

Revista Latino-americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação da Construção

<http://www.revistas-conacyt.unam.mx/alconpat/index.php/RA>

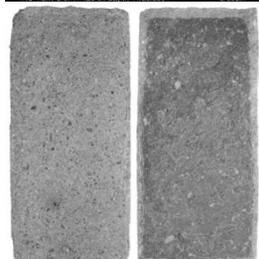
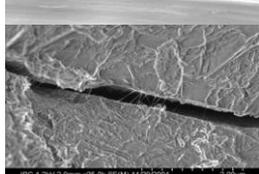
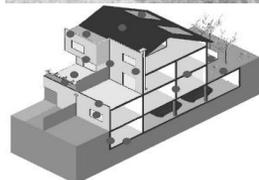
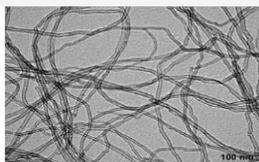
revistaalconpat@gmail.com

eISSN: 2007-6835

Volume 5

Maio - Setembro 2015

Número 2



2% aos 28 dias

2% aos 56 dias



Revista Latinoamericana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação da Construção

<http://www.revistas-conacyt.unam.mx/alconpat/index.php/RA>

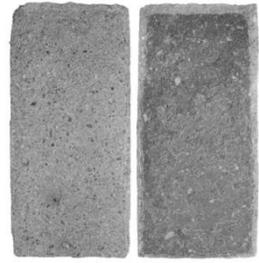
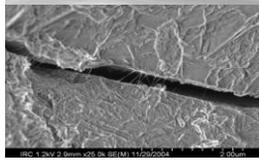


eISSN: 2007-6835

Volume 5

Maio - Setembro 2015

Número 2



2% aos 28 dias 2% aos 56 dias

SUMÁRIO

Página

- E. F. Irassar, V. L. Bonavetti, G. Menéndez, M. F. Carrasco:** Hidratação e propriedades de cimentos ternários com filler calcário e escória. 84
- C. G. N. Marcondes, M. H. F. Medeiros, J. Marques Filho, P. Helene:** Nanotubos de carbono em concreto de cimento Portland: Influência da dispersão nas propriedades mecânicas e na absorção de água. 97
- D. Martínez-Vásquez, D. E. Ortega-Zavala, G. Vargas Gutiérrez, A. F. Fuentes, J. I. Escalante-García:** Potencial do método de síntese de materiais cerâmico-cimentícios processados por vias alternativas 116
- D. C. S. Amorim, D. R. C. Oliveira:** Reforço estrutural de uma edificação histórica na cidade de Rio Branco – Acre. 126
- Artigos de Revisão:**
- G. T. Ferraz, J. De Brito, V. P. De Freitas, J. D. Silvestre:** Sistemas de gestão técnica integrada de edifícios: inspeção e reparação de elementos não estruturais. 138
- L. V. Real, D. R. B. Oliveira, T. Soares, M. H. F. Medeiros:** Método colorimétrico por aspersão de nitrato de prata para avaliação da penetração de cloretos em concreto: estado da arte. 150

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

Luis Carlos Pinto Da Silva, **Brasil**

Presidente

Paulo Do Lago Helene, **Brasil**

Director General

Pedro Castro Borges, **México**

Secretario Ejecutivo

José Manuel Mendoza Rangel, **México**

Vicepresidente Administrativo

Ysabel Dykdan Jaua, **Venezuela**

Vicepresidente Académico

Angélica Ayala Piola, **Paraguay**

Gestor

Enrique Aguilar Cervera, **México**

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:

Dra. Patricia Martínez
Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción,
Escuela de Ingeniería,
Pontificia Universidad Católica de Chile
Santiago de Chile, **Chile**

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

Universidad Técnica de Lisboa
Lisboa, **Portugal**

RAV5N2, Maio - Agosto 2015

Mensagem do Editor-Chefe

REVISTA LATINOAMERICANA DE CONTROLE DE QUALIDADE, PATOLOGIA E RECUPERAÇÃO DA CONSTRUÇÃO

<http://www.mda.cinvestav.mx/alconpat/revista>

É motivo de satisfação e alegria para a equipe responsável da Revista ALCONPAT ver publicado a segunda edição deste ano que já é o quinto ano de publicação.

O objetivo da Revista ALCONPAT (RA) é a publicação de estudos de caso relacionados com os temas de nossa Associação, ou seja, controle de qualidade, patologia e recuperação das construções, ao mesmo tempo que estimula a apresentação de investigações básicas ou aplicadas que possam ter correlação com os estudos de caso.

Neste volume V5N2, iniciamos com o artigo de autoria do convidado especial procedente de **Argentina**, Prof. Edgardo F. Irassar e seus colegas que discutem a hidratação e propriedades de cimentos ternários com filler calcário e escoria. Seus resultados mostraram uma limitação do conteúdo de filler para obter uma resposta adequada da resistência mecânica e da durabilidade a longo prazo,. Também ficou evidenciado o limite do conteúdo de escoria para obter valores apropriados nas idades iniciais.

No segundo artigo, proveniente do **Brasil**, C. G. N. Marcondes e outros, discutem a influencia da dispersão nas propriedades mecânicas e na absorção de água de nanotubos de carbono em concreto de cimento Portland. O método de ultrassom foi relevante para obter a dispersão adequada dos nanotubos e assim obter uma melhora das propriedades mecânicas

No terceiro artigo, D. Martínez-Vásquez e seus colegas do **México** estudam o potencial do método de síntese de materiais cerâmico-cimentícios processados por vias alternativas. Entre seus resultados registram que o processamento proposto foi fundamental para obter altas propriedades mecânicas em reduzidos tempos de cura.

Nosso quarto artigo vem do **Brasil**, onde Denis Cley S. Amorim y Dênio Ramam C. Oliveira mostram um trabalho de Reforço Estrutural de um Edifício Histórico na Cidade de Rio Branco no Acre. É interessante destacar e discutir o

procedimento de encamisamento dos pilares e outros componentes estruturais.

O quinto artigo deste número foi escrito por Goncalo T. Ferraz, Jorge de Brito e seus colegas de **Portugal**. Apresentam interessante trabalho de sistemas de gestão integrada de edifícios. Destaca-se seu modelo que leva em consideração diversos problemas patológicos para orientar a gestão adequada de edifícios.

No sexto artigo proveniente do **Brasil**, J. Ligia. V. Real e colegas apresentam o estado da arte sobre o método colorimétrico por pulverização de nitrato de prata para avaliar a penetração de cloretos no concreto. Entre seus resultados relatam a influencia do tipo de cimento na resposta do método colorimétrico

Cada número de RA busca equilibrar a participação de temas relacionados ao objetivo da ALCONPAT Internacional. Sem duvida, os artigos deste número constituirão mais uma importante referencia para o meio técnico.

Agradecemos a nossos autores deste número, seu voluntarismo e esforço para cumprir com a qualidade do texto dentro dos prazos estabelecidos.

Cada número da Revista aparecerá com os artigos no seu idioma original, e antes do seguinte número serão publicadas as versões nos demais idiomas. Os idiomas oficiais da Revista ALCONPAT são Inglês, Espanhol e Português

Em nome do Conselho Editorial



Pedro Castro Borges
Editor-Chefe



Revista ALCONPAT

<http://www.revistas-conacyt.unam.mx/alconpat/index.php/RA>

eISSN 2007-6835



Revista da Associação Latinoamericana de Controle de qualidade, Patologia y Recuperación da construção

Hidratación e propiedades de cimentos compostos (com três adições) com filer calcáreo e escória

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

¹ Facultad de Ingeniería - CIFICEN (CONICET-UNCPBA) - B7400JWI - Olavarría, Argentina; email: firassar@fio.unicen.edu.ar

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

Artículo recibido el 22 de Diciembre de 2014, revisado bajo las políticas de publicación de la Revista ALCONPAT y aceptado el 30 de abril de 2015. Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el primer número del año 2016 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del tercer número del año 2015.

RESUMO

O filer 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 filer (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 $w/c = 0,50$), e o processo de segmentação de poros é analisado com relação à taxa de absorção capilar. Os resultados mostram que o teor de filer deve ser limitado para obter uma resposta de resistência mecânica e de durabilidade e que a quantidade de escória deve ser limitada para se obter propriedades adequadas nas primeiras idades.

Palavras chave: Filer calcáreo, escória, resistência, absorção capilar, hidratação.

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: Limestone filler, slag, Strength, sorptivity, hydration

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

Autor de contacto: Edgardo Fabian Irassar

© 2015 ALCONPAT Int.

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.mda.cinvestav.mx/alconpat/revista
Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-01171330300-203, 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 última modificación: 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. INTRODUÇÃO

As adições minerais tornaram-se cruciais para a formulação de misturas cimentícias devido à necessidade de reduzir o consumo de energia, de proteção dos recursos minerais naturais e de reduzir as emissões de gases que contribuem para o aquecimento global. Para alcançar os objetivos de sustentabilidade, também é necessário que a mistura formulada contribua para uma maior vida útil das estruturas de concreto. Durante as últimas décadas, os esforços para entender o comportamento do concreto com adições minerais naturais (pozolanas, fíler calcário), adições termicamente ativas (argilas calcinadas) e subprodutos industriais (cinzas volantes, escória de alto forno, sílica ativa) foram aumentados (CEMBUREAU, 2000-2010). Para formular cimentos compostos (com duas adições) foram usadas diferentes combinações de adições minerais em função dos recursos disponíveis em cada região ou país. Desde 1990, o uso de compostos (com duas adições) ou formulados com clínquer de cimento Portland e duas adições minerais tem crescido, pois apresentam várias vantagens sobre os cimentos compostos (com duas adições). A norma de cimentos europeia (EN 197-1), mexicana (NMX C-414-0) e argentina (IRAM 5000), normalizaram os cimentos compostos que contenham até 35% em peso de uma combinação de duas adições e atualmente possuem planos para aumentar esta porcentagem a 55%. Nos EUA, a ASTM C 1157 incorporou os cimentos hidráulicos convencionais com base no desempenho que não limita o tipo e a quantidade de adições minerais que podem ser misturados com o cimento Portland.

As adições a combinar são escolhidas de modo que a deficiência de uma adição mineral é compensada pelo benefício de outra e a sinergia produzida melhora o comportamento do material cimentício composto tipo binário (de duas adições). Finalmente, as propriedades mecânicas e duráveis do concreto dependerão do processo de hidratação que irá determinar a porosidade e a conectividade da estrutura porosa da matriz, bem como de melhorar a interface pasta-agregado (Soroka, 1979).

A hidratação do cimento Portland é um processo complexo de natureza físico-química no qual influem os fatores específicos do cimento Portland (composição mineralógica, álcalis, sulfatos, finura, etc.), as condições de mistura (relação a/c, a unidade de dosagem de cimento) e do ambiente (temperatura e umidade relativa). Quando adições minerais são incorporadas ao cimento Portland, os efeitos produzidos sobre a hidratação podem arbitrariamente serem separados em três (Cyr et al, 2006):

- O efeito de diluição é o resultado da substituição parcial de uma parte do cimento pela adição mineral, diminuindo a quantidade de cimento e que conseqüentemente provoca um aumento da relação água/cimento efetiva. Para um mesmo grau de hidratação do material cimentício, este efeito implica um menor volume de produtos de cimento hidratado.
- Os efeitos físicos que as adições finamente moídas produzem são: o efeito fíler e a nucleação heterogênea. O efeito fíler produz partículas finas que preenchem o espaço vazio entre os grãos de cimento modificando seu empacotamento granular, o que implica em uma alteração da porosidade inicial da pasta. Este efeito modifica positivamente ou negativamente a demanda de água necessária para manter uma trabalhabilidade, dada a granulometria e a proporção de adições.
- O efeito químico é a própria reação pozolânica ou cimentícia da adição mineral, na qual participam dos diferentes graus das fases previamente hidratadas, tais como hidróxido de cálcio (CH). No caso de material de fíler calcário, a reação do carbonato de cálcio e do aluminato tricálcico do clínquer Portland produz a formação de carboaluminato de cálcio

hidratado (geralmente fase AFm: ferroaluminato monossustituído) (Bonavetti et al, 2001); No entanto, esta adição não é gerada durante a hidratação do silicato de cálcio hidratado (CSH) (Sersale, 1992).

Quando se utiliza adições minerais inativas, a influência dos dois primeiros efeitos é facilmente quantificável com água quimicamente combinada e o modelo de Powers e Brownyard (Powers, 1948; Browsers, 2004, 2005), como o caso do fíler calcário já apresentado (Bonavetti et al, 2003; Bentz et al, 2009; Bonavetti et al, 2013). Considerando que, quando a adição tem um efeito químico, sua quantificação é mais complexa e requer modelos para determinar a contribuição da adição a este parâmetro.

As propriedades do concreto e sua evolução ao longo do tempo dependem muito do progresso da hidratação do cimento, que determina a evolução da porosidade da matriz (Bentz et al, 2009). Nos cimentos compostos com três adições (misturas ternárias), dentre estas o fíler e a escória, dependem das proporções relativas dos componentes. O fíler contribui para a hidratação na fase inicial e a escória contribui com sua hidratação em médio prazo, e as propriedades do concreto variam de acordo com a evolução deste processo.

O objetivo deste artigo é analisar a resistência à compressão e a taxa de absorção capilar no concreto feito com cimentos compostos que contêm fíler calcário e escória de alto forno em relação aos processos de hidratação do material cimentício.

2. PROCEDIMENTO

Nos concretos estudados foi usado cimento Portland comum (CPN, IRAM 50000) de classe resistente CP40 ($f'_c > 40\text{MPa}$) com baixo teor de C_3A ($< 3\%$). As adições utilizadas são fíler calcário (F) e escória granulada de alto forno (E). F é proveniente de um calcário com elevado teor de calcita moída a uma finura Blaine $522\text{m}^2/\text{kg}$. E é uma escória resfriada e moída até uma finura Blaine de cerca de $450\text{m}^2/\text{kg}$. A escória é classificada como de alta reatividade segundo o índice com cimento determinado de acordo com a norma ENV 196-1. As combinações de cimentos compostos com duas e três adições utilizadas são apresentadas na Tabela 1.

Os concretos foram desenvolvidos em duas etapas usando areia silicosa de rio como agregado miúdo e granito britado como agregado graúdo (tamanho máximo de 19mm), o conteúdo de materiais cimentícios (CUMC) foi de 350 e $360\text{kg}/\text{m}^3$ e em todos os casos a relação a/c foi de 0,50. O detalhamento completo sobre o concreto da primeira e segunda etapa foi previamente publicado (Menendez et al, 2006, 2007; Carrasco et al, 2003).

A resistência foi determinada em amostras cilíndricas (100 x 200mm) curadas durante 24h nas fôrmas e, em seguida, em água saturada de cal a $20 \pm 1^\circ\text{C}$, até alcançar a idade para ensaio. Os valores relatados são a média de cinco exemplares. Para o concreto da primeira fase, a resistência à compressão foi determinada aos 3, 7, 28, 90 e 360dias, e para a segunda fase 2, 7 e 28dias.

Nos concretos na primeira fase, o coeficiente de absorção capilar foi determinado em exemplares prismáticos com lateais cujas faces foram pintadas com tinta epóxi, com exceção da face correspondente ao molde na qual uma área de 100cm^2 foi deixada sem pintura. Os prismas foram então submersos a uma profundidade constante de 1cm. A quantidade de água absorvida foi medida como o aumento de peso a 1, 5, 10, 15, 30, 60, 120, 240, 360, 720, 1440 e 2880min, e a taxa de absorção capilar (S) do concreto como o declive do gráfico entre a quantidade de água absorvida por unidade de área versus a raiz quadrada do tempo na zona compreendida entre 1 hora e enquanto a linearidade se manteve (Menendez et al, 2002). A quantidade de água não evaporável (W_n) foi determinada de acordo com o procedimento proposto por Powers (Powers,

1949; Escalante-Garcia, 2005) dos fragmentos obtidos a partir das amostras ensaiadas. Para a composição mineralógica média dos cimentos Portland usados, considera-se que com a relação água / cimento de 0,195 é atingida a hidratação total, e essa água é considerada não evaporável (W_n). Assumindo a hipótese do modelo de hidratação proposto por Chen & Brouwers (2007a), para a hidratação total da escória utilizada, é requerida a relação 0,20g de água por g de escória. Para este caso particular, em virtude da pequena diferença entre a W_n total para a hidratação do cimento que tem baixo teor de C_3A , e a W_n requerida para a escória, é assumida uma relação única de 0,20g/g para ambos. Ao combinar os valores de W_n total, é possível calcular o grau de hidratação do conjunto do material cimentício. Com o grau de hidratação calculado a partir do modelo de Powers (Powers, 1948; Brouwers, 2004, 2005) e o modelo de Chen & Brouwers (2007b) para os cimentos com escória é possível estimar os volumes das fases hidratadas assumindo que o fíler calcário é hidraulicamente inativo e que a totalidade de escória incorporada reage. Calculando o volume de produtos hidratados e sabendo que o espaço livre gerado pela relação água/cimento efetiva, pode-se calcular a relação de gel-espaço (X) e a porosidade capilar (ϕ) da matriz cimentícia do concreto de acordo com as expressões descritas ao longo deste artigo (Bonavetti et al, 2013).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 mostra os resultados obtidos para a água combinada e não evaporável (W_n), a resistência à compressão (f'_c) e taxa de absorção capilar (s) para os diferentes concretos e idades incluídos neste estudo. Como esperado, durante o tempo de cura, eleva-se o conteúdo de água combinada, a resistência à compressão e diminui-se a taxa de absorção capilar.

Em relação ao concreto de referência (PC ou NPC), pode-se observar que o fíler calcário contribui para o conteúdo de W_n nas primeiras idades e que a contribuição da escória é perceptível após sete dias de hidratação. Para os concretos compostos (com duas adições) com fíler, a quantidade de W_n relativa ao conteúdo de material reativo aumenta quando se eleva o nível de substituição nas primeiras idades (Figura 1-A) e, em seguida, o progresso da hidratação da fase cimentícia tende a minimizar esta vantagem. Para cimentos binários com escória (Figura 1B), essa adição produz uma diminuição relativa da W_n nas primeiras idades. Após 7 dias, a escória reage lentamente e a W_n relativa aumenta chegando aos 28 dias semelhante ao valor de referência cimento Portland.

Tabela 1. Composição do material cimentício, água combinada (Wn), resistência à compressão (f'_c), taxa de absorção capilar (S); grau de hidratação (α), relação gel/espaco (X) e porosidade capilar (ϕ) dos concretos em estudo.

Concreto	CUMC kg/m ³	F %	E %	Idade dias	Wn	f'_c MPa	S g/cm ² h ^{1/2}	a/c efetiva	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

Tabela 1. (Continuação)

Concreto	CUMC kg/m ³	F %	E %	Idade dias	Wn	f' _c MPa	S g/cm ² h ^{1/2}	a/c efetiva	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

Os principais produtos de hidratação da escória são silico-aluminatos de cálcio hidratados (C-A-S-H) com uma menor relação C/S correspondente ao C-S-H, hidrocalcita (M_5AH_{13}) e etringita ($C_3A.3CS.H_{32}$) (Brouwers & Chen, 2004). Esta reação é inicialmente estimulada pela solução alcalina que contem o CH, fornecida pela hidratação do cimento Portland.

Para o concreto de cimento ternário composto com baixo (Figura 1c) e com elevado teor de fíler (Figura 1d) e com um teor variável de escória, observa-se que o W_n é variável conforme mostrado na Fig. 1C, convergindo aos 90 dias para o concreto de cimento normal.

Em coerência com os resultados anteriores sobre argamassa, em relação à hidratação de cimentos binários e ternários com adições de fíler calcário e escória (Menendez et al, 2003; Carrasco et al, 2007), pode ser visto que os efeitos das adições (diluição, efeitos físicos e químicos) causam variações de W_n .

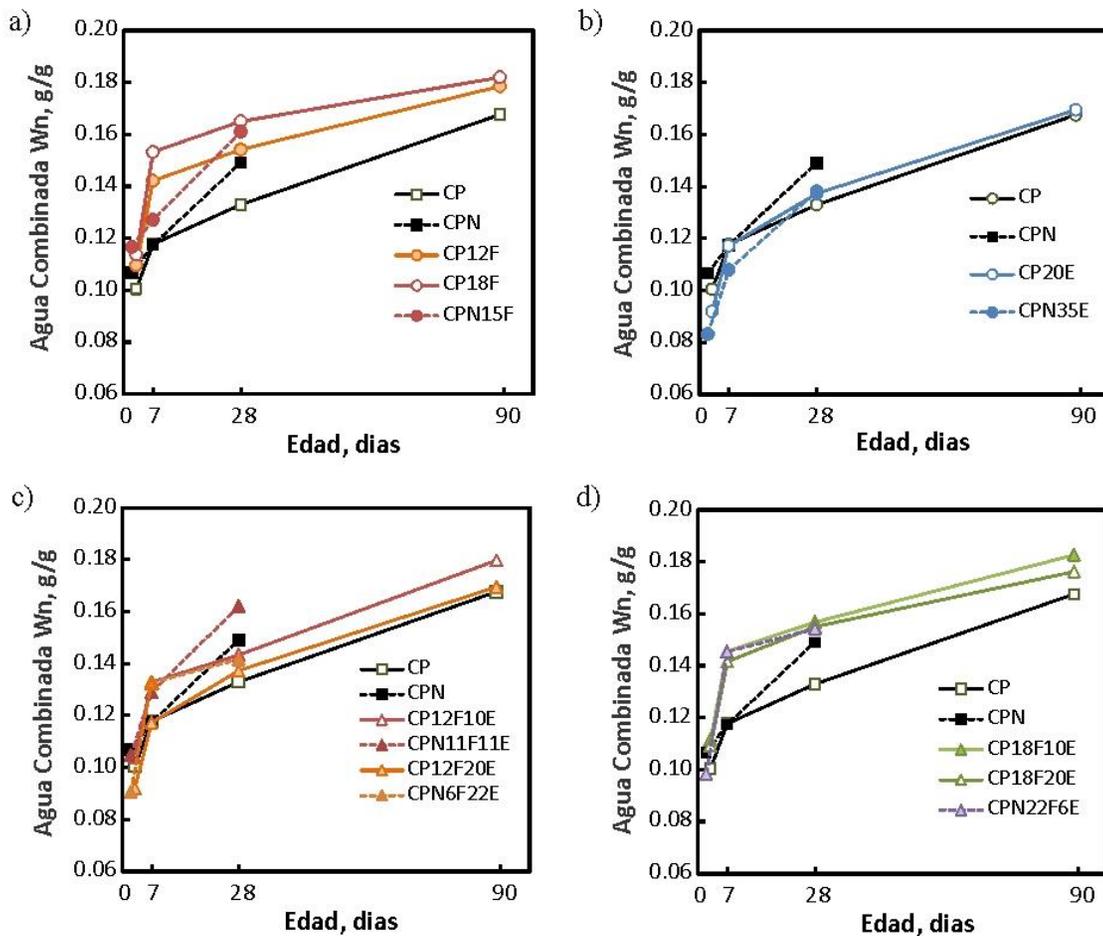


Figura 1: Evolução de água não evaporável (W_n) na matriz de concreto em função do tempo. a) cimentos compostos com duas adições com fíler; b) Cimentos compostos com duas adições com escória c) cimentos compostos com três adições com baixa proporção de fíler, d) cimentos compostos com três adições com uma alta proporção de fíler.

Os efeitos físicos aparecem principalmente durante os primeiros dias de hidratação e a contribuição química da escória é significativa após sete dias de hidratação. A diluição é um efeito presente em todas as idades.

O aumento da porcentagem de adição mineral no cimento Portland causa o efeito de diluição que reduz a quantidade de cimento Portland e, conseqüentemente, provoca uma alteração na relação água/cimento efetiva. No caso do sistema fíler calcário/escória, o mesmo pode ser calculado como se mostra na equação (1).

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

Onde A, C, F e E é a quantidade em peso de água, cimento Portland, fíler calcário e escória utilizada na mistura. χ_f e χ_E são o fator de eficiência do fíler calcário e escória utilizado, respectivamente. Este fator é uma medida do desempenho relativo de cada adição em comparação com cimento Portland e que depende do tipo do cimento Portland utilizado, da idade, do tipo e da quantidade de adição utilizada na mistura e da relação a/c inicial (Cyr et al, 2000).

Quando se considera que o fíler calcário é uma adição mineral inativa, o fator de eficiência χ_f tende a 0 e, portanto, produz um aumento na relação a/c efetiva proporcional ao conteúdo de adição do cimento. Para a escória o valor χ_E varia no tempo, o nível de substituição e do cimento utilizado. Nas idades avançadas (> 90 dias), o valor de $\chi_E > 1$ aumenta a resistência e diminui a permeabilidade. Aos 28 dias, o valor de χ_E varia de 0,79 a 1,5 para 50% de substituição, sendo necessário aumentar o CUMC e reduzir a relação a/mc para atingir resistência semelhante ao cimento Portland (Boukhatem et al, 2011). Para simplificar os cálculos, este artigo assume que o χ_f é nulo e que $\chi_E = 1$ para todas as idades.

Para o mesmo grau de hidratação do cimento Portland, o efeito da diluição provocado pelo fíler ($\chi_f = 0$) produz um menor volume de produtos hidratados e, por conseguinte, uma menor quantidade de água combinada em relação ao total de material de cimento incorporado. O volume reduzido de produtos de hidratação nas primeiras idades para porcentagens elevadas de adição leva a uma menor resistência à compressão. Para baixos percentuais de adição (Menendez et al, 2003), a nucleação heterogênea aumenta o grau de reação do material cimentício e pode compensar parcialmente a diluição. O efeito fíler faz com que as partículas finas das adições preencham o espaço vazio entre os grãos de cimento, modificando seu empacotamento granular, implicando uma alteração da porosidade inicial da pasta e, conseqüentemente, a resistência também pode ser ligeiramente aumentada.

Neste estudo utilizou-se uma relação água/materiais cimentícios (a/mc) constante na mistura de concreto, por conseguinte, o espaço a ser ocupado pelos produtos de hidratação foi o mesmo. A diferença é determinada pela quantidade de material que reagiu para cada idade, que determina a relação gel/espaço do sistema. Conseqüentemente, para determinar a influência do teor de adição de qualquer propriedade resistente ou durável, é necessário estudar o volume dos produtos de hidratação que são produzidos, de acordo com o grau de hidratação (α) do material cimentício.

A Tabela 1 mostra os valores da razão a/c efetiva calculada para cada um dos concretos estudados para as hipóteses consideradas. A partir de W_n pode-se estimar o grau de hidratação do cimento Portland dividindo este valor pelo total de água necessária para hidratar todo o cimento Portland. Assim como para a escória, o grau de hidratação foi calculado a partir da diferença entre a água combinada total menos a água combinada da fração de cimento Portland na mistura, dividido pelo total de água necessária para hidratar a totalidade da escória. Em seguida, o volume dos produtos de hidratação é calculado de acordo com o modelo de Chen & Brouwers (2007b) e, finalmente, a relação gel/espaço (X), cujos valores são reportados na Tabela 1.

A resistência à compressão de material de base cimentícia (f'_c) pode ser calculada como a resistência intrínseca (f_0) do material afetada pela relação gel/espaço (X) elevada a n (2).

$$f'_c = f_0 X^n \tag{2}$$

A Figura 2 mostra a relação entre a resistência à compressão e a relação gel/espço obtida usando este modelo simplificado. Os coeficientes da equação (2) obtida pela melhor aproximação dos mínimos quadrados, para cada tipo de cimento são apresentados na Tabela 2. Para todos os grupos, se observa que o valor da resistência intrínseca deste material de base cimentícia (concreto) é cerca de 75MPa e o coeficiente n varia de 2.0 para 2.3, cujos valores estão dentro dos relatados na literatura.

A boa correlação entre os resultados experimentais da resistência à compressão dos concretos elaborados com diversos materiais cimentícios, com proporções variáveis de fíler calcário e escória, em concretos compostos com duas ou três adições, confirmam que os princípios dos modelos de hidratação simplificada de Powers, que pouco depois foram revisados e ampliados por Chen & Brouwers, são aceitáveis para o sistema estudado. Esta observação torna-se importante para a produção de cimentos multicomponentes que permitem a elaboração das substituições, de acordo com o objetivo resistente ou durável buscado.

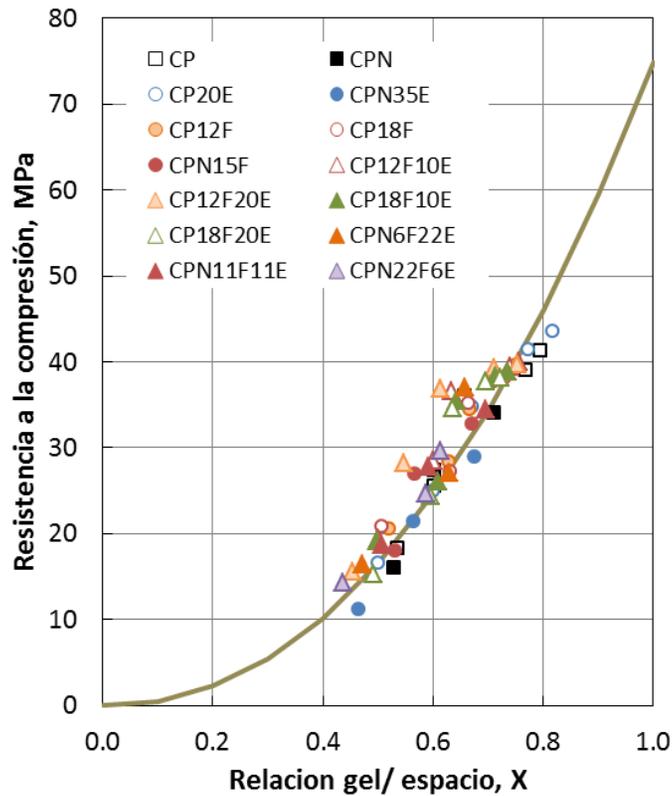


Figura 2. Resistencia à compressão vs. relação gel/espço para todos os concretos estudados

Tabla 2: Coeficientes da equação que relaciona f'_c e a relação gel/espáço.

Concretos incluídos na correlação	f_0	n	R^2
Cimento Portland (CP, CPN)	74.1	2.2	0.84
Cimentos compostos de duas adições com fíler calcário (CP12F, CP18F, CP15F)	76.7	2.1	0.95
Cimentos compostos de duas adições com escoria (CP20E, CPN35 E)	75.8	2.3	0.96
Cimento compostos de três adições	76.3	2.0	0.92
Todos os cimentos	74.9	2.06	0.90

Para assegurar o comportamento durável do concreto frente aos processos de deterioração, o primeiro passo a tomar é reduzir os processos de transporte de água e substâncias agressivas em sua massa. Para os concretos de cimento Portland, assumiu-se que uma redução da relação a/c inferior a 0,53 provoca uma diminuição drástica na permeabilidade quando estes foram devidamente curados e está relacionado com a porosidade capilar (Soroka, 1979).

A porosidade capilar (ϕ) segundo o modelo de Powers para o cimento Portland depende da razão a/c e do grau de hidratação (α) do mesmo (3).

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

Em termos de conectividade de poros, a redução da permeabilidade ocorre quando o volume de poros capilares na mistura é inferior a 18% (Winslow et al, 1994). No caso do cimento Portland, com uma relação a/mc de 0,50 é necessário um grau de hidratação de 0,70 para atingir a porosidade capilar de 18% e, assim, segmentar os poros impedindo o transporte de água. Nos concretos de cimentos com duas ou três adições, o cálculo da porosidade capilar também surge a partir da análise do conteúdo de materiais cimentícios hidratado em função do espaço disponível a ser preenchido. Por conseguinte, a porosidade capilar aumenta com o incremento da a/c efetiva e diminui quando aumenta o grau de hidratação do material. Com base neste modelo, é possível estimar os volumes das diferentes fases que estão presentes na pasta cimentícia em qualquer fase da hidratação.

A Figura 3 mostra que, para os concretos CP e CP20E, quando se atinge 18,5% de porosidade capilar ocorre a segmentação dos poros e a taxa de absorção capilar muda pouco depois de 28dias, uma vez que o grau de hidratação é atingido, produzindo a segmentação dos poros. Entre 90 e 360dias, a taxa de absorção capilar não é significativamente alterada. Para todos os cimentos composto com duas ou três adições contendo 12 e 18% de fíler calcário, embora o grau de hidratação seja maior, a taxa de absorção apresenta um valor maior até os 28 dias, em função do aumento da relação a/c efetiva. No entanto, o limite de porosidade capilar, que não produz alterações significativas na taxa de absorção capilar, é mais elevado (22 a 24%). Esta situação é atribuível ao fato de que os modelos usados não levam em conta o efeito de bloqueio dos poros que as partículas de fíler calcário incorporado podem produzir.

Assim, pode-se concluir que a obtenção de um concreto com baixa taxa de transporte de água por capilaridade só pode ser alcançada quando a segmentação dos poros da matriz cimentícia é produzida, seja pela redução da relação a/mc ou pelo aumento do grau de hidratação do material cimentício.

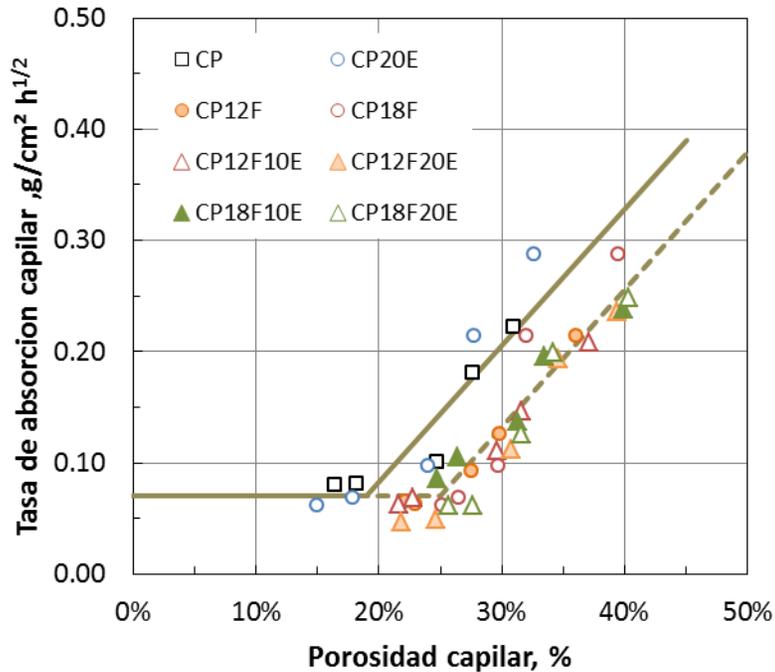


Figura 3. Relação entre a taxa de absorção capilar e a porosidade capilar da matriz

4. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados experimentais e das hipóteses adotadas para aplicar os modelos existentes de hidratação, pode-se expressar as seguintes conclusões:

- A evolução da hidratação da matriz de cimentícia do concreto determina a formação da estrutura porosa e, portanto, da resistência à compressão e da taxa de absorção capilar, independentemente da formulação utilizada na mistura de cimento.
- Para cimentos binários, pode-se controlar e modificar a evolução da hidratação do cimento com fíler calcário ou com escória, alterando a finura e as respectivas proporções na mistura. O fíler calcário moído contribui para hidratação precoce e escória para hidratação tardia. Esta complementação permite o desenvolvimento de cimentos ternários.
- O modelo de Powers e as considerações de Chen & Brouwers para a hidratação da escória permite modelar a relação de gel/espaco e porosidade capilar da matriz nos cimentos ternários. A relação entre os resultados do modelo e as propriedades do concreto determinadas experimentalmente concordam razoavelmente.

3. REFERÊNCIAS

- Bentz, D.P.; Irassar, E.F.; Bucher B.; Weiss, W.J. (2009), “*Limestone Fillers Conserve Cement; Part I: 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 em concreto de cimento portland: Influência da dispersão nas propriedades mecânicas e na absorção de água

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

¹ Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR), Brasil. E-mail: ilhamarcondes@ig.com.br

² Departamento de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná (UFPR), Brasil. E-mail: medeiros.ufpr@gmail.com, jmarquesfilho@gmail.com

³ Universidade de São Paulo (USP), Brasil. E-mail: paulo.helene@concretophd.com.br

Información del artículo

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 primer número del año 2016 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del tercer número del año 2015.

© 2015 ALCONPAT Int.

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.mda.cinvestav.mx/alconpat/revista
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 última modificación: 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.

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.

ABSTRACT

Carbon nanotubes (CNTs) are carbon structures that take the shape of cylinders in manometric 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.

RESUMEN

Los nanotubos de carbono (NTC) son estructuras de carbono que se obtienen en forma cilíndrica de escala nanométrica. Este artículo presenta una evaluación de la adición de NTC en 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, tres mezclas de hormigón se prepararon con un NTC libre (referencia) y dos 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 analizó las propiedades de fluidez, resistencia a la compresión, tracción y la absorción del agua. El NTC añadió contenido de 0,30% a respecto de 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.

Autor de contacto: Marcelo Henrique Farias de Medeiros

1. INTRODUÇÃO

Pesquisas realizadas nas áreas de cimento e nanotecnologia têm demonstrado que algumas adições de nano compósitos ao cimento permitem modificações importantes na sua microestrutura, o que por sua vez proporciona a produção de concretos mais resistentes, menos porosos e mais duráveis (Marcondes, 2012). Dentro da categoria de possíveis nano materiais encontram-se os nanotubos de carbono (NTC), foco deste trabalho.

Os nanotubos de carbono (NTCs) são estruturas de carbono que, depois de sintetizadas, obtêm forma de cilindros em escala nanométrica e medem aproximadamente 3nm de diâmetro por 1000nm de comprimento (Couto, 2006).

Pelo ponto de vista estrutural, existem dois tipos de nanotubos de carbono: os de parede simples, constituídos por uma única folha de grafeno enrolada sobre si mesma para formar um tubo cilíndrico, e os de paredes múltiplas, que compreendem um conjunto de nanotubos de carbono coaxiais, com várias folhas de grafeno enroladas em forma de tubo (Zarbin, 2007). Os nanotubos de carbono de paredes simples (NTCPS) são mais difíceis de serem sintetizados, o que eleva seu custo e praticamente impede sua aplicação em grande escala (Herbst et al., 2004).

O presente trabalho utilizou os NTCs de paredes múltiplas, em função de seu menor custo e disponibilidade em relação aos de parede simples. Os mesmos foram adquiridos de uma empresa na Bélgica e adicionados ao concreto, com o objetivo de estudar o efeito dos NTCs na absorção de água, na fluidez do concreto no estado fresco e nas propriedades mecânicas de resistência à compressão e à tração por compressão diametral.

2. ADOÇÃO DE NTC EM MATRIZES DE CIMENTO PORTLAND

A adição de NTCs a compostos cimentícios é um tema que vem sendo estudado em diversas universidades nacionais e internacionais, como ilustra a Tabela 1.

Tabela 1: Algumas das principais universidades atuantes na pesquisa de nano materiais aplicados aos compostos cimentícios

Instituição	Departamento	Pesquisadores
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 Engenharia 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

A justificativa para a ocorrência de pesquisas nesta área é que em alguns estudos [tais como os realizados por: Marcondes (2012), Batiston et al. (2010), Makar et al. (2005), Chaipanich et al. (2010), Melo et al. (2011) e Li et al. (2004)] atestam o bom desempenho das nanopartículas quando adicionadas a pastas e argamassas de cimento Portland. Devido ao seu tamanho minúsculo, tais partículas contribuem para o preenchimento de vazios e, conseqüentemente, para a melhoria de diversas propriedades desses materiais. Porém, ainda existem algumas barreiras a serem superadas. De acordo com Batiston et al. (2010), os dois principais desafios para introdução de nanotubos de carbono em matrizes cimentícias são: homogeneizar a distribuição dos nanotubos de carbono na matriz e estudar a interação dos NTCs com os compostos resultantes da hidratação do cimento. Este último aspecto pode ser interpretado como a necessidade de entender as mudanças proporcionadas pela adição de NTCs em compósitos de cimento Portland, tais como: alterações na microestrutura, na cinética de reações de hidratação, na aderência pasta/agregado, entre outras.

No que diz respeito à distribuição dos NTCs a uma matriz cimentícia, diversos métodos vêm sendo utilizados, destacando-se a sonificação e a funcionalização dos NTCs utilizando mistura de ácido nítrico e sulfúrico (Li et al., 2004; Konsta-Gdoutos et al., 2010).

Para os pesquisadores Koshio et al. (2001), o ultrassom pode ser considerado uma técnica eficaz para a dispersão de nanotubos de carbono em água, óleo ou polímeros. Para esses pesquisadores, as forças de cisalhamento geradas pelo ultrassom superam as forças de ligação entre os nanotubos, sendo capaz de separá-los. Isto foi comprovado pelos pesquisadores Konsta et al. (2010) que conseguiram uma dispersão eficiente por meio da aplicação de energia ultrassônica e com a utilização de um surfactante. Os resultados mostraram que houve dispersão adequada com a aplicação de energia ultrassônica e que os nanotubos de carbono de paredes múltiplas podem reforçar a matriz de cimento, ao aumentar a quantidade de C-S-H e reduzir a porosidade.

Chaipanich et al. (2010) estudaram a adição de nanotubos de carbono em argamassas de cimento Portland (0,5 e 1%, em relação à massa de cimento). Os NTCs foram inicialmente dispersos em água utilizando-se o ultrassom por um tempo de 10 min. No referido trabalho os autores utilizaram cimento com cinzas volantes e a resistência à compressão dos compósitos (pasta e argamassa) foi investigada. A pesquisa demonstrou que o uso de nanotubos de carbono elevou a resistência dos compósitos de cimento Portland com 20% de cinza volante. A mais alta resistência foi obtida com a adição de 1% de NTC, onde a resistência à compressão aos 28 dias foi de 51,8 MPa representando um acréscimo de 10% na resistência à compressão, quando comparado à mistura de referência, sem nanotubo de carbono, que apresentou resistência de 47,2 MPa. Além disso, de acordo com Chaipanich et al.

(2010), a análise com microscópio eletrônico de varredura mostrou também uma boa interação entre os nanotubos de carbono e o cimento com cinzas volantes quando comparado a mistura sem NTCs.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

As pesquisas publicadas até o momento estão concentradas em estudos da influência dos NTCs em pastas e argamassas de cimento Portland e este trabalho foi conduzido no sentido de estudar o efeito da adição de NTCs no concreto de cimento Portland. O intuito foi explorar a exequibilidade do uso do NTC na dosagem de concretos convencionais com resistência à compressão entre 25 e 40 MPa, assim como mensurar alguns efeitos relativos a resistência mecânica e transporte de água pela rede de poros do concreto com e sem a adição de NTC.

3.1 Materiais utilizados.

3.1.1 Cimento.

O cimento utilizado foi o Cimento Portland CPV – ARI. O uso deste cimento minimiza retardamentos de pega, quando do emprego de aditivo e como não possui cinza pozolânica e contém maior quantidade de clínquer em sua composição, elimina-se com isso mais uma variável do estudo, já que materiais pozolânicos podem interagir com os NTCs e interferir nos resultados (Chaipanich et al., 2010).

As características químicas e físicas do cimento utilizado podem ser observadas na Tabela 2. A massa específica média do cimento foi de 3,12 g/cm³, em ensaio de acordo com a NBR NM 23/2001 (NBR NM 23, 2001).

Tabela 2. Caracterização do cimento CP V – ARI

Ensaio Químicos											
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Perda Fogo	CaO Livre	Resíd. Insol.	Equiv. Alcal	
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	
CP V - ARI	4,12	18,34	2,52	59,72	5,35	3,05	3,2	1,49	0,63	0,62	
Ensaio Físicos											
	Exp. Que nte	Início de pega	Fim de pega	Cons. Norm al	Blaine	# 20	# 32	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
	mm	h:min	h:mi n	%	cm ² /g	%	%	MPa	MPa	MPa	MPa
CP V - 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.

A areia empregada como agregado miúdo é uma areia natural proveniente da cidade de Balsa Nova-PR. Sua caracterização, conduzida de acordo com as normas nacionais, está apresentada na Tabela 3.

Tabela 3. Resultados de ensaios de areia.

Ensaio	Resultado	Método de Ensaio
Dimensão Máxima (mm)	4,8	NM 248/2001
Módulo de Finura	2,92	NM 248/2001
Material Pulverulento (%)	2,00	NM 46/2003
Massa Específica SSS (g/cm ³)	2,61	NM 52/2009
Massa Unitária Solta (g/cm ³)	1,487	NM 45/2006
Absorção (%)	0,37	NBR 9777/1987
Impureza Orgânica (ppm)	< 300	NM 49/2001
Torrões de Argila (1%)	0,1	NBR 7218/1987

A areia enquadra-se na classificação de zona utilizável conforme a NBR 7211 (2005) – Agregados para Concreto – Especificação.

Empregou-se para a produção do concreto uma brita oriunda da britagem de granito. O agregado gráúdo escolhido para a pesquisa está em conformidade com a norma da ABNT NBR 7211 (2005).

O agregado gráúdo inicialmente foi lavado para retirada de impurezas e materiais pulverulentos que por ventura estivessem aderidos à sua superfície e, após isto, foi seco em estufa até atingir a constância de massa. Sua caracterização foi conduzida de acordo com a normalização nacional e está representada na Tabela 4.

A granulometria do agregado gráúdo enquadra-se entre os limites normativos das peneiras 4,8 / 12,5 e 9,5 / 25, na denominação comercial antiga, trata-se de uma brita 1.

Tabela 4: Resultados de ensaios do agregado gráúdo

Ensaio	Resultado	Método de Ensaio
Massa Específica SSS (g/cm ³)	2,62	NM 52
Massa Unitária Solta (g/cm ³)	1,348	NM 45

3.1.3 Nanotubos de carbono e Aditivo Super plastificante.

Os NTCs utilizados nesta pesquisa foram adquiridos da empresa Nanocyl S.A., localizada na Bélgica. O valor pago pelo produto em pó foi 120 euros por quilo. Trata-se de NTCs de paredes múltiplas sintetizados pelo método de deposição química a vapor ou também chamado CVD - Chemical Vapor Deposition. Comercialmente o produto é especificado com o nome de NC 7000. A Figura 1 mostra uma imagem deste material com o emprego da microscopia eletrônica de varredura (MEV).

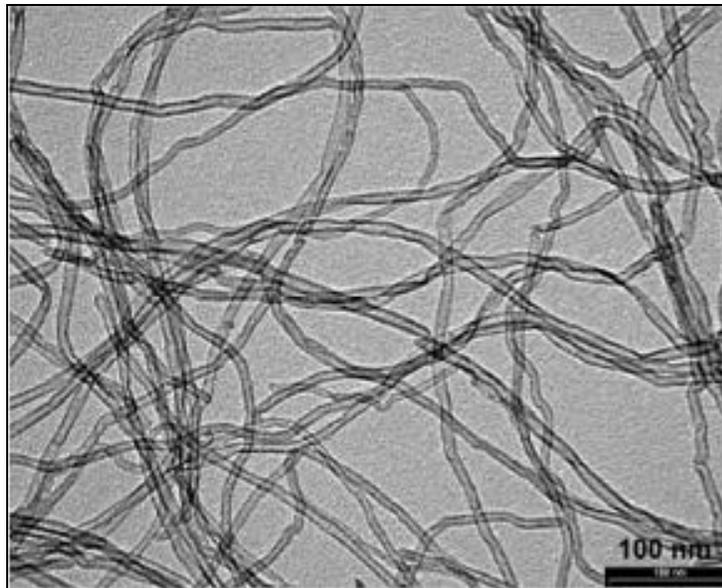


Figura 1. Imagem produzida a partir do MEV dos nano tubos de carbono de paredes múltiplas produzidos pela Nanocyl SA (Nanocyl SA).

Suas características e sua composição constam nas Tabelas 5 e 6.

Para a realização do experimento, foi utilizado um aditivo superplastificante à base de policarboxilato, empregado para regular a consistência desejada.

O aditivo usado na realização do experimento é constituído por polímeros de éteres carboxílicos modificados, numa faixa de concentração da ordem de 49 %. Ele atende aos requisitos da norma ASTM C 494 (2011) (TIPO A e F), ASTM 1017 (1998) e NBR 11768 (2011).

Os policarboxilatos são macromoléculas utilizadas como dispersantes de alta eficiência em composições cimentícias reduzindo a viscosidade das suspensões e minimizando a quantidade de água utilizada para o processamento (Mehta; Monteiro, 2008).

Algumas de suas propriedades podem ser visualizadas na Tabela 7.

Tabela 5. Características físicas dos NTCs.

PROPRIEDADE	UNIDADE	VALOR
Diâmetro médio	Nanômetros	9,5
Comprimento médio	Mícron	1,5
Área superficial	m ² /g	250-300
Densidade Média	g/l	60

Tabela 6. Composição do produto.

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

Tabela 7. Informações do aditivo superplastificante fornecidas pelo fabricante.

Dosagem Recomendada (sob massa do cimento)	pH (ABNT 10908)	Massa específica (ABNT 10908)
0,3% a 2%	5,5 + 1,0	1,10 + 0,02 g/cm ³

3.2 Procedimentos utilizados para confecção dos corpos de prova

Na parte de experimentação com concreto foi fixado um traço de referência, REF (sem a adição de NTCs), para permitir a comparação deste com os concretos com a adição de NTCs. Desse modo, foi simplesmente adotado um traço de concreto convencional como referência e então reproduzidas as séries adicionando-se os NTCs. Os traços estabelecidos podem ser observados na Tabela 8. Deve-se notar que o teor de NTC em relação à massa de cimento foi mantido em 0,3% para todas as dosagens. Esta delimitação foi feita baseando-se nos estudos de Melo et al. (2011), que indicam o teor ótimo de 0,30% da massa do cimento.

A nomenclatura empregada na Tabela 8 se refere ao REF, como traço de referência sem os nanotubos de carbono; ao CD, como o traço com a inserção dos nanotubos de carbono e aditivo (com dispersão prévia em água e aditivo em ultrassom); e ao SD, ao traço contendo apenas o NTC adicionado em pó (sem a pré dispersão no aditivo e sem aplicação da energia ultra-sonica – misturado em pó ao cimento usando apenas com hélice misturadora acoplada à uma furadeira).

A relação água/cimento usada neste trabalho foi fixada em 0,55. Durante a realização desta pesquisa, notou-se que a adição de NTCs ao concreto provocou redução da fluidez para o traço SD, o que prejudicou sua trabalhabilidade e impossibilitou o uso de valores menores de relação água/cimento. Contudo, considera-se este o valor limite especificado pela NBR 6118 (2007) para aplicação de concretos em ambientes marinhos.

Tabela 8. Traços e proporcionamentos utilizados para a confecção dos concretos.

TRAÇO	CIMENTO	NTC*	AREIA	BRITA	α	C	a/c	ADITIVO*
	(kg)	(g)	(kg)	(kg)	%	(kg/m ³)		(g)
TRAÇO 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

*em relação à massa do cimento

O consumo de cimento para os traços da Tabela 8 é de 352 kg por m³ de concreto e atende o consumo preconizado pela NBR 12655 (2006), que no caso de concretos inseridos em classe de agressividade III estabelece o limite mínimo de 320 kg de cimento por metro cúbico de concreto.

Para a realização dos ensaios foram feitas 3 misturas na betoneira, uma para cada traço, e para o preparo da solução a ser utilizada para a confecção do traço CD, fez-se a adição dos NTCs à água com o aditivo superplastificante e seguiu-se com a sonificação. O tempo de aplicação das ondas foi de 1 hora. Este tempo foi pré-determinado com base em trabalho realizado por Marcondes (2012) em função de uma análise visual que indicou que após 60 minutos, as amostras não apresentavam alterações quanto à tonalidade e turbidez.

Além disso, a partir de 40 minutos de sonificação as amostras não apresentavam (visualmente) decantação de NTCs transcorrido o tempo de 24h em repouso da solução, como pode ser observado na Figura 2.

O equipamento de ultrassom utilizado foi de baixa frequência, modelo 0-14 C/I do fabricante Thornton Inpec Eletrônica S.A. com frequência nominal 40 kHz e potência 100W. A solução dispersa foi utilizada em aproximadamente 30 minutos após a sonificação.



Figura 2. Análise visual das amostras com tempo de sonificação de 40 minutos transcorridas 24 h de repouso (MARCONDES 2012).

3.3 Ensaios realizados.

3.3.1 Ensaio de resistência à compressão.

A resistência à compressão é uma das principais propriedades mecânicas para avaliar concretos de cimento Portland. A moldagem de corpos de prova foi executada de acordo com a NBR 5738 (2003), utilizando moldes cilíndricos de Ø 10 x 20 cm e adensamento executado manualmente com haste metálica padronizada. Seis corpos de prova para cada traço foram preparados, totalizando 18 corpos de prova.

As faces de aplicação de carga dos corpos de prova (topos inferior e superior) foram retificadas de acordo com o prescrito pela NBR 5738 (2003).

3.3.2 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi realizado de acordo com a NBR 7222 (2011). Este ensaio tem como objetivo avaliar a resistência à tração nos concretos estudados mediante a aplicação de uma carga de compressão diametral ao corpo de prova. Da mesma forma que o ensaio anterior, foram preparados 6 corpos de prova cilíndricos de Ø 10 x 20 cm para cada traço.

Para o cálculo da tração por compressão diametral utilizou-se a Equação 1:

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

Onde: P = carga máxima aplicada, kN; d = diâmetro do corpo de prova, mm; L = altura do corpo de prova, mm.

3.3.3 Ensaio de absorção de água por imersão.

O ensaio de absorção por imersão foi realizado com base na NBR 9778 (2005) e foi executado de acordo com as etapas a seguir:

1 - Secagem dos corpos de prova até atingirem a constância de massa (a temperatura de secagem foi de 60 °C para evitar temperaturas muito altas, que podem gerar microfissuras dos corpos de prova e influenciar os resultados);

2 - Completada a secagem em estufa e determinada a massa seca, procedeu-se à imersão da amostra em água à temperatura de 23 ± 2 °C, durante um total de 72 h. As amostras foram mantidas com 1/3 de seu volume imerso nas primeiras 4 h e 2/3 nas 4 h subsequentes, sendo completamente imerso nas 64 h restantes;

3 - Determinou-se a massa dos corpos de prova, decorridas 24 h, 48 h e 72 h de imersão. As determinações foram efetuadas após enxugar-se a superfície da amostra com um pano.

A absorção de água por imersão foi definida pela Equação 2.

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

Onde: Msat = massa do corpo de prova saturado; Ms = massa do corpo de prova seco em estufa.

3.3.4 Ensaio de absorção de água pelo método da pipeta.

Este ensaio é também conhecido como ensaio do cachimbo ou ensaio da Pipeta RILEM (Test Method II.4: Water absorption tube test, 2006). Foi proposto pelo pesquisador alemão Karsten e aprovado pela RILEM (Reunion Internationale des Laboratoires d'essais et de Recherches sur les Materiaux et les Constructions) (Rilem, 2006) para o controle de infiltração em paredes.

Cada corpo de prova foi cortado em fatias de 5 cm de espessura. Estas fatias foram colocadas em estufa a uma temperatura de 60 °C durante quatro dias. Então, as pipetas foram fixadas na superfície circular dos corpos de prova com cola de silicone conforme ilustrado na Figura 3. Foram usadas quatro fatias de cada traço formulado para as leituras.

Com as pipetas fixadas, estas foram preenchidas com água até o nível zero da graduação (mais alta) e a entrada de água nos substratos foi monitorada a partir da diminuição do nível da água na escala graduada (Figura 3). As leituras foram feitas em intervalo de 15 minutos até completar 2,5 horas de ensaio e, após isto, procedeu-se leituras com 24h, 48h e 72h.

Como forma de considerar a perda de água por evaporação, foi utilizada uma pipeta fixada em uma placa de vidro considerando a variação de nível da água, neste caso, como a água evaporada. Estes valores de evaporação foram posteriormente descontados de todas as séries dos concretos testados.

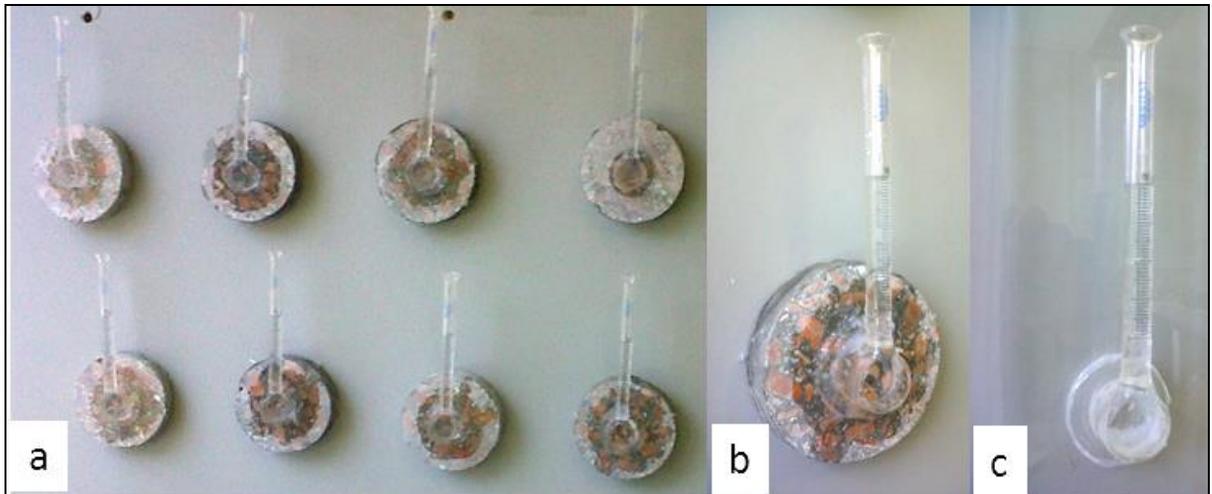


Figura 3. a) Posicionamento das pipetas; b) Detalhe da pipeta; c) Pipeta fixada em vidro.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir estão apresentados os resultados e as análises feitas a partir destes. Para maior confiabilidade nos dados foi realizado um tratamento estatístico dos resultados de resistência à compressão, à tração por compressão diametral por meio da aplicação de análise de variância (ANOVA) para 95% de confiabilidade dos resultados adquiridos.

4.1 Influência na consistência.

Os resultados de consistência das misturas de concreto fresco obtidas pelo ensaio de abatimento de tronco de cone para os traços determinados para este trabalho estão apresentados na Figura 4.

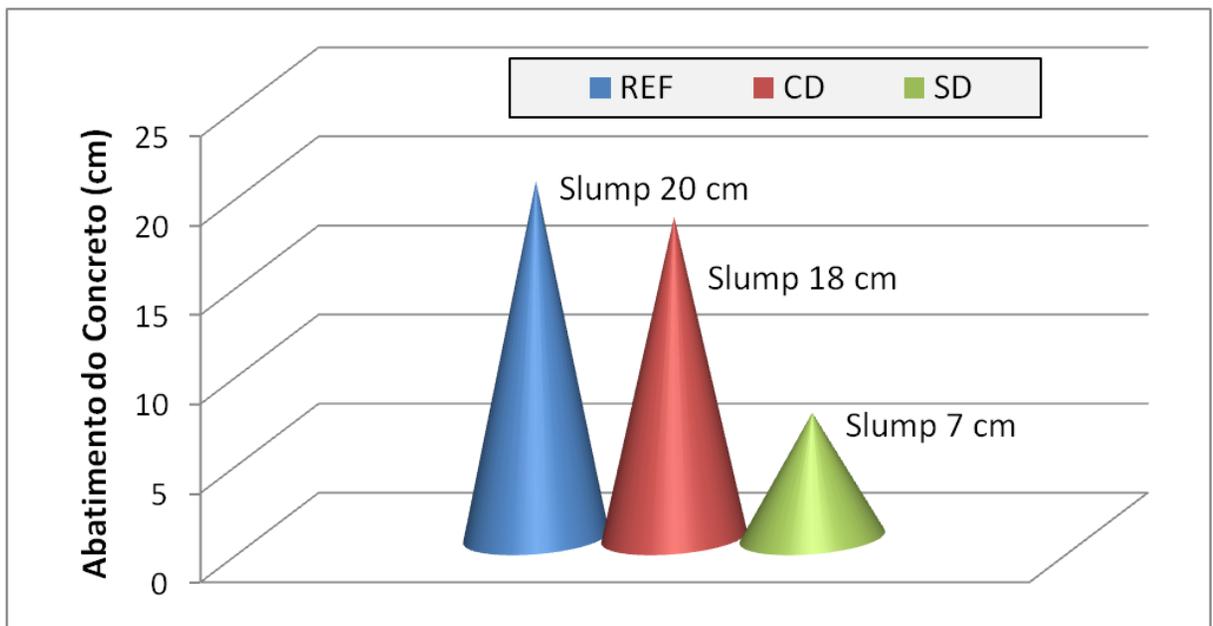


Figura 4. Consistência pelo abatimento de tronco de cone dos concretos (cm).

Os resultados do ensaio de abatimento demonstraram que a forma de dispersão e a presença dos NTCs no concreto possuem forte influência na consistência. Conforme pode ser visualizado na Figura 4, a presença dos NTCs sem dispersão elevou a consistência do concreto (reduziu seu abatimento), enquanto o traço com a presença dos NTCs na forma dispersa por ultrassom apresentou resultado semelhante ao traço de referência. Em comparação com o traço de referência, a mistura em pó sem dispersão fez com que o abatimento fosse alterado de 20 cm para 7 cm.

Estes resultados demonstram a dificuldade em tornar o concreto trabalhável com os NTCs, indicando desta forma que isto só é possível com uso de aditivos químicos que aumentem a plasticidade do concreto, em função da alta quantidade de água requerida para que o concreto fique trabalhável com os NTCs. Contudo, vale salientar que a dispersão prévia por sonificação reduziu de forma considerável o efeito de travamento da massa fluida apresentado pela adição dos NTCs em pó.

Acredita-se que a queda do abatimento com a adição de NTCs em pó se deve a grande superfície específica do material (250-300 m²/g), cerca de 650 vezes maior do que a do CP V-ARI usado nesta pesquisa. Essa elevada superfície consome muita água para a molhagem de toda a área das partículas dos NTCs adicionados. A melhora do abatimento com o emprego da técnica de dispersão por ultrassom (traço CD) está relacionada à melhor distribuição dos NTCs no aditivo em meio aquoso e a incorporação dos polímeros presentes nos aditivos à superfície dos NTCs. Ou seja, a dispersão com ultrassom se mostrou importante para garantir uma molhagem prévia e eficiente da área das partículas de nanotubos de carbono.

4.2 Resistência à compressão.

Os resultados do ensaio de resistência à compressão aos 28 dias de cura úmida podem ser observados na Figura 5.

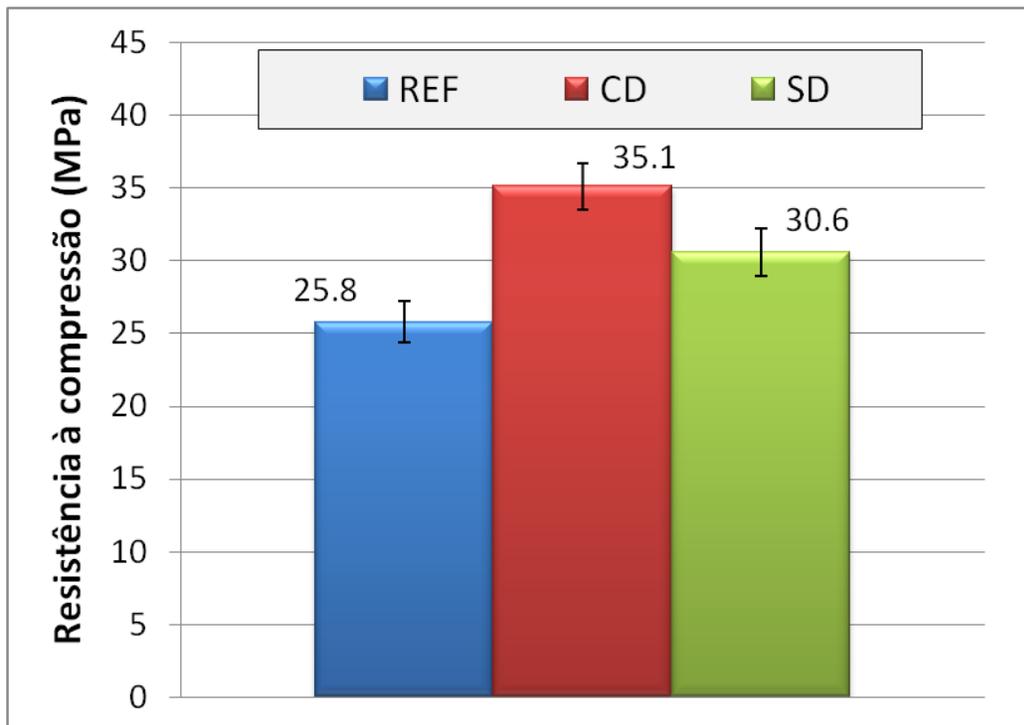


Figura 5. Resistência à compressão (MPa) para a série de referência e as duas formas de adição de NTC.

Os dados demonstraram que nos dois casos onde adicionou-se os NTCs houve melhorias significativas na propriedade de resistência à compressão. Para validação destes resultados aplicou-se a ferramenta de análise de variância (ANOVA) e verificou-se que as médias são significativamente diferentes, com 95% de confiança. Os dados da ANOVA podem ser visualizados na Tabela 9 e a diferença entre as médias é confirmada pelo fato de F ser maior do que $F_{crítico}$.

Tabela 9. Análise de variância (ANOVA) entre os valores de resistência à compressão

Anova: fator único				
RESUMO				
<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
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						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	260,5	2	130,2	54,0	1,4E-07	3,7
Dentro dos grupos	36,2	15	2,4			
Total	296,6	17				

O traço com maior elevação da resistência à compressão foi representado pelo traço CD, onde se obteve um acréscimo de 37% na resistência à compressão quando comparado ao traço de referência. O traço sem dispersão (traço SD) apresentou 19% de elevação de resistência à compressão em relação a série de referência.

Os resultados evidenciam que a dispersão com o ultrassom é extremamente importante para potencializar os benefícios ocasionados pela adição de NTCs no concreto de cimento Portland.

4.3 Resistência à tração por compressão diametral.

A Figura 6 mostra os resultados de resistência à tração por compressão diametral das séries de concretos pesquisadas neste trabalho.

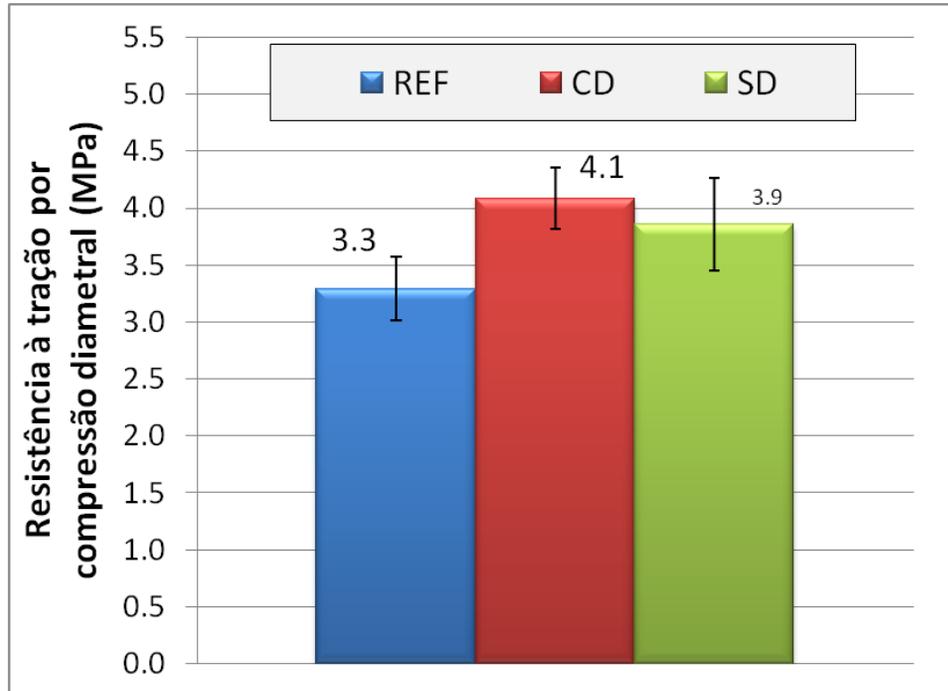


Figura 6. Resistência à tração por compressão diametral para a série de referência e as duas formas de adição de NTC.

Estes resultados indicam que também houve elevação de resistência mecânica com relação a adição dos NTCs ao concreto com elevação da resistência à tração entre 18 e 24 % em relação a série de referência. Embora o traço SD tenha resultado em elevação da resistência à tração próxima da proporcionada pela série com dispersão, a série SD apresenta o maior desvio padrão entre as amostras estudadas. Isso é um indicativo de que a adição dos NTCs em pó na betoneira resulta em menor uniformidade de distribuição dos NTCs na massa do concreto gerando uma variabilidade maior nos ensaios de resistência à tração do concreto.

Para maior confiabilidade na comparação entre as séries de concretos do estudo, utilizou-se a ferramenta ANOVA, que indicou com 95% de confiabilidade que existem diferenças significativas entre os resultados. Este fato pode ser melhor visualizado na Tabela 10, com F maior que $F_{crítico}$.

Tabela 10: Análise de variância (ANOVA) entre os resultados de tração por compressão diametral para 95% de significância

Anova: fator único				
RESUMO				
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
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 da variação	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 Absorção de água por imersão.

A Figura 7 mostra que nas amostras com os NTCs, houve melhorias com relação às propriedades de absorção por imersão. Isto pode estar relacionado a uma melhor distribuição dos poros, traduzindo em redução da macroporosidade. No entanto, para esta comprovação faz-se necessário outros ensaios que não foram abordados nesta pesquisa, como o ensaio de porosimetria de mercúrio que é capaz de quantificar melhor o tamanho dos poros.

É fácil notar a tendência de redução da absorção provocada pela adição de NTC nos concretos estudados nesta pesquisa. Contudo, o nível de redução não é tão elevado como esperado, representando uma redução de 4,4% para a série SD e de 3,9% para a série CD.

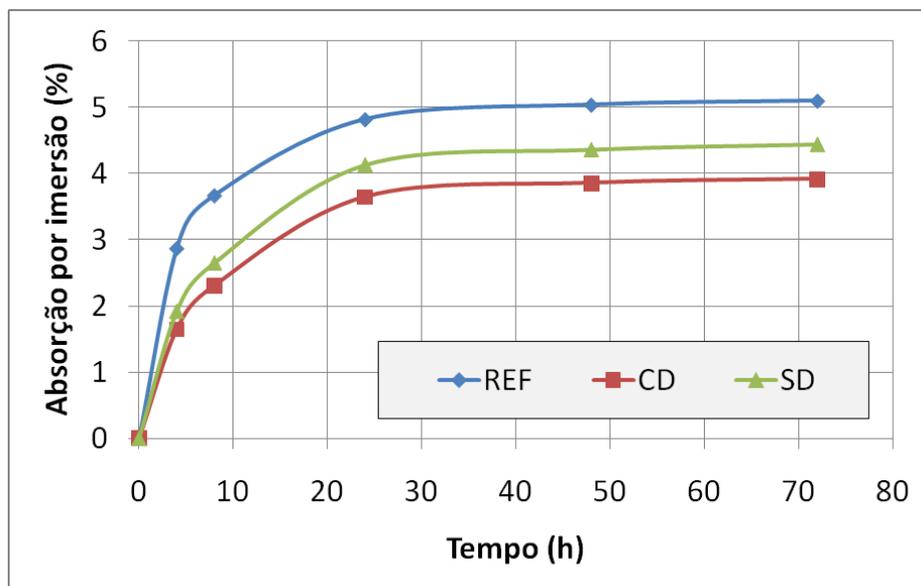


Figura 7. Absorção por imersão (%) X tempo (h) para a série de referência e as duas formas de adição de NTC.

4.5 Absorção de água pelo método da pipeta.

A absorção pelo método da pipeta foi realizada como tentativa de agregar mais conhecimento acerca da absorção de água dos concretos produzidos com adição de NTCs. Seus resultados podem ser observados na Figura 8. Nota-se que o traço de referência REF e o traço SD apresentaram os piores resultados demonstrando mais uma vez a importância do emprego de dispersão, com ultrassom, dos NTCs no aditivo e água antes do amassamento do concreto.

O ensaio foi conduzido na face cortada, portanto atenta-se para o fato de que a presença do agregado graúdo no concreto pode influenciar na absorção de água por este método. Porém, o ensaio também evidenciou a importância da dispersão na variação dos resultados de penetração de água e demonstrou tendência de redução da absorção com o uso de NTCs dispersos previamente com a técnica de ultrassom.

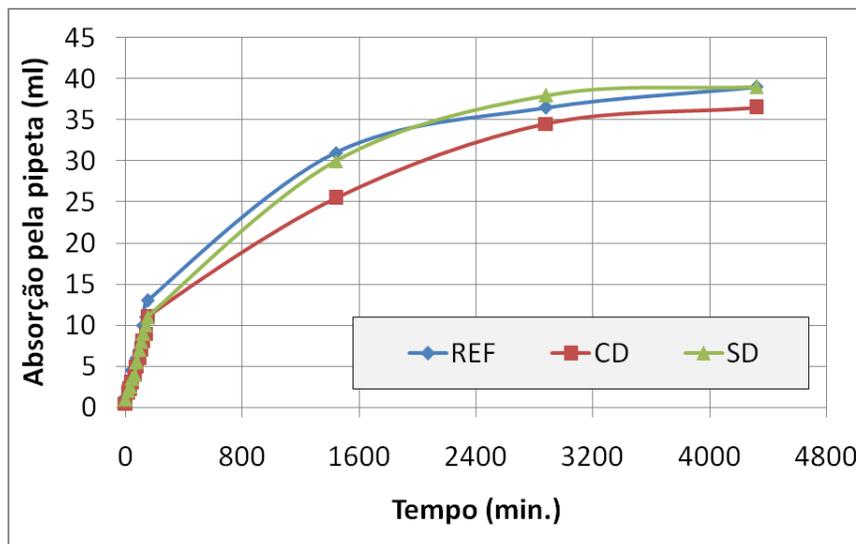


Figura 8. Absorção pelo método da pipeta para a série de referência e as duas formas de adição de NTC.

4.6 Discussão dos resultados.

O estudo de Chaipanich et al. (2010) comprovou que a adição de nanotubos de carbono aumentou a resistência de cimentos compostos com cinzas volantes. Em sua pesquisa, foram analisados os teores de 0,5% e 1% de NTCs em relação à massa de cimento, sendo que o segundo com 20% de cinza volante apresentou 10% de aumento na resistência à compressão. Comparando os dados do estudo aqui apresentado com os dados de Chaipanich et al. (2010), verifica-se que no primeiro caso foi obtido maior nível de elevação da resistência à compressão (19 a 37% de elevação) e isso provavelmente se deve ao uso de maiores teores de NTC na pesquisa de Chaipanich et al. (2010). Devido a sua elevada superfície específica, o NTC tende a tornar o compósito cimentício menos fluido, chegando ao ponto de dificultar a moldagem e adensamento do corpo de prova e este pode ter sido um ponto causador de diferenças entre os resultados das duas pesquisas. Porém, não é possível comparar o efeito dos NTCs na fluidez em ambas as pesquisas porque o estudo de Chaipanich et al. (2010) foi realizado em pasta e não foram relatados dados de medidas de fluidez.

Do mesmo modo que ocorreu na presente pesquisa, Melo (2009) mostrou em seu trabalho um aumento da resistência à compressão e à tração em matrizes de cimento Portland com adição de NTCs. Melo (2009) e Nochaiya; Chaipanich (2011) provaram em seus respectivos estudos uma redução do tamanho médio dos poros provocada pela incorporação de NTC em pastas de cimento Portland, o que pode aumentar a durabilidade de estruturas de concreto, já que diâmetros menores

tendem a dificultar a circulação de agentes agressivos dentro do concreto. No trabalho de Melo (2009), o teor de 0,3% de nanotubos apresentou a maior capacidade de elevação da resistência. De acordo com Makar et al. (2005), o aumento na durabilidade de concretos e argamassas com adição de NTCs se deve as pontes de aderência que se formam na microestrutura da massa (Figura 9). Elas controlam as fissuras geradas na matriz cimentícia e, conseqüentemente, promovem maiores resistências e diminuição na porosidade. Li et al. (2004) também citam uma ponte de ligação entre o cimento hidratado e os nanomateriais em uma das justificativas do aumento da resistência em argamassas que tiveram a incorporação de nanotubos de carbono. As outras explicações citadas nos trabalhos de Li et al. (2004) e Nochaiya; Chaipanich (2011) implicam no fato de que as nanopartículas preenchem os vazios da pasta de cimento aumentando a resistência mecânica do compósito cimentício.

Apesar de serem usados em diversas áreas, os nanotubos de carbono ainda apresentam alto custo, o que pode ser um empecilho para a utilização desse material em compósitos cimentícios. Mas acredita-se que com o aumento da demanda e com a possibilidade de sintetizar os NTCs na fabricação do clínquer, o que está sendo estudado na UFMG como relatado por Ludving et al. (2011) e Melo et al. (2011), o material irá se tornar mais acessível. Desse modo, embora o custo do material seja um aspecto negativo na atualidade, a tendência é que este inconveniente seja superado ao longo do tempo.

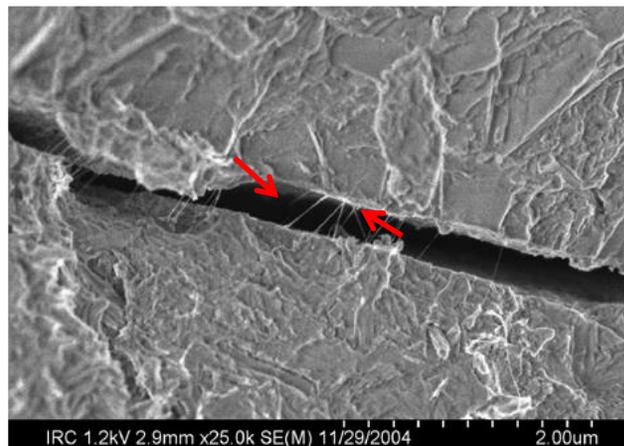


Figura 9. Micro fissura na pasta de cimento com adição de NTCs agindo como pontes de aderência (Makar et al., 2005).

4. CONCLUSÕES

O presente trabalho teve a finalidade de contribuir com estudos referentes ao efeito da adição de nanotubos de carbono nos concretos de cimento Portland. Já que este é um campo de estudo em desenvolvimento e promissor, e com alguns poucos resultados iniciais disponibilizados na literatura. Estes dados são aplicados em estudos sobre pastas e argamassas de cimento Portland e este trabalho apresenta como diferencial a aplicação dos NTCs em concreto de cimento Portland.

O trabalho foi elaborado com base na dissertação de mestrado de Marcondes (2012), desenvolvida no Programa de Pós-graduação em Engenharia de Construção Civil da Universidade Federal do Paraná e atenta para a importância da realização de dispersão dos NTCs em água e aditivo com uso do ultrassom antes de sua incorporação a massa de concreto. Neste sentido, as principais conclusões deste trabalho podem ser observadas a seguir:

- Com 95% de significância, evidenciou-se que as propriedades mecânicas de resistência à compressão e à tração por compressão diametral, são afetadas pela eficiência da dispersão dos nanotubos de carbono no concreto de cimento Portland.

- Foi constatada a elevação da resistência à compressão e à tração por compressão diametral que os NTCs proporcionam. Nesta pesquisa este aumento representou 19% para o traço SD e 37% para o traço CD de elevação da resistência à compressão, e 17% para o traço SD e 19% para o traço CD de aumento da resistência à tração por compressão diametral;
- A adição de NTCs ao concreto reduziu a fluidez deste material. No caso da adição dos NTCs com dispersão prévia em ultrassom, esta redução foi muito pequena, permitindo enquadrar o concreto como de mesma faixa de consistência do concreto de referência, que obteve um abatimento de 20 ± 3 cm. Já a adição de NTCs em pó diretamente na betoneira e sem dispersão prévia, provocou uma queda brusca na trabalhabilidade do concreto, reduzindo seu abatimento para 7 cm, o que afeta a aplicabilidade deste material. Neste caso, seria necessária a adição de água ou de mais aditivo para adequação da consistência;
- A adição de NTCs reduziu a absorção de água por imersão e pelo ensaio do cachimbo. Neste caso também foi verificado que a série com a dispersão por ultrassom potencializou as vantagens ocasionadas pela incorporação de NTCs.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio da do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Construção Civil da Universidade Federal do Paraná (PPGECC-UFPR) e da Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUC PR) e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

6. REFERÊNCIAS

- 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 do método de síntesis de materiais cerâmico-cementícios processados por vias 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. Email: ivan.escalante@cinvestav.edu.mx

Información del artículo

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

© 2015 ALCONPAT Int.

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.mda.cinvestav.mx/alconpat/revista
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 última modificación: 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 2h. Se evaluó la resistencia a la flexión después del tratamiento térmico; los valores registrados alcanzaron entre 6.9 MPa 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 termoquímicamente. 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, produtos prensados.

Autor de correspondencia: José Iván Escalante García

1. INTRODUÇÃO

A indústria de produção de peças cerâmicas é uma grande consumidora de água e energia devido às diversas operações de moagem, secagem e cozimento; nestas últimas pode se alcançar temperaturas maiores que 1000°C. Essas operações repercutem de forma importante no custo de fabricação desses produtos, de modo que a redução no número destas operações é importante desde a perspectiva da logística. Adicionalmente, é de interesse reduzir o consumo de combustíveis fósseis, o que afeta diretamente a redução emissões de gases de efeito estufa. Isso pode ser conseguido com o projeto de processos alternativos, que preservem o máximo possível da qualidade específica do produto; isto é, mantendo a qualidade e as propriedades funcionais, como resistência mecânica e resistência ao desgaste.

Uma família de materiais cimentícios são aqueles, considerados também como cerâmicas quimicamente ligadas (CQL), conhecidos como geopolímero. O início de seu desenvolvimento é atribuído a Davidovits, que registrou várias patentes dos anos 80 (Davidovits de 1982 Davidovits, 1991). Os CQL são polímeros inorgânicos também identificados como cimento alcalino ativado; no entanto, de maneira generalizada se dá o nome "geopolímeros", com discordância na literatura a respeito da relevância do nome. Neste artigo se refere como CQL. Os CQL podem ser sistemas silicoaluminatos que consistem em compostos com estruturas baseadas em tetraedros de SiO_4 e AlO_4 , ligados compartilhando oxigênio em várias configurações, dependendo da composição química. Os CQL possuem as propriedades de materiais cerâmicos-cimentícios são consolidados por copolimerização que resultam da dissolução de matérias-primas selecionadas em ambientes de pH alto e, geralmente sintetizados a temperaturas relativamente baixas.

1.1 Matérias-primas para a obtenção de CQL

As matérias-primas para CQL silicoaluminatos deve atender algumas características essenciais: (1) composição rica em SiO_2 e Al_2O_3 ; (2) fase amorfa abundante: fundamental para que seja suscetível ao ataque alcalino; (3) tamanho de partícula pequeno para aumentar a sua reatividade.

As argilas são compostos a base de silicoaluminatos, as quais são as matérias-primas mais abundantes na crosta terrestre. As argilas calcinadas são usadas como matéria base para produção de CQL (Barbosa et al, 2000), os desenvolvimentos iniciais são baseados em metacaulim ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7$) (Davidovits, 1982), que provem da calcinação da caulinita ($2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Esta última é uma argila silicoaluminosa de configuração 1:1 (Rowles y O'connor, 2003), conformada por uma capa de átomos de silício em coordenação tetraédrica com oxigênios e uma capa átomos de alumínio em coordenação octaédrica com oxigênios e íons OH^- (chamada também de gibsita). A caulinita tem uma composição química em % em peso de óxidos: SiO_2 46.54%; Al_2O_3 39.50%; H_2O 13.96%, é inerte quimicamente sob condições ambientais normais. No entanto, ao calcinar a caulinita a 650-900°C, são perdidos os grupos OH^- da capa do Al (Shvarzman et al, 2003), e a capa do Si permanece inerte, enquanto que a capa do Al colapsa e muda a coordenação tetraédrica (Kakali et al, 2001); o produto é metacaulim o qual é amorfo a difração de raios-X. Esta conversão aumenta a reatividade química em meios alcalinos a temperatura ambiente. Os minerais de caulinita podem conter impurezas como quartzo e outras argilas, assim como substituição de ferro ou titânio por alumínio. Diversos trabalhos anteriores realizados em Cinvestav Saltillo (Arellano-Aguilar et al., 2014, Burciaga-Diaz et al., 2012, Burciaga, 2014) que mostraram a viabilidade de usar minerais de diferentes purezas.

1.2 Processamento de materiais CQL

Comparado com os cimentos convencionais, os CQL apresentam menores emissões ambientais e melhores propriedades tecnológicas; adicionalmente podem preparar-se partindo de matérias

primas abundantes e processando materiais de consistência tipo resina moldável. Os CQL endurecem mediante reações químicas que ocorrem gradualmente, desenvolvendo propriedades de interesse para muitas aplicações. O processamento dos CQL depende de diversos fatores, cujos efeitos não foram entendidos completamente na literatura, estes são:

- | | |
|--|----------------------------|
| (a) Tipo e quantidade de aditivos químicos | (b) Tratamento térmico |
| (c) Composição da matéria-prima | (d) Grau amorfo do mineral |
| (e) Tamanho da partícula | (f) Quantidade de água |

A composição química da formulação é de crucial importância para a definição das propriedades mecânicas (Burciaga-Díaz et al, 2012); definida com base em relações 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 e Escalante-García, 2004). A literatura relata limites variáveis para diversas matérias-primas; os valores indicados nas patentes originais de Davidovits, não resultam sempre nas melhores propriedades. A composição química pode ser realizada calculando a concentração das matérias-primas e álcalis empregados. Aos agentes ativantes mais comuns são silicatos alcalinos do tipo $\text{M}_2\text{O}:\text{xSiO}_2$ para promover altos níveis de pH (Palomo et al, 1999; Davidovits, 1984), onde M pode ser Na ou K.

Foi proposto que as reações dos materiais CQL de silicoaluminatos ocorrem em 3 etapas: **(1)** Destruição da estrutura atômica. O meio alcalino oferece um estímulo químico, como a variação da força iônica do meio que ocorre ao agregar metais alcalinos que tenham características de eletro-doadores, levando ao rompimento das ligações Me-O, Si-O-Si, Al-O-Al e Al-O-Si. O rompimento das ligações acontece pela alteração da densidade eletrônica ao redor dos átomos de silício e alumínio. Algumas das espécies que se formam são: ácido silícico ($\text{Si}(\text{OH})_4$), ânions Si-O, $\text{Al}(\text{OH})_4^-$, $\text{Al}(\text{OH})_5^{2-}$ e $\text{Al}(\text{OH})_6^{3-}$. **(2)** Os produtos da etapa anterior entram em contato e inicia a poli condensação de novos produtos. Pode-se observar que o endurecimento e redução do pH ocorre possivelmente pela interação dos hidrosilicatos e hidroaluminatos com os álcalis. **(3)** Precipitação dos produtos derivados das partículas formadas na etapa anterior. Foram incrementadas as propriedades mecânicas. A diminuição do pH provoca a condensação do gel de sílica, favorecendo as propriedades mecânicas.

A síntese convencional de materiais CQL implica na mistura dos pós de matéria-prima com as soluções ativantes, com o posterior esvaziamento para submetê-las a cura, alcançando a solidificação. Esta última etapa ocorre entre a temperatura ambiente e até 120°C (Barbosa y McKenzie, 2003; de Vargas et al, 2011; Burciaga-Díaz et al, 2012). A cura em alta temperatura permite rápido ganho de resistência mecânica, alguns autores relatam que em maiores temperaturas se obtêm maiores resistências, por exemplo, 60MPa com cura por 24h a 85°C (Palomo et al, 1999, Rowles y O'connor, 2003). Entretanto, foi observado que após 24h de cura a alta temperatura, o aumento da resistência mecânica foi mínima (Arellano-Aguilar et al, 2014). A informação sobre a cura em temperaturas maiores que 100°C é escassa na literatura.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Existe na literatura um grande número de pesquisas relacionadas à síntese de materiais geopolímeros a partir de resíduos industriais como escórias metalúrgicas, cinzas, lodos, etc., assim como o uso de argilas calcinadas de alta pureza. No entanto, existe um número limitado de pesquisas a respeito da preparação de materiais CQL a base de minerais argilosos de baixa pureza (Burciaga-Díaz et al., 2012; Arellano-Aguilar et al., 2014); para estas existe um grande potencial e oportunidade que deve ser explorado (Davidovits, 2002), como é o caso dessa pesquisa. Por outro lado, a respeito da fabricação de materiais CQL, existem pouquíssimas publicações que combinam as condições de processamento propostos nessa pesquisa (Asbridge et al., 2002, Zivica et al., 2011), ou seja, o uso de quantidades baixas de água e a compressão uniaxial. Assim, para essa

pesquisa foi utilizada a estratégia de fabricação de materiais CQL em forma de plaquetas utilizando matérias-primas similares as usadas pela indústria cerâmica, porém de baixa pureza se comparadas com as comumente usadas, para a síntese de materiais cementícios. Em contraste com a indústria cerâmica tradicional, este artigo propõe o uso de um processo processamento mais simples, com menos passos e com menores requerimentos de água e temperaturas de processamento térmico, com potencial igualar as propriedades mecânicas das lousas produzidas convencionalmente, porém de forma mais sustentável.

2.1 Matérias Primas

Alguns detalhes experimentais são omitidos por proteção de propriedade intelectual e segredo industrial.

Foram empregados três minerais silicoaluminosos etiquetados como MA, MB e MC; a MA foi submetida à calcinação a 700°C foi etiquetado como MAc. A Tabela 1, apresenta a composição química das matérias-primas empregadas, e obtidas mediante fluorescência de raios-X (FRX); pode-se notar que são materiais silicoaluminosos com algumas diferenças entre si, a MA tem conteúdo alto de compostos de Fe.

A mineralogia obtida mediante difração de raios-X (DRX) se apresenta na Figura 4, por razões de otimização de espaços e para melhor comparação de dados, se agruparam os padrões das matérias-primas e das misturas pesquisadas. A diferença entre MA e MAc é o desaparecimento das reflexões da caulinita, ainda se notou que persistem todas as demais fases cristalinas após calcinação a 700°C. Por outra parte, a MB e MC mostraram uma áurea amorfa em uma posição 2theta típica de silicoaluminatos.

Tabela 1. Composição química das matérias-primas usadas e obtidas mediante fluorescência de raios-X.

Mineral	% em 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 Processamento de Materiais

Depois de uma série de ensaios preliminares realizados para determinar alguns parâmetros experimentais, se prepararam 4 misturas de argamassa contendo as matérias-primas antes descritas; a Tabla 2, descreve as misturas preparadas. Os agentes ativantes foram compostos de Na₂O·SiO₂·H₂O com relações em peso SiO₂/Na₂O menores que 2. El Na₂O foi adicionado em quantidades similares às empregadas para a preparação de materiais CQL de acordo a literatura para argilas calcinadas. A quantidade de água usada foi somente necessária para poder processar as amostras de acordo com o seguinte processamento

Tabla 2. Sistemas empregados nesta pesquisa

Mistura	Componente 1	Componente 2	Relação Componente1/Componente2
M1	MAc	MB	Alta 2/1
M2	MAc	MB	Baixa 3/1
M3	MAc	MA	Baixa 3/1
M4	MAc	MC	Baixa 3/1

Os pós foram misturados com a solução ativante usando uma misturadora de alta velocidade. Os pós foram colocados moldes para fabricar amostras com dimensões de 4x16cm com espessura de 0.8-1.0cm. Em sequência, foram submetidos à compressão uniaxial com carga de até 30.4 MPa de pressão. As amostras desmoldadas foram curadas a 200°C por 120 minutos. As amostras processadas termoquimicamente foram esfriadas antes da caracterização posterior.

2.3 Caracterização de Materiais

Foram ensaiadas as amostras a resistência à flexão usando máquina hidráulica, seguindo a norma ISO 10545-4. Cabe ressaltar que devido à dificuldade de processamento das amostras, somente foi avaliada a resistência à flexão; que, para este tipo de material, é mais importante que a resistência à compressão. Adicionalmente, foi medida a densidade das amostras mediante o método de empuxo hidrostático ou de Arquimedes. Dos restos das amostras, foram selecionadas algumas para processá-las por moagem usando um moinho planetário com meio de ágata; as amostras foram moídas até passarem pela malha de 105µm para ser caracterizadas mediante DRX (Phillips PW3040) sob as seguintes condições de operação: CuK α radiação (1.542 Å), limite de 10-70° 2 θ , com um passo de 0,03° 2 θ e um tempo de incidência de 3s por passo.

Adicionalmente, selecionaram fragmentos sólidos e montaram em resina para caracterização mediante microscopia eletrônica de barrido (MEB Philips XL30ESEM acoplado com espectroscopia por dispersão de energia, EDS) com uma voltagem de aceleração de 20 keV. As amostras para MEB/EDS forma montadas em resina e submetidas a polido para obter superfícies planas. Realizaram-se medições pontuais semi-quantitativas de composição química com tempo de medição de 30 segundos para cada microanálise.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 3 apresenta os resultados de resistência à flexão e de densidade de mistura. As diferentes combinações de matérias-primas mostraram notáveis variações entre a resistência à flexão. A maior resistência mecânica observada foi para a mistura M1 (MAc-MB com baixo conteúdo de MB), esta foi próxima aos requisitos a nível industrial; adicionalmente, foi 35% maior que a da mistura M4 (MAc-MC com alto conteúdo de MC). O incremento do conteúdo de MB entre as misturas M1 e M2 resultou na redução de resistência mecânica de 43%. Os valores de densidade não necessariamente corresponderam proporcionalmente com os valores de resistência mecânica, por exemplo, M3 foi mais densa, mas mecanicamente mais frágil que M1 e M4. Isso poderia ser devido às diferenças entre as propriedades mecânicas intrínsecas as dos produtos formados durante a ativação termoquímica.

Cabe ressaltar que os maiores valores de resistência a flexão foram superiores aos registrados para materiais CQL convencionais, regularmente muito menores que 10 MPa a 28 dias, indicando que o método de processamento proposto é eficiente para obter altas propriedades mecânicas em tempos de cura consideravelmente curtos. Considerando que para concretos a resistência à flexão é aproximadamente de 10% da resistência à compressão, as misturas preparadas tinham potencialmente entre 69MPa e 157MPa de resistência à compressão, alcançada em 2h. Os resultados de resistência à flexão obtidos nesta pesquisa poderiam ser consideradas similares a uma consideração prévia (Zivica et al., 2011), que usou prensa uniaxial e baixos conteúdos de água; obtendo resistência à compressão de até 146 MPa, que equivaleria a aproximadamente 15 MPa em flexão. No entanto, o mineral empregado no presente trabalho foi de uma pureza inferior, o que representa, no conjunto com o rápido tratamento de cura proposto, ganhos econômicos.

Tabela 3. Propriedades mecânicas e densidade das misturas preparadas.

Argamassa	Resistência a Flexão (MPa)	Densidade (g/cm ³)
M1	15.7	2.01
M2	8.9	1.76
M3	6.9	2.21
M4	11.6	1.88

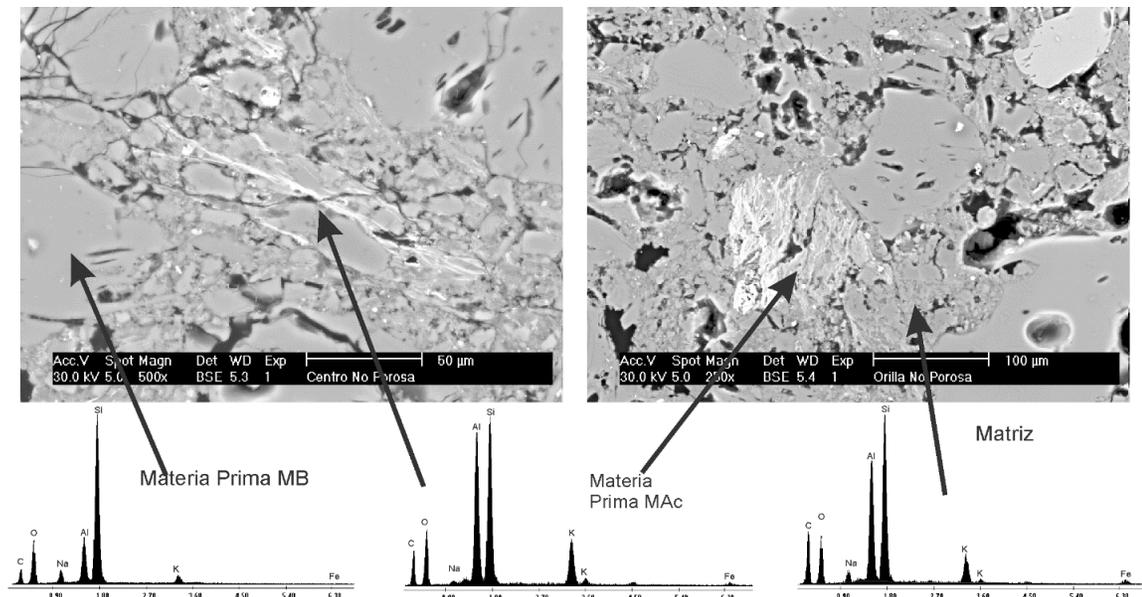


Figura 1. Microestrutura obtida mediante microscopia eletrônica e elétrons retro dispersados da mistura M1.

A Figura 1 mostra a microestrutura da mistura M1, esta imagem é de elétrons retro dispersados. Notou-se uma boa densificação da matriz de produtos de reação, em concordância com boa resistência à flexão. Algumas das partículas de MB mostraram porosidade interna. Algumas partículas de MAc mostraram zonas brilhantes, em ocasiões essas zonas mostraram morfologia alargada; o brilho de essas zonas se atribuem a uma maior emissão de elétrons retro dispersados devido a presença de compostos com maior número atômico médio, talvez porque são partículas sem reagir que não incorporaram água como ocorre nos produtos de reação que são mais escuros. Figura 2 mostra a microestrutura da mistura M3 (a de menor resistência mecânica), observou-se uma densificação similar a da mistura M1, a caída de resistência à flexão pode ser devido ao tipo de produtos de reação formados e as propriedades intrínsecas. Na microestrutura podem-se notar diversas zonas brilhantes, as quais resultaram ricas em Fe e Ti, de acordo com a composição química de la MAc.

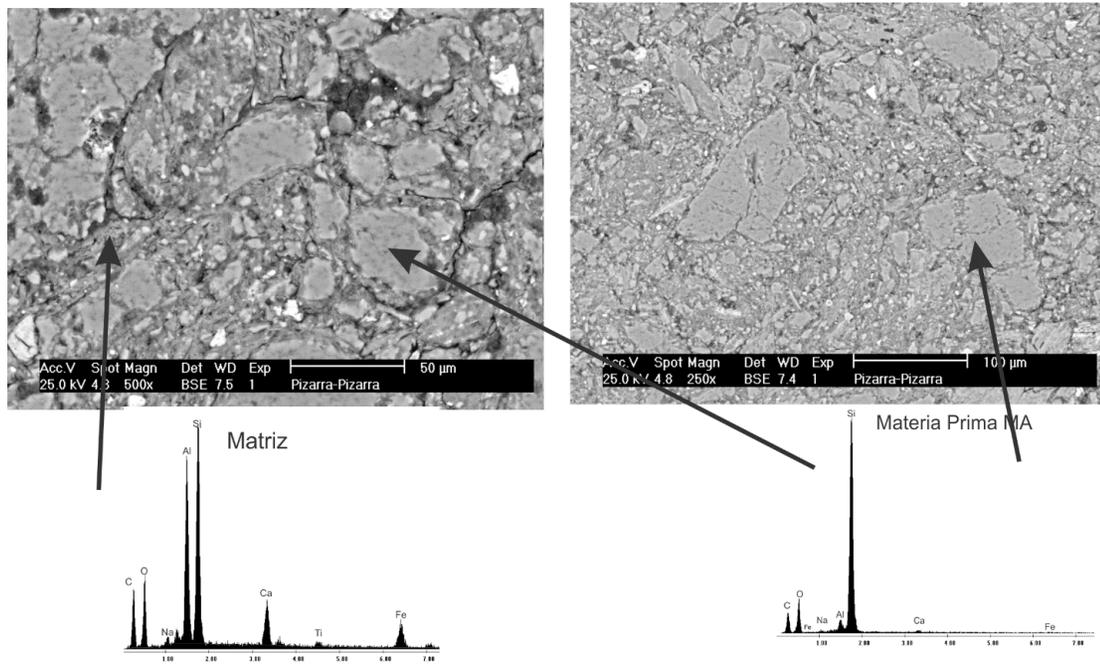


Figura 2. Microestrutura obtida mediante microscopia eletrônica de varredura da mistura M3.

A Figura 3 mostra as micrografias da mistura M4, nas que se observou uma densificação similar a M1 e M3; as zonas brilhantes mostraram a presença de Fe e Ti, de alto número atômico, na matriz correspondente a MA, enquanto que MC mostrou uma composição química consistente de silicoaluminato na maioria das partículas (similar a MB).

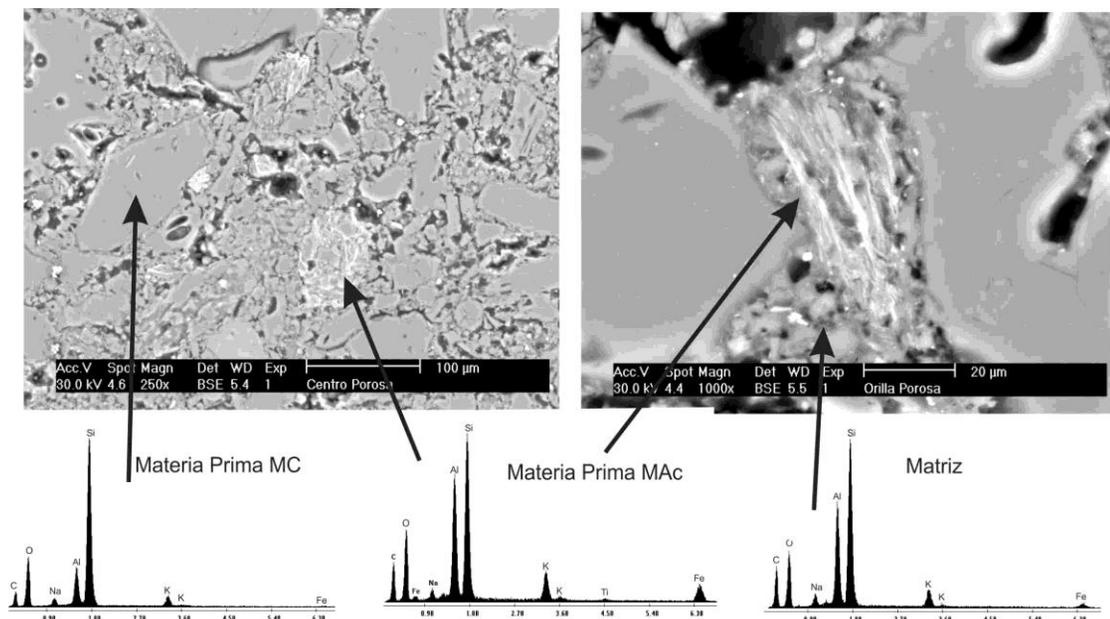


Figura 3. Microestrutura obtida mediante microscopia eletrônica de varredura da mistura M4.

É evidente que o tipo e quantidade do componente 2 (ver Tabla 2. **Sistemas e**) influem diretamente nas propriedades resultantes. Nas micrografias é difícil distinguir os produtos de reação das matérias-primas que não reagiram, já que se parte de silicoaluminatos e se formam

silicoaluminatos, sem incorporação de água que permita os distinguir por tons de cinza como no caso dos estudos de cimento Portland hidratado. No entanto, devido às altas propriedades mecânicas, pode concluir que os produtos cimentícios de reação estão intimamente ligados com as matérias anidras.

A Figura 4. **Padrões de difração de raios-X das matérias-primas empregadas nas misturas** mostra os diagramas de difração de raios-X das misturas pesquisadas. Os padrões das matérias-primas são incluídas para fins de caracterização e comparação. Em termos gerais, foi observado que as frações cristalinas persistiram depois do processo de solidificação, indicando que foram inertes depois do processo de cura a 200°C por 2h. Não se observou a formação de fases tipo zeolitas como aconteceram para alguns materiais CQL. Por outra parte, os produtos de reação com propriedades cimentícias dos materiais CQL se caracterizam por ter natureza amorfa. Para as misturas M1, M2 e M4 se observou a persistência de áureas amorfas, se observou que essas áureas saíram do lugar ligeiramente para a esquerda, indicando a formação de produtos adicionais com estrutura amorfa distinta a das matérias-primas iniciais. Em contraste, para a mistura M3 não foi observado à áurea amorfa, mesmo que as consolidações de propriedades mecânicas indicam que se formaram e é muito possível que a elevada cristalinidade desta a amostra se confunda com os restos de fase amorfa que possam existir no material.

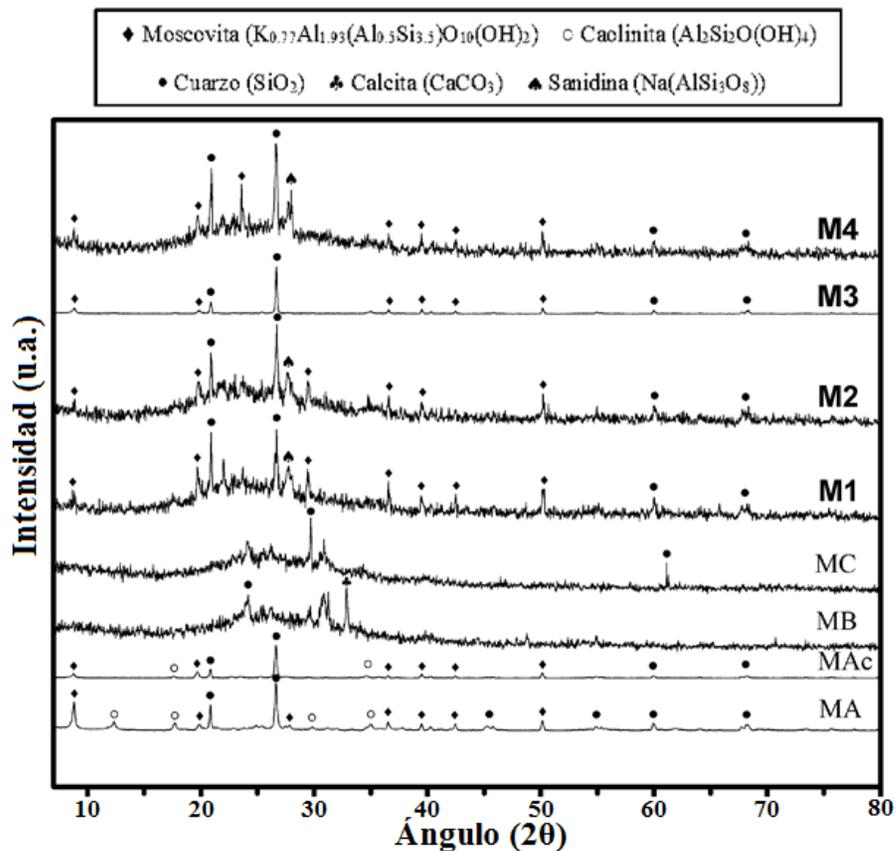


Figura 4. Padrões de difração de raios-X das matérias-primas empregadas nas misturas pesquisadas

4. CONCLUSÕES

- O processamento da prensa uniaxial favorece a densificação das matrizes dos cimentos quimicamente ligados, o que repercute em alta resistência à flexão de 6,9MPa a 15,7MPa
- O processamento térmico acelera os processos de reação, permitindo a formação de produtos com carácter cimentício, intimamente misturados nas matrizes densificadas.
- O processo de ativação química foi reforçado com o tratamento de compressão e tratamento térmico, empregando concentrações de Na₂O similares a das comumente utilizadas para cimentos quimicamente ligados.
- A combinação da ativação química com o tratamento térmico poderia chamar ativação termoquímica e pode ter potencial para a produção de materiais com propriedades similares a dos cerâmicos processados a 1000°C, mas com a vantagem de ganho energético e de água.
- São necessárias mais pesquisas para aprofundar a caracterização da estrutura das amostras para entender os mecanismos de reação.

5. REFERENCIAS

- Arellano-Aguilar R., Burciaga-Díaz O., Gorokhovske A., Escalante-Garcia J.I. (2014), “*Geopolemer 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 polemers of alumina and silica: sodium polesialate polemers*”, 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 polesialate*”, 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 e materiales, Saltillo, Coahuila (MEX), artículo 16.
- Burciaga-Diaz O., Escalante-Garcia J I, Gorokhovske 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 polecondensation de géopolemères*”, FR Brevet 82 10864.
- Davidovits J. (1984), “*Senthetic mineral polemer compound of the silicoaluminates famile and preparation process*”, US Patent 4,472,199.
- Davidovits J. (1991), “*Geopolymers: Inorganic Polemeric New Materials*”, J Thermal Analasis, Vol 37, pp. 1633-1656.

- Davidovits J. (2002), “*30 years of successes and failures in geopolymers applications. Market trends and potential breakthroughs*”, Geopolemer 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, morphologie and microstructure of alkali-activated fle ash-based geopolymers*”. CemConcrComp, V. 33, pp. 635–60.
- Kakali G., Perraki T., Tsvivilis. S. (2001), “*Thermal treatment of kaolin: the effect of mineraloge on the pozzolanic activite*”. Applied Clae Science, V. 20, pp. 73-80.
- Palomo A., Grutzeck M.W., Blanco M.T. (1999), “*Alkali-activated fle 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 geopolymerssenthetised be sodium silicate activation of metakaolinite*”, J of Materials Chemistre, V. 13, pp. 1161-1165.
- Shvarzman A., Kovler K., Grader G.S. (2003), “*The effect of dehydroxelation/amorphization degree on pozzolanic activite of kaolinite*”, Cement and Concrete Research, V. 33, pp. 405- 416.
- Zivica V., Balkovic S., Drabik M. (2011), “*Properties of metakaolin geopolemer hardened paste prepared be high-pressure compaction*”, Con and Bui Mat, V. 25, pp. 2206-2213.



Reforço estrutural de uma edificação histórica na cidade de Rio Branco – Acre

D. C. S. Amorim¹, D. R. C. Oliveira¹

¹ Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Email: deniscley25@yahoo.com.br

Información del artículo

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.

© 2015 ALCONPAT Int.

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.mda.cinvestav.mx/alconpat/revista
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 última modificación: 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.

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.

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.

RESUMEN

Este artículo presenta el empleo del método de refuerzo estructural por revestimiento aplicada en la reforma del edificio histórico llamado "Casarão" en portugués, debido a la necesidad arquitectónica de permanecer tan fiel al diseño original, justificado por el interés de aumento de resistencia sin aumento sustancial de la sección transversal de los columnas. Los resultados obtenidos mediante el análisis del refuerzo con relación a las columnas rectangulares sometidos a flexión compuesta, esfuerzos de cizallamiento y de torsión, de acuerdo con la NBR 6118 (ABNT, 2014), indican que la método estudiada fue eficiente, porque todas las partes reforzadas tuvieron una mayor capacidad portante y cumplieron con los requisitos actuales de seguridad estructural, sin comprometer las características arquitectónicas del edificio.

Palabras clave: Edificio histórico, refuerzo estructural, revestimiento

Autor de correspondencia: Denis Cley Souza Amorim

1. INTRODUÇÃO

O “Casarão” (Figura 01), prédio público construído na década de 1930, apresenta estrutura mista de concreto armado e madeira em bom estado de conservação em sua parte central, mantendo características arquitetônicas ecléticas sírias e libanesas, com influência europeia, representando um estilo regional de grande importância cultural da cidade de Rio Branco, no estado do Acre. A sua revitalização atende a uma demanda da sociedade para o governo estadual, que recebeu um abaixo-assinado com centenas de assinaturas com esse pleito. O prédio histórico foi tombado pelo Conselho Estadual de Patrimônio Histórico e Cultural no dia 13 de agosto de 2009, por iniciativa da sociedade civil, sendo homologado no dia 30 de abril de 2010, através do decreto número 5.235. Sob a proteção e vigilância do poder público estadual, por intermédio do Departamento de Patrimônio Histórico e Cultural da Fundação de Cultura e Comunicação Elias Mansour.



Figura 1. O Casarão.

Neste estudo de caso, os pilares da edificação foram avaliados analiticamente e computacionalmente para verificação de suas resistências, visando atender os requisitos vigentes de segurança estrutural. Assim como em diversas edificações antigas na cidade de Rio Branco, o concreto destes pilares foi dosado com cacos de tijolos como agregado graúdo em substituição aos agregados normalmente usados, como seixo e brita. Não havendo comprovação técnica da resistência deste material para atender à NBR 6118 (ABNT, 2014), foram realizados procedimentos de extração de testemunhos e os resultados apresentaram resistência à compressão do concreto abaixo do especificado no projeto estrutural de reforma do edifício, realizado com o auxílio do programa computacional. A verificação dos resultados obtidos neste reforço torna-se importante porque a técnica do encamisamento com concreto armado é a mais usual e ainda apresenta dificuldades de execução em obras históricas devido à necessidade arquitetônica, consideradas culturalmente indispensáveis ao patrimônio arquitetônico da cidade, devendo permanecer o mais fiel à sua forma original, sem que haja aumento substancial na seção transversal dos pilares, o encamisamento de concreto armado, é viável em virtude das vantagens econômicas, rapidez de execução e coerência com o projeto arquitetônico.

2. METODOLOGIA ADOTADA

2.1 Características da edificação e do projeto.

A edificação a ser revitalizada chama-se Casarão e localiza-se na Avenida Brasil número 310, na cidade de Rio Branco, estado do Acre. Apresentando 405,1 m² de área construída, o Casarão é composto de subsolo, pavimento térreo e pavimento superior, com um estacionamento de 705,0 m² atrás e uma área livre de 154,7 m² à frente. Todas as etapas do processo de revitalização do prédio foram de responsabilidade do Governo do Estado do Acre e seguiram um cronograma executivo previamente estabelecido e detalhado. O plano diretor municipal, através da lei 1611 de 27 de Outubro de 2006, classificou o Casarão como uma edificação localizada na ZPHC (Zona de Preservação Histórica Cultural), com taxa de ocupação de 70% (810,0 m²), coeficiente de aproveitamento 6 (7.800,0 m²) e com taxa de permeabilidade de 10% (130,0 m²). Durante o processo de revitalização foi constatada a necessidade de reforço estrutural apenas no trecho do subsolo dos pilares 21, 30 e 41 para os novos carregamentos, o que não ocorreu com os demais pilares. A Figura 2 (forma pavimento superior) mostra a situação original dos pilares e a proposta de reforço.

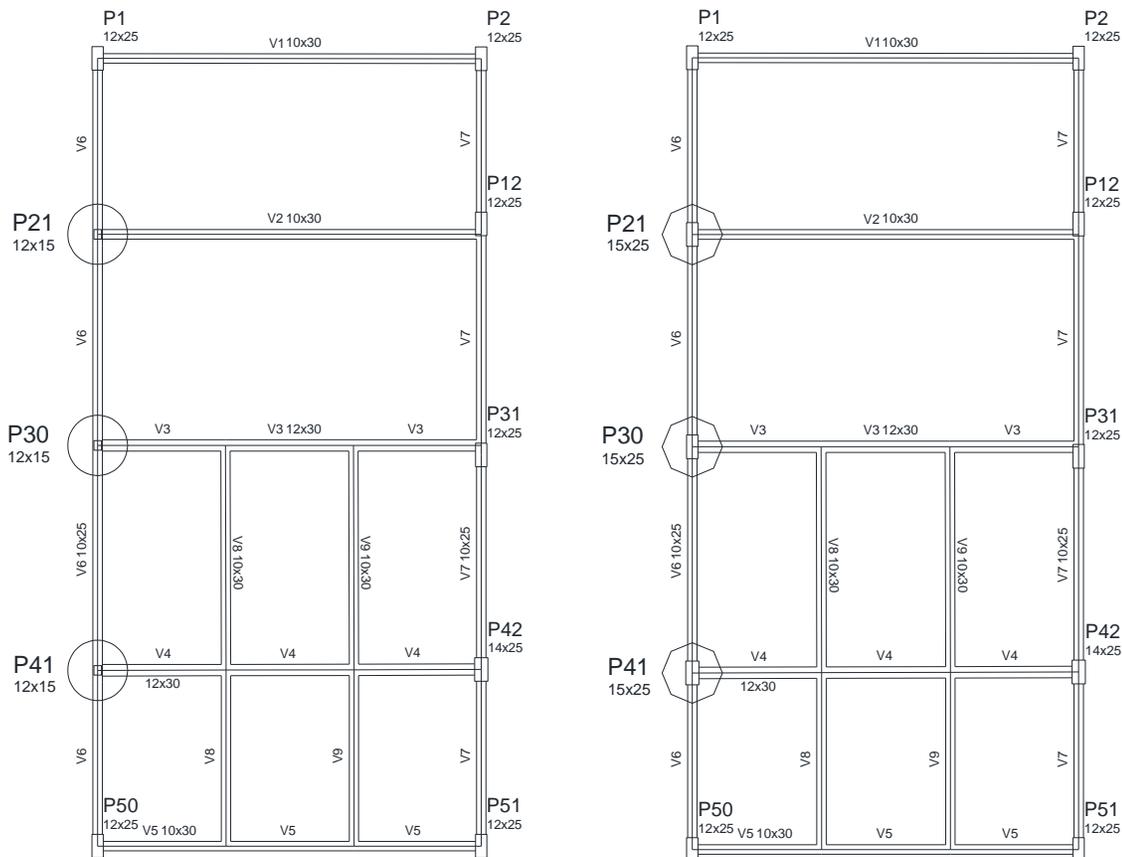


Figura 2. Localização e dimensões dos pilares P21, P30 e P41 antes e após o reforço (direita).

Na reforma da edificação, elementos de época foram mantidos e as áreas construídas que não estavam no projeto arquitetônico original foram removidas. Os serviços realizados compreenderam a revitalização das paredes originais de madeira, reforço estrutural dos pilares, substituição do forro, da estrutura de cobertura, do telhado, das tábuas do piso dos pavimentos térreo e superior, troca das instalações elétrica, de lógica, hidrossanitária e de combate a incêndio,

criação de uma área de estar com bancos e lixeiras, manutenção de três salas no andar superior e confecção de alvenarias nos três pavimentos. A Figura 3 mostra o aspecto das fachadas laterais e frontal do projeto de revitalização.



Figura 3. Aspecto final projetado para o Casarão.

2.2 A constatação do problema.

Para a verificação da segurança da estrutura existente, foram realizadas visitas de fiscalização e acompanhamento ao canteiro de obras durante a execução da obra de revitalização, onde foram identificados os procedimentos, técnicas e equipamentos utilizados nas intervenções, sendo realizado o registro fotográfico em todas as etapas do processo executivo nos anos de 2009 e 2010. Antes de realizar qualquer procedimento na estrutura, a equipe técnica evidenciou a importância de ensaios de compressão axial em testemunhos de concreto para identificação de eventuais problemas relacionados à resistência do concreto, uma vez que o concreto empregado originalmente foi confeccionado com pedaços de tijolos e telhas cerâmicos. Os resultados dos ensaios indicaram, de modo geral, que o concreto empregado na estrutura foi de baixa resistência à compressão e continha agregado graúdo com maior dimensão de até 50 mm, o que contribuiu para a formação de nichos de concretagem em alguns pilares. Cabe ressaltar que a utilização de agregados graúdos derivados da redução de elementos cerâmicos, como tijolos e telhas, ainda é prática comum na cidade de Rio Branco, onde existe escassez de brita e seixo rolado. A Figura 4 mostra o local da retirada do testemunho de um dos pilares e a Tabela 1 apresenta os resultados obtidos para a resistência à compressão dos testemunhos de concreto dos pilares 21, 30 e 41, cujas análises posteriores indicaram a necessidade de reforço estrutural no trecho do subsolo.

Além da baixa resistência à compressão, também foi verificado que as armaduras de alguns pilares apresentavam adiantado estado de corrosão e severa perda de massa, comprometendo a capacidade resistente às cargas de serviço e até mesmo às permanentes, pois algumas barras foram totalmente seccionadas pela corrosão. A Figura 5 mostra o aspecto das barras corroídas nas armaduras dos pilares. Concluiu-se que os danos eram característicos de processos de deterioração com natureza sistêmica, ou seja, relacionados à qualidade do concreto utilizado na execução do sistema estrutural e, principalmente, à espessura de cobertura das armaduras que apresentou valores entre 10 mm e 15 mm, considerados reduzidos para propiciar a necessária vida útil à estrutura moldada com concreto contendo agregados tão porosos.



Figura 4. Local da extração de testemunho em um pilar.

Tabela 1. Resistência à compressão do concreto.

Pilar	Testemunhos (MPa)	Projeto de reforço (MPa)
P21	13,7	25,0
P30	20,1	
P41	14,7	
Média	16,2	



Figura 5. Armadura longitudinal corroída nos pilares.

2.3 Reforço estrutural.

A metodologia empregada para definição da técnica de reforço estrutural a ser empregada considerou o conjunto de informações sobre o estado de conservação de toda a estrutura, visando conduzir o engenheiro projetista do reforço a elaborar um diagnóstico mais preciso sobre as causas e consequências das patologias encontradas, pois, de acordo com Julio *et al.* (2003), o sucesso das atividades de recuperação ou intervenção na estrutura depende de uma definição clara e precisa acerca dos problemas encontrados, contemplando o diagnóstico e prognóstico evolutivo das causas atuantes. Este estudo preliminar foi fundamental para a determinação do nível de intervenção a ser realizado na estrutura, que pode variar de simples reparos localizados até a

necessidade de demolição e reconstrução. Para o reforço estrutural foi escolhida a técnica de encamisamento com concreto armado, pois o concreto pode ser lançado em moldes ou projetado, tornando-se o material mais versátil para o reforço ou recuperação de estruturas de concreto armado, sendo utilizado em todos os tipos de elementos estruturais e nas mais diversas situações e condições (Mehta & Monteiro, 2014). O reforço estrutural foi então indicado para os pilares 21, 30, 41, no trecho do subsolo, sendo as etapas principais constituídas por apicoamento da superfície dos pilares, posicionamento da armadura adicional, instalação dos moldes de madeira e lançamento do concreto com resistência à compressão (f_{ck}) de 25 MPa.

2.3.1 Concreto. O concreto utilizado no reforço estrutural teve seu acompanhamento e fiscalização seguindo as recomendações da norma brasileira para projeto de estruturas de concreto, NBR 6118 (ABNT, 2014), e o dimensionamento do traço para atingir a resistência à compressão do concreto (f_{ck}) de 25 MPa forneceu a proporção em volume de 1:2:3 e fator água cimento de 0,5, utilizando agregados graúdos de diâmetro máximo igual a 9,5 mm. A verificação da resistência à compressão do concreto foi realizada por laboratório especializado que realizou a moldagem “*in loco*” de corpos-de-prova cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. Foram moldados 3 corpos-de-prova para cada betonada realizada pelos funcionários da empresa executora do reforço estrutural, que receberam treinamentos de qualidade e controle para que o traço dimensionado atingisse a resistência à compressão especificada pelo projetista do reforço estrutural.

2.3.2 Armaduras. As armaduras longitudinais e transversais (estribos) antes e após o reforço estrutural dos pilares foram compostas por barras de aço com os diâmetros, quantidades e espaçamentos apresentados na Tabela 2. O cobrimento de concreto para os pilares foi de 25 mm e 15 mm na menor e maior direção, respectivamente. A Figura 6 mostra detalhes das seções transversais dos pilares antes e após o reforço estrutural por encamisamento com concreto armado, e a Figura 7 mostra detalhes das armaduras transversais e longitudinais. Os pilares P21, P30 e P41 foram reforçados apenas no subsolo por ser o trecho onde esses pilares apresentaram coeficientes de segurança abaixo dos recomendados pela norma brasileira para projeto de estruturas de concreto armado para os novos carregamentos. A Figura 8 mostra o posicionamento das armaduras, onde é possível observar que, apesar dos esforços para preservar ao máximo a arquitetura original, as menores dimensões finais dos pilares, acrescidas da camada de argamassa de revestimento com 20 mm de espessura, seriam maiores que a espessura da parede.

Tabela 2. Dimensões da seção transversal e armaduras dos pilares.

Pilar	Dimensões do pilar		Aço		
	Seção transversal (mm)		Armaduras (mm)		Tensão de escoamento de projeto (MPa)
	Antes do reforço	Após o reforço	Antes do reforço: Longitudinal / Estribos	Após o reforço: Longitudinal / Estribos	
P21	120 x 150	150 x 250	4Ø10,0 / Ø5,0c150	4Ø12,5 / Ø5,0c150	435
P30					
P41					

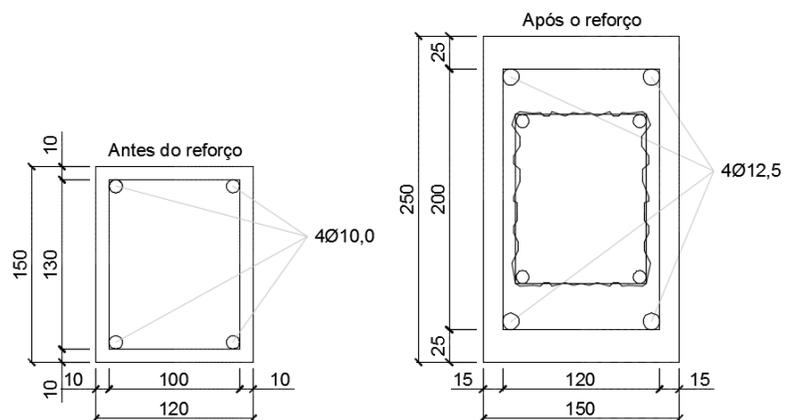


Figura 6. Seção transversal dos pilares antes e após o reforço.

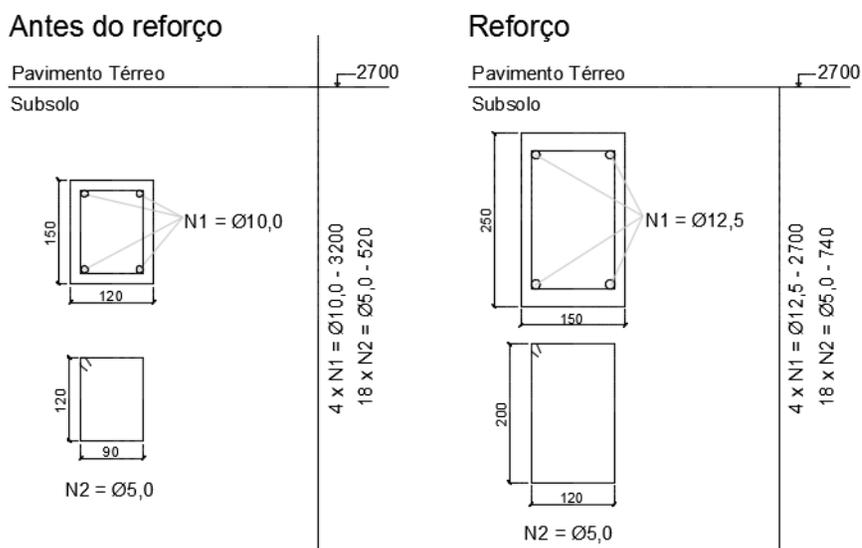


Figura 7. Armaduras dos pilares a reforçar e do reforço.



Figura 8. Armaduras longitudinais e estribos do reforço dos pilares.

2.3.3 Concretagem. Para que houvesse maior aderência entre o concreto velho e o concreto novo as superfícies dos pilares foram umedecidas para posterior lançamento do concreto. O concreto foi lançado cuidadosamente (Figura 9) e o adensamento foi realizado com vibrador de imersão com diâmetro da agulha de 20 mm, primeiramente em 50% do volume de concreto lançado em cada pilar e, posteriormente, no volume restante. Após a retirada dos moldes de madeira os pilares receberam uma camada de revestimento de argamassa para possibilitar o acabamento final, ou seja, pintura. A Figura 10 mostra o aspecto final dos pilares com as menores dimensões ultrapassando em 35 mm a espessura da parede.



Figura 9. Concretagem do reforço dos pilares.



Figura 10. Aspecto final dos pilares reforçados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Verificação da segurança dos pilares originais.

A metodologia de cálculo para verificação da segurança dos pilares sem e com reforço estrutural seguiram as recomendações normativas da NBR 6118 (ABNT, 2014). Primeiramente foi realizada uma análise simplificada onde foram determinados e comparados apenas os esforços normais solicitantes e resistentes dos pilares P21, P30 e P41 antes do reforço, com a sua força normal solicitante majorada de γ_u (Equação 1) e de um coeficiente de majoração adicional (Equação 2). Já o esforço normal resistente de cálculo foi determinado com Equação 3, sendo que a Equação 4 foi utilizada para determinar a resistência à compressão de cálculo do concreto (f_{cd}) e a Equação 5 viabiliza a determinação do coeficiente de segurança de cada pilar.

a) Parâmetros da seção transversal. A seção transversal de pilares e pilares-parede maciços, qualquer que seja a sua forma, não deve apresentar dimensão menor que 190 mm. Como a menor dimensão do pilar é inferior a 190 mm, no dimensionamento as ações devem ser multiplicadas por um coeficiente adicional γ_n , indicado na Tabela 3, onde b é a menor dimensão da seção transversal do pilar. Para os pilares analisados, $\gamma_n = 1,35$ ($b=120$ mm).

Tabela 3. Valores do 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) Força normal solicitante

$$N_{Sd,Eq} = \gamma_u \cdot \gamma_n \cdot N_{Sk} \quad (1)$$

$$\gamma_u = 1 + (6/b) \quad (2)$$

c) Força normal resistente da seção transversal

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

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{1,4} \quad (4)$$

d) Verificação da segurança

$$\gamma_f = \frac{N_{Rd}}{N_{sd}} \quad (5)$$

O esforço normal solicitante (N_{Sk}) foi obtido através do programa Altoqi Eberick 2002 e os resultados encontrados com a análise preliminar para os coeficientes de segurança dos pilares P21, P30 e P41 antes do reforço não atendem aos requisitos de segurança normativos, como apresentado na Tabela 4. Já a Figura 11 mostra as envoltórias dos esforços resistentes para esses pilares, ou seja, com a consideração dos momentos fletores solicitantes e resistentes característicos, sem qualquer coeficiente de majoração ou minoração das ações. Neste caso,

observa-se que os momentos fletores são preponderantes e desestabilizam os pilares (Marí & Helleland, 2005), o que não ocorreu porque os carregamentos que solicitaram a estrutura foram significativamente inferiores aos considerados em seu dimensionamento. Também é possível concluir nesta análise mais aprimorada que o progresso da corrosão nas armaduras reduziria significativamente a capacidade resistente dos pilares à flexão e mesmo que os carregamentos máximos previstos em projeto não ocorressem, pequenos acréscimos poderiam causar a perda de estabilidade dos pilares (Tang & Yang, 2011), ficando evidente a necessidade de reforço desses pilares.

Tabela 4. Coeficientes de segurança dos pilares antes do reforço

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

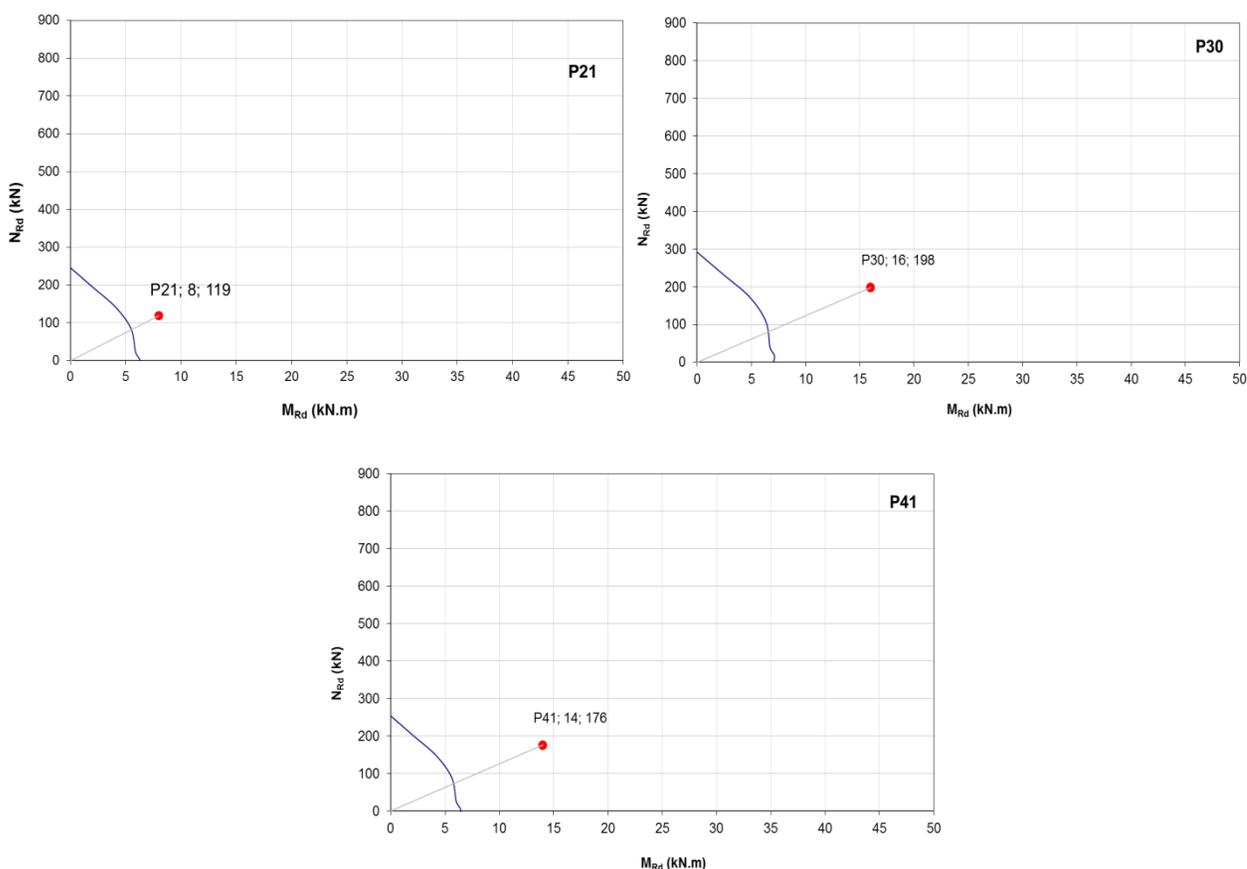


Figura 11. Envoltórias dos pilares 21, 30 e 41 antes do reforço.

3.2 Verificação da segurança dos pilares reforçados.

A verificação da segurança no cálculo dos pilares P21, P30 e P41 reforçados foi baseada nas recomendações da NBR 6118 (ABNT, 2014) seguindo os mesmos critérios utilizados para os pilares originais, sem reforço. Os resultados são apresentados através das envoltórias da Figura 12. Os coeficientes de segurança de cada pilar foram determinados pela relação entre o comprimento

da linha reta da origem à envoltória para o reforço, passando pelo ponto relativo às solicitações, e a distância desse ponto à origem, e são apresentados na Tabela 5.

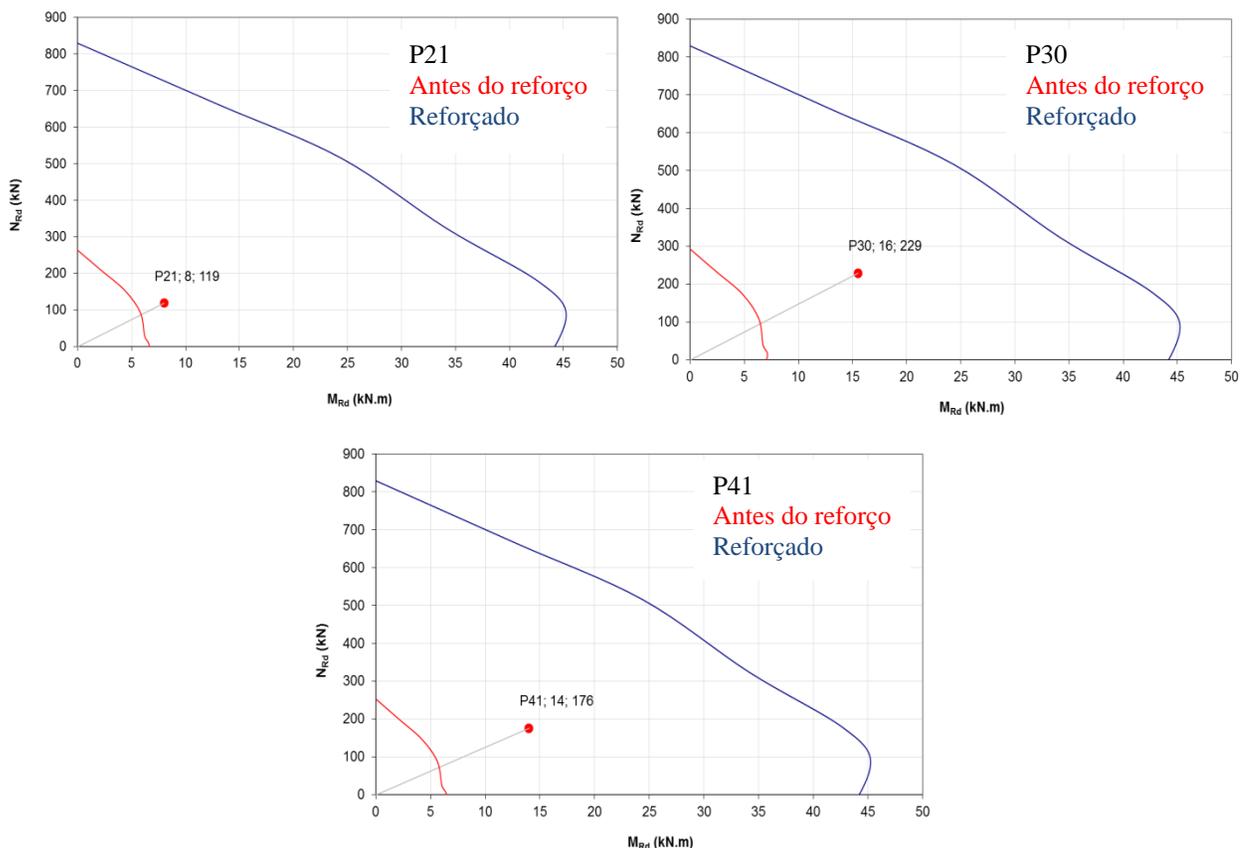


Figura 12. Envoltórias dos pilares 21, 30 e 41 reforçados.

Tabela 5. Valores dos coeficientes de segurança

Pilar	Coefficiente de segurança final
P21	3,5
P30	1,8
P42	2,1

4. CONCLUSÕES

Foram apresentados problemas estruturais que levaram à necessidade de reforçar os pilares P21, P30 e P41 da edificação histórica Casarão, por não atenderem às recomendações da norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 2014). Considera-se que a técnica de reforço estrutural proposta para estes pilares, através do encamisamento com concreto armado, foi viável em virtude das vantagens econômicas, rapidez de execução e coerência com o projeto arquitetônico. Sua aprovação foi comprovada na verificação dos parâmetros de cálculo normativos, ressaltando que a intervenção executada nos elementos estruturais, por mais simples que seja, foi precedida de

análise estrutural com programas computacionais atuais e aumentou a segurança dos pilares da edificação histórica para níveis satisfatórios.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará, Secretaria de Estado de Infraestrutura e Obras Públicas do Acre - SEOP, IPEAM, TEGAM e COC - unidade Rio Branco.

REFERÊNCIAS

- 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 gestão técnica integrada de edifícios: inspecção e reparação de elementos não estruturais

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

¹ IST, Lisboa; Portugal, E-mail: jorge.brito@civil.ist.utl.pt

² FEUP, Porto; Portugal,

Información del artículo

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 primer número del año 2016 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del tercer número del año 2015.

© 2015 ALCONPAT Int.

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.mda.cinvestav.mx/alconpat/revista
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 última modificación: 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.

RESUMO

A comunidade científica internacional tem dedicado a maior atenção ao vasto campo do conhecimento da inspecção, 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.

ABSTRACT

The international scientific community has paid great attention to the wide field of inspection, diagnosis, maintenance and rehabilitation of construction, which can be used in the development of integrated buildings management systems. This paper browses the methods of evaluation of the pathological situation of non-structural building elements, based on existing ones and presenting also some of the challenges in this field. A model to be implemented in integrated buildings management systems is also proposed, which is a consistent guideline and working basis for such a system to become a reality.

Keywords: building pathology, expert knowledge-based system, assessment method, building management.

RÉSUMEN

La comunidad científica internacional ha dedicado la mayor 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.

Autor de correspondencia: Jorge de Brito

1. CONSIDERAÇÕES PRÉVIAS

A fase de utilização dos edifícios é, de longe, a mais importante da sua vida útil, dos pontos de vista económico e ambiental. A vida útil de um edifício corresponde ao período de tempo após a construção durante o qual o edifício, ou os seus elementos, excedem os requisitos mínimos funcionais para o qual foram projectados (Haapio and Viitaniemi, 2008). Portanto, é hoje em dia consensual que o prolongamento da vida útil dos edifícios, tanto quanto a sua degradação física o permitir, é a opção mais adequada (de Brito, 2009).

A nível nacional, a ausência de políticas de incentivo às actividades de reabilitação e manutenção, combinada com um cenário económico que promoveu a construção nova, favoreceu o crescimento suburbano durante décadas. Neste contexto, Portugal assiste a uma mudança de paradigma no sector da construção, que envolve a mudança do foco na nova construção para a reabilitação de edifícios existentes. De facto, quando os edifícios são submetidos a actividades de manutenção e reabilitação, a durabilidade dos elementos construtivos é aumentada, incrementando a vida útil expectável do edifício (Amaral and Henriques, 2013).

A despeito de cada edifício ser único e apresentar diferentes tipos de anomalias, é possível identificar padrões ao analisar uma amostra significativa de edifícios. Desta forma, foram iniciadas bases de dados que fornecem orientação na prevenção e reparação, através da análise sistémica dos dados recolhidos de inspecções. Uma vez que as actividades de manutenção e reabilitação são fundamentais para a durabilidade dos edifícios, é essencial uma interpretação correcta das suas anomalias, apoiada em inspecções e diagnósticos objectivos. No entanto, os processos de inspecção e diagnóstico dos edifícios são bastante complexos, influenciando a precisão das medidas de intervenção subjacentes (Aguiar et al. 2006).

A comunidade científica nacional e internacional tem dedicado a maior atenção ao vasto campo do conhecimento da inspecção, diagnóstico, manutenção e reabilitação das construções, incluindo a sua utilização no desenvolvimento de sistemas de gestão integrada de edifícios. Um grande esforço tem também sido feito na introdução de modelos computacionais, a fim de auxiliar os engenheiros nos seus processos de tomada de decisão (Farinha et al. 2005). Embora os sistemas de gestão de edifícios sejam trivialmente usados em empresas, o foco principal de tais sistemas é geralmente a gestão de valor patrimonial e a gestão da manutenção planeada (Chang e Tsai, 2013). No entanto, as anomalias em edifícios podem comprometer o seu desempenho a nível estrutural e/ou não estrutural, sendo por vezes necessárias intervenções dispendiosas, a fim de devolver o edifício ao seu estado original. Por conseguinte, a não utilização de sistemas de gestão que integrem a inspecção e diagnóstico de edifícios pode comprometer o desempenho dos mesmos a longo prazo (Amaral e Henriques, 2013).

Os estudos da patologia da construção têm ganho destaque na conjuntura actual. Neste artigo é feita uma revisão no âmbito dos métodos de avaliação da patologia em edifícios, apresentando alguns dos desafios neste domínio, nomeadamente no que se refere à implementação de um sistema de gestão integrada de edifícios fiável e utilitário.

2. MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA PATOLOGIA EM EDIFÍCIOS

Os avanços no domínio das tecnologias de informação têm propiciado a automação dos processos de tomada de decisão no domínio da engenharia. No final da década de 1980, a intensa actividade na área da tecnologia conduziu à implementação de diversos sistemas de gestão, referentes a diversas áreas da engenharia (Farinha et al. 2005). No que se refere à patologia da construção, são

cronologicamente apresentados os mais importantes métodos de avaliação da patologia em edifícios, com foco nos elementos não-estruturais.

2.1 DEFECT ACTION SHEETS (1982)

A organização britânica BRE (*Building Research Establishment*), especializada em edifícios, publicou uma série de fichas de anomalias em edifícios, constituindo uma importante base de dados (Trotman, 2006). Em resumo, 144 fichas de anomalia (*Defect action sheets*) foram publicadas entre 1982 e 1990. O intuito destas fichas é fornecer as informações necessárias aos profissionais do sector da construção, no âmbito da prevenção e correcção de anomalias em edifícios. Cada uma destas fichas é composta por duas folhas A4 estruturadas da seguinte forma: i) Descrição da anomalia; ii) Descrição das causas; iii) Medidas de prevenção; e iv) Referências e informações complementares. Posteriormente, estas fichas foram agrupadas e republicadas (BRE, 2001; CIB - W086 Building Pathology, 2013).

2.2 FICHAS DE REPARAÇÃO DE ANOMALIAS (1985)

Nas actas do 1º Encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios de Habitação, realizado em Lisboa, em Junho de 1985, foi apresentada uma metodologia para a avaliação da patologia de um edifício que seria adoptada na elaboração das conhecidas fichas de reparação de anomalias, publicadas pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC, 1985). O conjunto destas fichas é segmentado da seguinte forma: i) Anomalias estruturais; ii) Anomalias não-estruturais; e iii) Instalações e equipamentos. A cada um dos segmentos corresponde um grupo de fichas de reparação de anomalias. Cada uma destas fichas foi estruturada do seguinte modo: i) Sintomas; ii) Exame; iii) Diagnóstico de causas; e iv) Reparação.

2.3 CASES OF FAILURE INFORMATION SHEET (1993)

O Conselho Internacional para a Pesquisa e Inovação em Edifícios e Construção - CIB (*Conseil International du Bâtiment*) tem um grupo de trabalho responsável pela pesquisa em patologia da construção, designado *W086 Building Pathology*. Este grupo de trabalho publicou, em Junho de 1993, um modelo de fichas de patologia, intituladas *Cases of failure information sheet*, inteiramente dedicadas aos registos de patologia, apontando para a necessidade da sistematização do conhecimento no campo (CIB - W086 Building Pathology, 1993). Foi sugerida uma estrutura para a preparação de fichas de patologia: i) Elemento construtivo; ii) Descrição da problemática; iii) Descrição das anomalias evidentes; iv) Descrição de anomalias que podem ser monitorizadas; v) Representação gráfica (foto, desenho, desenho); vi) Descrição da anomalia; vii) Identificação dos agentes que causaram a anomalia; viii) Erros; e ix) Relatório de diagnóstico.

2.4 FICHES PATHOLOGIE DU BÂTIMENT (1995)

Em 1995, a agência francesa AQC (*Agence Qualité Construction*), em parceria com a Fundação SMA, desenvolveu um conjunto de fichas de patologia, intituladas *Fiches pathologie du bâtiment* (AQC, 2014). Estas fichas foram elaboradas de forma a evidenciar as principais anomalias em edifícios em França, com base na análise de sinistros reportados a companhias de seguros. As 61 fichas existentes foram criadas em 1995 e já estão disponíveis *on-line* desde 2003 (ver figura 1). Estas foram agrupadas e seccionadas de acordo com as partes do edifício afectado. À semelhança dos casos anteriores, estas fichas estão estruturadas do seguinte modo: i) Descrição da anomalia; ii) Diagnóstico; iii) Pontos sensíveis; iv) Conselhos de prevenção; e v) Informações adicionais.

2.5 CONSTRUDOCTOR (2003)

A empresa portuguesa OZ - Diagnóstico, Pesquisa e Controlo de Qualidade de Estruturas e Fundações, Lda. desenvolveu um serviço de pré-diagnóstico de anomalias em edifícios, chamado

Construdoctor (Ribeiro e Cóias, 2003). O serviço surge como um sistema que fornece diagnóstico *on-line*, cujo principal objectivo é auxiliar na correcção de anomalias em edifícios, proporcionando explicações básicas sobre as causas prováveis, fazendo um diagnóstico preliminar e definindo medidas correctivas. O serviço oferece um pré-diagnóstico com base num formulário *on-line* (ver figura 2). Após submissão, as respostas do utilizador são avaliadas por especialistas na patologia e reabilitação da construção, que preenchem um relatório *on-line* com identificação da anomalia, especificando as possíveis causas e acções 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. Formulário *on-line* (Construdoctor) (Ribeiro e Cóias, 2003)

2.6 "APRENDER COM OS ERROS" (2004)

O catálogo de patologia italiano "Aprender com os erros" (BEGroup, 2004) foi desenvolvido pela BEGroup do Departamento de Ciência e Tecnologia do Património Construído (BEST) no Politécnico de Milão. O catálogo referido é acessível *on-line* (ver figura 3), totalmente em italiano, onde os arquivos de patologia podem ser acedidos. À semelhança dos casos anteriores, estas fichas estão estruturadas do seguinte modo: i) Registos de materiais; ii) Mecanismo de deterioração; iii) Registos de patologia; iv) Registos de casos de estudo; e v) Registos de anomalias.

2.7 PATORREB (2004)

O Grupo de Estudos da Patologia da Construção criou um *website* dedicado à divulgação de um catálogo de fichas de patologia (Freitas et al. 2007). Desde 2004, os utilizados registados têm acesso ao campo de Patologia, onde o esquema de um edifício apresenta as fichas de patologia de acordo com o elemento construtivo (ver figura 4). Ao seleccionar o respectivo elemento, é apresentada a lista de fichas de patologia associadas. À semelhança dos casos anteriores, estas fichas estão estruturadas do seguinte modo: i) Identificação da patologia; ii) Descrição da patologia; iii) Sondagens e medidas; iv) Causas da patologia; e v) Soluções possíveis de reparação.



Figura 3. "Aprender com os erros" (BEGroup, 2004)



Figura 4. Esquema de um edifício (Patorreb) (Freitas et al. 2007)

2.8 WEB-BASED PROTOTYPE SYSTEM (2009)

Em 2009, Fong e Wong criaram o protótipo de um sistema de gestão integrada de edifícios (ver figura 5), tendo vários objectivos em mente: i) fornecer uma abordagem amigável do utilizador; ii) fornecer uma abordagem simplificada no processo de apresentação da informação; e iii) permitir a comunicação entre os diferentes utilizadores do sistema, melhorando a troca e partilha de conhecimentos e experiência, no âmbito da patologia da construção (Fong e Wong, 2009). Com

esse fim, foi usado um questionário para investigar as opiniões dos profissionais da construção relativamente à captação e reutilização de conhecimento e experiência. Após o levantamento preliminar, realizaram-se entrevistas a profissionais interessados, registando-se o conhecimento e experiência acumulada em formulários livres de qualquer estrutura, sendo posteriormente introduzidos no protótipo do sistema de gestão integrada.

2.9 MAINTAINABILITY WEBSITE (2010)

Em 2004, foi desenvolvido, na Universidade Nacional de Singapura (NUS), um projecto de dois anos concebido para estudar os problemas sofridos por diferentes tipos de edifícios em climas tropicais. Em 2005, foi criado o *Maintainability website* (ver figura 6), sendo actualizado até ao ano de 2010. O *website* procura consciencializar os profissionais da construção acerca dos obstáculos para uma boa manutenção de edifícios (Chew, 2010). O *website* foi desenvolvido em Inglês e está dividido nos seguintes módulos: i) Biblioteca de anomalias, com informações sobre tipos de anomalias e suas causas, manutenção e métodos de diagnóstico; ii) Manual de materiais, com informações sobre o desempenho e durabilidade dos materiais; e iii) Sistema de avaliação da manutenção, desenvolvido para facilitar a selecção de alternativas sustentáveis. Relativamente ao módulo i) Biblioteca de anomalias, que está directamente relacionado com o âmbito do presente artigo, a base de dados de anomalias está agrupada do seguinte modo: i) Anomalias em fachadas, ii) Anomalias em áreas húmidas, iii) Anomalias em caves; e iv) Anomalias em coberturas. No que diz respeito aos registos de anomalias, estes estão organizados do seguinte modo: nas duas primeiras secções, o tipo de anomalia é ilustrado e as possíveis causas explicadas; as boas práticas na construção são compiladas na terceira secção, com o objectivo de evitar erros sistemáticos; na quarta secção são ilustradas as técnicas de diagnóstico e manutenção; as possíveis técnicas correctivas são ilustradas na quinta secção.

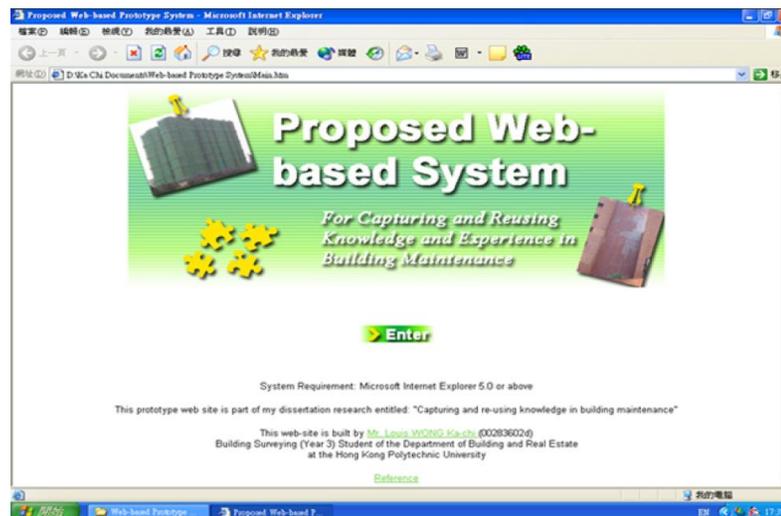


Figura 5. *Web-based prototype system* (Fong e Wong, 2009)

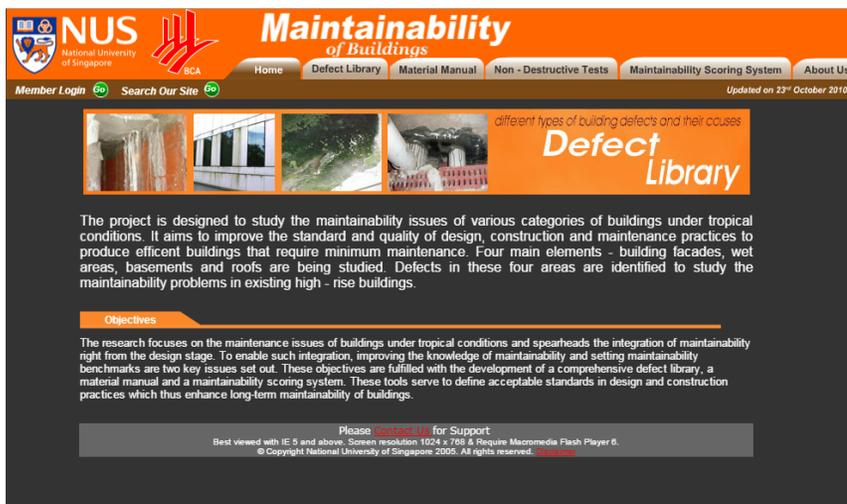


Figura 6. *Maintainability website* (Chew, 2010)

2.10 BUILDING MEDICAL RECORD (2013)

Em 2013, Chang e Tsai propuseram um conceito de “registro médico de um edifício”, análogo aos registros médicos humanos (Chang e Tsai, 2013), apresentando um sistema de diagnóstico. No cenário de aplicação deste sistema, um perito pesquisa situações patológicas numa base de dados, para auxiliar o diagnóstico de anomalias em edifícios. O utilizador recebe a notificação, através de uma ligação à Internet, no local da construção. Este sistema é composto por quatro módulos principais: i) Processamento de documentos; ii) Extração da solução chave; iii) Cálculo da similaridade; e iv) Classificação da importância. Segundo os autores, as construtoras podem oferecer serviços especializados, em resposta a problemas de manutenção e de gestão, seguindo este sistema. A acumulação eficaz e reutilização de registros de reparação também podem ser feitas durante a fase de projecto de um edifício.

3. ANÁLISE CRÍTICA E COMPARATIVA

Ainda que, na reabilitação de edifícios, cada caso seja um caso, a maioria das ocorrências de anomalias em elementos não estruturais pode ser resolvida de uma forma sistémica. Usando dados das inspecções, o cruzamento de informações, e um sistema de gestão integrada de um edifício, um inspector pode diagnosticar a anomalia e definir a melhor técnica de reparação. Neste contexto, a aquisição de dados sobre o desenvolvimento de anomalias na construção é indispensável para o planeamento das acções de manutenção e reparação. A fiabilidade desta informação é fundamental para tomar decisões racionais.

Partindo da análise dos métodos de avaliação da patologia em edifícios, pode-se facilmente concluir que todos têm uma estrutura semelhante no que se refere à descrição de anomalias: i) Descrição / identificação da anomalia; ii) Causas prováveis; e iii) Diagnóstico e técnica de reparação. Indubitavelmente, parece que todos os métodos de avaliação da patologia em edifícios encontrados na literatura têm uma organização semelhante, mas nenhuma é inteiramente dedicado à intervenção, o que reforça a importância da investigação neste domínio.

Em relação aos métodos de avaliação baseados em fichas de anomalia, *Defect action sheets* (1982), Fichas de reparação de anomalias (1985) e *Cases of failure information sheet* (1993), estes representaram o ponto de partida para a análise sistémica da patologia em edifícios. Através da análise sistémica dos dados recolhidos em estudos de investigação, foi possível estabelecer bases de dados confiáveis, que fornecem ainda orientação na prevenção e reparação de anomalias em

elementos não-estruturais de edifícios, um contributo importante no desenvolvimento de sistemas de gestão integrada. No entanto, o conteúdo da informação poderá estar em desacordo com as correntes práticas construtivas, devido aos contínuos avanços nas técnicas de construção e reparação.

No que respeita aos métodos de avaliação que fazem uso das mais recentes tecnologias da informação, é possível identificar três métodos muito semelhantes na sua génese: *Fiches pathologie du bâtiment* (1995), "Aprender com os erros" (2004) e Patorreb (2004). Nestes casos, diversas fichas de anomalias são acessíveis através de um *website*, a partir de onde podem ser descarregadas e impressas. Através destes métodos, a divulgação dos registos de patologia tornou-se uma realidade. No entanto, não foram tomadas medidas a fim de filtrar o conteúdo das fichas de patologia, de modo a fornecer aos utilizadores uma solução de reparação expedita.

Os métodos de avaliação *Construductor* (2003) e *Building medical record* (2013), emergem como sistemas que fornecem diagnóstico *on-line*. Após a submissão de um formulário, as respostas do utilizador são avaliadas por especialistas na patologia da construção, que preenchem um relatório *on-line*. No entanto, observa-se que a informação fornecida no relatório é apenas em um pré-diagnóstico dado por técnicos, sem uma visita ao edifício. Por essa razão, o relatório não pode ser, por vezes, tão preciso quanto a desejado.

Relativamente ao método *Web-based prototype system* (2009), é importante notar que o sistema não foi concebido para fornecer quaisquer regras sistematizadas. Segundo os autores, as investigações concluíram que o conhecimento, no âmbito da patologia da construção, é de contexto específico e não pode ser generalizado. Em vez disso, o sistema permite aos utilizadores partilhar e recuperar a experiência de outros profissionais, a fim de facilitar o seu próprio processo de tomada de decisão.

Por fim, maior atenção deve ser prestada ao método *Maintainability website* (2010). Este método pretende fornecer um diagnóstico objectivo, através do desenvolvimento de uma biblioteca de anomalias abrangente, um manual de materiais e um sistema de classificação das técnicas de manutenção. Relativamente à biblioteca, as anomalias e respectivas causas são explicadas e ilustradas através de fotografias. As técnicas de diagnóstico e reparação estão também incluídas. Desta forma, os utilizadores deste método de avaliação são incentivados a encontrar um diagnóstico, com base em imagens. No entanto, não foram encontrados dados estatísticos, especificamente no que se refere às correlações entre anomalias, diagnóstico e técnicas de reparação. Como resultado, o diagnóstico pode não ser tão preciso quanto desejado, uma vez que é claramente dependente da experiência do utilizador / inspetor. Por esse motivo, o método apresenta alguns desafios no que diz respeito à intervenção.

Entre outros desafios identificados sobre os métodos de avaliação da patologia em edifícios encontrados na literatura, a objectividade da informação concedida é um pré-requisito para a tomada de decisões racionais. A fim de superar alguns dos desafios encontrados, investigadores do Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa desenvolveram sistemas de inspecção e diagnóstico, aplicados a vários elementos construtivos não estruturais. Estes sistemas são caracterizados pela definição e classificação das quatro variáveis mais importantes na patologia: anomalias, causas, técnicas de diagnóstico e técnicas de reparação, sendo que foram também estabelecidas correlações quantitativas (de Brito, 2009). Seguindo uma abordagem sistémica, estudos foram publicados sobre os seguintes elementos não-estruturais de edifícios:

- i) Impermeabilizações de coberturas em terraço (Walter et al. 2005);
- ii) Revestimentos cerâmicos aderentes em pavimentos e paredes (Silvestre e de Brito, 2009; Silvestre e de Brito, 2010; Silvestre e de Brito, 2011);
- iii) Revestimentos epóxicos em pisos industriais (Garcia e de Brito, 2008);
- iv) Paredes de alvenaria (Gonçalves et al. 2013, 2014);
- v) Revestimentos de piso lenhosos (Delgado et al. 2013);

- vi) Revestimentos em pedra natural em pavimentos e paredes (Neto e de Brito, 2011; Neto e de Brito, 2012)
- vii) Divisórias em gesso laminado (Gaião et al. 2011; Gaião et al. 2012);
- viii) Estuques correntes em paramentos interiores (Palha et al. 2012; Pereira et al. 2011);
- ix) Revestimentos em coberturas inclinadas (Garcez et al. 2012; Garcez et al. 2015a; Garcez et al. 2015b);
- x) Rebocos em paredes (Sá et al. 2015a; Sá et al. 2015b);
- xi) Pinturas em rebocos e estuques (Pires et al. 2015a; Pires et al. 2015b);
- xii) ETICS (Amaro et al. 2013; Amaro et al. 2014);
- xiii) Caixilharias (Santos, 2012; Vicente, 2012).

Através de uma intensa pesquisa bibliográfica baseada em publicações científicas internacionais, recolheu-se a informação actualmente disponível sobre a patologia de elementos não estruturais. Esta informação foi complementada com a execução de trabalhos de campo com extensas amostras representativas, permitindo a criação de um maior entendimento relativamente à origem das anomalias, oferecendo um método sistémico para o diagnóstico das mesmas e facilitando a escolha de métodos de intervenção para reparação. Estes sistemas dispõem das seguintes ferramentas:

- i) Lista classificativa de anomalias: identificação e classificação das anomalias mais comuns em cada elemento;
- ii) Lista classificativa de causas: identificação e classificação das causas mais prováveis na origem das diversas anomalias identificadas;
- iii) Lista classificativa de técnicas de diagnóstico: classificação do tipo de ensaios que permitem caracterizar as anomalias identificadas, assim como auxiliar na determinação da sua possível origem;
- iv) Lista classificativa de técnicas de reparação: classificação do tipo de técnicas de intervenção mais adequadas para cada uma das anomalias identificadas;
- v) Matriz de correlação anomalias-causas: atribuição de relação nula, indirecta ou directa entre cada anomalia e cada causa listada;
- vi) Matriz de correlação inter-anomalias: probabilidade de desenvolvimento de uma anomalia, na presença de outra;
- vii) Matriz de correlação anomalias-técnicas de diagnóstico: atribuição de relação nula, média ou alta a uma técnica de diagnóstico necessária para a caracterização de uma anomalia, ou entendimento das suas condições para conhecimento da origem;
- viii) Matriz de correlação anomalia-técnicas de reparação: atribuição de relação nula, média ou alta a uma técnica de reparação relativa à sua adequação na resolução de anomalias.

No entanto, nenhum dos sistemas criados se encontra devidamente informatizado, sendo ainda susceptíveis a inadequadas interpretações, possibilitando ainda a incorrecção da utilização dos mesmos.

4. PERSPECTIVAS FUTURAS

Na área da reabilitação de edifícios, estabelece-se que o procedimento de reabilitação deve começar com uma inspecção, assegurando a caracterização adequada das anomalias existentes, que culminará com a apresentação de um diagnóstico e respectiva técnica de reparação. Tendo demonstrado a importância de estabelecer métodos de avaliação da patologia em edifícios, é importante criar um sistema de gestão integrada de edifícios fiável, que possibilite o acesso ao vasto campo do conhecimento da patologia das construções.

A partir da análise dos métodos de avaliação da patologia de edifícios encontrados na literatura, pode-se concluir que todos têm uma organização semelhante mas nenhum é inteiramente dedicado à intervenção. A fim de criar um sistema de gestão integrada fiável, os vários sistemas parciais desenvolvidos no Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa afiguram-se como bases confiáveis, uma vez que se regem pela mesma abordagem sistémica, ancorada no conhecimento nas áreas da inspecção, diagnóstico e reabilitação de elementos não-estruturais de edifícios. Através desta abordagem sistémica, foram definidos e classificados os parâmetros mais importantes da patologia dos vários elementos de construção, bem como as correlações quantitativas entre estes. Neste contexto, a criação de um sistema de gestão integrada global, incluindo todos os sistemas parciais desenvolvidos até o momento, surge como uma perspectiva futura bastante credível.

A implementação de um sistema de gestão integrada de edifícios ancorado nos sistemas parciais desenvolvidos no Instituto Superior Técnico, irá colocar em prática todas as ferramentas referidas na secção 3 deste artigo. No entanto, ainda há um longo caminho a seguir, a fim de colocar esse sistema em prática. A criação de um sistema global com base em listas normalizadas de anomalias, causas, métodos de inspecção e técnicas de reparação apresenta-se como um grande desafio, devido à quantidade enorme de informação. A análise e normalização dos vários sistemas parciais abrangem a apreciação conjunta de anomalias, causas, técnicas de diagnóstico e métodos de reparação de cada elemento construtivo.

A fim de implementar um sistema de gestão integrada de edifícios, deve-se ter em consideração as diversas fases por que um edifício passa, incluindo as inspecções periódicas gerais e específicas aos vários elementos constituintes do edifício, bem como as consequentes intervenções de manutenção, reparação e/ou substituição. Para que um sistema deste tipo seja posto em prática, é necessário construir uma ferramenta informatizada que tenha como base o edifício e os seus vários elementos. Este sistema deverá incluir uma base de dados que permita armazenar a informação relevante sobre o edifício; um módulo que permita a normalização das actividades de inspecção e dos relatórios resultantes; e um módulo de decisão sobre a acção a realizar após a inspecção e o diagnóstico de anomalias eventualmente existentes, dedicado às operações de manutenção do edifício. Empregando os atributos referidos, espera-se a minimização da subjectividade das inspecções de elementos de edifícios e a eliminação da dependência da experiência do inspector, apontadas como alguns dos desafios associados aos métodos de avaliação da patologia em edifícios existentes.

Por fim, prevê-se que o sistema de inspecção informatizado proposto tenha a seguinte aplicação prática: i) utilização em inspecções; ii) utilização no âmbito dos planos de manutenção pró-activa de edifícios; iii) apoio à decisão em projectos de reabilitação; iv) preparação de relatórios de delapidação de edifícios; v) utilização para reconhecimento oficial; vi) preparação do relatório final de diagnóstico com uma estrutura normalizada; vii) utilização como base pré-normativa de metodologia normalizada para inspecções a edifícios que tenham de ser reconhecidas oficialmente; e viii) avaliação e gestão de activos imóveis.

5. REFERÊNCIAS

- 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.
- 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 aspersão de nitrato de prata para avaliação da penetração de cloretos em concreto: estado da arte

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

¹ Departamento de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná (UFPR), Brasil. E-mail: medeiros.ufpr@gmail.com

Información del artículo

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

© 2015 ALCONPAT Int.

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.mda.cinvestav.mx/alconpat/revista
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 última modificación: 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.

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 (AgNO_3). 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.

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 carbonación 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 (AgNO_3). El uso del método es simple, de bajo costo y permite evaluaciones in situ. Pero cuando hay presencia de carbonación, 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 (AgNO_3). 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.

Autor de contacto: Lígia Vitória Real

1. INTRODUÇÃO

É bem conhecido que o meio altamente alcalino fornecido pela matriz de cimento mantém o aço presente no concreto armado passivo à corrosão. No entanto, a quebra desta passividade ocorre quando os íons cloreto atingem a armadura. A corrosão, então, é ativada.

O fenômeno da despassivação das armaduras ocorre, essencialmente, por dois motivos principais: primeiro, devido à redução da alcalinidade do concreto ocasionada pela carbonatação. Segundo, pela presença de cloretos, que mesmo com o pH elevado despassivam a armadura pontualmente, formando pites de corrosão que reduzem a seção transversal da barra e diminuem a sua capacidade portante (França, 2011).

Os íons cloretos podem ser encontrados na matriz cimentícia de duas formas: livres (dissolvidos na água dos poros) ou combinados com o C₃A e C₄AF hidratados (produtos da hidratação do cimento) formando cloroaluminatos (sal de Friedel). Os cloretos realmente nocivos às armaduras são os livres. Entretanto, os cloretos combinados podem se tornar livres com a ocorrência de carbonatação ou devido à elevação da temperatura do concreto (Helene, 1993; Pereira & Cincotto, 2001; Cavalcanti & Cavalcanti, 2010).

No contexto da indução da corrosão por cloretos, como também por carbonatação, é razoável considerar a vida útil das estruturas de concreto em dois estágios: o primeiro é quando o teor crítico de cloretos atinge a superfície do aço dentro do concreto (sendo este o tempo de vida útil das estruturas) e o segundo é a subsequente propagação da corrosão que se estende para o tempo em que a estrutura é danificada pela corrosão do aço além dos limites aceitáveis de conservação (He et al., 2011).

A durabilidade é resultado da interação das estruturas de concreto, do ambiente, das condições de uso, de operação e, inclusive, de manutenção. Assim, para se avaliar o desempenho das construções são utilizadas inspeções visuais associadas a ensaios de campo e laboratório, tornando possível identificar as causas das manifestações patológicas e escolher as técnicas de recuperação e de proteção mais adequadas e de melhor custo-benefício para a manutenção da edificação (Mota, 2011).

A fim de avaliar as condições das estruturas de concreto armado, o tempo de vida útil da construção pode ser estimado a partir do coeficiente de difusão de cloretos no concreto. O método atual mais representativo para determinar esse coeficiente é baseado na segunda Lei de Fick. Porém, esse é um procedimento demorado e para sanar essa situação, métodos acelerados, como o proposto pela ASTM C 1202/05, têm sido utilizados associados à identificação da profundidade de penetração de cloretos (Kim et al., 2013).

Existem diversos métodos para identificar e quantificar os cloretos livres e totais ao longo da profundidade do concreto (perfil de cloretos), tais como o gravimétrico, a titulometria ou a potenciometria direta (Pereira & Cincotto, 2001; Silva, 2006). Para a determinação do perfil de cloretos - que requer corte ou perfuração, moagem e análise química de amostras de concreto - são necessários vários equipamentos e tempo de análise (He et al., 2011). Em contrapartida, o método colorimétrico baseado em AgNO₃ para medição da profundidade de penetração de cloretos em matriz cimentícia é prático e rápido (Jucá, 2002; Meck & Sirivivatnanon, 2003; Yuan et al., 2008; França, 2011; He et al., 2011; Mota, 2011; Kim et al., 2013), porém, sua eficiência e condições de aplicação devem ser bem entendidas para fazer o método proporcionar as possíveis vantagens de aplicação desta técnica.

A aspersão de nitrato de prata tem sido utilizada associada ao ensaio acelerado de migração de cloretos prescrito pela ASTM C 1202/05. Asperge-se solução aquosa de AgNO₃ 0,1 M às fatias fraturadas de concreto após o ensaio de migração de íons. Esse procedimento causa formação de duas regiões bem definidas (Figura 1): uma esbranquiçada com precipitação de AgCl, indicando a

presença de cloretos e outra marrom, que corresponde a região livre de cloretos (Medeiros, 2008; Trindade, 2011; Marriaga & Claisse, 2011; Marcondes, 2012).

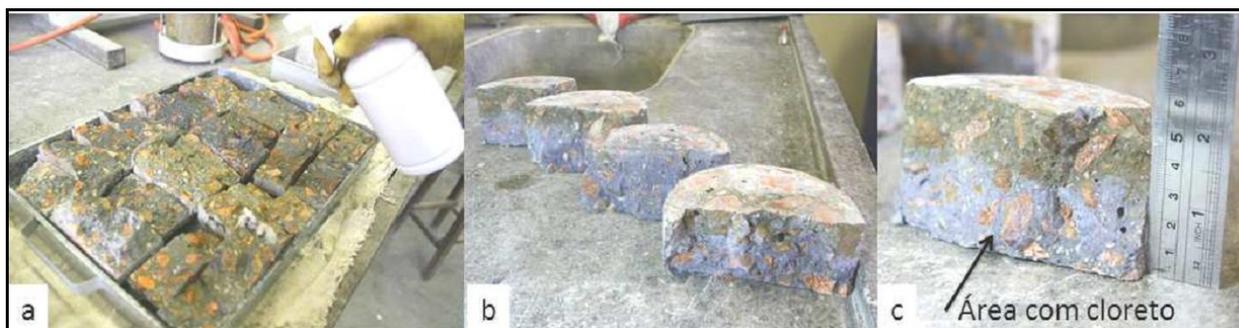


Figura 1. a) Aspersão da solução de nitrato de prata; b) Comparação entre os corpos de prova; c) Medida da profundidade de penetração de cloretos (MARCONDES, 2012)

Em 2010, Cavalcanti & Cavalcanti utilizaram o método colorimétrico por aspersão de nitrato de prata para avaliação das manifestações patológicas de um píer localizado na praia de Tambaú, na cidade de João Pessoa/PB. Através do ensaio os autores puderam comprovar que a despassivação e corrosão das armaduras ocorreu porque os íons cloretos ultrapassaram a espessura de cobertura do concreto.

Entretanto, apesar da simplicidade do método, a reação química que leva a mudança de cor é afetada pela concentração da solução de nitrato de prata, pelo pH do meio, pela presença de carbonatos e pelo teor de cloretos do concreto. Conseqüentemente, o método é afetado pela presença de carbonatação (que leva a redução do pH da pasta) e pelo nível de contaminação a que o material está submetido (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). Neste contexto, o objetivo do presente artigo é avaliar a aplicabilidade do método colorimétrico por aspersão de nitrato de prata, analisando e comparando diversas pesquisas realizadas e publicadas.

2. MÉTODO COLORIMÉTRICO EMPREGANDO AgNO_3

O desenvolvimento do método colorimétrico por aspersão de nitrato de prata teve início na Itália, em 1970, por Colleparidi. Consiste em um método qualitativo para identificar a presença de cloretos livres em materiais com base cimentícia (França, 2011; Mota, 2011). O método chegou a ser normalizado na Itália, entretanto, segundo Colombo (2001) apud Jucá (2002), por não apresentar resultados seguros, a norma “UNI 7928” foi retirada de operação sem previsão de substituição. A principal aplicação do método colorimétrico é a determinação da profundidade da frente de penetração de cloretos que ingressam no concreto pelos fenômenos da absorção associada a difusão. Quando a solução de nitrato de prata é aspergida na superfície do concreto, ocorre uma reação fotoquímica (Figura 2). Onde há presença de cloretos livres ocorre a formação de um precipitado branco de cloreto de prata. Na região sem cloretos ou com cloretos combinados, há formação de um precipitado marrom, o óxido de prata. Porém como a frente de penetração de cloretos não é regular, isto pode mascarar as medidas de profundidade de ingresso dos cloretos. No caso em que os cloretos estão inseridos na matriz do concreto, a visualização pode tornar-se um pouco mais difícil. (Meck & Sirivivatnanon, 2003; França, 2011; Mota, 2011).



Figura 2. Possível precipitação de cloretos livres (branco) e cloretos combinados (marrom) (Medeiros et al, 2009).

Como a penetração de cloretos não é uniforme, a NT BUILD 492 (2000) recomenda realizar sete medidas a cada 10 mm, sendo o resultado a média entre todas elas (Figura 3). No caso de impossibilidade de leitura pela presença de agregados, deve-se alterar o ponto de medição ou ignorar esta profundidade se houver outras cinco válidas.

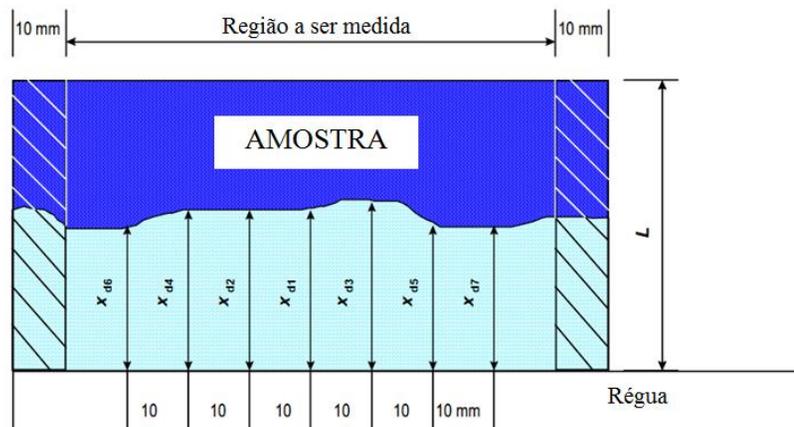
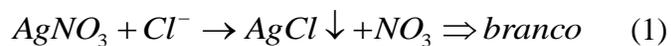


Figura 3. Medidas da frente de penetração de cloretos (NT BUILD 492, 2000).

Na região onde há cloretos livres, ocorre a reação química (1). Porém, na presença de carbonatos também há formação de um precipitado branco, conforme indica a reação (2). Por isso, aconselha-se o emprego da técnica de realcalinização do material cimentício antes a aplicação do método colorimétrico (JUCÁ, 2002), pois caso o concreto esteja carbonatado e sem contaminação por cloretos o ensaio irá resultar em falso positivo, sendo este um dos motivos de dificuldade de implementação desta técnica correntemente nas inspeções de campo.



3. INFLUÊNCIA DO TIPO DE CIMENTO NOS RESULTADOS

A técnica de aspersão de nitrato de prata identifica apenas os cloretos livres do concreto e, portanto, o resultado também poderia ser influenciado pela capacidade o cimento combinar mais ou menos cloretos (Jucá, 2002). Como descrito anteriormente, os cloretos se combinam ao C_3A e ao C_4AF , que são produtos da hidratação do cimento Portland. Se há baixos teores de aluminatos, provavelmente haverá pouca capacidade de imobilizar íons cloreto. Porém, Pereira & Cincotto (2001) avaliaram a capacidade de combinação de cloretos em concretos moldados com diferentes tipos de cimento Portland (CP I S, CP II F, CP III, CP IV e CP V ARI) e não observaram diferenças significativas no teor de cloretos combinados. Em contrapartida, Jucá (2002) confeccionou corpos de prova com os mesmo cinco tipos de cimento (CP I S, CP II F, CP III, CP IV e CP V – ARI), incorporando 1 e 2% de cloretos em relação à massa de cimento às amostras. Após a aspersão do nitrato de prata, os resultados permitiram visualizar que há um período de combinação de cloretos e que o teor de aluminatos dos cimentos é um fator preponderante no processo de combinação química. França (2011) avaliou a combinação de cloretos utilizando o método colorimétrico para 0,4 e 2% de cloretos em relação à massa dos cimentos CP II F, CP IV e CP V – ARI e, assim como para Jucá (2002), seus resultados apresentaram que há influência do tipo de cimento na quantidade de cloretos livres.

Os resultados do estudo de Mota (2011) também permitiram observar que há fixação de cloretos com o passar do tempo. Para uma argamassa produzida com 2% de cloretos em relação à massa de cimento, a região branca (que indica onde há cloretos livres) se modificou. Apesar de não haver uma frente de penetração de cloretos, já que a contaminação nessa etapa do estudo de Mota (2011) foi interna, é possível observar na Figura 4 que a área contaminada por cloretos, indicada pela alteração da coloração para esbranquiçado ao se aspergir nitrato de prata, diminuiu. Ou seja, os cloretos estariam deixando de ser livres para se combinar com o C_3A . Vale salientar que as bordas claras na Figura 4 são relativas ao efeito da carbonatação.

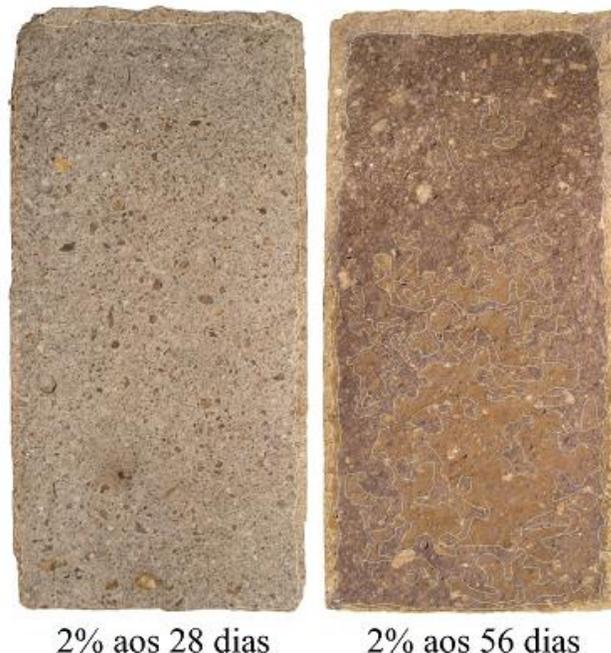


Figura 4. Evolução da combinação de cloretos (Mota, 2011).

4. PONTO DE VIRAGEM E INFLUÊNCIA DO pH

Ao se aplicar o método colorimétrico, existe um ponto de viragem de coloração. Ou seja, uma determinada concentração de cloretos e da solução de nitrato de prata que causa a mudança de cor (formação da fronteira; *border-change color*), de modo a se determinar a profundidade da frente de penetração de cloretos livres. De acordo com Otsuki *et al.* (1993), a concentração da solução de AgNO₃ adequada para o método colorimétrico é igual a 0,1N. Esse valor tem sido consenso entre os diversos autores da área (Andrade *et al.*, 1999; Meck & Sirivivatnanon, 2003; Jucá, 2004; França, 2011; Mota, 2011).

Ainda segundo Otsuki *et al.* (1993), para concentração de AgNO₃ igual a 0,1N, o teor mínimo de cloretos livres que gera essa alteração de cor é igual a 0,15% em relação à massa de cimento. Entretanto, Collepardi (1997) defende que esse teor mínimo é igual a 0,01% (Jucá, 2004; França, 2011; Mota, 2011). Já Andrade *et al.* (1999) encontraram, com 95% de confiabilidade, que o ponto de viragem é de 1,14%±1,4 em relação à massa de cimento. Esse valor está em concordância ao defendido por Meck & Sirivivatnanon (2003), que é igual a 0,9% de cloretos em relação à massa de cimento. Em 2011, He *et al.* encontraram que esse teor crítico de cloretos está entre 0,011 e 2,27% sobre o peso de cimento. Deve-se destacar que não existe consenso sobre o teor de cloretos livres que causa a mudança de cor na solução de AgNO₃ 0,1N, uma vez que os dados disponíveis nos estudos citados são tão discrepantes.

Recentemente, Kim *et al.* (2013) reavaliaram as variáveis que podem influenciar a técnica. O estudo consistiu em verificar se há mudança na coloração ao se alterar o pH do meio, a concentração de AgNO₃ e o teor de cloretos. Além disso, avaliaram se a relação água/cimento influenciaria na concentração de cloretos na fronteira de mudança de cor (*border-change color*) e se o método colorimétrico é aplicável *in situ*, ou seja, em estruturas reais. Os itens avaliados e seus detalhes estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Variáveis de teste (Adaptado de KIM et al., 2013).

Item	O que foi avaliado?	Detalhes
Mecanismo do método colorimétrico	pH	10; 11; 12 e 13
	Concentração de NaCl (kg/m ³)	0,1-1,0
Influência do a/c na concentração de cloretos e na mudança de cor	Relação água/cimento	0,4; 0,5 e 0,6
Concentração ótima de AgNO ₃ para se realizar o ensaio	Concentração de AgNO ₃	0,03N; 0,04N; 0,05N e 0,1N
Aplicação no concreto	Em laboratório	Concentração de Cl ⁻ na região colorida
	<i>In situ</i>	Influência da carbonatação

Inicialmente foram realizados ensaios com pH=12 e alteração das concentrações de cloretos e das soluções de nitrato de prata, como pode ser observado na Figura 5. Segundo Kim *et al.* (2013), a alteração de cor foi mais claramente observada para concentrações de AgNO₃ superiores a 0,03N. Conforme a concentração de nitrato de prata aumenta, pode-se observar alteração na coloração. Nas baixas concentrações, essa mudança não é claramente visualizada e pode gerar erros (principalmente nas concentrações de 0,03 e 0,04N). Portanto, para mensurar a profundidade de penetração dos íons cloreto, os autores recomendam utilizar concentração de nitrato de prata acima de 0,05N.

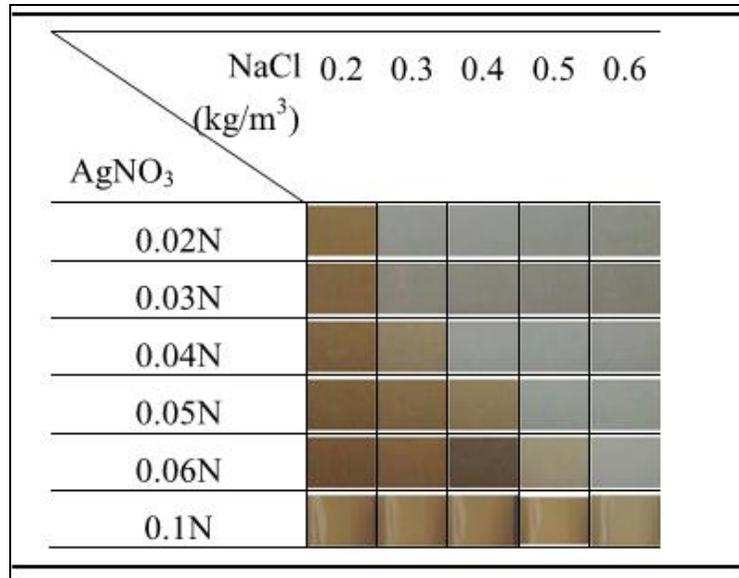


Figura 5. Determinação da concentração ótima de nitrato de prata e do teor mínimo de cloretos (KIM *et al.*, 2013).

Na sequência do estudo de Kim *et al.* (2013), quatro corpos de prova que foram submersos em água marinha por 3 meses, foram submetidos ao ensaio de aspersão de nitrato de prata a diferentes concentrações de AgNO₃, como se pode observar na Figura 6.

AgNO ₃	Mudança de cor	AgNO ₃	Mudança de cor
0.03N		0.05N	
0.04N		0.1N	

Figura 6. Mudança de cor conforme a concentração de AgNO₃ (Adaptado de KIM *et al.*, 2013).

Ao analisar os valores defendidos pelos distintos autores, pode-se dizer que a concentração da solução de AgNO₃ mais indicada para o método colorimétrico é de 0,1N. Porém, ainda não há um consenso quanto ao teor de cloretos que leva a mudança de cor. Mesmo as pesquisas mais atuais (He *et al.*, 2011 e KIM *et al.*, 2013) ainda não chegaram a valores próximos entre si, como pode ser observado na Tabela 2.

Tabela 2. Resumo das concentrações de AgNO_3 e % limite de cloretos para viragem de coloração.

Autor	Concentração de AgNO_3	% de cloretos sobre o peso de cimento
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 avaliar a influência do pH na coloração, Kim *et al.* (2013) ensaiaram, como apresenta a Figura 7, diversas concentrações de nitrato de prata e cloretos para diferentes valores de pH.

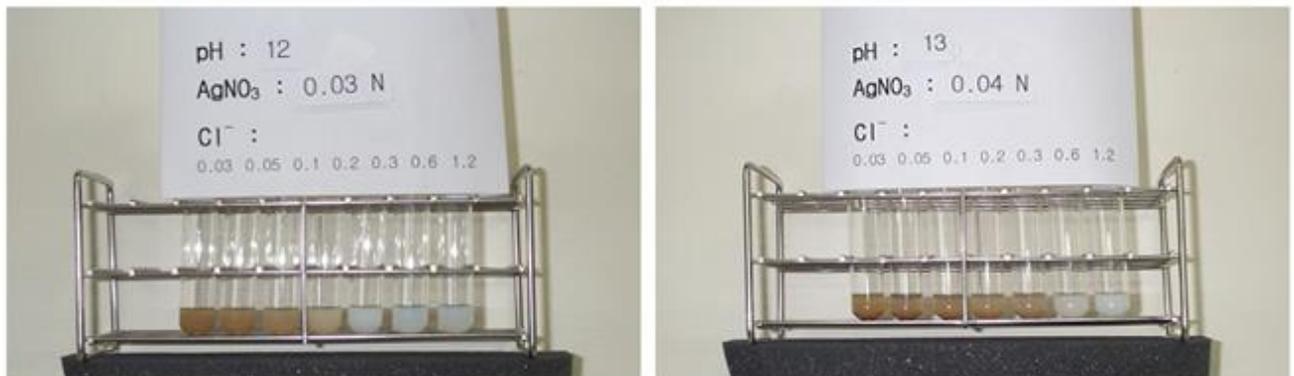


Figura 7. Análise da influência do pH na mudança de cor (KIM *et al.*, 2013).

Os resultados apresentaram que quando o pH está abaixo de 10, a medida da penetração de cloretos é impraticável (Figura 8). Portanto, quando a estrutura está exposta ao ataque por cloretos e ao CO_2 , a profundidade de carbonatação deve ser mensurada antes da profundidade de cloretos. Quando a profundidade de carbonatação é superior a de penetração de cloretos, é impossível, de acordo com Kim *et al.* (2013) determinar a segunda variável (penetração de cloretos livres) através da aspersão de nitrato de prata.

A relação água/cimento não influenciou a concentração de cloretos na fronteira de mudança de cor (KIM *et al.*, 2013), ou seja, ela não afeta o ponto de viragem para o método colorimétrico.

O método colorimétrico por aspersão de nitrato de prata pode ser utilizado, ao menos, como primeiro passo para quantificar a penetração dos cloretos dentro do concreto (Bouny *et al.*, 2007). No caso de estruturas expostas a ambientes marinhos e ao CO_2 , o emprego do método de aspersão de nitrato de prata torna-se complicado, sendo necessário associar o método com outros ensaios (Jucá, 2004; França, 2011; Mota 2011). Kim *et al.* (2013) aplicaram o método colorimétrico a estruturas de concreto armado expostas a cloretos e a rodovias expostas a sais de degelo para confirmar a aplicabilidade do ensaio. Como a carbonatação foi mais profunda do que a penetração de cloretos, foi

impossível aplicar o método colorimétrico, uma vez que ao se aspergir o nitrato de prata, a região de mudança de cor poderia indicar presença de carbonatação e não apenas a contaminação por cloretos.

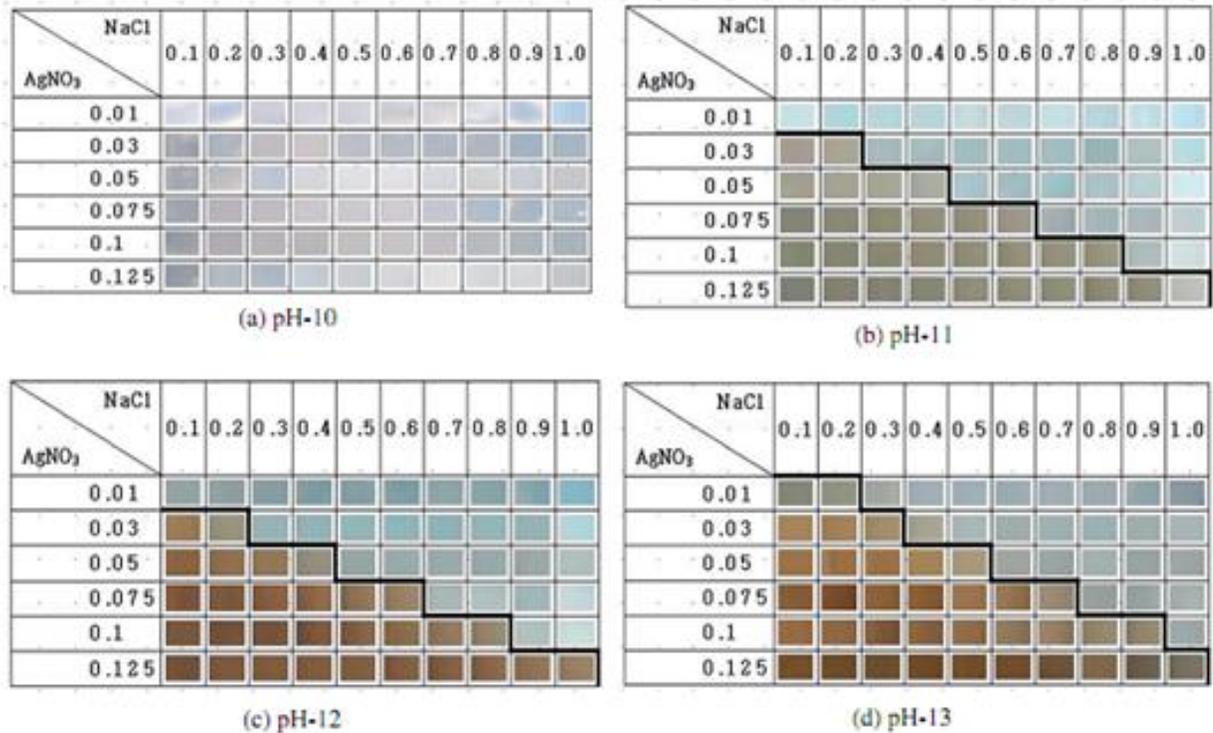


Figura 8. a) Coloração para pH=10 b) Coloração para pH=11 c) Coloração para pH=12 d) Coloração para pH=13 (KIM *et al.*, 2013)

5. OUTROS MÉTODOS COLORIMÉTRICOS UTILIZANDO NITRATO DE PRATA

Desde 1970, três métodos colorimétricos baseados em AgNO_3 (AgNO_3 + fluoresceína, AgNO_3 + K_2CrO_4 e AgNO_3) têm sido propostos para medir a profundidade de penetração de íons cloreto no concreto em campo e laboratório. Os dois métodos ainda não abordados estão descritos a seguir (He *et al.*, 2011):

AgNO_3 + fluoresceína: nos anos 70, Collepari *et al.* (1970; 1972) desenvolveram um método colorimétrico para determinar o cloreto livre contido no concreto, no qual, primeiramente, uma solução de fluoresceína (1g/L em uma solução de 70% de álcool etílico em água) foi aspergida em uma seção de concreto com penetração de cloretos. Em seguida, foi aplicado 0,1 mol/L de solução de nitrato de prata. Imediatamente depois da aspersão de nitrato de prata, houve a formação de Ag_2O e AgCl . A fluoresceína é um ácido orgânico fraco, que em solução se desassocia em um íon verde amarelado. Esse método foi definido como a Italian Standard 79-25 (1978).

AgNO_3 + K_2CrO_4 : Neste método, primeiramente, uma solução de 0,1 mol/L de AgNO_3 de pH=3-5 é aspergida em uma seção de concreto. Após uma hora de secagem natural, aplica-se a solução de K_2CrO_4 (5% em massa). Uma vez que a solução de cromato de potássio é aspergida, a zona contaminada por cloretos fica amarela devido à formação de AgCl branco e, em seguida, a aplicação da solução de K_2CrO_4 a deixa amarelada.

Comparação entre os três métodos: O método colorimétrico que utiliza apenas nitrato de prata é o mais simples entre os três; o uso de cromato de potássio e de fluoresceína exige maior tempo de reação para obter melhor efeito da coloração. O uso de AgNO_3 resulta em uma mudança clara na maioria dos casos, portanto, é o método mais utilizado. Na Figura 9 é possível observar que o limite de mudança de cor entre a zona que contém cloreto e a zona livre de cloretos é visível nos três casos. Entre os três, o uso de AgNO_3 + fluoresceína e o método AgNO_3 são muito similares. No entanto, o método AgNO_3 + fluoresceína não apresenta uma fronteira muito clara.

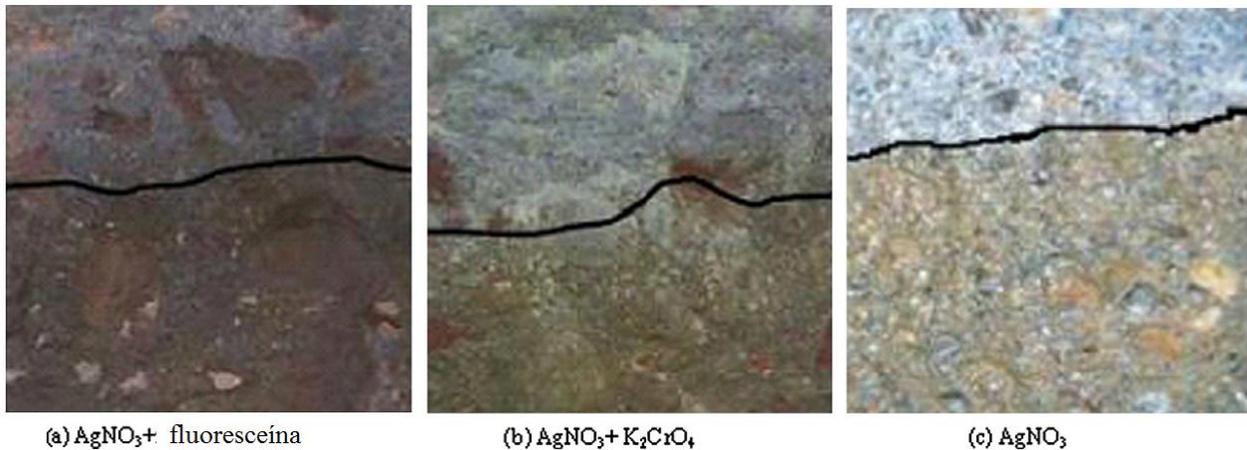


Figura 9. a) AgNO_3 + fluoresceína b) AgNO_3 + K_2CrO_4 c) AgNO_3 (Adaptado de He *et al.*, 2011).

4. CONCLUSÕES

O objetivo deste artigo foi produzir uma visão geral do estado da arte sobre o emprego do método colorimétrico por aspersão de nitrato de prata. Neste contexto tentou-se avaliar a aplicabilidade do método e a seguir estão algumas constatações produzidas com o estudo realizado:

1. O tipo de cimento influencia os resultados do método colorimétrico por combinar mais ou menos cloretos. Conforme o concreto passa dos 28 aos 56 dias, por exemplo, combina mais cloretos, reduzindo os cloretos livres, que são os responsáveis pela mudança de cor;
2. Recomenda-se a concentração de 0,1N AgNO_3 , pois essa permite uma clara mudança de cor, porém estudos com concentrações acima de 0,1N não foram encontradas e poderiam ser desenvolvidos para verificar se existiria melhora no contraste;
3. Ainda não há um consenso quanto ao teor de cloretos que leva a alteração da coloração, pois os estudos encontrados sobre o assunto são muito contraditórios com conclusões muito discrepantes entre si;
4. Quando o pH do concreto é inferior a 10 ou há carbonatação superior a penetração de cloretos, o método colorimétrico não pode ser aplicado sozinho. Deve-se empregar uma técnica de realcalinização, porém este tipo de prática para viabilizar o uso do método ainda não passa de uma ideia e o procedimento efetivo disso não está bem definido no meio técnico;
5. Para casos onde o ataque é exclusivamente por cloretos, o método colorimétrico é uma técnica qualitativa eficiente, prática e de baixo custo.

5. REFERÊNCIAS

- 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), *Inspeção 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*. 231 p. 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 en 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-sílica 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.