son materiales silicoaluminosos con algunas diferencias entre ellas, la MA tiene altos contenidos de compuestos de Fe. La mineralogía obtenida mediante difracción de rayos X (DRX) se presenta en la Figura 4, por razones de optimización de espacio y para mejor comparación de datos, se agruparon los patrones de las materias primas y de las mezclas investigadas. La diferencia entre la MA y la MAc es la desaparición de las reflexiones de la caolinita, aunque se notó que persisten todas las demás fases cristalinas después de la calcinación a 700°C. Por otra parte, la MB y MC mostraron un halo amorfo en una posición 2theta típica de silicoaluminatos.

Tabla 1. Composición química de las materias primas usadas obtenida mediante fluorescencia de rayos X.

Mineral	% en peso de óxidos						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂	CaO	Na ₂ O
MA	54.5	20.6	10.1	5.7	1.65	0.219	0.15
MB	72.1	14.8	0.916	5.13	-	3.39	3.21
MC	68.66	12.82	0.94	4.76	0.04	4.15	-

2.2 Procesamiento de Materiales.

Después de una serie de pruebas preliminares realizadas para determinar algunos parámetros experimentales, se prepararon 4 mezclas mortero conteniendo las materias primas antes descritas; la Tabla 2, describe las mezclas preparadas. Los agentes activantes fueron compuestos de Na₂O·SiO₂·H₂O con relaciones en peso SiO₂/Na₂O menores que 2. El Na₂O se agregó en cantidades similares a las empleadas para la preparación de materiales CQL de acuerdo a la literatura para arcillas calcinadas. La cantidad de agua usada fue solo la necesaria para poder procesar las probetas de acuerdo al siguiente procesamiento.

Tabla 2. Sistemas elaborados para el estudio.

Mezcla	Componente 1	Componente 2	Relación Componente1/Componente2
M1	MAc	MB	Alta 2/1
M2	MAc	MB	Baja 3/1
M3	MAc	MA	Baja 3/1
M4	MAc	MC	Baja 3/1

Se mezclaron los polvos con la solución activante usando una mezcladora de alta velocidad. Los polvos se depositaron en moldes para fabricar probetas con dimensiones de 4x16cm con un espesor de 0.8-1.0cm. Los polvos se sometieron a compresión uniaxial aplicando hasta 30.4 MPa de presión. Las probetas desmoldadas se sometieron a curado a 200°C por 120 minutos. Las probetas procesadas termoquímicamente se dejaron enfriar antes de la caracterización posterior.

2.3 Caracterización de Materiales.

Las probetas se sometieron a pruebas de medición de resistencia a la flexión usando una máquina hidráulica siguiendo la norma ISO 10545-4. Cabe resaltar que por la dificultad del procesamiento de las muestras, solo se evaluó la resistencia a la flexión; la cual, para este tipo de materiales, es más importante que la resistencia a la compresión. Adicionalmente se midió la densidad de las muestras mediante el método de empuje hidrostático o de Arquímedes. De los restos de las probetas se seleccionaron muestras para procesarlas por molienda usando un molino planetario con medio de ágata; las muestras se molieron hasta pasar la malla de 105µm para ser caracterizadas mediante DRX (Phillips PW3040) bajo las siguientes condiciones de operación: CuK α radiación (1.542 Å), rango de 10-70° 2 θ , con un paso de 0,03° 2 θ y un tiempo de incidencia de 3s por paso. Adicionalmente, se seleccionaron fragmentos sólidos y se montaron en resina para caracterización mediante microscopía electrónica de barrido (MEB Philips XL30ESEM acoplado con espectroscopía por dispersión de energía, EDS) con un voltaje de aceleración de 20 keV. Las muestras para MEB/EDS se montaron en resina y se sometieron a pulido para obtener superficies planas. Se realizaron mediciones puntuales semicuantitativas de composición química con un tiempo de medición de 30 segundos para cada microanálisis.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 3 presenta los resultados de resistencia a la flexión y de densidad de las mezclas. Las diferentes combinaciones de materias primas mostraron notable variación entre la resistencia a la flexión. La mayor resistencia mecánica se observó para la mezcla M1 (MAc-MB con bajo contenido de MB), esta fue cercana a los requerimientos a nivel industrial; adicionalmente, fue 35% mayor que la de la mezcla M4 (MAc-MC con alto contenido de MC). El incremento del contenido de MB entre las mezclas M1 y M2 resultó en una reducción de la resistencia mecánica de 43%. Los valores de densidad no necesariamente correspondieron proporcionalmente con los de resistencia mecánica, por ejemplo M3 fue más densa pero mecánicamente más débil que M1 y M4. Esto podría deberse a diferencias entre las propiedades mecánicas intrínsecas de los productos formados durante la activación termoquímica.

Cabe resaltar que los mayores valores de resistencia a la flexión son superiores a los registrados para materiales CQL convencionales, regularmente mucho menores que 10 MPa a 28 días, lo cual indica que el método de procesamiento propuesto es eficiente para obtener altas propiedades mecánicas en tiempos de curado considerablemente cortos. Considerando que para concretos la resistencia a la flexión es alrededor 10% de la resistencia a la compresión, las mezclas preparadas

tendrían potencialmente entre 69 y 157 MPa de resistencia a la compresión, alcanzada en 2 horas. Los resultados de resistencia a la flexión obtenidos en esta investigación se podrían considerar similares a un reporte previo (Zivica et al., 2011) que usó prensado uniaxial y bajos contenidos de agua; ellos reportaron solo resistencia a la compresión de hasta 146 MPa, que equivaldría a aproximadamente 15 MPa en flexión. Sin embargo, el mineral empleado en el presente trabajo fue de una pureza inferior, lo que representa, en conjunto con el rápido tratamiento de curado propuesto, ahorros económicos.

Tabla 3. Propiedades mecánicas y densidad de las mezclas preparadas.

Mortero	Resistencia a la Flexión (MPa)	Densidad (g/cm ³)
M1	15.7	2.01
M2	8.9	1.76
M3	6.9	2.21
M4	11.6	1.88

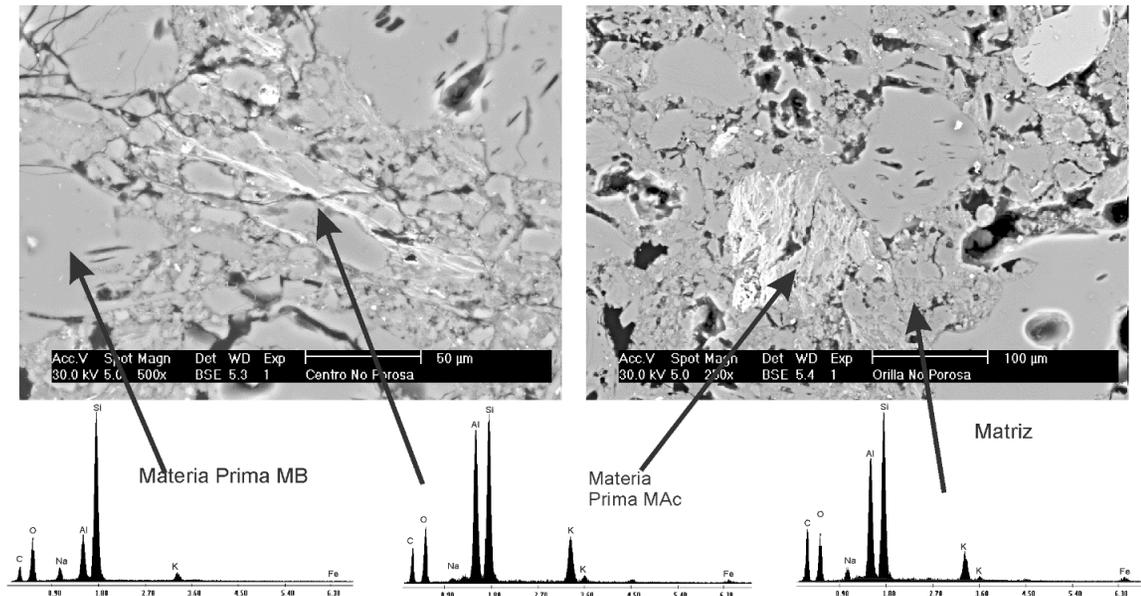


Figura 1. Microestructura obtenida mediante microscopía electrónica de barrido y electrones retrodispersados de la mezcla M1.

La Figura 1 muestra la microestructura de la mezcla M1, la imagen es de electrones retrodispersados. Se notó una buena densificación de la matriz de productos de reacción, en concordancia con la buena resistencia a la flexión. Algunas de las partículas de MB mostraron porosidad interna. Algunas partículas de MAC mostraron zonas brillantes, en ocasiones dichas zonas mostraron morfología alargada; el brillo de esas zonas se atribuye a una mayor emisión de electrones retrodispersados debido a la presencia de compuestos con mayor número atómico promedio, quizá porque son partículas sin reaccionar que no han incorporado agua como sucede en los productos de reacción que se notan más oscuros.

La Figura 2 muestra la microestructura de la mezcla M3 (la de menor resistencia mecánica), se observó una densificación similar a la de la mezcla M1, por lo que la caída de resistencia a la flexión puede deberse al tipo de productos de reacción formados y a las propiedades intrínsecas.

En la microestructura pueden notarse diversas zonas brillantes, las cuales resultaron ricas en Fe y Ti, acorde con la composición química de la MAc.

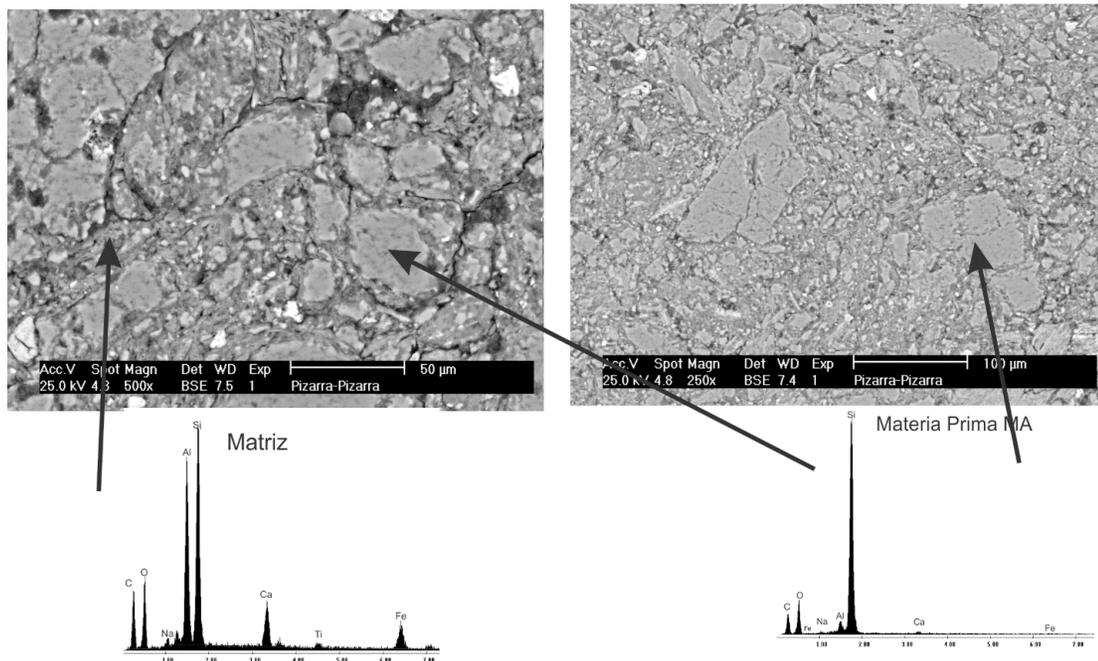


Figura 2. Microestructura obtenida mediante microscopía electrónica de barrido de la mezcla M3.

La Figura 3 muestra las micrografías de la mezcla M4, en la que se observó una densificación similar a las M1 y M3; las zonas brillantes mostraron presencia de Fe y Ti, de alto número atómico, en la matriz correspondiente a la MA, mientras que la MC mostró una composición química consistente de silicoaluminato en la mayoría de las partículas (similar a MB).

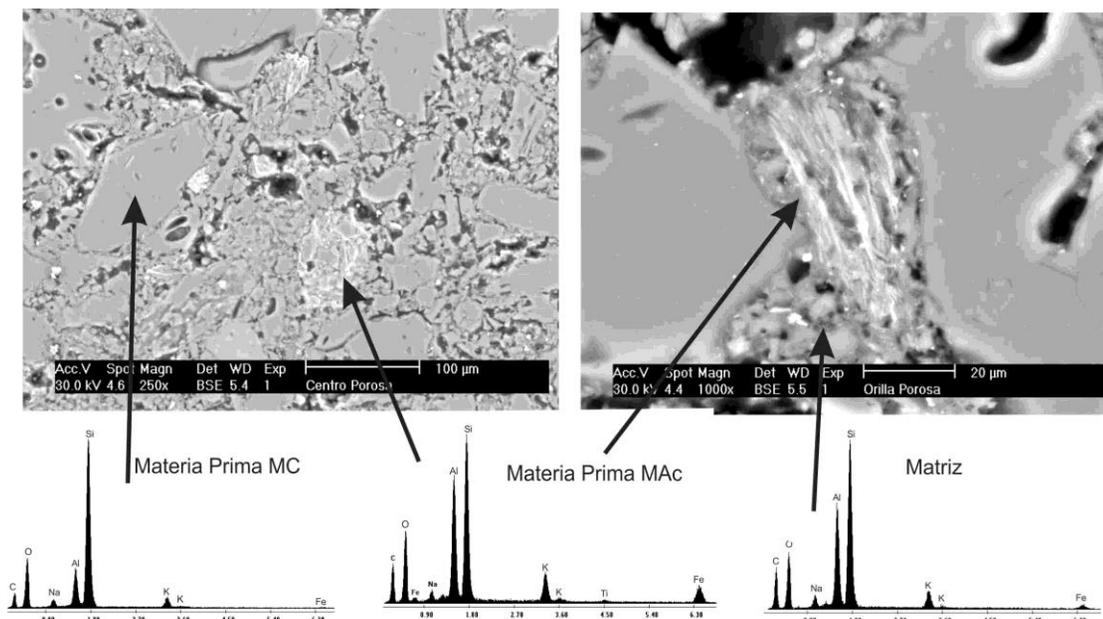


Figura 3. Microestructura obtenida mediante microscopía electrónica de barrido de la mezcla M4.

Es evidente que el tipo y cantidad de componente 2 (ver Tabla 2. **Sistemas elaborados para el estudio.**) influyen directamente en las propiedades resultantes. En las micrografías es difícil distinguir los productos de reacción de las materias primas sin reaccionar, ya que se parte de silicoaluminatos y se forman silicoaluminatos, sin incorporación de agua que permita distinguirlos por tonos de gris como en el caso de los estudios de cemento portland hidratado. Sin embargo, por las altas propiedades mecánicas, puede inferirse que los productos de cementicios de reacción están íntimamente entremezclados con las materias anhidras.

La Figura 4. **Patrones de difracción de rayos X de las materias primas empleadas y las mezclas investigadas.** muestra los diagramas de difracción de rayos X de las mezclas investigadas, los patrones de las materias primas se incluyeron para fines de caracterización y comparación. En términos generales se observó que las fracciones cristalinas persistieron después del proceso de solidificación, indicando que fueron inertes después del proceso de curado a 200°C por 2h. No se observó la formación de fases tipo zeolitas como se ha reportado para algunos materiales CQL. Por otra parte, los productos de reacción con propiedades cementicias de los materiales CQL se caracterizan por tener naturaleza amorfa. Para las mezclas M1, M2 y M4 se observó la persistencia de los halos amorfos, se observó que dichos halos se ensancharon y desplazaron ligeramente hacia la izquierda, indicando la formación de productos adicionales con estructura amorfa distinta a las de las materias primas de partida. En contraste, para la mezcla M3 no se observó halo amorfo, aunque la consolidación de propiedades mecánicas indica que si se formaron y es muy posible que la elevada cristalinidad de esta muestra se solape con los restos de fase amorfa que puedan existir en el material.

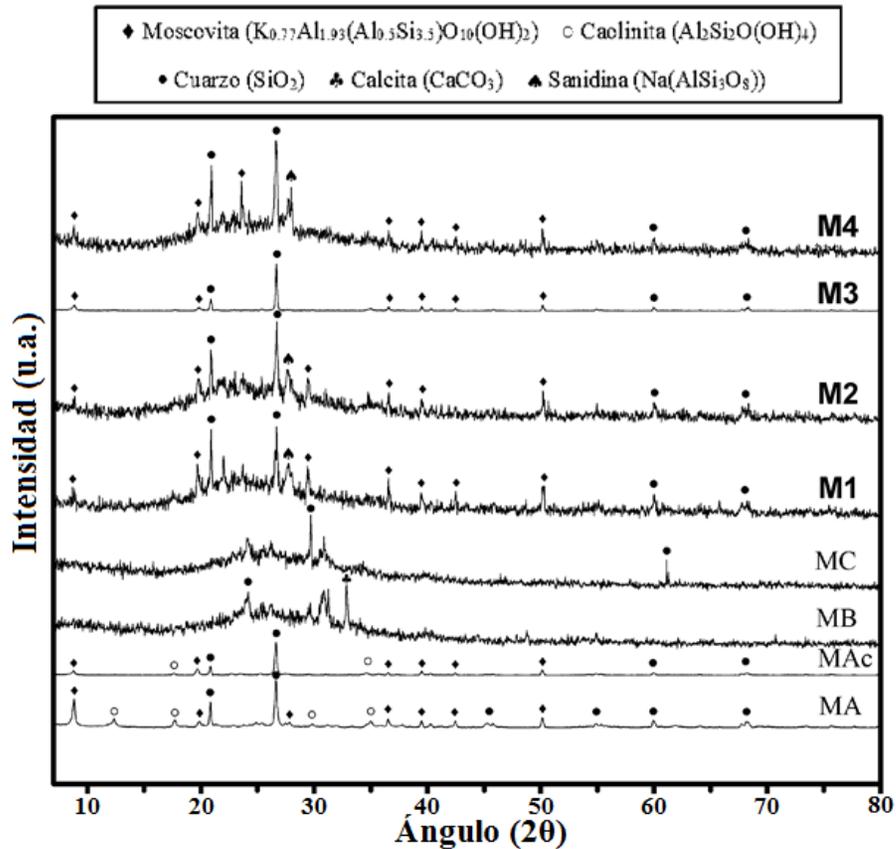


Figura 4. Patrones de difracción de rayos X de las materias primas empleadas y las mezclas investigadas.

4. CONCLUSIONES

- El procesamiento de prensado uniaxial favorece la densificación de las matrices de los cementos químicamente ligados, lo que repercute en alta resistencia a la flexión de 6.9-15.7 MPa
- El procesamiento de térmico acelera los procesos de reacción, permitiendo la formación de productos con carácter cementicio, íntimamente mezclados en matrices densificadas.
- El proceso de activación química se reforzó con el tratamiento de compresión y tratamiento térmico, empleando concentraciones de Na₂O similares a las comúnmente reportadas para cementos químicamente ligados
- La combinación de la activación química con el tratamiento térmico podría llamarse activación termoquímica y puede tener potencial para la producción de materiales con propiedades similares a las de los cerámicos procesados a 1000°C pero con la ventaja del ahorro energético y de agua.
- Se requieren aún más investigaciones para profundizar en la caracterización de la estructura de las muestras para entender los mecanismos de reacción.

5. REFERENCIAS

- Arellano-Aguilar R., Burciaga-Díaz O., Gorokhovskiy A., Escalante-García J.I. (2014), “*Geopolymer mortars based on a low grade metakaolin: Effects of the chemical composition, temperature and aggregate:binder ratio*”, Construction and Building Materials, V.50, pp. 642–648.
- Asbridge A.H., Page C.L., Page M.M. (2002), “Effects of metakaolin, water/binder ratio and interfacial transition zones on the microhardness of cement mortars”, Cem Conc Res, V.32, pp. 1365-1369.
- Barbosa F.F., MacKenzie J.D., Thaumaturgo C. (2000), “*Synthesis and characterization of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: sodium polysialate polymers*”, International Journal of Inorganic Materials, V. 2, pp. 309-317.
- Barbosa V.F., MacKenzie K.J. (2003), “*Thermal behavior of inorganic geopolymers and composites derived from sodium polysialate*”, Mater Res Bull, V. 38, pp. 319–31.
- Burciaga Díaz O. (2004), “*Investigación inicial del uso de caolín del estado de Zacatecas en la preparación de cerámicos a base de polímeros inorgánicos.*”, Tesis de licenciatura, Instituto Tecnológico de Zacatecas/Cinvestav Saltillo.
- Burciaga Díaz O., Escalante García J.I. (2004), “*Efecto de parámetros químicos de soluciones alcalinas sobre las propiedades mecánicas de polímeros inorgánicos base metacaolín*”, Memorias del 26 congreso internacional en metalurgia y materiales, Saltillo, Coahuila (MEX), artículo 16.
- Burciaga-Díaz O., Escalante-García J I, Gorokhovskiy A. (2012), “*Geopolymers based on a coarse low-purity kaolin mineral: Mechanical strength as a function of the chemical composition and temperature*”, Cement & Concrete Composites, V. 34, pp. 18–24.
- Davidovits J., Bouterin C. (1982), “*Procédé de fabrication de revêtements de sols ou de murs par polycondensation de géopolymères*”, FR Brevet 82 10864.
- Davidovits J. (1984), “*Synthetic mineral polymer compound of the silicoaluminates family and preparation process*”, US Patent 4,472,199.
- Davidovits J. (1991), “*Geopolymers: Inorganic Polymeric New Materials*”, J Thermal Analysis, Vol 37, pp. 1633-1656.

- Davidovits J. (2002), “*30 years of successes and failures in geopolymers applications. Market trends and potential breakthroughs*”, Geopolymer 2002 conference, October 28-29, Melbourne Australia, pp 1-16.
- de Vargas A.S., Dal Molin CC, Antônio CF, da Silva F J, Pavão B, Veit H (2011), “*The effects of Na₂ O/SiO₂ molar ratio, curing temperature and age on compressive strength, morphology and microstructure of alkali-activated fly ash-based geopolymers*”. CemConcrComp, V. 33, pp. 635–60.
- Kakali G., Perraki T., Tsvivilis. S. (2001), “*Thermal treatment of kaolin: the effect of mineralogy on the pozzolanic activity*”. Applied Clay Science, V. 20, pp. 73-80.
- Palomo A., Grutzeck M.W., Blanco M.T. (1999), “*Alkali-activated fly ashes A cement for the future*”, Cem Concr Res, V. 29, pp. 1323-1329.
- Rowles M, O’Connor B (2003), “*Chemical optimization of the compressive strength of aluminate geopolymers synthesised by sodium silicate activation of metakaolinite*”, J of Materials Chemistry, V. 13, pp. 1161-1165.
- Shvarzman A., Kovler K., Grader G.S. (2003), “*The effect of dehydroxylation/amorphization degree on pozzolanic activity of kaolinite*”, Cement and Concrete Research, V. 33, pp. 405- 416.
- Zivica V., Balkovic S., Drabik M. (2011), “*Properties of metakaolin geopolymer hardened paste prepared by high-pressure compaction*”, Con and Bui Mat, V. 25, pp. 2206-2213.



Refuerzo estructural de una edificación histórica en la Ciudad de Rio Branco- Acre

D. C. S. Amorim¹, D. R. C. Oliveira¹

¹ Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidad Federal de Pará, Brasil.

Información del artículo

DOI:

<http://dx.doi.org/10.21041/ra.v5i2.82>

Artículo recibido el 01 de Diciembre de 2014, revisado bajo las políticas de publicación de la Revista ALCONPAT y aceptado el 30 de Marzo de 2015. Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el segundo número del año 2016 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del primer número del año 2016.

RESUMEN

Este trabajo presenta el uso de la técnica de refuerzo estructural por encamisado aplicada en la reforma de la edificación histórica denominada “Casarão”, debido a la necesidad arquitectónica de permanecer lo más fiel al proyecto original, justificándose por la intención de aumentar la capacidad resistente sin que haya aumento sustancial en la sección transversal de los pilares. Los resultados obtenidos a través del análisis del refuerzo en relación a los pilares rectangulares sometidos a flexión compuesta, esfuerzos cortantes y torsiones, en concordancia con la NBR 6118 (ABNT, 2014), indican que la técnica estudiada fue eficiente, pues todas las piezas reforzadas tuvieron una capacidad portante mayor que atiende a los requisitos actuales de seguridad estructural sin comprometer las características arquitectónicas de la edificación.

Palabras clave: edificio histórico; refuerzo estructural; revestimiento.

ABSTRACT

This work presents the use of the technique of structural reinforcement for jacketing applied in the reform of the historical building called "Big House", due to the architectural need to remain as faithful to the original design, justifying the need for increased resilience without substantial increase in the cross section of the pillars. The results obtained by analyzing the reinforcement relative to rectangular columns subjected to bending, shearing and torsional, in accordance with the NBR 6118 (ABNT, 2014), indicated that the studied technique was efficient because all reinforced parts had a greater bearing capacity and met the current requirements without compromising the structural safety of the building's characteristic architectural.

Keywords: historic building; structural strengthening; jacketing.

RESUMO

Este trabalho apresenta o emprego da técnica de reforço estrutural por encamisamento aplicada na reforma da edificação histórica denominada “Casarão”, devido à necessidade arquitetônica de permanecer o mais fiel ao projeto original, justificando-se pela necessidade do aumento de capacidade de resistência sem que haja aumento substancial na seção transversal dos pilares. Os resultados obtidos através da análise do reforço em relação aos pilares retangulares submetidos à flexão composta, esforços cortantes e torsores, em concordância com a NBR 6118 (ABNT, 2014), indicaram que a técnica estudada foi eficiente, pois todas as peças reforçadas tiveram uma capacidade portante maior e atenderam aos requisitos atuais de segurança estrutural sem comprometer as características arquitetônicas da edificação.

Palavras-chave: edificação histórica; reforço estrutural; encamisamento.

Autor de correspondencia: Denis Cley Souza Amorim (deniscley25@yahoo.com.br)

© 2015 ALCONPAT Internacional

Información Legal

Revista ALCONPAT, Año 5, No. 3, Septiembre – Diciembre 2015, es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A.C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat_int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org
Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida Yucatán, C.P. 97310, fecha de publicación: 30 de mayo de 2015.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

1. INTRODUCCIÓN

El “Casarão” (Figura 01), edificio público construido en la década de 1930, representa una estructura mixta de concreto armado y madera en buen estado de conservación en su parte central, manteniendo características arquitectónicas eclécticas sirias y libanesas, con influencia europea, representando un estilo regional de gran importancia cultural de la Ciudad de Rio Branco, en el estado de Acre. Su revitalización atiende a una demanda de la sociedad al gobierno estatal, que recibió una solicitud con centenas de firmas con esa querrela. El edificio histórico fue derribado por el Consejo Estadual de Patrimonio Histórico y Cultural en el día 13 de agosto de 2009, por iniciativa de la sociedad civil, siendo homologado el día 30 de abril de 2010, a través del decreto número 5.235, sobre la protección y vigilancia del poder público estatal, por intermedio del Departamento de Patrimonio Histórico y Cultural de la Fundación de Cultura y Comunicación Elias Mansour.



Figura 1. El Casarão.

En este estudio de caso los pilares de la edificación fueron evaluados analítica y computacionalmente para verificación de sus resistencias, atendiendo a los requisitos vigentes de seguridad estructural. Así como en diversas edificaciones antiguas en la ciudad de Rio Branco, el concreto de estas columnas fue dosificado con trozos de ladrillos como agregado grueso en sustitución de los agregados normalmente usados, como canto rodado y piedra. No habiendo comprobación técnica de la resistencia de este material para atender la norma NBR 6118 (ABNT, 2014), se realizaron procedimientos de extracción de núcleos y los resultados presentan resistencia a la compresión del concreto por debajo de lo especificado en el proyecto estructural de reforma del edificio, realizado con ayuda de un programa computacional. La verificación de los resultados obtenidos en este refuerzo se vuelve importante porque la técnica del encamisado con concreto armado es la más usada y aun así representa dificultades de ejecución en obras históricas debido a la necesidad arquitectónica, consideradas culturalmente indispensables en el patrimonio arquitectónico de la ciudad, debiendo permanecer lo más fiel a su forma original, sin que haya aumento sustancial en la sección transversal de las columnas. El encamisado del concreto armado es viable en virtud de las ventajas económicas, rapidez de ejecución y coherencia con el proyecto arquitectónico.

2. METODOLOGIA ADOPTADA

2.1 Características de la edificación y del proyecto.

La edificación a ser revitalizada se llama Casarão y se localiza en la Avenida Brasil número 310, en la ciudad de Rio Branco, estado de Acre. Posee 405,1 m² de área construida, el Casarão es compuesto de sótano, planta baja y primer piso, con un estacionamiento de 705,0 m² detrás es un área libre de 154,7 m² en el frente. Todas las etapas del proceso de revitalización del edificio fueron de responsabilidad del Gobierno del Estado de Acre y siguieron un cronograma ejecutivo previamente establecido y detallado. El plano director municipal, a través da ley 1611 de 27 de Octubre de 2006, clasificó el Casarão como una edificación localizada en la ZPHC (Zona de Preservación Histórica Cultural), con índice de ocupación de 70% (810,0 m²), coeficiente de aprovechamiento 6 (7.800,0 m²) y con índice de permeabilidad de 10% (130,0 m²). Durante el proceso de revitalización fue constatada la necesidad de refuerzo estructural apenas en el trecho del sótano de los pilares 21, 30 e 41 para las nuevas cargas, lo que no ocurrió con los demás pilares. La Figura 2 (forma pavimento superior) muestra la situación original de los pilares y la propuesta de refuerzo.

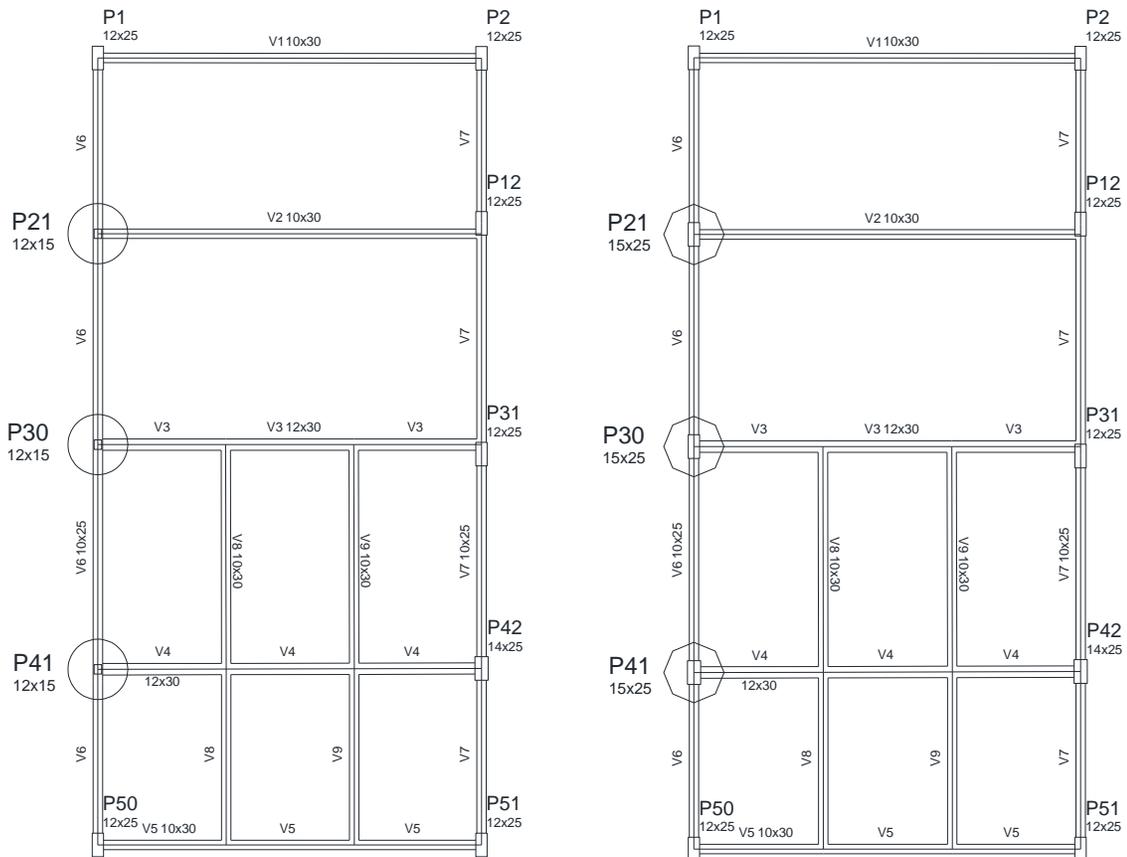


Figura 2. Ubicación y dimensiones de los pilares P21, P30 y P41 antes y después del refuerzo (derecha).

En la reforma de la edificación, fueron mantenidos los elementos de época y las áreas construidas que no estaban en el proyecto arquitectónico original fueron removidas. Los servicios realizados comprendieron la revitalización de las paredes originales de madera, refuerzo estructural de los pilares, sustitución del revestimiento interior del techo, de la estructura de la cubierta, del tejado,

de las tablas del piso de planta baja y primer piso, cambio de las instalaciones eléctrica, de lógica, sanitarias y de sistema contra incendios, creación del área de estar con bancos y papeleras, mantenimiento de tres salas en el primer piso y confección de paredes en los tres pisos. La Figura 3 muestra el aspecto de las fachadas laterales y frente del proyecto de revitalización.



Figura 3. Aspecto final proyectado para el Casarão.

2.2 Verificación del problema.

Para la verificación de la seguridad de la estructura existente, fueron realizadas visitas de fiscalización y seguimiento al sitio de obra durante la ejecución de la obra de revitalización, donde fueron identificados los procedimientos, técnicas y equipos utilizados en las intervenciones, siendo realizado el registro fotográfico en todas las etapas del proceso ejecutivo en los años de 2009 y 2010. Antes de realizar cualquier procedimiento en la estructura, el equipo técnico evidenció la importancia de ensayos de compresión axial en núcleos de concreto para la identificación de eventuales problemas relacionados con la resistencia del concreto, una vez que el mismo usado originalmente fue confeccionado con trozos de ladrillos y tejas. Los resultados de los ensayos indican, de modo general, que el concreto usado fue de baja resistencia a la compresión y contenía agregado grueso con mayor dimensión de hasta 50 mm, lo que contribuyó para la formación de cangrejeras en algunas columnas. Cabe resaltar que el uso de agregado grueso derivado de la producción de elementos cerámicos, como ladrillos y tejas, todavía es práctica común en la ciudad de Rio Branco, donde existe escasez de piedra y canto rodado. La Figura 4 muestra el local de extracción del testigo de uno de los pilares y la Tabla 1 presenta los resultados obtenidos para la resistencia a la compresión de los núcleos de concreto de los pilares 21, 30 y 41, cuyos análisis posteriores indican la necesidad de refuerzo estructural en el tramo del sótano.

Además de la baja resistencia a la compresión, también fue verificado que las armaduras de algunos pilares tenían un estado de corrosión avanzado y una severa pérdida de masa, comprometiendo la capacidad resistente las cargas de servicio y hasta las cargas fijas, pues algunas barras fueron totalmente seccionadas por la corrosión. La Figura 5 muestra el aspecto de las barras corroídas en las armaduras de los pilares. Se concluye que los daños eran característicos de procesos de deterioro con naturaleza sistémica, es decir, relacionados con la calidad del concreto utilizado en la ejecución del sistema estructural y, principalmente, al espesor de

recubrimiento del acero que presentó valores entre 10 mm y 15 mm, considerados reducidos para propiciar la necesaria vida útil a la estructura vaciada con concreto conteniendo agregados tan porosos.



Figura 4. Local de la extracción de testigo en un pilar.

Tabla 1. Resistencia a la compresión do concreto.

Pilar	Núcleos (MPa)	Proyecto de refuerzo (MPa)
P21	13,7	25,0
P30	20,1	
P41	14,7	
Média	16,2	



Figura 5. Armadura longitudinal corroída en los pilares.

2.3 Refuerzo estructural.

La metodología empleada en la definición de la técnica de refuerzo estructural a ser usada consideró el conjunto de informaciones sobre el estado de conservación de toda la estructura, buscando llevar al ingeniero proyectista del refuerzo a elaborar un diagnóstico más preciso sobre las causas y consecuencias de las patologías encontradas, pues, de acuerdo con Julio *et al.* (2003), el éxito de las actividades de recuperación o intervención en la estructura depende de una definición clara y precisa acerca de los problemas encontrados, contemplando el diagnóstico y el pronóstico evolutivo de las causas actuantes. Este estudio preliminar fue fundamental para la determinación del nivel de intervención a ser realizado en la estructura, que puede variar de simples reparaciones localizado hasta la necesidad de demolición y reconstrucción. Para el refuerzo estructural fue escogida la técnica de encamisado con concreto armado, pues el concreto puede ser lanzado en moldes o proyectado, volviéndose un material más versátil para el refuerzo o recuperación de estructuras de concreto armado, siendo utilizado en todos los tipos de elementos estructurales y en las más diversas situaciones y condiciones (Mehta & Monteiro, 2014). El refuerzo estructural fue entonces indicado para los pilares 21, 30, 41, en el tramo del sótano, siendo las etapas principales constituidas por repicado de la superficie de los pilares, colocación de la armadura adicional, instalación de los moldes de madera y lanzamiento del concreto con resistencia a la compresión (f_{ck}) de 25 MPa.

2.3.1 Concreto. El concreto utilizado en el refuerzo estructural tuvo su inspección y fiscalización siguiendo las recomendaciones de la norma brasileña para proyecto de estructuras de concreto, NBR 6118 (ABNT, 2014), y el dimensionamiento de la mezcla para llegar a la resistencia a compresión del concreto (f_{ck}) de 25 MPa proporcionó la dosificación en volumen de 1:2:3 y relación agua cemento de 0,5, utilizando agregado grueso de diámetro máximo igual a 9,5 mm. La verificación de la resistencia a compresión del concreto fue realizada por el laboratorio especializado que realizó el vaciado “en sitio” de probetas cilíndricas con 100 mm de diámetro y 200 mm de altura. Fueron vaciadas 3 probetas para cada mezcla realizada por funcionarios de la empresa ejecutora del refuerzo estructural, que fueron entrenados en control de calidad para que la mezcla dimensionada alcanzara la resistencia la compresión especificada por el proyectista del refuerzo estructural.

2.3.2 Armaduras. Las armaduras longitudinales y transversales (estribos) antes y después del refuerzo estructural de los pilares fueron compuestas por barras de acero con los diámetros, cantidades y separaciones presentados en la Tabla 2. El recubrimiento de concreto para los pilares fue de 25 mm y 15 mm la menor y la mayor dirección, respectivamente. La Figura 6 muestra detalles de las secciones de los pilares antes y después del refuerzo estructural por encamisado con el concreto armado, y la Figura 7 muestra los detalles de las armaduras transversales y longitudinales. Los pilares P21, P30 y P41 fueron reforzados apenas en el sótano por ser el tramo donde esos pilares presentaban coeficientes de seguridad debajo de los recomendados por la norma brasileña para proyecto de estructuras de concreto armado para las cargas. La Figura 8 muestra la colocación de las armaduras, donde es posible observar que a pesar de los esfuerzos para preservar al máximo la arquitectura original, las menores dimensiones finales de los pilares, incrementadas por la capa de mortero de revestimiento 20 mm de espesor, fueron mayores que el espesor de la pared.

Tabla 2. Dimensiones de la sección transversal y armaduras de los pilares.

Pilar	Dimensiones del pilar		Acero		
	Sección transversal (mm)		Armaduras (mm)		Tensión de escurrimiento de proyecto (MPa)
	Antes del refuerzo	Después del refuerzo	Antes del refuerzo: Longitudinal / Estribos	Después del refuerzo: Longitudinal / Estribos	
P21	120 x 150	150 x 250	4Ø10,0 / Ø5,0c150	4Ø12,5 / Ø5,0c150	435
P30					
P41					

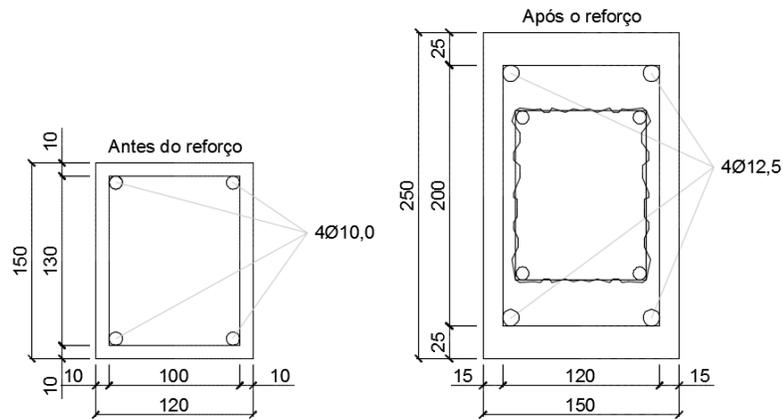


Figura 6. Sección transversal de los pilares antes y después del refuerzo.

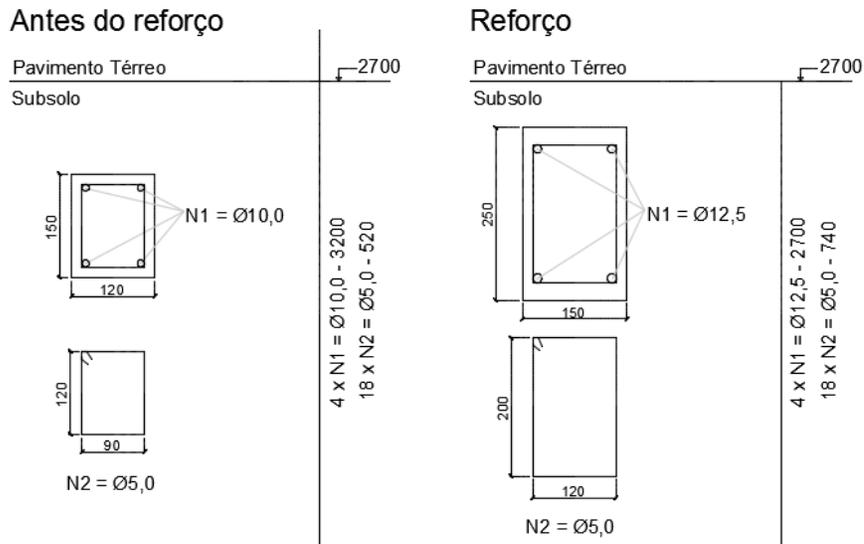


Figura 7. Armaduras de los pilares a reforzar y el refuerzo.



Figura 8. Armaduras longitudinales y estribos del refuerzo de los pilares.

2.3.3 Vaciado del concreto. Para que hubiese mayor adherencia entre el concreto viejo y el concreto nuevo las superficies de los pilares fueron humedecidas para posteriormente lanzar el concreto. El concreto fue lanzado cuidadosamente (Figura 9) y la compactación fue realizada con vibrador de inmersión de diámetro de aguja de 20 mm, primeramente en 50% del volumen de concreto lanzado en cada pilar y, posteriormente, en el volumen restante. Después de la retirada de los moldes de madera los pilares recibieron una capa de revestimiento de mortero para posibilitar el acabado final, es decir, pintura. La Figura 10 muestra el aspecto final de los pilares con las menores dimensiones sobrepasando en 35 mm el espesor de la pared.



Figura 9. Vaciado del concreto de refuerzo de los pilares.



Figura 10. Aspecto final de los pilares reforzados.

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1 Verificación de la seguridad de los pilares originales.

La metodología de cálculo para la verificación de la seguridad de los pilares con y sin refuerzo estructural siguieron las recomendaciones normativas de la NBR 6118 (ABNT, 2014). Primeramente fue realizado un análisis simplificado donde fueron determinados y comparados apenas los esfuerzos normales y solicitaciones de los pilares P21, P30 y P41 antes del refuerzo, con su fuerza normal solicitante mayorada de γ_u (Ecuación 1) y de un coeficiente de mayoración adicional (Ecuación 2). Ya el esfuerzo normal resistente de cálculo fue determinado con la Ecuación 3, siendo que la Ecuación 4 fue utilizada para determinar la resistencia a compresión de cálculo del concreto (f_{cd}) y la Ecuación 5 viabiliza la determinación del coeficiente de seguridad de cada pilar.

a) Parámetros de la Sección transversal. La Sección transversal de pilares y pilares-pared macizos, cualquiera que sea su forma, no debe presentar dimensión menor que 190 mm. Como la menor dimensión del pilar es inferior a 190 mm, en el dimensionamiento las acciones deben ser multiplicadas por un coeficiente adicional γ_n , indicado en la Tabla 3, donde b es la menor dimensión de la Sección transversal del pilar. Para los pilares analizados, $\gamma_n = 1,35$ ($b=120$ mm).

Tabla 3. Valores del coeficiente adicional γ_n NBR 6118 (ABNT, 2014)

b (mm)	≥ 190	180	170	160	150	140	130	120
γ_n	1,00	1,05	1,10	1,15	1,20	1,25	1,30	1,35

b) Fuerza normal solicitante

$$N_{Sd,Eq} = \gamma_u \cdot \gamma_n \cdot N_{Sk} \tag{1}$$

$$\gamma_u = 1 + (6/b) \tag{2}$$

c) Fuerza normal resistente de la Sección transversal

$$N_{Rd} = 0,75 \cdot f_{cd} A_c + f_{yd} \cdot A_s \tag{3}$$

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{1,4} \tag{4}$$

d) Verificación de la seguridad

$$\gamma_f = \frac{N_{Rd}}{N_{sd}} \tag{5}$$

El esfuerzo normal solicitante (N_{Sk}) fue obtenido a través del programa Altoqi Eberick 2002 y los resultados encontrados con el análisis preliminar para los coeficientes de seguridad de los pilares P21, P30 y P41 antes del refuerzo no atienden a los requisitos de seguridad normativos, como el que se presenta en la Tabla 4. En la Figura 11 se muestran las envolventes de los esfuerzos resistentes para esos pilares, es decir, con la consideración de los momentos flectores solicitantes y resistentes característicos, sin ningún coeficiente de mayoración o minoración de las acciones. En este caso, se observa que los momentos flectores son preponderantes y desestabilizan los pilares (Marí & Hellesland, 2005), lo que no ocurrió porque las cargas que se solicitaron a la estructura fueron significativamente inferiores a las consideradas en su dimensionamiento. También es posible concluir en este análisis más detallado que el progreso de la corrosión en las armaduras reduciría significativamente la capacidad resistente de los pilares a flexión y también que las cargas máximas previstas en proyecto no ocurriesen, pequeños incrementos podrían causar la pérdida de estabilidad de los pilares (Tang & Yang, 2011), quedando evidente la necesidad de refuerzo de esos pilares.

Tabla 4. Coeficientes de seguridad de los pilares antes del refuerzo

Pilar	f_{ck} (MPa)	f_{cd} (MPa)	f_{yd} (MPa)	A_c (mm ²)	A_s (mm ²)	γ_u	γ_n	N_{Sk} (kN)	$N_{Sd,Eq}$ (kN)	N_{Rd} (kN)	γ_f
P21	13,7	9,9	435	18000	482	1,5	1,35	119	240	155	0,65
P30	20,1	14,4						198	400	215	0,54
P41	14,7	10,5						176	356	164	0,46

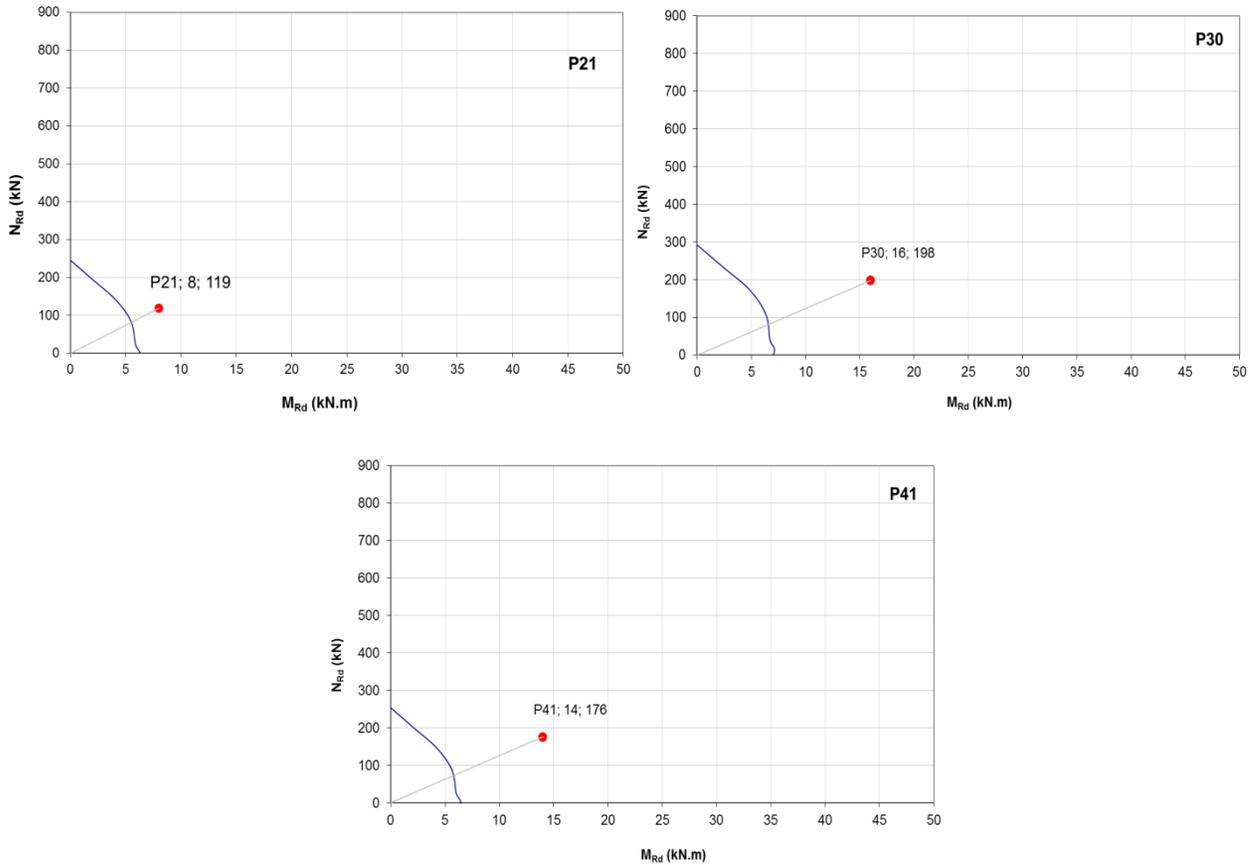


Figura 11. Envoltentes de los pilares 21, 30 y 41 antes del refuerzo.

3.2 Verificación de la seguridad de los pilares reforzados.

La verificación de la seguridad en el cálculo de los pilares P21, P30 y P41 reforzados fue basada en las recomendaciones de la NBR 6118 (ABNT, 2014) siguiendo los mismos criterios utilizados para los pilares originales, sin refuerzo. Los resultados son presentados a través de las envoltentes de la Figura 12. Los coeficientes de seguridad de cada pilar fueron determinados por la relación entre el largo de la línea recta del origen de la envolvente para el refuerzo, pasando por el punto relativo a las solicitaciones, y la distancia de ese punto de origen, y son presentados en la Tabla 5.

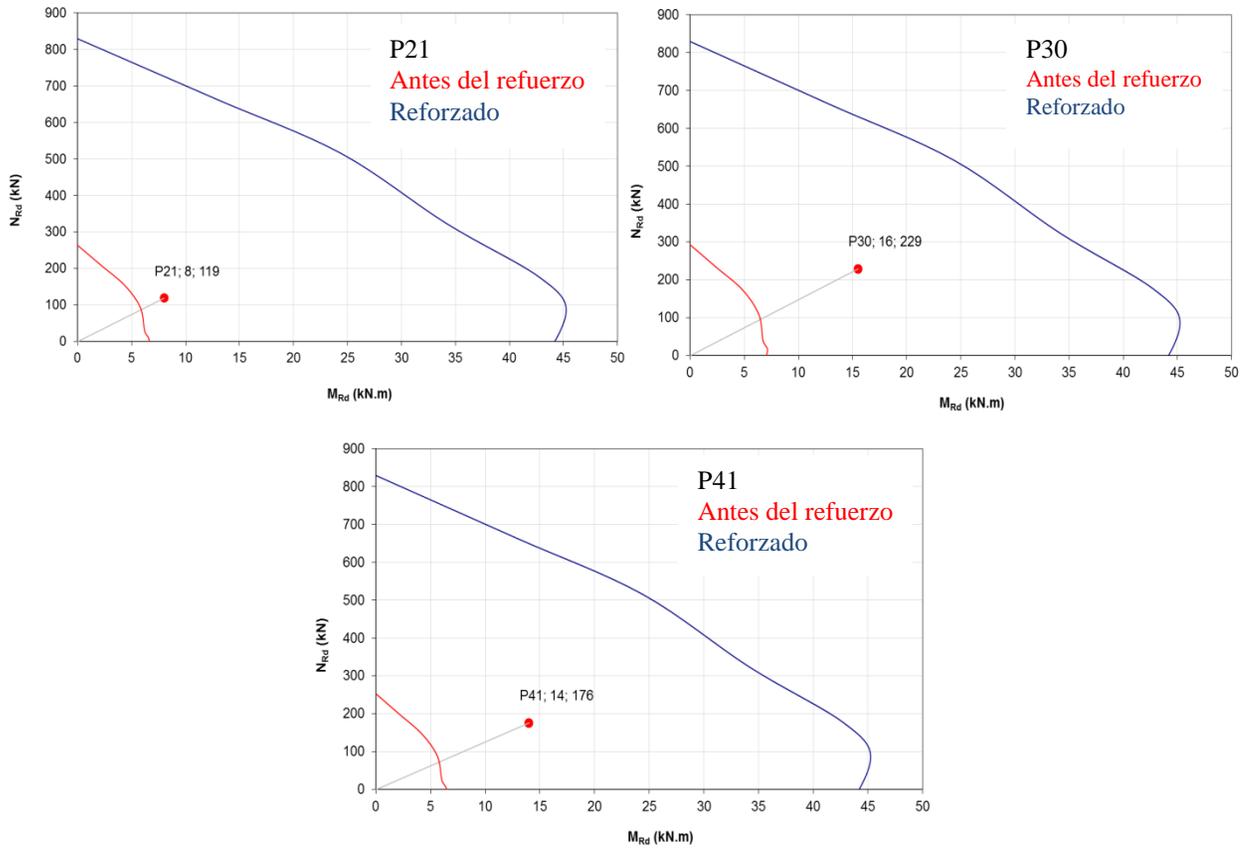


Figura 12. Envolventes de los pilares 21, 30 y 41 reforzados.

Tabla 5. Valores de los coeficientes de seguridad

Pilar	Coficiente de seguridad final
P21	3,5
P30	1,8
P42	2,1

4. CONCLUSIONES

Fueron presentados problemas estructurales que llevaron a la necesidad de reforzar los pilares P21, P30 y P41 de la edificación histórica Casarão, por no cumplir las recomendaciones de la norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 2014). Se considera que la técnica de refuerzo estructural propuesta para estos pilares, a través del encamisado con concreto armado, fue viable en virtud de las ventajas económicas, rapidez de ejecución y coherencia con el proyecto arquitectónico. Su aprobación fue comprobada con la verificación de los parámetros de cálculo normativos, resaltando que la intervención ejecutada en los elementos estructurales, por mas sencillos que sean, fue precedida de análisis estructural con programas computacionales actualizados y aumento la seguridad de los pilares de la edificación histórica a niveles satisfactorios.

AGRADECIMIENTOS

Al Programa de Post Grado en Ingeniería Civil de la Universidad Federal de Pará, Secretaria de Estado de Infraestructura y Obras Públicas de Acre - SEOP, IPEAM, TEGAM e COC - unidad Rio Branco.

REFERENCIAS

Associação brasileira de normas técnicas (2014), “*NBR 6118 – Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado*” (Rio de Janeiro, Brasil: ANBT), p. 238.

Júlio, E. S.; Branco, F.; Silva, V. D. (2003), “*Structural Rehabilitation of Columns using Reinforced Concrete Jacketing*”, *Progress in Structural Engineering and Materials*, V.5, pp. 29-37.

Marí, A.; Helleland, J. (2005), “*Lower Slenderness Limits for Rectangular Reinforced Concrete Columns*”, [Journal of Structural Engineering](#), V.131, pp. 85-95.

Mehta, P. K.; Monteiro, P. J. M. (2014), “*Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais*” (São Paulo, Brasil: Nicole Pagan Hasparyk), p.782.

Tang, C. H.; Yang, Y. C. (2011), “*Loading Correlation for Reliability Analysis of Reinforced Concrete Columns*”, [Advanced Materials Research](#), V.243-249, pp.396-405.



Sistemas de gestión técnica integrada de edificios: inspección y reparación de elementos no estructurales

G. T. Ferraz¹, J. de Brito¹, V. P. De Freitas², J. D. Silvestre¹

¹ IST, Lisboa; Portugal.

² FEUP, Porto; Portugal.

Información del artículo

DOI:

<http://dx.doi.org/10.21041/ra.v5i2.83>

Artículo recibido el 16 de Febrero de 2015, revisado bajo las políticas de publicación de la Revista ALCONPAT y aceptado el 25 de Abril de 2015. Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el segundo número del año 2016 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del primer número del año 2016.

© 2015 ALCONPAT Internacional

Información Legal

Revista ALCONPAT, Año 5, No. 2, Mayo – Agosto 2015, es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A.C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat_int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org
Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida Yucatán, C.P. 97310, fecha de publicación: 30 de mayo de 2015.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

RESUMEN

La comunidad científica internacional ha dedicado mucha atención a la vasta área de conocimiento de la inspección, diagnóstico, mantenimiento y rehabilitación de edificios, que se puede utilizar en el desarrollo de sistemas de gestión de edificios integrados. En este artículo, se realiza un encuadramiento de los métodos de evaluación de patología en elementos no estructurales de los edificios, basado en los actuales, presentando algunos de los desafíos en esta área. También se presenta un modelo a implementar en sistemas integrados de gestión de un edificio, formando una línea conductora y una base consistente para un sistema que se ponga en su lugar.

Palabras clave: patología de la construcción; sistema experto basado en el desempeño; método de evaluación; gestión de edificios.

ABSTRACT

The international scientific community has devoted a great deal of attention to the vast area of knowledge of inspection, diagnosis, maintenance and renovation of buildings, which may be used in the development of integrated building management systems. In this article, we provide a framework for the evaluation methods of the pathology of non-structural elements of buildings, based on current methods, presenting some of the challenges in this area. We present a model to be enforced in the integrated management systems of a building, along with some of the challenges of this area. We also introduce a model to be enforced in the integrated management systems of a building, forming a conductor line and a consistent foundation for a system to be put in place.

Keywords: construction pathology; expert system based on performance; evaluation method; building management.

RESUMO

A comunidade científica internacional tem dedicado a maior atenção ao vasto campo do conhecimento da inspeção, diagnóstico, manutenção e reabilitação das construções, o qual pode ser utilizado no desenvolvimento de sistemas de gestão integrada de edifícios. Neste artigo, é feito um enquadramento aos métodos de avaliação da patologia em elementos não-estruturais de edifícios, com base nos actualmente existentes, apresentando-se alguns dos desafios neste domínio. É também apresentado um modelo a implementar em sistemas de gestão integrada de um edifício, constituindo uma linha condutora e uma base de trabalho consistente para que um sistema deste tipo seja posto em prática.

Palavras-chave: patologia da construção; sistema pericial baseado no desempenho; método de avaliação; gestão de edifícios.

Autor de correspondencia: Jorge de Brito (jorge.brito@civil.ist.utl.pt)

1. CONSIDERACIONES PREVIAS

La fase de uso de los edificios es la más importante de su vida útil desde los puntos de vista económico y ambiental. La vida útil de un edificio corresponde al período de tiempo posterior a la construcción durante el cual un edificio, o sus elementos, exceden los requisitos mínimos funcionales para los cuales fue proyectado (Haapio and Viitaniemi, 2008). Por lo tanto, es hoy en día consensuado que el alargamiento de la vida útil de los edificios, consecuencia de su degradación, es la opción más adecuada (de Brito, 2009).

A nivel nacional, la ausencia de políticas de incentivo a las actividades de rehabilitación y mantenimiento, combinada con un escenario económico que promovió la construcción nueva, favoreció el crecimiento suburbano durante décadas. En este contexto, Portugal observa una mudanza de paradigma en el sector de la construcción, que incluye la mudanza de foco en la nueva construcción para la rehabilitación de edificios existentes. De hecho, cuando los edificios son sometidos a actividades de mantenimiento y rehabilitación, la durabilidad de los elementos constructivos es aumentada, incrementando la vida útil esperada del edificio (Amaral and Henriques, 2013).

A ese respecto de cada edificio ser único y presentar diferentes tipos de anomalías, es posible identificar patrones al analizar una muestra significativa de edificios. De esta forma, fueron iniciadas bases de datos que ofrecen orientación en la prevención y reparación, a través del análisis sistémico de los datos recogidos de inspecciones. Una vez que las actividades de mantenimiento y rehabilitación son fundamentales para la durabilidad de los edificios, es esencial una interpretación correcta de sus anomalías, apoyada en inspecciones y diagnósticos objetivos. Sin embargo, los procesos de inspección y diagnóstico de los edificios son bastante complejos, influenciando la precisión de las medidas de intervención subyacentes (Aguiar et al. 2006).

La comunidad científica nacional e internacional ha dedicado la mayor atención al vasto campo de conocimiento de la inspección, diagnóstico, mantenimiento y rehabilitación de las construcciones, incluyendo su uso en el desarrollo de sistemas de gestión integrada de edificios. Un gran esfuerzo se ha hecho en la incorporación de modelos computacionales a fin de auxiliar a los ingenieros en los procesos de toma de decisión (Farinha et al. 2005). Aun cuando los sistemas de gestión de edificios sean trivialmente usados en empresas, el foco principal de tales sistemas es generalmente la gestión de valor patrimonial y la gestión de mantenimiento planificada (Chang e Tsai, 2013). No obstante, las anomalías en edificios pueden comprometer su desempeño a nivel estructural y/o no estructural, siendo a veces necesarias intervenciones dispendiosas, a fin de devolver al edificio su estado original. Por consiguiente, el no usar sistemas de gestión que integren la inspección el diagnóstico de edificios puede comprometer el desempeño de los mismos a largo plazo (Amaral e Henriques, 2013).

Los estudios de patología de construcción tienen mucho destaque actualmente. En este artículo es hecha una revisión en el ámbito de los métodos de evaluación de la patología en edificios, presentando algunos de los desafíos en este tema, en lo que se refiere a la implementación de un sistema de gestión integrada de edificios fiable y aplicable.

2. MÉTODOS DE EVALUACIÓN DA PATOLOGÍA EN EDIFICIOS

Los avances en el tema de las tecnologías de información han propiciado la automatización de los procesos de toma de decisión en ingeniería. Al final de la década de 1980, la intensa actividad en el área de la tecnología condujo la implementación de diversos sistemas de gestión, referentes a diversas áreas de la ingeniería (Farinha et al. 2005). En lo que se refiere a patología de la construcción, son cronológicamente presentados los más importantes métodos de evaluación de la patología en edificios, enfocados en los elementos no-estructurales.

2.1 DEFECT ACTION SHEETS (1982)

La organización británica BRE (*Building Research Establishment*), especializada en edificios, publicó una serie de fichas de anomalías en edificios, constituyendo una importante base de datos (Trotman, 2006). En resumen, 144 fichas de anomalías (*Defect action sheets*) fueron publicadas entre 1982 y 1990. La intención de estas fichas es brindar las informaciones necesarias a los profesionales del sector de la construcción, en el ámbito de la prevención y corrección de anomalías en edificios. Cada una de estas fichas está compuesta por dos hojas A4 estructuradas de la siguiente forma: i) Descripción de la anomalía; ii) Descripción de las causas; iii) Medidas de prevención; e iv) Referencias e informaciones complementarias. Posteriormente, estas fichas fueron agrupadas y republicadas (BRE, 2001; CIB - W086 Building Pathology, 2013).

2.2 FICHAS DE REPARACIÓN DE ANOMALÍAS (1985)

En las actas del 1º Encuentro sobre Conservación y Rehabilitación de Edificios de Habitación, realizado en Lisboa, en Junio de 1985, fue presentada una metodología para la evaluación de la patología de un edificio que sería adoptada en la elaboración de las conocidas fichas de reparación de anomalías, publicadas por el Laboratorio Nacional de Ingeniería Civil (LNEC, 1985). El conjunto de estas fichas es segmentado de la siguiente forma: i) Anomalías estructurales; ii) Anomalías no-estructurales; e iii) Instalaciones y equipamientos. A cada uno de los segmentos corresponde un grupo de fichas de reparación de anomalías. Cada una de estas fichas fue estructurada del siguiente modo: i) Síntomas; ii) Examen; iii) Diagnóstico de causas; e iv) Reparación.

2.3 CASOS DE FALLA, HOJA DE INFORMACIÓN (1993)

El consejo Internacional para la investigación e Innovación en Edificios y Construcción - CIB (*Conseil International du Bâtiment*) tiene un grupo de trabajo responsable por la investigación en patología de la construcción, designado *W086 Building Pathology*. Este grupo de trabajo publicó, en Junio de 1993, un modelo de fichas de patología, tituladas *Cases of failure information sheet*, totalmente dedicadas a los registros de patología, apuntando para la necesidad de la sistematización del conocimiento en el campo (CIB - W086 Building Pathology, 1993). Fue sugerida una estructura para la preparación de fichas de patología: i) Elemento constructivo; ii) Descripción da problemática; iii) Descripción das anomalías evidentes; iv) Descripción de anomalías que pueden ser monitoreadas; v) Representación gráfica (foto, dibujo); vi) Descripción da la anomalía; vii) Identificación de los agentes que causan la anomalía; viii) Errores; e ix) Informe diagnóstico.

2.4 FICHES PATHOLOGIE DU BÂTIMENT (1995)

En 1995, la agencia francesa AQC (*Agence Qualité Construction*), en alianza con la Fundación SMA, desarrolló un conjunto de fichas de patología, tituladas *Fiches pathologie du bâtiment* (AQC, 2014). Estas fichas fueron elaboradas de forma de evidenciar las principales anomalías en edificios de Francia, con base en los análisis de siniestros reportados a las compañías de seguros. Las 61 fichas existentes fueron creadas en 1995 y ya están disponibles *en línea* desde 2003 (ver figura 1). Estas fueron agrupadas y seccionadas de acuerdo con las partes del edificio afectado. De manera semejante a los casos anteriores, estas fichas están estructuradas del siguiente modo: i) Descripción de la anomalía; ii) Diagnóstico; iii) Puntos sensibles; iv) Consejos de prevención; e v) Informaciones adicionales.

2.5 CONSTRUDOCTOR (2003)

La empresa portuguesa OZ - Diagnóstico, Investigación y Control de Calidad de Estructuras y Fundaciones, Lda. desarrolló un servicio de pre-diagnóstico de anomalías en edificios, llamado Construductor (Ribeiro e Cóias, 2003). El servicio surge como un sistema que brinda el diagnóstico *on-line*, cuyo principal objetivo es auxiliar en la corrección de anomalías en edificios, proporcionando explicaciones básicas sobre las causas probables, haciendo un diagnóstico preliminar y definiendo medidas correctivas. El servicio ofrece un pre-diagnóstico sobre la base de un formulario *on-line* (ver figura 2). Posterior al sometimiento, las respuestas del entrevistado son evaluadas por especialistas en la patología y rehabilitación de la construcción, que completan un informe *on-line* con la identificación de la anomalía, especificando las posibles causas y acciones correctivas.



Figura 1. *Fiches pathologie du bâtiment* (AQC, 2014)

INFORMAÇÃO RELATIVA AO IMÓVEL

Glossário dos termos da Construção

1) Qual a morada completa do edifício?*

2) Qual o ano aproximado de construção?

2.1) Se não sabe o ano exacto indique se a construção é anterior ou posterior a 1945

3) Qual o tipo de edifício?*

3.1) Outro

4) Qual o número de pisos

4.1) Acima do solo, incluindo o piso térreo?

4.2) Abaixo do nível do solo?

5) Qual o tipo de utilização do edifício?

5.1) Outro

6) Qual o nome do proprietário do edifício ou da sua fracção em análise?

7) Existe conhecimento de modificações estruturais introduzidas no edifício posteriormente à sua construção? (Se responder sim passe para a 7.1 se não para 7.2) Sim Não

7.1) Qual o tipo de modificações estruturais introduzidas?

Figura 2. Formulario *on-line* (Construductor) (Ribeiro e Cóias, 2003)

2.6 "APRENDER CON LOS ERRORES" (2004)

El catálogo de patología italiano "Aprender con los errores" (BEGroup, 2004) fue desarrollado por la BEGroup del Departamento de Ciencia y Tecnología del Patrimonio Construido (BEST) en el Politécnico de Milán. El catálogo referido es accesible *on-line* (ver figura 3), totalmente en italiano, donde los archivos de patología pueden ser accedidos. A semejanza de los casos anteriores, estas fichas están estructuradas de la siguiente manera: i) Registros de materiales; ii) Mecanismo de deterioro; iii) Registros de patología; iv) Registros de casos de estudio; y v) Registros de anomalías.

2.7 PATORREB (2004)

El Grupo de Estudios de Patología de la Construcción creó un sitio web dedicado a la divulgación de un catálogo de fichas de patología (Freitas et al. 2007). Desde 2004, los usuarios registrados tienen acceso al campo de Patología, donde el esquema de un edificio presenta las fichas de patología de acuerdo con el elemento constructivo (ver figura 4). Al seleccionar el respectivo elemento, es presentada la lista de fichas de patología asociadas. A semejanza de los casos anteriores, estas fichas están estructuradas de la siguiente forma: i) Identificación de la patología; ii) Descripción de la patología; iii) Sondeos y medidas; iv) Causas de la patología; e v) Soluciones posibles de reparación.



Figura 3. "Aprender con los errores" (BEGroup, 2004)



Figura 4. Esquema de un edificio (Patorreb) (Freitas et al. 2007)

2.8 SISTEMA PROTOTIPO BASADO EN WEB (2009)

En el 2009, Fong y Wong crearon el prototipo de un sistema de gestión integrada de edificios (ver figura 5), teniendo varios objetivos en mente: i) brindar un abordaje amigable al usuario; ii) brindar un abordaje simple en el proceso de presentación de la información; y iii) permitir la comunicación entre los diferentes usuarios del sistema, mejorando el intercambio de conocimientos y experiencia, en el ámbito de la patología de la construcción (Fong e Wong, 2009). Con ese fin fue usado un cuestionario para investigar las opiniones de los profesionales de la construcción así como la captación y reutilización del conocimiento y experiencia. Posterior al levantamiento preliminar, se realizarán entrevistas a profesionales interesados, y se registra el conocimiento y la experiencia acumulada en formularios libres de cualquier estructura, siendo posteriormente introducidos en el prototipo del sistema de gestión integrada.

2.9 MANTENIMIENTO DEL SITIO WEB (2010)

En 2004, fue desarrollado, en la Universidad Nacional de Singapur (NUS), un proyecto de dos años concebido para estudiar los problemas sufridos por diferentes tipos de edificios en climas tropicales. En 2005, fue criado el *Maintainability website* (ver figura 6), siendo actualizado hasta el año 2010. El sitio web procura concientizar a los profesionales de la construcción acerca de los obstáculos para un buen mantenimiento de edificios (Chew, 2010). El sitio web fue desarrollado en Inglés y está dividido en los siguientes módulos: i) Biblioteca de anomalías, con informaciones sobre tipos de anomalías y sus causas, mantenimiento y métodos de diagnóstico; ii) Manual de materiales, con informaciones sobre el desempeño y durabilidad de los materiales; e iii) Sistema de evaluación del mantenimiento, desarrollado para facilitar la selección de alternativas sustentables. El módulo i) Biblioteca de anomalías, está directamente relacionado con el ámbito del presente artículo, a base de datos de anomalías y está agrupado del siguiente modo: i) Anomalías en fachadas, ii) Anomalías en áreas húmedas, iii) Anomalías en bodegas; y iv) Anomalías en techos. En lo que se refiere a los registros de anomalías, estos están organizados de la siguiente manera: en las dos primeras secciones el tipo de anomalía es ilustrado y las posibles causas explicadas; las buenas prácticas constructivas son compiladas en la tercera sección con el objetivo de evitar errores sistemáticos; en la cuarta sección son ilustradas las técnicas de diagnóstico y mantenimiento; las posibles técnicas correctivas son ilustradas en la quinta sección..

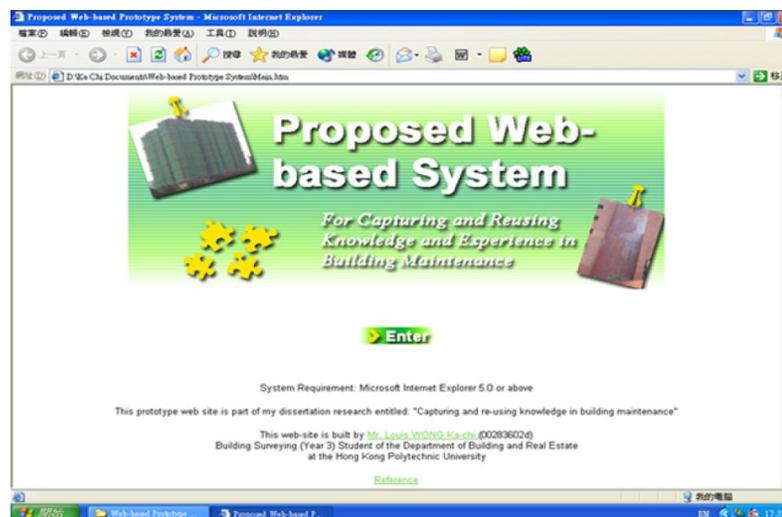


Figura 5. *Web-based prototype system* (Fong e Wong, 2009)



Figura 6. Mantenimiento del sitio WEB (Chew, 2010)

2.10 CONSTRUYENDO EL RÉCORD MÉDICO (2013)

En 2013, Chang y Tsai propusieron el concepto de “registro médico de en edificio”, análogo a los registros médicos humanos (Chang e Tsai, 2013), presentando un sistema de diagnóstico. En el escenario de aplicación de este sistema, un perito de investigación en situaciones patológicas con una base de datos, se auxilia para el diagnóstico de anomalías en edificios. El usuario recibe la notificación, a través de una conexión a Internet, en el local de la construcción. Este sistema es compuesto por cuatro módulos principales: i) Procesamiento de documentos; ii) Extracción de la solución clave; iii) Cálculo de simulación; y iv) Clasificación de la importancia. Según los autores, las constructoras pueden ofrecer servicios especializados, en respuesta a problemas de mantenimiento y de gestión, usando este sistema. La acumulación eficaz y reutilización de registros de reparación también pueden ser hechas durante la fase de proyecto de un edificio.

3. ANÁLISIS CRÍTICO Y COMPARATIVO

Aun cuando en la rehabilitación de edificios, cada caso sea único, la mayoría de las ocurrencias de anomalías en elementos no estructurales puede ser resuelta de una forma sistémica. Usando datos de inspecciones, o cruzamiento de informaciones, y un sistema de gestión integrada de un edificio, un inspector puede diagnosticar la anomalía y definir la mejor técnica de reparación. En este contexto, la adquisición de datos sobre el desarrollo de anomalías en la construcción es indispensable para la planificación de las acciones de mantenimiento y reparación. La fiabilidad de esta información es fundamental para tomar decisiones racionales.

Partiendo del análisis de los métodos de evaluación de la patología en edificios, se puede fácilmente concluir que todos tienen una estructura semejante en lo que se refiere a la descripción de anomalías: i) descripción / identificación de la anomalía; ii) causas probables; y iii) Diagnóstico y técnica de reparación. Indudablemente, parece que todos los métodos de evaluación de la patología en edificios encontrados en la literatura tienen una organización semejante, más ninguna es completamente dedicada a la intervención, lo que refuerza la importancia de la investigación en este tema.

En relación a los métodos de evaluación basados en fichas de anomalía, *Defect action sheets* (1982), Fichas de reparación de anomalías (1985) y *Cases of failure information sheet* (1993), estos representan el punto de partida para el análisis sistémica de la patología en edificios. A través del análisis sistemático de los datos recogidos en estudios de investigación, fue posible establecer bases de datos confiables, que proporcionan una orientación en la prevención y reparación de anomalías de elementos no-estructurales de edificios, es una contribución importante en el desarrollo de

sistemas de gestión integrada. En ese sentido el contenido de la información podrá estar en desacuerdo con las prácticas constructivas comunes, debido a los continuos avances en las técnicas de construcción y de reparación.

En lo que respecta a los métodos de evaluación que hace uso de las más recientes tecnologías de la información, es posible identificar tres métodos muy semejantes en su gesta: *Fiches pathologie du bâtiment* (1995), "Aprender con los errores" (2004) y Patorreb (2004). En estos casos, diversas fichas de anomalías son accesibles a través de un sitio web, a partir de donde pueden ser descargados e impresos. A través de estos métodos, a divulgación de los registros de patología se volvió una realidad. No obstante, no fueron tomadas medidas a fin de filtrar el contenido de las fichas de patología, de modo de ofrecer a los usuarios una solución de reparación expedita.

Los métodos de evaluación *Construdoctor* (2003) y *Building medical record* (2013), surgen como sistemas que ofrecen diagnóstico *on-line*. Posterior a completar el formulario, las respuestas del usuario son evaluadas por especialistas en la patología de la construcción, que hacen un informe *on-line*. También se observa que la información ofrecida en el informe es apenas un pre diagnóstico dado por técnicos, sin una visita al edificio. Por esa razón, el informe no puede ser tan preciso como se desea.

Con respecto al método *Web-based prototype system* (2009), es importante notar que el sistema no fue concebido para ofrecer cualquier regla sistematizada. Según los autores, las investigaciones concluyeron que el conocimiento, en el ámbito de la patología de la construcción, es de contexto específico y no puede ser generalizado. En vez de eso, el sistema permite a los usuarios compartir y recuperar la experiencia de otros profesionales, a fin de facilitar su propio proceso de toma de decisión.

Finalmente, se debe dar mayor atención al método *Maintainability website* (2010). Este método pretende brindar un diagnóstico objetivo, a través del desarrollo de una biblioteca de anomalías incluyendo, un manual de materiales y un sistema de clasificación de las técnicas de mantenimiento. Relativo a la biblioteca, las anomalías y respectivas causas son explicadas e ilustradas a través de fotografías. Las técnicas de diagnóstico y reparación están también incluidas. De esta forma, los usuarios de este método de evaluación son incentivados a encontrar un diagnóstico, con base en imágenes. No obstante, no fueron encontrados datos estadísticos, específicamente en lo que se refiere a las correlaciones entre anomalías, diagnóstico y técnicas de reparación. Como resultado, el diagnóstico puede no ser tan preciso cuanto se espera, una vez que es claramente dependiente de la experiencia del usuario / inspector. Por ese motivo, el método tiene algunos desafíos en lo referente a la intervención.

Entre otros desafíos identificados sobre los métodos de evaluación de la patología en edificios encontrados en la literatura, la objetividad de la información concedida es un pre-requisito para la toma de decisiones racionales. A fin de superar algunos de los desafíos encontrados, investigadores del Instituto Superior Técnico de la Universidad de Lisboa desarrollaron sistemas de inspección y diagnóstico, aplicados a varios elementos constructivos no estructurales. Estos sistemas son caracterizados por la definición y clasificación de las cuatro variables más importantes en la patología: anomalías, causas, técnicas de diagnóstico y técnicas de reparación, siendo que fueron también establecidas correlaciones cuantitativas (de Brito, 2009). Siguiendo un abordaje sistémico, estudios fueron publicados sobre los siguientes elementos no-estructurales de edificios:

- i) Impermeabilizaciones de techos en azoteas (Walter et al. 2005);
- ii) Revestimientos cerámicos adherentes en pisos y paredes (Silvestre y de Brito, 2009; Silvestre e de Brito, 2010; Silvestre e de Brito, 2011);
- iii) Revestimientos epóxicos en pisos industriales (Garcia e de Brito, 2008);
- iv) Paredes de bloque (Gonçalves et al. 2013, 2014);
- v) Revestimientos de piso de madera (Delgado et al. 2013);

- vi) Revestimientos en piedra natural en pisos y paredes (Neto e de Brito, 2011; Neto y de Brito, 2012)
- vii) Divisiones en yeso laminado (Gaião et al. 2011; Gaião et al. 2012);
- viii) Frisos comunes en fachadas interiores (Palha et al. 2012; Pereira et al. 2011);
- ix) Revestimientos en techos inclinados (Garcez et al. 2012; Garcez et al. 2015a; Garcez et al. 2015b);
- x) Yeso en paredes (Sá et al. 2015a; Sá et al. 2015b);
- xi) Pinturas en frisos (Pires et al. 2015a; Pires et al. 2015b);
- xii) ETICS (Amaro et al. 2013; Amaro et al. 2014);
- xiii) M (Santos, 2012; Vicente, 2012).

A través de una intensa investigación bibliográfica basada en publicaciones científicas internacionales, se recogió la información actualmente disponible sobre la patología de elementos no estructurales. Esta información fue complementada con la ejecución de trabajos de campo con extensas muestras representativas, permitiendo la creación de un mayor entendimiento relativamente al origen de las anomalías, ofreciendo un método sistémico para el diagnóstico de las mismas y facilitando la elección de métodos de intervención para reparación. Estos sistemas disponen de las siguientes herramientas:

- i) Lista de clasificación de anomalías: identificación y clasificación de las anomalías más comunes en cada elemento;
- ii) Lista clarificativa de causas: identificación y clasificación en las causas más probables en origen de diversas anomalías identificadas;
- iii) Lista de clasificación de técnicas de diagnóstico: clasificación del tipo de ensayos que permiten caracterizar las anomalías identificadas, así como auxiliar en la determinación de la posible causa.;
- iv) Lista de clasificación de técnicas de reparación: clasificación del tipo de técnicas de intervención más adecuadas para cada una de las anomalías identificadas;
- v) Matriz de correlación anomalías-causas: atribución de relación nula, indirecta o directa entre cada anomalía y cada causa listada;
- vi) Matriz de correlación inter-anomalías: probabilidad de desarrollo de una anomalía, en presencia de otra.;
- vii) Matriz de correlación anomalías-técnicas de diagnóstico: atribución de relación nula, promedio o alta a una técnica de diagnóstico necesaria para la caracterización de una anomalía, o entendimiento de sus condiciones para conocimiento del origen;
- viii) Matriz de correlación anomalía-técnicas de reparación: atribución de relación nula, promedio o alta a una técnica de reparación relativa a su adecuación en la resolución de anomalías.

Entre tanto, ninguno de los sistemas creados se encuentra debidamente informatizado, siendo todavía susceptible a inadecuadas interpretaciones, posibilitando todavía el error en el uso de los mismos.

4. PERSPECTIVAS FUTURAS

En el área de rehabilitación de edificios, se establece que el procedimiento de rehabilitación debe comenzar con una inspección, asegurando la caracterización adecuada de las anomalías existentes, que culminará con la presentación de un diagnóstico y la respectiva técnica de reparación. Habiendo comprobado la importancia de establecer métodos de evaluación de la patología en edificios, es importante crear un sistema de gestión integrada de edificios fiable, que posibilite el acceso al vasto campo del conocimiento de la patología de las construcciones.

A partir del análisis de los métodos de evaluación de la patología de edificios encontrados en la literatura, se concluye que todos tienen una organización parecida pero ninguno es por entero dedicado a la intervención. A fin de crear un sistema de gestión integrada fiable, los sistemas
Sistemas de gestión técnica integrada de edificios: inspección y reparación de elementos... 145

parciales desarrollados en el Instituto Superior Técnico de la Universidad de Lisboa se figuran como bases confiables, una vez que se rigen por el mismo abordaje sistémico, anclados en el conocimiento de las áreas de inspección, diagnóstico y rehabilitación de elementos no-estructurales de edificios. A través de este abordaje sistémico, fueron definidos y clasificados los parámetros más importantes de la patología de varios elementos de construcción, bien como las correlaciones cuantitativas entre estos. En ese contexto, la creación de un sistema de gestión integrada global, incluyendo todos los sistemas parciales desarrollados hasta el momento, surge como una perspectiva futura bastante creíble.

La implementación de un sistema de gestión integrada de edificios apoyado en los sistemas parciales desarrollados en el Instituto Superior Técnico, colocará en práctica todas las herramientas referidas en la sección 3 de este artículo. Sin embargo hay un largo camino a seguir, a fin de colocar ese sistema en práctica. La creación de un sistema global con base en listas normalizadas de anomalías, causas, métodos de inspección y técnicas de reparación son como un gran desafío, debido a la cantidad enorme de información. El análisis y normalización de los sistemas parciales incluyen la apreciación conjunta de anomalías, causas, técnicas de diagnóstico y métodos de reparación de cada elemento constructivo.

A fin de implementar un sistema de gestión integrada de edificios, se debe tener en consideración las diversas fases por las que un edificio pasa, incluyendo las inspecciones periódicas generales y específicas a los elementos constituyentes del edificio, bien sea como las consecuentes intervenciones de mantenimiento, reparación y/o sustituciones. Para que un sistema de este tipo sea puesto en práctica, es necesario construir una herramienta informatizada que tenga como base el edificio sus elementos. Este sistema deberá incluir una base de datos que permita almacenar la información relevante sobre el edificio; un módulo que permita la normalización de las actividades de inspección y los informes resultantes; es un módulo de decisión sobre la acción a realizar posterior a la inspección y el diagnóstico de anomalías eventualmente existentes, dedicado a las operaciones de mantenimiento del edificio. Usando los atributos referidos, se espera la disminución de la subjetividad de las inspecciones de elementos de edificios y la eliminación de la dependencia de la experiencia del inspector, que apuntan como algunos de los desafíos asociados a los métodos de evaluación de patología en edificios existentes.

Finalmente se tiene previsto que el sistema de inspección informatizado propuesto tenga la siguiente aplicación práctica: i) uso en inspecciones; ii) uso en el ámbito de los planes de mantenimiento pro-activo de edificios; iii) apoyo en la decisión de proyectos de rehabilitación; iv) preparación de informes de dilapidación de edificios; v) uso para reconocimiento oficial; vi) preparación del informe final de diagnóstico con una estructura normalizada; vii) uso como base pre normativa de metodología normalizada para inspecciones a edificios que tengan que ser reconocidas oficialmente; e viii) evaluación y gestión de activos inmuebles.

5. REFERENCIAS

- Aguiar, J., Paiva, J. e Pinho, A. (2006), “*Guião de apoio à reabilitação de edifícios habitacionais*”, LNEC, Lisboa.
- Amaral, S. e Henriques, D. (2013), “*Inspection and diagnosis: A contribution to modern buildings sustainability*.” Proc., Portugal SB13, Guimarães, Portugal, Multicomp, pp. 75-82.
- Amaro, B., Saraiva, D., de Brito, J. e Flores-Colen, I. (2013), “*Inspection and diagnosis system of ETICS on walls*.” Construction and Building Materials, Volume 47, pp. 1257-1267.
- Amaro, B., Saraiva, D., de Brito, J. e Flores-Colen, I. (2014), “*Statistical survey of the pathology, diagnosis and rehabilitation of ETICS in walls*.” Journal of Civil Engineering and Management, Volume 20, pp. 511-526.

- AQC (2014), *Agence Qualité Construction*. [Online] Disponível em: <http://www.qualiteconstruction.com/outils/fiches-pathologie.html>
- BEGroup (2004), *Imparare dagli errori*, Italy, Regione Lombardia (em Italiano).
- BRE (2001), *Defect Action Sheets - The complete set*, London, BREPress.
- Chang, C.-Y. e Tsai, M.-D. (2013), “*Knowledge-based navigation system for building health diagnosis.*” *Advanced Engineering Informatics*, Volume 27, pp. 246-260.
- Chew, Y. L. (2010), *Maintainability of facilities: for building professionals*. Singapore, World Scientific.
- CIB - W086 Building Pathology (1993), *Building pathology: A state-of-the-art report*, Delft, Netherlands: CIB.
- CIB - W086 Building pathology (2013), *A state-of-the-art report on building pathology*, CIB, FEUP, LFC.
- de Brito, J. (2009), “*Sistemas de inspeção e diagnóstico em edifícios.*” Porto, Portugal, 3º Encontro sobre Patologia e Reabilitação, pp. 13-23.
- Delgado, A., de Brito, J. e Silvestre, J. D. (2013), “*Inspection and diagnosis system for wood flooring.*” *Journal of Performance of Constructed Facilities*, Volume 27, pp. 564-574.
- Farinha, F., Portela, E., Domingues, C. e Sousa, L. (2005), “*Knowledge-based systems in civil engineering: Three case studies.*” *Advances in Engineering Software*, Volume 36, p. 729–739.
- Fong, P. S. W. e Wong, K. (2009), “*Knowledge and experience sharing in project-based building maintenance community of practice.*” *International Journal of Knowledge Management Studies*, Volume 3, pp. 275-294.
- Freitas, V. P. d., Alves, S. e Sousa, M. (2007), “*Um contributo para a sistematização do conhecimento da patologia da construção em Portugal - www.patorreb.com*”. Proc., 2º Congresso de Argamassas de Construção, Lisboa, Portugal.
- Gaião, C., de Brito, J. e Silvestre, J. (2011), “*Inspection and diagnosis of gypsum plasterboard walls.*” *Journal of Performance of Constructed Facilities*, Volume 25, pp. 172-180.
- Gaião, C., de Brito, J., Silvestre, J. (2012), “*Technical Note: Gypsum plasterboard walls: inspection, pathological characterization and statistical survey using an expert system.*” *Materiales de Construcción*, Instituto Eduardo Torroja, Spain, pp. 285-297.
- Garcez, N., Lopes, N., de Brito, J. d. e Sá, G. (2012), “*Pathology, diagnosis and repair of pitched roofs with ceramic tiles: Statistical characterisation and lessons learned from inspections.*” *Construction and Building Materials*, Volume 36, pp. 807–819.
- Garcez, N., Lopes, N., de Brito, J. e Silvestre, J. (2015a), “*System of inspection, diagnosis and repair of external claddings of pitched roofs.*” *Construction and Building Materials*, Volume 35, pp. 1034-1044.
- Garcez, N., Lopes, N., de Brito, J., Sá, G., Silvestre, J. (2015b), “*Influence of design on the service life of pitched roofs’ cladding.*”, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, Volume 29, No. 3, pp. 04014073.
- Garcia, J. e de Brito, J. (2008), “*Inspection and diagnosis of epoxy resin industrial floor coatings.*” *Journal of Materials in Civil Engineering*, Volume 20, pp. 128-136.
- Gonçalves, A., de Brito, J., Branco, F., e Amaro, B. (2013), “*Sistema de inspeção, diagnóstico e reparação de paredes de alvenaria.*” *Revista Construlink*, vol. 11.
- Gonçalves, A., de Brito, J. e Amaro, B. (2014), “*Systematic approach to inspect, diagnose, and repair masonry walls.*” *Journal of Performance of Constructed Facilities*, [doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000650](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000650).
- Haapio, A. e Viitaniemi, P. (2008), *Service life of a building in environmental assessment of buildings*. Istanbul, Turkey, pp. 11-14.
- LNEC (1985). *Construction pathology (in Portuguese)*. Lisbon, LNEC, pp. 1-95.

- Neto, N. e de Brito, J. (2011), “*Inspection and defect diagnosis system for natural stone cladding.*” *Journal of Materials in Civil Engineering*, Volume 30, pp. 1433-1443.
- Neto, N. e de Brito, J. (2012), “*Validation of an inspection and diagnosis system for anomalies in natural stone cladding.*” *Construction and Building Materials*, Volume 30, pp. 224-236.
- Palha, F., Pereira, A., de Brito, J. e Silvestre, J. (2012), “*Effect of water on the degradation of gypsum plaster coatings: inspection, diagnosis and repair.*” *Journal of Performance of Constructed Facilities*, Volume 26, pp. 424-432.
- Pereira, A., Palha, F., de Brito, J. e Silvestre, J. (2011), “*Inspection and diagnosis system for gypsum plasters in partition walls and ceilings.*” *Construction and Building Materials*, Volume 25, pp. 2146-2156.
- Pires, R., de Brito, J. e Amaro, B. (2015a), “*Inspection, diagnosis and rehabilitation of painted rendered façades.*” *Journal of Performance of Constructed Facilities*, Volume 29, No. 2, pp. 04014062.
- Pires, R., de Brito, J. and Amaro, B. (2015b), “*Statistical survey of the inspection, diagnosis and repair of painted rendered façades.*” *Structure and Infrastructure Engineering*, Volume 11, No. 5, pp. 605-618.
- Ribeiro, T. and Córias, V. (2003), “*Construdoctor. Um serviço de pré- diagnóstico via internet.*” *Proc. 3º Encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios*, Volume 2, pp. 1037-1046, Lisboa, Portugal.
- Sá, G., Sá, J. and de Brito, J. (2015a), “*Inspection and diagnosis system for rendered walls.*” *International Journal of Civil Engineering*, Volume 12, No. 2, pp. 279-290.
- Sá, G., Sá, J., de Brito, J. and Amaro, B. (2015b), “*Statistical survey on inspection, diagnosis and repair of wall renderings.*” *Journal of Civil Engineering and Management*, Volume 21, No. 5, pp. 623-636.
- Santos, A. (2012), *Sistema de inspeção e diagnóstico de caixilharias*, Lisboa, Portugal: Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil no Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa.
- Silvestre, J. and de Brito, J. (2009), “*Ceramic tiling inspection system.*” *Construction and Building Materials*, Volume 23, pp. 653-668.
- Silvestre, J. and de Brito, J. (2010), “*Inspection and repair of ceramic tiling within a building management system.*” *Journal of Materials in Civil Engineering*, Volume 22, pp. 39-48.
- Silvestre, J. and de Brito, J. (2011), “*Ceramic tiling in building façades: Inspection and pathological characterization using an expert system.*” *Construction and Building Materials*, Volume 25, p. 1560–1571.
- Trotman, P. (2006), *Building pathology at the Building Research Establishment, UK - Cases studies, data bases and feedback to the construction industry. 2º Encontro sobre Patologia e Reabilitação*, Porto, Portugal: Edições FEUP, 35 p.
- Vicente, M. (2012), *Tecnologia e reabilitação de caixilharias*, Lisboa, Portugal: Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil no Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa.
- Walter, A., de Brito, J. and Lopes, J. G. (2005), “*Current flat roof bituminous membranes waterproofing systems - Inspection, diagnosis and pathology classification.*” *Construction and Building Materials*, Volume 19, p. 233–242.



Método colorimétrico por aspersión de nitrato de plata para la evaluación de la penetración de cloruros en concreto: estado del arte

L. V. Real¹, D. R. B. Oliveira¹, T. Soares¹, M. H. F. Medeiros¹

¹ Departamento de Construcción Civil, Universidad Federal de Paraná (UFPR), Brasil.

Información del artículo

DOI:

<http://dx.doi.org/10.21041/ra.v5i2.84>

Artículo recibido el 07 de Enero de 2015, revisado bajo las políticas de publicación de la Revista ALCONPAT y aceptado el 06 de Abril de 2015. Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el segundo número del año 2016 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del primer número del año 2016.

RESUMEN

La durabilidad de las construcciones se ha evaluado mediante inspecciones visuales asociados a los ensayos de campo y de laboratorio. Hoy, para el análisis de carbonatación método colorimétrico por pulverización fenolftaleína se utiliza ampliamente debido a la facilidad y alta fiabilidad. Sin embargo, en la presencia de cloruros, los ensayos no son expeditos y tienen un alto costo. En su lugar, se utiliza la pulverización de nitrato de plata (AgNO₃). El uso del método es simple, de bajo costo y permite evaluaciones in situ. Pero cuando, hay presencia de carbonatación, el análisis se hace más compleja debido a que la reducción del pH y los cambios en la coloración de hormigón. Esta investigación presenta estudios sobre el uso del método colorimétrico para evaluar la profundidad de penetración de cloruro en el hormigón. No hay todavía un consenso sobre la forma de eliminar esa influencia o determinar el momento decisivo, sin embargo, hay investigaciones que muestran la influencia del tipo de cemento en el método colorimétrico.

Palabras clave: hormigón; corrosión; penetración por cloruros; nitrato de plata; método colorimétrico.

ABSTRACT

The durability of the buildings has been evaluated through visual inspections associated with field and laboratory tests. Nowadays, for analysis of the carbonation colorimetric method by spraying phenolphthalein is widely used, due to the ease and high reliability. However, when there is the presence of chlorides, the tests are long and expensive. As an alternative, there is a colorimetric method (AgNO₃). The method is easy to use, low cost and allows for on-site reviews. But when there is presence of carbonation, the analysis becomes more complex, since reducing the pH and leads to discoloration of the concrete. This paper presents studies on the use of the colorimetric method for evaluation of the depth of chloride penetration in concrete. There is no consensus in academic circles as to eliminate this influence and to determine the turning point, however there is research demonstrating the influence of cement type on the colorimetric method.

Keywords: concrete; corrosion; chloride penetration; silver nitrate; colorimetric method.

RESUMO

A durabilidade das construções tem sido avaliada através de inspeções visuais associadas a ensaios de campo e laboratório. Hoje, para análise da carbonatação o método colorimétrico por aspersão de fenolftaleína é amplamente utilizado, devido à facilidade e alta confiabilidade. Porém, na presença de cloretos, os ensaios não são expeditos e possuem alto custo. Como alternativa, há a aspersão de nitrato de prata (AgNO₃). O método é de fácil aplicação, baixo custo e permite avaliações in loco. Mas quando há presença de carbonatação, a análise torna-se mais complexa, devido a redução do pH e alteração da coloração do concreto. Esta pesquisa apresenta estudos sobre o uso do método colorimétrico para avaliação da profundidade de penetração de cloretos no concreto. Ainda não há consenso de como eliminar essa influência ou determinar o ponto de viragem, entretanto há pesquisas que demonstram a influência do tipo de cimento no método colorimétrico.

Palavras chaves: concreto; corrosão; penetração de cloretos; nitrato de prata; método colorimétrico.

Autor de contacto: Marcelo H. F. Medeiros (medeiros.ufpr@gmail.com)

© 2015 ALCONPAT Internacional

Información Legal

Revista ALCONPAT, Año 5, No. 2, Mayo – Agosto 2015, es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A.C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida Yucatán, C.P. 97310, Tel. 5219997385893, alconpat_int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org
Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida Yucatán, C.P. 97310, fecha de publicación: 30 de mayo de 2015.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

1. INTRODUCCION

Es bien conocido que el medio altamente alcalino que proporciona la matriz de cemento mantiene el acero presente en el concreto armado pasivo a la corrosión. Sin embargo, se pierde esta pasividad cuando los iones cloruro llegan a la armadura. La corrosión, entonces, es activada.

El fenómeno de la despasivación de las armaduras ocurre, esencialmente, por dos motivos principales: primero, debido a la reducción de la alcalinidad del concreto ocasionada por la carbonatación. Segundo, por la presencia de cloruros, que aun cuando con el pH elevado despasivan la armadura puntualmente, formando picaduras de corrosión que reducen la sección transversal de la barra y disminuyen su capacidad portante (França, 2011).

Los iones cloruros pueden ser encontrados en la matriz cementicia de dos formas: libres (disueltos en el agua de los poros) o combinados con el C_3A y C_4AF hidratados (productos de la hidratación del cemento) formando cloroaluminatos (sal de Friedel). Los cloruros realmente nocivos a las armaduras son los libres. Entretanto, los cloruros combinados pueden convertirse en libres con la presencia de carbonatación o debido al incremento de la temperatura del concreto (Helene, 1993; Pereira & Cincotto, 2001; Cavalcanti & Cavalcanti, 2010).

En el contexto de la inducción de la corrosión por cloruros, como también por carbonatación, es razonable considerar la vida útil de las estructuras de concreto en dos fases: primero cuando la concentración crítica de cloruros alcanza la superficie del acero dentro del concreto (siendo este el tiempo de vida útil de las estructuras) el segundo es la consecuencia de la propagación de la corrosión que se extiende para el tiempo en que la estructura es dañada por la corrosión del acero además de los límites aceptables de conservación (He et al., 2011).

La durabilidad es el resultado de la interacción de las estructuras de concreto, del ambiente, las condiciones de uso, de operación e, inclusive, de mantenimiento. Así, para evaluar el desempeño de las construcciones son utilizadas inspecciones visuales asociadas a ensayos de campo y laboratorio, haciendo posible identificar las causas de las manifestaciones patológicas y escoger las técnicas de recuperación y de protección más adecuada y de mejor costo-beneficio para el mantenimiento de la edificación (Mota, 2011).

Con el fin de evaluar las condiciones de las estructuras de concreto armado, el tiempo de vida útil de la construcción puede ser estimado a partir del coeficiente de difusión de cloruros en el concreto. El método actual más representativo para determinar ese coeficiente es basado en la segunda Ley de Fick. Por ello, ese es un procedimiento lento y para corregir esa situación, los métodos acelerados, como el propuesto por la ASTM C 1202/05, han sido utilizados asociados a la identificación de la profundidad de penetración de cloruros (Kim et al., 2013).

Existen diversos métodos para identificar y cuantificar los cloruros libres y totales a lo largo de la profundidad del concreto (perfil de cloruros), tales como el gravimétrico, y la titulación o la potenciometría directa (Pereira & Cincotto, 2001; Silva, 2006). Para la determinación del perfil de cloruros que requiere corte o perforación, y análisis química de muestras de concreto, son necesarios varios equipamientos y tiempo de análisis (He et al., 2011). En contrapartida, el método colorimétrico basado en $AgNO_3$ para la medición de la profundidad de penetración de cloruros en la matriz cementicia es práctico y rápido (Jucá, 2002; Meck & Sirivivatnanon, 2003; Yuan et al., 2008; França, 2011; He et al., 2011; Mota, 2011; Kim et al., 2013), por tanto, su eficiencia y condiciones de aplicación deben ser bien entendidas para hacer el método y tener las posibles ventajas de aplicación de esta técnica.

La aspersión de nitrato de plata ha sido utilizada asociada al ensayo acelerado de migración de cloruros prescrito por la ASTM C 1202/05. Se rocía solución acuosa de $AgNO_3$ 0,1 M a las rebanadas fracturadas de concreto posterior al ensayo de migración de iones. Ese procedimiento causa la formación de dos regiones bien definidas (Figura 1): una blanquecina con precipitado de

AgCl, indicando la presencia de cloruros y otra color marrón, que corresponde a la región libre de cloruros (Medeiros, 2008; Trindade, 2011; Marriaga & Claisse, 2011; Marcondes, 2012).

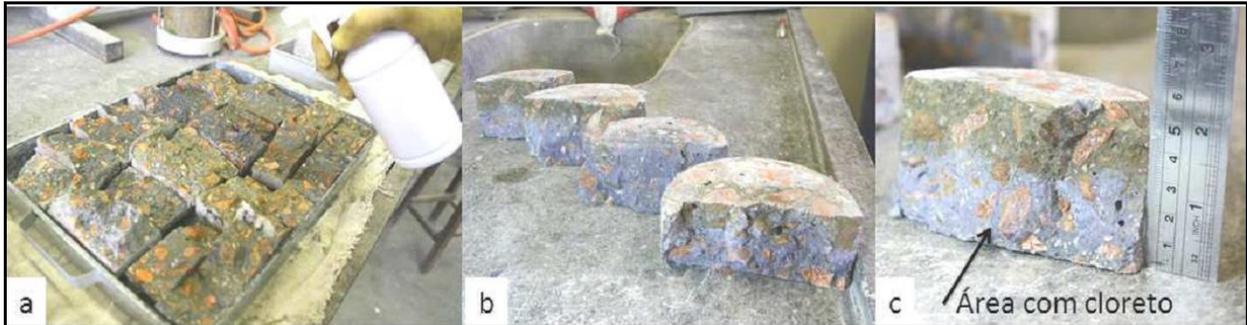


Figura 1. a) Aspersión de la solución de nitrato de plata; b) Comparación entre los cuerpos de prueba; c) Medida de la profundidad de penetración de cloruros (MARCONDES, 2012)

En 2010, Cavalcanti & Cavalcanti utilizaron el método colorimétrico por aspersión de nitrato de plata para la evaluación de las manifestaciones patológicas de un muelle localizado en la playa de Tambaú, en la ciudad de João Pessoa/PB. A través del ensayo los autores pudieron comprobar que la despasivación y corrosión de las armaduras ocurrió porque los iones cloruros excedieron el espesor de recubrimiento del concreto.

Entretanto, a pesar de la simplicidad del método, la reacción química que lleva al cambio de color es afectada por la concentración de la solución de nitrato de plata, por el pH Del medio, la presencia de carbonatos o por el contenido de cloruros del concreto. En consecuencia el método es afectado por la presencia de carbonatación (que lleva a la reducción del pH de la pasta) y por el nivel de contaminación que el material está sometido (Otsuki *et al.*, 1993; Andrade *et al.*, 1999; Meck & Sirivivatnanon, 2003; Jucá, 2002; Bouny *et al.*, 2007; He *et al.*, 2012; França, 2011; Kim *et al.*, 2013). En este contexto, el objetivo del presente artículo es evaluar la aplicación del método colorimétrico por aspersión de nitrato de plata, analizando y comparando diversas investigaciones realizadas y publicadas.

2. MÉTODO COLORIMETRICO UTILIZANDO AgNO_3

El desarrollo del método colorimétrico por aspersión de nitrato de plata tuvo sus inicios en Italia, en 1970, por Colleparidi. Consiste en un método cualitativo para identificar la presencia de cloruros libres en materiales a base de cemento (Francia, 2011; Mota, 2011). El método llegó a ser normalizado en Italia, entretanto, según Colombo (2001) apud Jucá (2002), por no presentar resultados seguros, la norma “UNI 7928” fue retirada de uso sin preveer una sustitución. La principal aplicación del método colorimétrico es la determinación de la profundidad del frente de penetración de cloruros que ingresan en el concreto por los fenómenos de la absorción asociada a la difusión. Cuando la solución de nitrato de plata es rociada en la superficie del concreto, ocurre una reacción fotoquímica (Figura 2). Donde hay presencia de cloruros libres ocurre la formación de un precipitado blanco de cloruro de plata. En la región sin cloruros o con cloruros combinados, hay formación de un precipitado marrón, u óxido de plata. Por ello como el frente de penetración de cloruros nano es regular, esto puede modificar las medidas de profundidad de ingreso de los cloruros. En el caso que los cloruros están insertos en la matriz del concreto, la visualización puede volverse un poco más difícil. (Meck & Sirivivatnanon, 2003; Francia, 2011; Mota, 2011).



Figura 2. Posible precipitación de cloruros libres (blanco) y cloruros combinados (marrón) (Medeiros et al, 2009).

Como la penetración de cloruros no es uniforme, la NT BUILD 492 (2000) recomienda realizar siete medidas a cada 10 mm, siendo el resultado el promedio entre todas ellas (Figura 3). En caso de no poderse dar lectura por la presencia de agregados, se debe alterar hasta el punto de la medición o ignorar esta profundidad si hay otras cinco válidas.

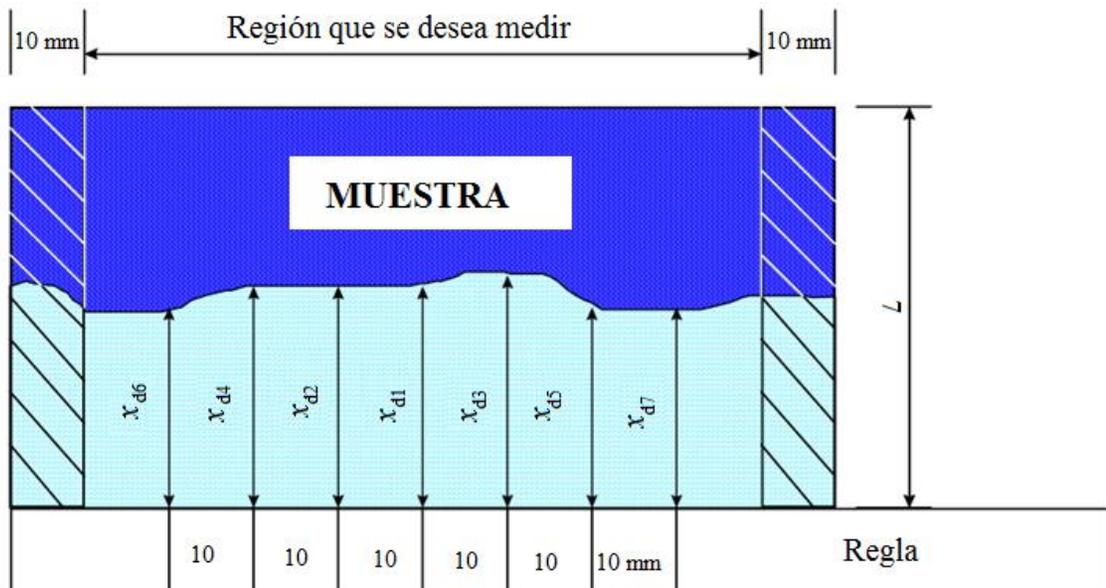
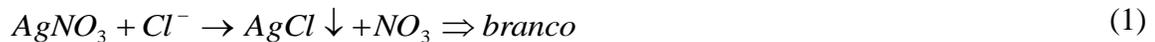


Figura 3. Medidas del frente de penetración de cloruros (NT BUILD 492, 2000).

En la región donde hay cloruros libres, ocurre la reacción química (1). Por tanto, la presencia de carbonatos también hay formación de un precipitado blanco, conforme indica la reacción (2). Por eso, se aconseja el uso de la técnica de realcalinización del material cementicio antes de la aplicación del método colorimétrico (JUCÁ, 2002), pues en caso que el concreto este carbonatado y sin contaminación por cloruros el ensayo irá resultar en falso positivo, siendo este uno de los motivos de dificultad de implementación de esta técnica comúnmente en las inspecciones de campo.



3. INFLUENCIA DEL TIPO DE CEMENTO EM LOS RESULTADOS

La técnica de aspersión de nitrato de plata identifica apenas los cloruros libres del concreto y por lo tanto el resultado también podría ser influenciado por la capacidad del cemento de combinarse más o menos con los cloruros (Jucá, 2002). Como se describió anteriormente, los cloruros se combinan con el C_3A y el C_4AF , que son productos de la hidratación del cemento Portland. Si hay bajos contenidos de aluminatos, probablemente habra poca capacidad de inmovilizar los iones de cloruro. Es por ello que Pereira & Cincotto (2001) evaluaron la capacidad de combinación de cloruros en concretos vaciados con diferentes tipos de cemento Portland (CP I S, CP II F, CP III, CP IV e CP V ARI) y no observaron diferencias significativas en el contenido de cloruros combinados. En contraparte Jucá (2002) elaboro cuerpos de prueba con los mismos cinco tipos de cemento (CP I S, CP II F, CP III, CP IV e CP V – ARI), incorporando 1 y 2% de cloruros en relación al peso de cemento en las muestras. Posterior al rociado del nitrato de plata, los resultados permitieron visualizar que hay un período de combinación de cloruros y que el contenido de aluminatos de los cementos es un factor preponderante en el proceso de combinación química. Francia (2011) evaluó la combinación de cloruros utilizando el método colorimétrico para 0,4 y 2% de cloruros en relación al peso de los cementos CP II F, CP IV e CP V – ARI y, así como para Jucá (2002), sus resultados mostraron que hay influencia del tipo de cemento en la cantidad de cloruros libres.

Los resultados del estudio de Mota (2011) también permitieron observar que hay fijación de cloruros con el pasar del tiempo. Para una mezcla producida con 2% de cloruros en relación a la masa de cemento, la región blanca (que indica donde hay cloruros libres) se modificó. A pesar de no haber un frente de penetración de cloruros, ya que la contaminación en esa etapa del estudio de Mota (2011) fue interna, es posible observar en la Figura 4 que el área contaminada por cloruros, indicada por la alteración de la coloración para blanquecina al rociar nitrato de plata, disminuye. Es decir, los cloruros estarían dejando de ser libres para combinarse con el C_3A . Cabe destacar que los bordes claros en la Figura 4 son relativas al efecto de la carbonatación.



Figura 4. Evolución de la combinación de cloruros (Mota, 2011).

4. PUNTO DE VIRAJE E INFLUENCIA DEL pH

Al aplicar el método colorimétrico, existe un punto de viraje de coloración. Es decir, una determinada concentración de cloruros y de la solución de nitrato de plata que causa el cambio de color (formación de la frontera; *border-change color*), de modo de determinar la profundidad del frente de penetración de cloruros libres. De acuerdo con Otsuki *et al.* (1993), la concentración de la solución de AgNO₃ adecuada para el método colorimétrico es igual a 0,1N. Ese valor ha sido en consenso entre los diversos autores del área (Andrade *et al.*, 1999; Meck & Sirivivatnanon, 2003; Jucá, 2004; Francia, 2011; Mota, 2011).

Aun según Otsuki *et al.* (1993), para la concentración de AgNO₃ igual a 0,1N, el contenido mínimo de cloruros libres que genera esa alteración de color es igual a 0,15% en relación a la masa de cemento. Entretanto, Collepari (1997) defiende que ese contenido mínimo es igual a 0,01% (Jucá, 2004; França, 2011; Mota, 2011). Já Andrade *et al.* (1999) obtuvieron, con 95% de confiabilidad, que el punto de viraje es de 1,14%±1,4 en relación a la masa de cemento. Ese valor está en concordancia al defendido por Meck & Sirivivatnanon (2003), que es igual a 0,9% de cloruros en relación a la masa de cemento. En 2011, He *et al.* encontraron que ese contenido crítico de cloruros está entre 0,011 e 2,27% sobre el peso de cemento. Se debe destacar que no existe consenso sobre el contenido de cloruros libres que causa el cambio de color en la solución de AgNO₃ 0,1N, una vez que los datos disponibles en los estudios citados son tan discrepantes.

Recientemente, Kim *et al.* (2013) re evaluaron las variables que pueden influenciar la técnica. El estudio consiste en verificar si hay mudanza en la coloración al alterar el pH del medio, la concentración de AgNO₃ y el contenido de cloruros. Además de eso, evaluaron si la relación agua/cemento influenciaría en la concentración de cloruros en la frontera de cambio de color (*border-change color*) y si el método colorimétrico es aplicable *in situ*, es decir, en estructuras reales. Los ítems evaluados y sus detalles están presentados en la Tabla 1.

Tabla 1. Variables de teste (Adaptado de KIM et al., 2013).

Item	Que fue evaluado	Detalles
Mecanismo del método colorimétrico	pH	10; 11; 12 e 13
	Concentración de NaCl (kg/m ³)	0,1-1,0
Influencia de la a/c en la concentración de cloruros y cambio de color	Relación agua/cemento	0,4; 0,5 e 0,6
Concentración óptima de AgNO ₃ para realizar el ensayo	Concentración de AgNO ₃	0,03N; 0,04N; 0,05N e 0,1N
Aplicación en el concreto	En laboratorio	Concentración de Cl ⁻ en región colorida
	<i>In situ</i>	Influencia da carbonatación

Inicialmente fueron realizados ensayos con pH=12 y alteración de las concentraciones de cloruros y de las soluciones de nitrato de plata, como puede ser observado en la Figura 5. Según Kim *et al.* (2013), la alteración de color fue más claramente observada para concentraciones de AgNO₃ superiores a 0,03N. Conforme a la concentración de nitrato de plata aumenta, se observa alteración en la coloración. En las bajas concentraciones, ese cambio no es claramente visualizado y puede generar errores (principalmente en las concentraciones de 0,03 e 0,04N). Por lo tanto, para mesurar la profundidad de penetración de los iones cloruro, los autores recomiendan utilizar concentración de nitrato de plata por encima de 0,05N.

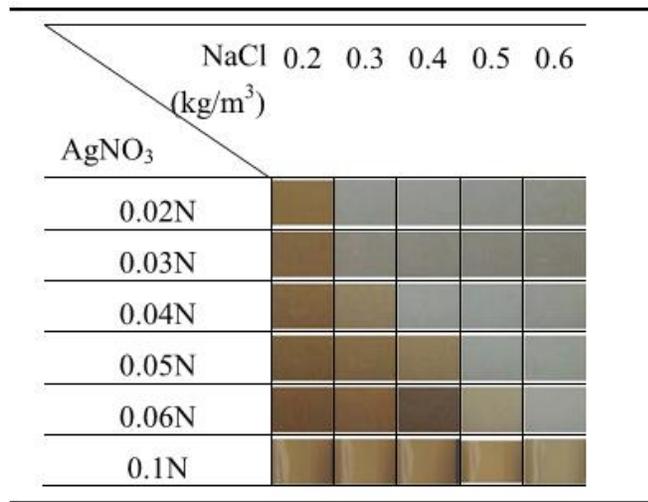


Figura 5. Determinación de la concentración óptima de nitrato de plata y el contenido mínimo de cloruros (KIM *et al.*, 2013).

Continuando con el estudio de Kim *et al.* (2013), cuatro cuerpos de prueba que fueron sumergidos en agua marina por 3 meses, y fueron sometidos al ensayo de rociado de nitrato de plata a diferentes concentraciones de AgNO₃, como se puede observar en la Figura 6.

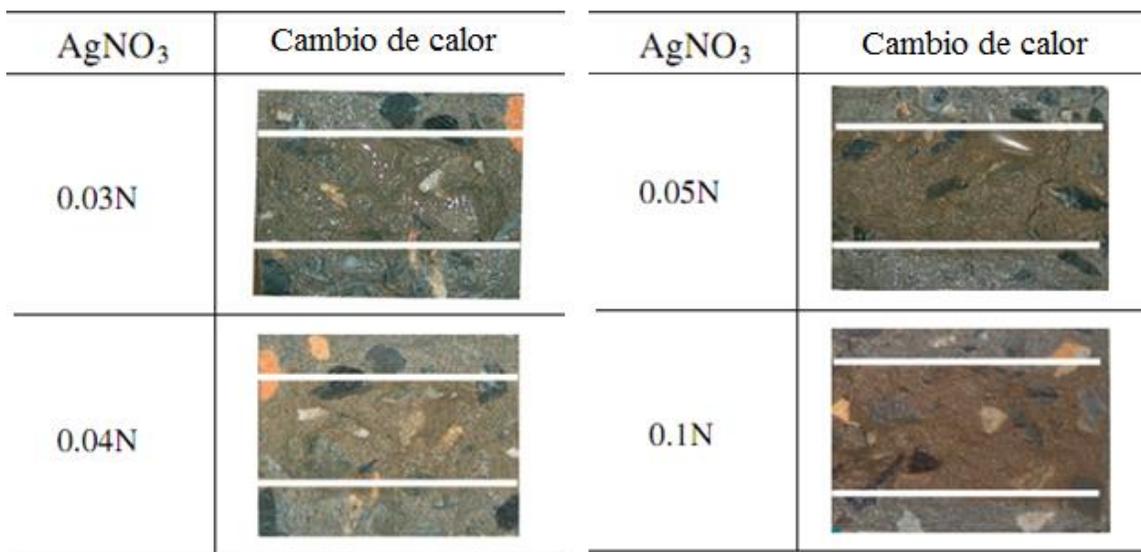


Figura 6. Cambio de color conforme a la concentración de AgNO₃ (Adaptado de KIM *et al.*, 2013).

Al analizar los valores defendidos por los distintos autores, se puede decir que la concentración de la solución de AgNO₃ más indicada para el método colorimétrico es de 0,1N. Todavía no hay un sobre el contenido de cloruros que provoca el cambio de color. Aun cuando las as investigaciones más actuales (He *et al.*, 2011 e KIM *et al.*, 2013) aun no llegan a valores próximos entre sí, como se ve en la Tabla 2.

Tabla 2. Resumen de las concentraciones de AgNO_3 e % límite de cloruros para cambio de coloración.

Autor	Concentración de AgNO_3	% de cloruros sobre o peso de cemento
Otsuki <i>et al.</i> (1993)	0,1N	0,15%
Collepari (1997)	0,1N	0,01%
Andrade <i>et al.</i> (1999)	0,1N	1,14% \pm 1,4%
Meck & Sirivivatnanon (2003)	0,1N	0,90%
He <i>et al.</i> (2011)	0,1N	0,011% a 2,27%
Kim <i>et al.</i> (2013)	Acima de 0,05N	0,05%

Para evaluar la influencia del pH en la coloración, Kim *et al.* (2013) ensayaron, como se presenta en la Figura 7, diversas concentraciones de nitrato de plata y cloruros para diferentes valores de pH.

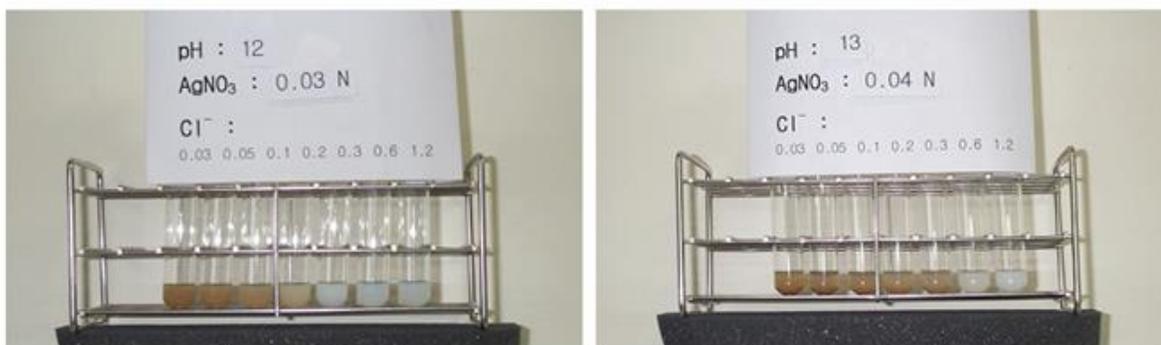


Figura 7. Análisis da influencia del pH en el cambio de color (KIM *et al.*, 2013).

Los resultados se presentaron cuando el pH está por debajo de 10, la medida da penetración de cloruros es impracticable (Figura 8). Por tanto, cuando la estructura está expuesta al ataque por cloruros y al CO_2 , la profundidad de carbonatación debe ser medida antes de la profundidad de cloruros. Cuando la profundidad de carbonatación es superior a la de penetración de cloruros, es imposible, de acuerdo con Kim *et al.* (2013) determinar la segunda variable (penetración de cloruros libres) a través de rociado de nitrato de plata.

La relación agua/cemento no influyo en la concentración de cloruros en el borde de cambio de color (KIM *et al.*, 2013), es decir, ella no afecta el cambio de color para el método colorimétrico.

El método colorimétrico por aspersión de nitrato de plata pode ser utilizado, al menos, como primer paso para cuantificar la penetración de los cloruros dentro del concreto (Bouny *et al.*, 2007). En el caso de estructuras expuestas a ambientes marinos y al CO_2 , el uso del método de aspersión de nitrato de plata se vuelve complicado, siendo necesario asociar el método con otros ensayos (Jucá, 2004; Francia, 2011; Mota 2011). Kim *et al.* (2013) aplicaron el método colorimétrico a estructuras de concreto armado expuestas a cloruros y a autopistas expuestas a sales de deshielo para confirmar la aplicación del ensayo. Como la carbonatación fue más profunda que la penetración de cloruros, fue imposible aplicar el método colorimétrico, una vez que al regar el nitrato de plata, la región de

cambio de color pudiera indicar presencia de carbonatación y no apenas la contaminación por cloruros.

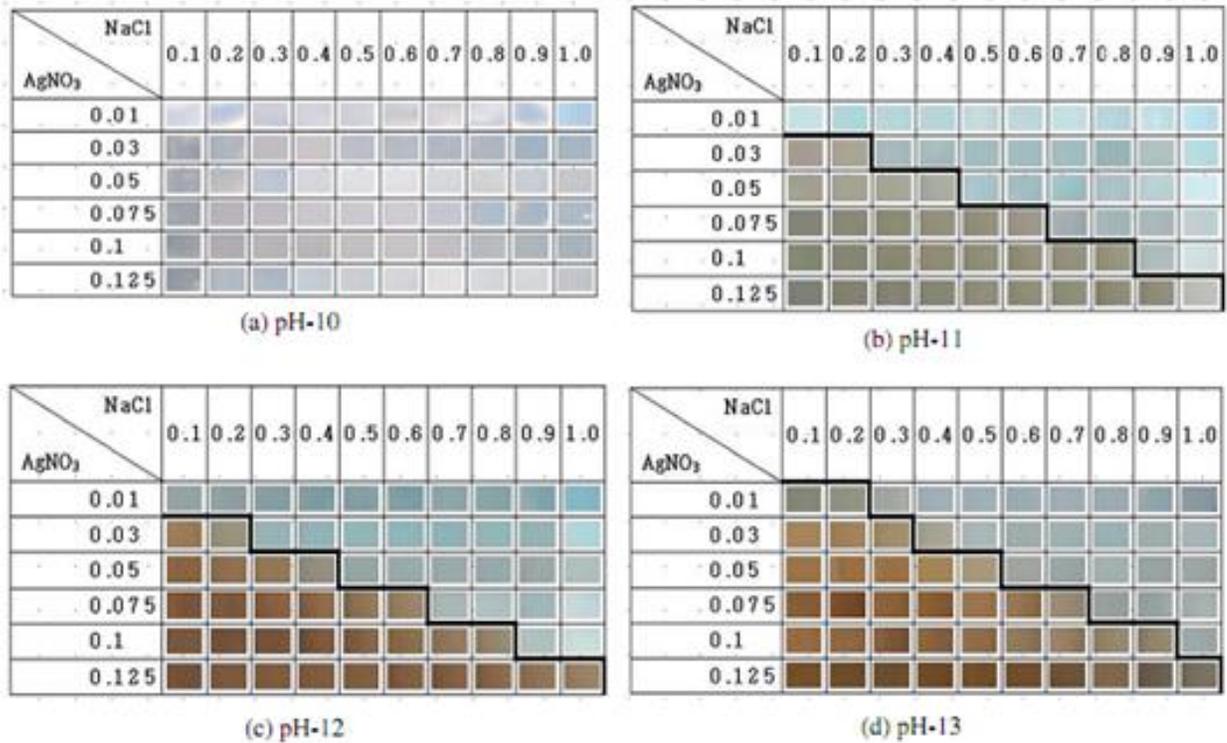


Figura 8. a) Coloración para pH=10 b) Coloración para pH=11 c) Coloración para pH=12 d) Coloración para pH=13 (KIM *et al.*, 2013)

5. OTROS MÉTODOS COLORIMÉTRICOS UTILIZANDO NITRATO DE PLATA

Desde 1970, tres métodos colorimétricos basados en AgNO_3 (AgNO_3 + fluoresceína, AgNO_3 + K_2CrO_4 e AgNO_3) han sido propuestos para medir la profundidad de penetración de iones cloruro en el concreto en campo y laboratorio. Los dos métodos todavía no abordados se describen a continuación (He *et al.*, 2011):

AgNO_3 + fluoresceína: en los años 70, Collepardi *et al.* (1970; 1972) desarrollaron un método colorimétrico para determinar el cloruro libre contenido en el concreto, en el cual, primeramente, una solución de fluoresceína (1g/L en una solución de 70% de alcohol etílico en agua) fue regada en una sección de concreto con penetración de cloruros. Enseguida, fue aplicado 0,1 mol/L de solución de nitrato de plata. Inmediatamente después de la aspersión de nitrato de plata, hubo la formación de Ag_2O y AgCl . La fluoresceína es un ácido orgánico débil, que en solución se disocia en un ion verde amarillento. Ese método fue definido como la Italiana Standard 79-25 (1978).

AgNO_3 + K_2CrO_4 : Este método, primeramente, una solución de 0,1mol/L de AgNO_3 de pH=3-5 y regada en una sección de concreto. Luego de una hora de secado natural, se aplica la solución de K_2CrO_4 (5% en peso). Una vez que la solución de cromato de potasio es colocada, en la zona contaminada por cloruros se torna amarilla debido a la formación de AgCl blanco y, enseguida, la aplicación de la solución de K_2CrO_4 la convierte en amarillenta.

Comparación entre os tres métodos: El método colorimétrico que utiliza apenas nitrato de plata y el más simple entre los tres; el uso de cromato de potasio y de fluoresceína exige mayor tiempo de reacción para obtener mejor efecto de la coloración. El uso de AgNO_3 resulta en una mudanza clara en la mayoría de los casos, por lo tanto, es el método más utilizado. En la Figura 9 es posible

observar que el límite de cambio de color entre la zona que contiene cloruro y la zona libre de cloruros es visible en los tres casos. Entre los tres, el uso de AgNO_3 + fluoresceína es el método AgNO_3 son muy similares. No en tanto, el método AgNO_3 + fluoresceína no presenta una frontera muy clara.

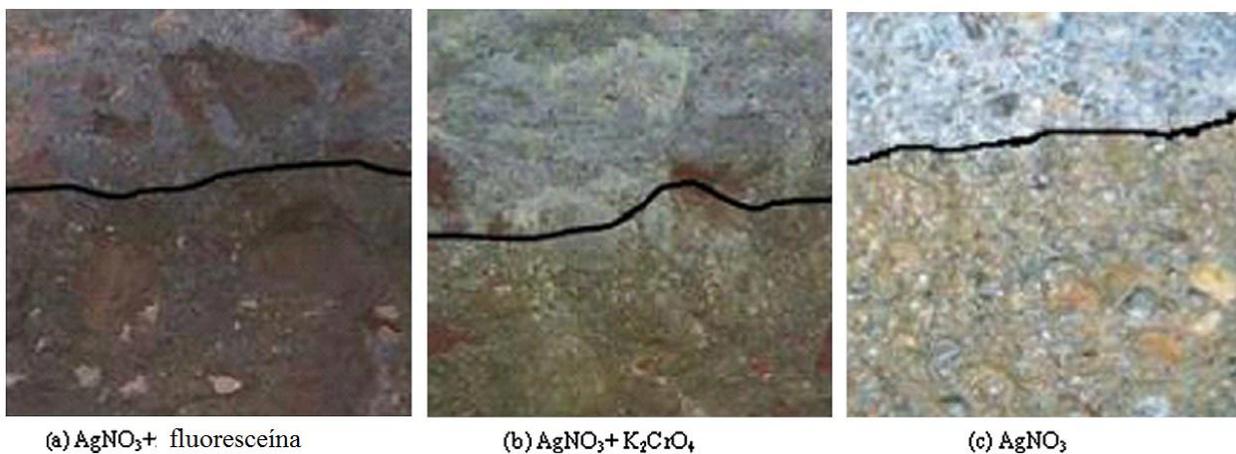


Figura 9. a) AgNO_3 + fluoresceína b) AgNO_3 + K_2CrO_4 c) AgNO_3 (Adaptado de He *et al.*, 2011).

4. CONCLUSIONES

El objetivo de este artículo fue producir una visión general del estado del arte sobre el uso del método colorimétrico por aspersión de nitrato de plata. En este contexto se intentó evaluar la aplicabilidad del método y seguidamente están algunas comprobaciones producidas con el estudio realizado:

1. El tipo de cemento influye en los resultados del método colorimétrico por combinar más o menos cloruros. Conforme el concreto pasa de los 28 a los 56 días, por ejemplo, combina más cloruros, reduciendo los cloruros libres, que son los responsables por la mudanza del color;
2. Se recomienda la concentración de 0,1N AgNO_3 , pues esa permite un claro cambio de color, por lo tanto los estudios con concentraciones por encima de 0,1N no fueron encontradas y pueden ser desarrollados para verificar se existiría mejoras en el contraste;
3. Todavía no hay consenso cuanto el contenido de cloruros que lleva a la alteración del color, pues los estudios encontrados sobre este asunto son muy contradictorios y discrepantes entre sí.;
4. Cuando el pH del concreto es inferior a 10 o hay carbonatación superior a la penetración de cloruros, el método colorimétrico no puede ser aplicado solo. Se debe emplear una técnica de realcalinización, pues este tipo de práctica para viabilizar el uso del método todavía no pasa de una idea y el procedimiento efectivo no está bien definido en el medio técnico.;
5. Para casos donde el ataque es exclusivamente por cloruros, el método colorimétrico es una técnica cualitativa eficiente, práctica y de bajo costo.

5. REFERENCIAS

- Bouny, B. V. *et al.* (2007), *AgNO₃ spray tests: advantages, weaknesses, and various applications to quantify chloride ingress into concrete. Part 1: Non-steady-state diffusion tests and exposure to natural conditions.* Materials and Structures, p. 759-781.
- Cavalcanti, A. N.; Cavalcanti, G. A. D. (2010), *Inspecção técnica do píer de atracação de Tambaú.* Concreto e construção, v. 57, p. 45-55.
- França, C. B. (2011), *Avaliação de cloretos livres em concretos pelo método de aspersão de solução de nitrato de prata.* Dissertação de Mestrado. Universidade Católica de Pernambuco, Recife, Brasil.

- Helene, P. (1993), *Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado*. 231p. Tese (Livre docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.
- He, F. *et al.* (2012), *AgNO₃-based colorimetric methods for measurement of chloride penetration in concrete*. Construction and Building Materials, v. 26, n. 1, p. 1-8.
- He, F. *et al.* (2011), *Calculation of chloride concentration at color change boundary of AgNO₃*. Construction and Building Materials, v. 41, n. 11, p. 1095-1103, 2011.
- Jucá, T. R. P. (2002), *Avaliação de cloretos livres em concretos e argamassas de cimento Portland pelo método de aspersão de solução de nitrato de prata*. Dissertação (mestrado), Universidade Federal de Goiás. Goiânia, Brasil.
- Kim, M. *et al.* (2013), *Application of the colorimetric method to chloride diffusion evaluation in concrete structures*. Construction and Building Materials. v. 41, p. 239-245.
- Marcondes, G. N. (2012), *Adição de nanotubos de carbono em concretos de cimento Portland – absorção, permeabilidade, penetração de cloretos e propriedades mecânicas*. Dissertação (mestrado). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil.
- Marriaga, J. L.; Claisse, P. (2003), *Influencia de la adición de escoria de alto horno em la penetración de los cloruros en el concreto*. Ingenieria e investigación, v.31, p. 38-47, 2011.
- Meck, E.; Sirivivatnanon V. *Field indicator of chloride penetration depth*. Cement and Concrete Research, v.33, p.1113-1117.
- Medeiros, M. H. F. (2008), *Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos com proteção de superficial frente à ação de íons cloreto*. Tese (doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.
- Medeiros, M. H. F.; Hoppe Filho, J.; Helene, P. (2009), *Influence of the slice position on chloride migration tests for concrete in marine conditions*. Marine Structures, v. 22, p. 128-141.
- Mota, A. C. M. (2011), *Avaliação da presença de cloretos livres em argamassas através do método colorimétrico de aspersão da solução de nitrato de prata*. Dissertação (mestrado). Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco, Recife, Brasil.
- Otsuki, N.; Nagataki, S; Nakashita, K. (1992), *Evaluation of AgNO₃ solution spray method for measurement of chloride penetration into hardener cementitious matrix materials*. ACI Materials Journal. v. 89, n. 6, p. 587-592.
- Pereira, L. F. C.; Cincotto, M. A. (2001), *Determinação de cloretos em concreto de cimentos Portland: influência do tipo de cimento*. Boletim Técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.
- Silva, F. G. (2006), *Estudo de concretos de alto desempenho frente à ação de cloretos*. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil.
- Trindade, G. H. (2011), *Durabilidade do concreto com cinza de casca de arroz natural sem moagem: mitigação da reação álcali-silica e penetração de cloretos*. Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil.
- Yuan, Q.; Shi, C.; Schutter, G.; Audenaert, K.; Deng, D. (2008), *Effect of hydroxyl ions on chloride penetration depth measurement using the colorimetric method*. Cement and concrete research, v. 38, n. 10, p. 1177-1180.