



## Hidratación e propiedades de cementos compuestos (com três adições) com filer calcáreo e escória

E. F. Irassar<sup>1</sup>, V. L. Bonavetti<sup>1</sup>, G. Menéndez<sup>2</sup>, M. F. Carrasco<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería - CIFICEN (CONICET-UNCPBA) - B7400JWI - Olavarría, Argentina

<sup>2</sup> Actualmente en la Universidad Tecnológica Nacional, Puerto Madryn, Chubut, Argentina

<sup>3</sup> Actualmente en la Universidad Tecnológica Nacional, Regional Santa Fe, Argentina

### Información del artículo

#### DOI:

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

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

© 2015 ALCONPAT Internacional

### Información Legal

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

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

## 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:** calcareous filler; slag; resistance; capillary absorption; 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 ( $w/mc = 0.50$ ), 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 ([firassar@fio.unicen.edu.ar](mailto:firassar@fio.unicen.edu.ar))

## 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 Brownnyard (Powers, 1948; Browers, 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  $100\text{cm}^2$  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 hidráulicamente 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 ( $\phi$ ) 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 ( $\alpha$ ), relação gel/espaco (X) e porosidade capilar ( $\phi$ ) dos concretos em estudo.

Concreto	CUMC kg/m <sup>3</sup>	F %	E %	Idade dias	Wn	$f'_c$ MPa	S g/cm <sup>2</sup> h <sup>1/2</sup>	a/c efetiva	$\alpha$	X	$\phi$ %
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 <sup>3</sup>	F %	E %	Idade dias	Wn	f' <sub>c</sub> MPa	S g/cm <sup>2</sup> h <sup>1/2</sup>	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 Wn 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 Wn.

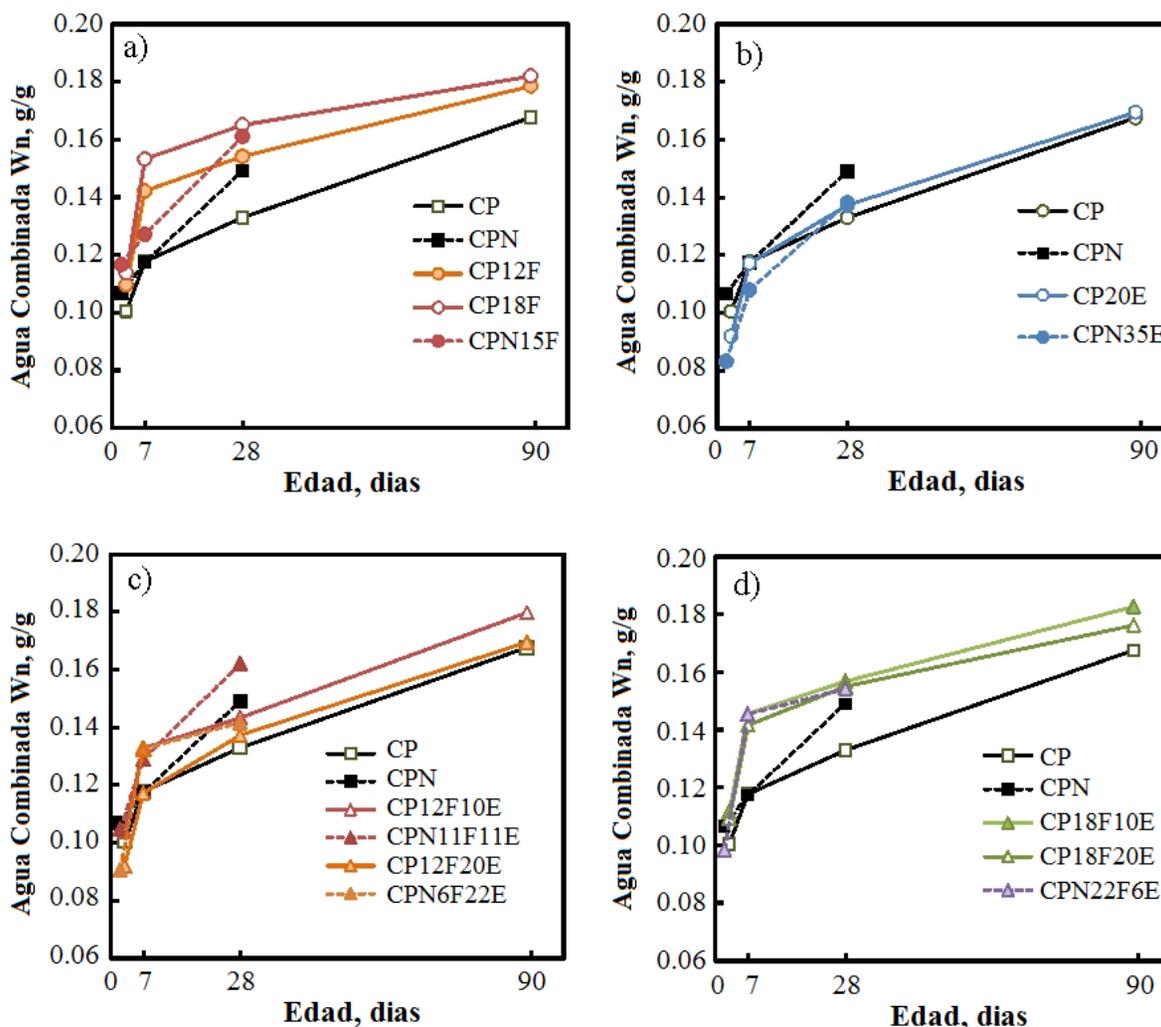


Figura 1: Evolução de água não evaporável (Wn) na matriz de concreto em função do tempo. a) cimentos compostos com duas adições com fíler; b) Cimentos compostos com duas adições com escória c) cimentos compostos com três adições com baixa proporção de fíler, d) cimentos compostos com três adições com 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.  $\chi_f$  e  $\chi_E$  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  $\chi_f$  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  $\chi_E$  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  $\chi_E$  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  $\chi_f$  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 ( $\alpha$ ) 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/espaco ( $X$ ) elevada a  $n$  (2).

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

A Figura 2 mostra a relação entre a resistência à compressão e a relação gel/espaco 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.

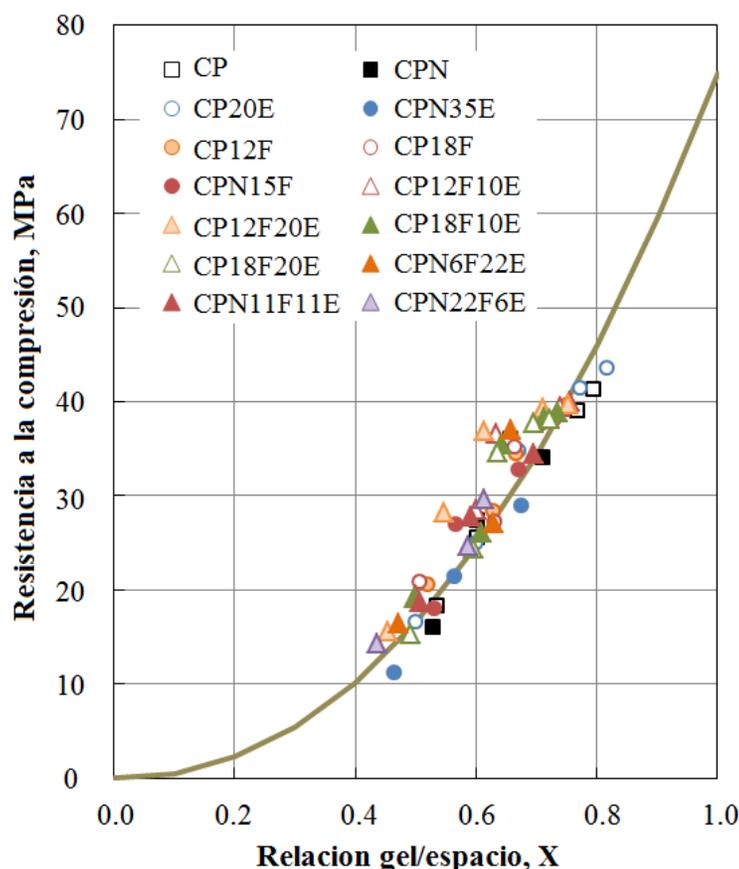


Figura 2. Resistencia à compressão vs. relação gel/espaco para todos os concretos estudados

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

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 ( $\phi$ ) segundo o modelo de Powers para o cimento Portland depende da razão a/c e do grau de hidratação ( $\alpha$ ) 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 28 dias, uma vez que o grau de hidratação é atingido, produzindo a segmentação dos poros. Entre 90 e 360 dias, 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.

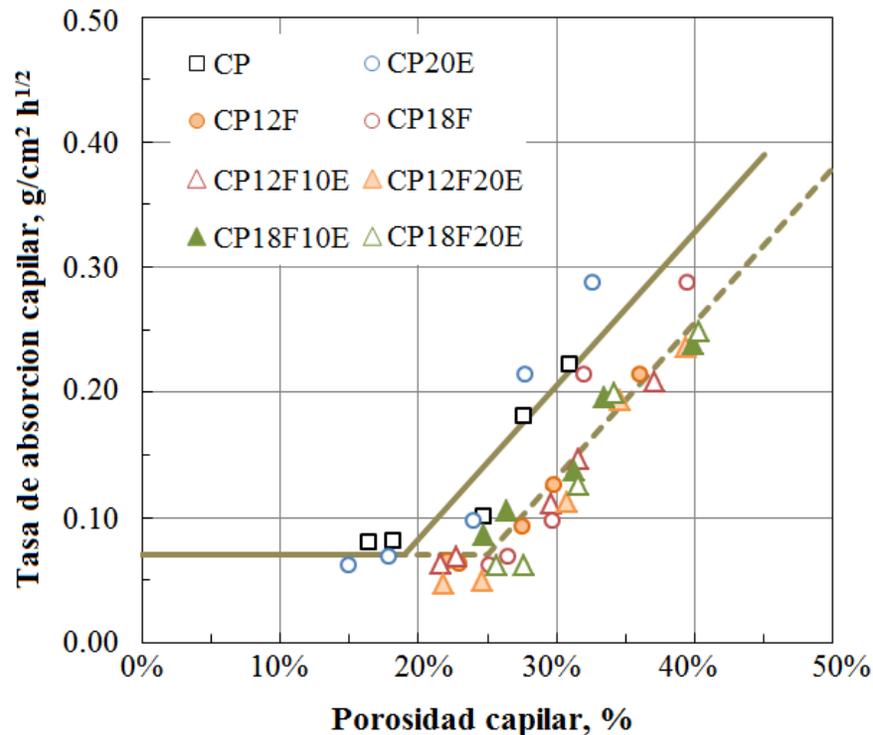


Figura 3. Relação entre a taxa de absorção capilar e a porosidade capilar da matriz

#### 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/espaço e porosidade capilar da matriz nos cimentos ternários. A relação entre os resultados do modelo e as propriedades do concreto determinadas experimentalmente concordam razoavelmente.

## 5. 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.