

Proposta de modelagem da carbonatação de concretos de cimento portland branco

Modelling proposal for the carbonation of white portland cement concrete

Ana Paula Kirchheim
NORIE/LEME
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil
Escola de Engenharia
Universidade Federal do Rio
Grande do Sul
Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º
Andar, Centro
CEP 90035-190 - Porto Alegre,
RS - Brasil
Tel. (51) 3316 3518
Fax (51) 3316 4054
E-mail: anapaula.k@bol.com.br

Ana Paula Kirchheim
Vanessa Rheinheimer
Denise Carpena Coitinho Dal Molin
José Luís Duarte Ribeiro

Vanessa Rheinheimer
Universidade Federal do Rio
Grande do Sul
Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º
Andar, Centro
CEP 90035-190 - Porto Alegre,
RS - Brasil
Tel. (51) 3333.1961
E-mail: vane.civ@yahoo.com.br

Denise C.C. Dal Molin
NORIE
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil
Escola de Engenharia
Universidade Federal do Rio
Grande do Sul
Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º
Andar, Centro
CEP 90035-190 - Porto Alegre,
RS - Brasil
Tel. (51) 3316 3321
Fax (51) 3316 4054
E-mail: dmolin@ufrgs.br

José Luís Duarte Ribeiro
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Produção
Universidade Federal do Rio
Grande do Sul
Rua Praça Argentina, 9
CEP 90040-020 - Porto Alegre,
RS, Brasil
Tel: (51) 3316.4005
E-mail: ribeiro@ufrgs.br

Recebido em 10/09/03
Aceito em 03/02/04

Resumo

Este trabalho descreve um estudo experimental cujo objetivo foi avaliar a resistência à compressão e à carbonatação de concretos moldados com quatro tipos de cimento Portland branco estrutural, comparando seus resultados com um concreto moldado com cimento Portland de alta resistência inicial (CPV), utilizado como referência. Investigou-se, também, a relação água/cimento (0,4; 0,5; 0,6). Os resultados obtidos mostram que o desempenho dos concretos moldados com os cimentos Portland branco estudados equivalem ao dos moldados com CPV. Em termos de carbonatação, os resultados experimentais foram modelados estatisticamente e apresentaram coeficientes de determinação superiores a 75%. Os modelos obtidos revelam que, no que se refere à carbonatação, o desempenho dos concretos moldados com cimento branco foi geralmente superior ao dos moldados com cimento CPV, exceto para um deles. Nesse caso, seriam necessários ajustes em sua composição física e química, para que este tenha uma melhora em seu desempenho.

Palavras-chave: Cimento Portland branco estrutural, carbonatação.

Abstract

This paper describes an experimental program that aimed to assess the compressive strength and carbonation results of concrete specimens made with four types of white cement. The high early strength cement (CP-V) was taken as a reference for comparison. The influence of the water/cement ratio (0,4; 0,5 and 0,6) was also investigated. The results showed that the compressive strength of the concrete made with white Portland cement was equivalent to the reference concrete. Also, carbonation tests indicated that the concrete made with structural white cement presented a slightly improved behavior when compared to the reference concrete, except for one of the models. The experimental results were analyzed statistically presenting a coefficient of determination greater than 75%. In this case, to reach a better performance some adjustments in the physical and chemical composition would be necessary.

Keywords: structural white Portland cement; carbonation.

Introdução

O cimento Portland branco é um tipo de cimento que se diferencia dos demais pela coloração. A cor branca é conseguida a partir da utilização de matérias-primas com baixos teores de óxido de ferro e manganês e pela aplicação de condições especiais durante a fabricação, especialmente com relação ao resfriamento e à moagem do produto (MEHTA; MONTEIRO, 1994; NEVILLE, 1997).

É um produto relativamente novo no mercado nacional, mas já é bastante utilizado em alguns países da América do Sul, nos Estados Unidos e, principalmente, na Europa. Contudo, assuntos relacionados ao seu estudo se caracterizam por serem inovadores, pois há deficiência de pesquisas nessa área.

Atualmente, a bibliografia sobre o tema não é ampla, encontrando-se poucas publicações, na maioria das vezes estrangeiras, referentes à produção (PUERTAS et al., 1995; PUERTAS et al., 1996, entre outros), propriedades químicas e físico-mecânicas (HAMAD, 1995) e, principalmente, pesquisas relacionadas à hidratação (BENSTED, 1983; SHING; SHING, 1989; SHING et al., 1992; STÜRMER et al., 1994; HEREN; ÖLMEZ, 1996, entre outros) e ao tempo de início e fim de pega (MENEK; HEREN, 1999) do cimento Portland branco, algumas vezes comparando-se as propriedades avaliadas com cimentos Portland cinza.

São raras as pesquisas relacionadas a características de durabilidade, sendo esse conhecimento, até mesmo em países que já o utilizam em grandes obras, deficiente. Já em relação às propriedades mecânicas, alguns estudos já foram realizados, principalmente comparando-se cimento Portland branco e cinza (HAMAD, 1995; KATZ, 2003; BENITEZ et al., 2002a; BENITEZ et al., 2002b). No Brasil, tanto a utilização quanto estudos que esclareçam as propriedades de concretos com cimento Portland branco são ainda incipientes, não existindo diretrizes seguras para sua produção e emprego, o que desperta o interesse em entender as características e propriedades desse tipo de cimento e, com isso, possibilitar o aumento da utilização correta do produto. Atualmente, existem duas fábricas no Brasil que produzem o cimento Portland branco estrutural. No entanto, é consenso que o produto final ainda pode necessitar ajustes para alcançar o desempenho necessário para seu uso na construção civil.

Alguns estudos já foram realizados, em concreto colorido, utilizando-se cimento Portland branco com adição de pigmentos por Helene e Galante

(1999), com a pretensão de encorajar o casamento da cultura latina, cheia de cores, com a tendência do concreto aparente da arquitetura urbana.

As possibilidades de uso desse material em concreto estrutural para fins arquitetônicos, obras civis de grande porte, produtos pré-moldados, entre outros, são irrefutavelmente extraordinárias. Esse produto, além de proporcionar um diferencial diante da sua beleza no projeto arquitetônico, possui vantagens como a boa refletância da radiação solar. Porém, o concreto com cimento Portland branco é um material cujas potencialidades, em termos de aparência estética e capacidade estrutural, somente são atingidas quando se opta por uma adequada prescrição e controle de etapas fundamentais nas diferentes fases do processo, que se entendem da concepção à execução (NERO; NUNES, 2000).

Percebe-se, assim, a necessidade de investigação de parâmetros construtivos e das características do próprio material, principalmente quando se trata de novos materiais ou novas utilizações de materiais convencionais. Em especial, recomenda-se a inclusão de conceitos de durabilidade, pois não se conhecendo o comportamento das construções no meio onde elas estão inseridas, não há como se prever a sua manutenção, o que pode tornar o custo dessas construções um tanto elevado. A falta de conhecimento dessas propriedades pode, ainda, aumentar as possibilidades de degradação das obras executadas com concretos moldados com cimento Portland branco estrutural.

Esses estudos podem permitir a transformação de um produto novo e ainda pouco utilizado em um material seguro e com difusão potencial e aumento de vendas, possibilitando, assim, com o aumento da demanda, a redução do seu preço.

Dessa forma, constitui-se fundamental o desenvolvimento de pesquisas com caráter esclarecedor das propriedades do concreto com cimento Portland branco, juntamente com possíveis métodos construtivos diferenciados e materiais apropriados. Essa foi a motivação deste trabalho.

Cimento Portland branco estrutural

O cimento Portland, tanto o cinza quanto o branco, é constituído por vários compostos, dos quais

quatro (C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF)¹ são os mais importantes e têm maior influência nas suas propriedades.

Para cimentos Portland comuns, a composição média desses compostos varia: para o C_3S , entre 50% e 70%, para o C_2S , entre 15% e 30%, para o C_3A , entre 5% e 10%, e para o C_4AF , entre 5% e 15% (LEA, 1970; TAYLOR, 1992). Além dos componentes principais, podem estar presentes compostos menores, como óxidos de cálcio livres, óxidos de sódio e potássio (denominados álcalis do cimento), de magnésio, manganês, fosfato, fluoretos e sulfatos. Esses componentes estão presentes no clínquer, e suas proporções dependem das composições da rocha calcária e argila, além das proporções da mistura desses materiais.

Analisando diversas publicações de trabalhos com cimento Portland branco estrutural (BENSTED, 1983; SINGH; SINGH, 1989; DUNSTER et al., 1994; STÜMER et al., 1994; HAMAD, 1995; HEREN; ÖLMEZ, 1996; RICHARDSON; GROVES, 1997; PORTLAND CEMENT ASSOCIATION, 1999; WERNER et al., 2000; SORA et al., 2001; HANSEN, 2001; ROTHSTEIN et al., 2002; CHANDRA; BJÖRNSTRÖN, 2002), que divulgaram a composição do cimento utilizado, os teores de cada um dos componentes variam entre: C_3S – 50% e 72%; C_2S – 0,4% e 30,7% (na maioria das publicações as porcentagens mais encontradas estavam na faixa de 15% a 30%); C_3A – 4% e 14%; C_4AF – menores que 1%. Pode-se notar, portanto, que a grande diferença na composição química dos cimentos Portland branco e cinza está na limitação do C_4AF , com possibilidade de aumento do teor de C_3A .

Essas diferenças nas proporções dos componentes químicos que o cimento Portland branco possui, quando comparado ao cinza, refletirá em mudanças no desempenho ante as propriedades do concreto com ele executado no estado fresco e endurecido, o que demonstra a necessidade de caracterizá-las.

Degradação do concreto

O material mais utilizado na construção civil sem dúvida é o concreto. Para Andrade (1997), “é praticamente inconcebível dissociar o desenvolvimento tecnológico da humanidade do desenvolvimento e do uso do concreto”.

A compatibilidade dos materiais constituintes bem como a conjugação do aço com o concreto

propiciam uma complementação físico-mecânica e química, o que explica o grande sucesso do emprego do concreto armado como material de construção. Entre as diversas razões para se fazer uso do concreto, além de ser resistente à água e facilmente executado numa variedade de formas e tamanhos, esse material possui baixo custo e é facilmente disponível no canteiro de obras.

Paralelamente a isso, durante muitos anos o concreto era considerado um material que não necessitava de maiores cuidados de manutenção, devido ao seu excelente desempenho nas obras onde se fazia uso. Assim, o concreto foi sendo empregado em larga escala, em diversos ambientes e sob condições de exposição extremamente desfavoráveis, o que acabou ocasionando uma redução significativa da durabilidade dessas estruturas (ANDRADE, 1997).

Segundo o CIB/RILEM (1983), a durabilidade é “a capacidade que um produto, componente ou construção possui de manter o seu desempenho acima dos níveis mínimos especificados, de maneira a atender às exigências dos usuários, em cada situação específica”. Isaia e Helene (1993) destacam que a “durabilidade adquire especial importância quando enfocada sob aspecto estrutural, tornando-se propriedade crítica se houver perda de desempenho que signifique tanto diminuição da segurança quanto redução da vida útil da construção”. Justificam que as conseqüências dessa situação podem ser cruciais porque a segurança de uma estrutura envolve aspectos referentes à sobrevivência (proteção à vida) e à integridade (proteção à propriedade).

Infelizmente, na indústria da construção civil, muitos produtos são empregados sem uma avaliação prévia do seu comportamento em serviço, o que tem caracterizado uma realidade na qual uma enorme parcela de edifícios tem apresentado problemas quanto à durabilidade.

Conforme Silva Filho (1994), diversas causas podem esclarecer essa situação, tais como a transmissão deficiente dos conhecimentos para o meio produtivo, a dificuldade de produzir ensaios de avaliação da durabilidade confiáveis, discrepâncias existentes entre o comportamento dos fenômenos de degradação em laboratório e na estrutura real, juntamente com o surgimento de novos materiais, ou a modificação dos existentes, não podendo deixar de fora a variação nas condições ambientais ao longo do tempo, como o agravamento da poluição nas zonas urbanas de grandes cidades.

¹ C = CaO; S = SiO₂, A = Al₂O₃; F = Fe₂O₃.

Entre os diversos tipos de manifestações patológicas encontradas em estruturas de concreto armado, a corrosão da armadura é a de maior incidência. Andrade (1997) relata que, para o estado de Pernambuco, a corrosão de armaduras corresponde a 64% das manifestações patológicas registradas. Já Aranha (1994) expõe que na região amazônica, a corrosão é registrada como 42,68% das manifestações patológicas para obras convencionais e como 52,63% para obras especiais.

A resistência das estruturas de concreto armado mediante a ação do meio ambiente para um mesmo uso dependerá da resistência do concreto e da resistência da armadura, e, conseqüentemente, a degradação de qualquer um desses componentes comprometerá a estrutura como um todo. Os principais agentes agressivos à armadura são: o gás carbônico (CO₂), responsável pela carbonatação, e os íons cloreto, que alteram a película passivadora. Já os agentes agressivos ao concreto são: ácidos que contribuem para a redução do pH e conseqüente elevação do risco de despassivação da armadura; e os sulfatos e reações álcali-agregado, que geram produtos expansivos, destruindo o concreto de cobrimento e de proteção da armadura, que, além de atacarem o concreto, atacam a armadura.

Conforme Levy e Helene (2000), foi constatado que em uma amostra de 27 escolas estaduais de São Paulo com problemas patológicos, 96%

apresentaram carbonatação do concreto além da espessura de cobrimento da armadura. Em 57% das escolas que apresentaram problemas de corrosão das armaduras, a carbonatação do concreto deu origem à patologia.

Sendo assim, estudos relacionados à carbonatação são indispensáveis para se obterem respostas no que se refere ao comportamento de concretos de cimento Portland branco. Pode-se afirmar, segundo John e Tudisco (1993), que avanços na compreensão da microestrutura e composição química do concreto e de seus mecanismos de degradação possibilitam projetar estruturas, levando-se em consideração não somente a estabilidade estrutural, mas também a vida útil desejada diante de determinados fatores de degradação.

Procedimento experimental

Caracterização dos materiais

Para a confecção dos corpos-de-prova, foram utilizados quatro tipos de cimento Portland branco estrutural (CPB1, CPB2, CPB3 e CPB4), além do cimento Portland de alta resistência inicial (CPV), utilizado como referência. A caracterização físico-mecânica e química dos cimentos utilizados pode ser observada na Tabela 1.

Composição Química	Teor (% em massa)					
	CPV	CPB1	CPB2	CPB3	CPB4	
Perda ao fogo (PF)	3,76	9,37	7,01	2,09	2,16	
Resíduo Insolúvel (RI)	0,54	1,80	1,29	0,35	0,26	
Anidrido Carbônico (CO ₂)	2,45	8,61	5,27	0,33	0,58	
C ₃ S	78,37	84,36	80,89	70,42	73,43	
C ₂ S	-	-	-	10,74	14,92	
C ₃ A	5,47	9,09	9,41	11,01	4,96	
C ₄ AF	8,79	0,49	0,52	0,64	1,10	
Finura – Resíduo na peneira de 75 µm – 200%	0,5	0,4	0,4	0,9	10,3	
Massa Específica (gm/cm ³)	3,09	2,99	2,99	3,05	3,07	
Superfície Específica (cm ² /g) – Blaine	4190	4500	4380	3490	3950	
Água da pasta de consistência normal (%)	29,8	33,0	31,4	28,2	31,8	
Início de pega (h:min)	3:05	2:35	2:40	1:20	2:05	
Fim de pega (h:min)	4:25	3:25	3:40	2:10	3:25	
Expansibilidade de Le Chatelier – a Frio (mm)	1,0	1,5	2,5	3,0	0,5	
Expansibilidade de Le Chatelier – a Quente (mm)	0,5	0,5	0,5	1,0	10,0	
Resistência à compressão (MPa)	1 dia	14,6	-	-	-	
	3 dias	34,6	23,4	26,0	29,1	22,7
	7 dias	40,7	31,3	35,4	36,7	33,1
	28 dias	-	45,4	51,1	47,1	51,0

Tabela 1 - Caracterização físico-mecânica e química dos cimentos utilizados

	Agregado miúdo	Agregado graúdo
Dimensão máxima característica (mm)	2,4	19,0
Módulo de finura (NBR 7217, ABNT, 1987a)	2,7	6,88
Massa específica (NBR 9937, ABNT, 1987c) (kg/dm ³)	2,6	2,8

Tabela 2 - Características físicas dos agregados utilizados

Para a confecção dos corpos-de-prova de concreto, foi utilizado agregado miúdo de origem quartzosa, disponível comercialmente, no qual não se constatou a presença de impurezas orgânicas, determinada de acordo com a NBR 7220 (ABNT, 1987b).

O agregado graúdo utilizado possui origem basáltica. Segundo a NBR 7211 (ABNT, 1983), pode ser classificado como brita 1 e com dimensão máxima característica de 19 mm. As características físicas dos agregados utilizados estão relacionadas na Tabela 2.

Método de dosagem

Utilizou-se a metodologia de dosagem do IPT/EPUSP, descrito por Helene e Terzian (1992), cujos parâmetros foram a obtenção de um abatimento de tronco de cone de (70 ± 10) mm e a manutenção de um teor de argamassa de 53%, determinado experimentalmente. O concreto moldado com cimento Portland CPV foi utilizado como referência. A Tabela 3 apresenta os traços resultantes da dosagem. Todas as concretagens utilizaram esses traços, variando apenas o tipo de cimento.

Referência - CPV

Relação água/cimento	Traço em massa	Consumo cimento (kg/m³)
0,40	1 : 1,43 : 2,16	487,3
0,50	1 : 2,09 : 2,74	382,7
0,60	1 : 2,75 : 3,33	315,0

Tabela 3 - Traços utilizados

O controle da trabalhabilidade foi realizado mediante ensaio de abatimento de tronco de cone (*slump*), segundo o procedimento sugerido na norma NBR 7223. Para determinados traços (os moldados com CPB1, CPB2 e alguns CPB4), tornou-se necessário o uso de aditivo superplastificante à base de éster policarboxílico modificado, a fim de obter-se uma consistência adequada ao uso. A dosagem utilizada nesses concretos variou entre 0,05% e 0,25% sobre a massa de cimento, sendo o aditivo colocado sem diluição, ao final da dosagem, nos casos em que o concreto não atingiu o *slump* especificado (7 ± 1) cm.

Como desmoldante, foi utilizada parafina líquida, aplicada com esponja embebida no produto momentos antes da concretagem, uma vez que, no concreto aparente, em especial no concreto branco, não é possível recorrer aos óleos habituais de desmoldagem, sob pena de surgirem manchas de gordura.

O adensamento foi feito de forma mecânica.

A cura deu-se por 28 dias em câmara úmida com temperatura de (23 ± 2) °C e umidade relativa superior a 95%, conforme a NBR 9479 (ABNT, 1994).

Avaliação da resistência à compressão axial

O método de ensaio de resistência à compressão do concreto segue as determinações da norma NBR 5739 (ABNT, 1994a). Os corpos-de-prova, de dimensões 9,5 cm x 19,5 cm, foram mantidos em processo de cura úmida até a idade de ensaio. Para cada idade – 3, 14 e 28 dias – foram concretados três corpos-de-prova.

Ensaio de carbonatação acelerada

A carbonatação foi avaliada submetendo os corpos-de-prova ao ensaio de carbonatação acelerada. A utilização de ensaios acelerados é justificada devido à dificuldade de realização de ensaios de longa duração. Diversos pesquisadores já adotaram esse ensaio para medição da carbonatação, entre eles Nepomuceno (1992), Bauer (1995), Kazmierczak (1995), Monteiro (1996), Martins et al. (2001), Coelho et al. (2002), Pessôa e Nepomuceno (2002) e Silva e Libório (2002). No entanto, cada autor diferiu em alguns processos, seguindo uma determinada metodologia, já que não existe método de ensaio normalizado.

No âmbito das pesquisas de carbonatação, a inexistência de metodologia se torna polêmica. Para que os resultados entre pesquisas distintas possam ser comparáveis, existe a necessidade da elaboração de uma regulamentação que defina alguns parâmetros para o ensaio acelerado de carbonatação, tais como a concentração de CO₂ na câmara, a idade de cura úmida e pré-cura ao ar dos

concretos antes de acelerar o processo, entre outros. Vagheti (1999), Vagheti et al. (2001) e Isaia (2002) já haviam relatado tal preocupação, uma vez que mesmo pesquisas exaustivamente planejadas e executadas se tornam muitas vezes únicas e sem possibilidade de comparações no meio técnico.

Para este ensaio foram utilizados corpos-de-prova prismáticos na dimensão de 6,0 x 6,0 x 18,0 cm (comprimento x largura x altura), possibilitando fatias de 3,0 cm (conforme sugestões feitas pela REUNION INTERNATIONALE DE LABORATOIRES D'ESSAIS ET MATERIAUS, 1984). Segundo essas recomendações, para estudos de carbonatação em concreto, os corpos-de-prova devem ser prismáticos e possuir dimensões compatíveis que possibilitem a extração de fatias, cuja dimensão seja a metade da aresta do corpo-de-prova. Neste estudo, definiu-se que as fatias teriam 3,0 cm. As dimensões dos corpos-de-prova são definidas pelo tamanho do agregado graúdo utilizado, e a aresta deve ser, no mínimo, três vezes a dimensão máxima característica do agregado graúdo. Por exemplo, 3 x brita # 19,0 mm = 57,0 mm = 5,7 cm \approx 6,0 cm.

Após a cura, em câmara úmida por 28 dias, os corpos-de-prova foram colocados em câmara de sazonalamento até atingir a constância de massa entre pesagens de 0,1%, em um período de aproximadamente uma semana. A câmara de sazonalamento é provida de uma bomba que permite que o ar circulante seja constantemente filtrado em uma solução de hidróxido de potássio (KOH), que retém o CO₂ existente na atmosfera. Essa câmara juntamente com a câmara de carbonatação encontram-se em sala de ambiente controlado, cujos dispositivos estão ajustados para uma umidade relativa de (70 \pm 2)% e temperatura de (25 \pm 5) °C.

Após isso, foram embalados com papel filme e saco plástico (Figura 1), e armazenados por 59 dias em câmara climatizada, para que ocorresse a distribuição uniforme da umidade interna dos corpos-de-prova. Assim que atingiram a idade de 59 dias, os corpos-de-prova foram desembalados, cada fatia foi identificada e recebeu aplicação de parafina sólida no topo e na base, com o objetivo de impermeabilizá-las para que a carbonatação ocorresse somente nas paredes laterais (Figura 2).



Figura 1 - Corpo-de-prova embalado para homogeneização



Figura 2 - Corpo-de-prova recebendo aplicação de parafina

Os corpos-de-prova, após preparados, foram dispostos sobre um gabarito metálico, que define seus lugares dentro da câmara de carbonatação (Figura 3). Essa câmara consiste em uma caixa térmica de 60 litros, vedada, a qual foi alimentada por um fluxo de gás proveniente de um cilindro de gás carbônico (CO₂), sendo controlado por um regulador de vazão acoplado a esse cilindro. A vazão utilizada foi de 10 litros/minuto, circulando o gás durante 24 minutos por dia, totalizando a passagem do gás por quatro vezes.

A determinação da profundidade de carbonatação foi feita por meio de aspersão de uma solução de fenolftaleína em álcool na concentração de 1/100, que se apresenta incolor em pH inferior a 9,2 e se torna violeta em pH superior a este. A aspersão do líquido foi feita em uma região recém-fraturada do concreto, antes que a face exposta pela fratura pudesse carbonatar pelo contato com o ar. Teve-se o cuidado de que a superfície do concreto não se encontrasse molhada ou com excesso de poeira, para evitar erros na determinação da profundidade de carbonatação.

A leitura foi feita com um paquímetro digital, com o qual foram lidos 12 pontos preestabelecidos, conforme a Figura 4. Essas leituras foram feitas até uma hora após o corpo-de-prova ser partido.



Figura 3 - Corpos-de-prova dispostos dentro da câmara, sobre o gabarito

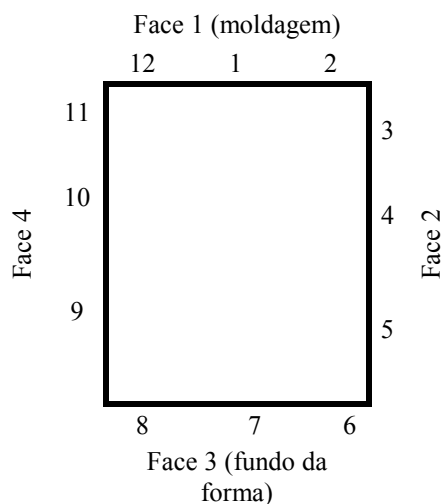


Figura 4 - Identificação das faces dos corpos-de-prova para ensaio de carbonatação

Resultados obtidos

Avaliação da resistência à compressão axial

A resistência à compressão axial foi avaliada nas idades de 3, 14 e 28 dias. Os resultados relativos à

compressão axial constam na Tabela 4, onde cada resultado representa a média de resistência de três corpos-de-prova.

Para a análise da significância em relação ao tipo de cimento, a idade e a relação água/cimento, bem como suas interações, foi feita uma Análise de Variância (ANOVA), utilizando o programa *Statistica*, considerando-se todos os tipos de cimento, e obtiveram-se os resultados que constam na Tabela 5.

Em ordem de importância, a relação água/cimento, a idade, o tipo de cimento, a interação entre a relação água/cimento e o tipo de cimento, e a interação entre o tipo de cimento e a idade exerceram efeito estatisticamente significativo sobre os resultados da resistência à compressão. No gráfico da Figura 5 são apresentados os valores de resistência à compressão em função da interação entre o tipo de cimento e a idade.

a) Idade		Tipo de cimento				
3 dias		CPV	CPB1	CPB2	CPB3	CPB4
a/c*	0,4	38,57	30,61	33,04	35,46	34,07
	0,5	26,93	22,27	23,14	23,94	19,89
	0,6	18,99	14,92	14,83	16,34	14,06
b) Idade		Tipo de cimento				
14 dias		CPV	CPB1	CPB2	CPB3	CPB4
a/c*	0,4	41,12	37,08	41,52	42,84	45,59
	0,5	33,76	29,46	29,51	32,89	29,13
	0,6	26,04	22,50	23,34	23,94	21,30
c) Idade		Tipo de cimento				
28 dias		CPV	CPB1	CPB2	CPB3	CPB4
a/c*	0,4	43,45	37,97	45,87	45,31	45,22
	0,5	33,84	32,40	32,31	33,25	33,20
	0,6	27,16	24,29	24,44	26,52	23,96

*a/c = relação água/cimento

Tabela 4 - Resistência à compressão (MPa) para as três idades de ensaio

Fonte	SQ	GDL	SQR	F	Valor de P	Efeito
1 – água/cimento	4193,36	2	110,00	920,38	0,000	Significativo
2 – cimento	83,28	4	110,00	18,28	0,000	Significativo
3 – idade	1223,76	2	110,00	268,60	0,000	Significativo
Interação 12	22,30	8	110,00	4,89	0,000	Significativo
Interação 13	0,36	4	110,00	0,08	0,989	Não Signif.
Interação 23	9,51	8	110,00	2,09	0,043	Significativo
Interação 123	5,01	16	110,00	1,10	0,364	Não Signif.

Tabela 5 - Análise de variância - resistência à compressão

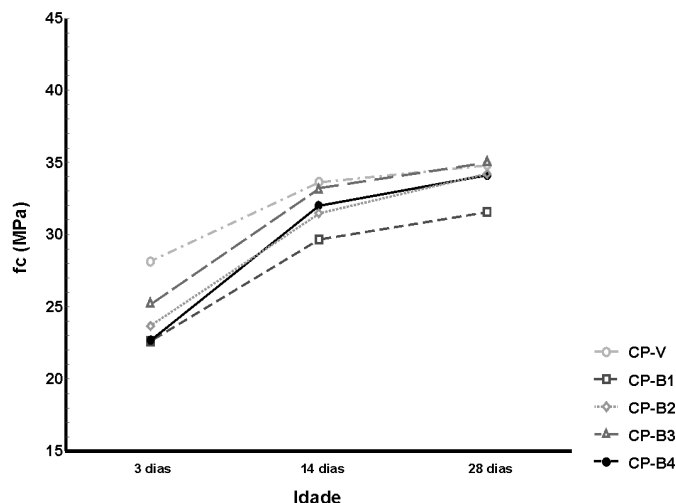


Figura 5 - Resistência à compressão em função da interação entre o tipo de cimento e a idade

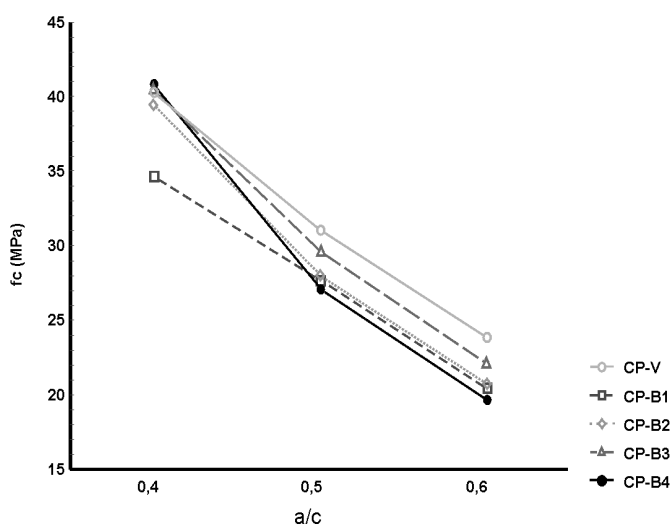


Figura 6 - Resistência à compressão em função da relação água/cimento (a/c) e do tipo de cimento

Na Figura 1 observa-se o efeito do tipo de cimento e da idade. Nota-se que a resistência dos cimentos cresce de forma um pouco diferenciada com a idade, ou seja, o CPB4, aos 3 dias, possui 66% da resistência dos 28 dias, enquanto o CPV possui 81%. Os demais cimentos possuem, aos 3 dias, cerca de 70% da resistência dos 28 dias, crescendo de forma similar dos 3 aos 14 dias. O maior crescimento, de quase 30%, dos 3 aos 14 dias, foi o do CPB4. Observa-se, também, que todos os cimentos atingiram grandes valores de resistência nos primeiros 14 dias (cerca de 95% da resistência dos 28 dias) e, após, o aumento de resistência não é tão significativo. Para as três idades, o concreto moldado com CPV teve maiores valores de resistência à compressão, sendo cerca de 9% superior, aos 28 dias, que a do cimento CPB1, que atingiu o menor valor de resistência à compressão.

O gráfico da Figura 6 apresenta o efeito do tipo de cimento e da relação água/cimento. Novamente, observa-se interação entre os fatores. Observa-se que a influência da relação água/cimento depende do tipo de cimento, ou seja, o CPB4 possui a maior resistência para a relação água/cimento (0,4) e a menor para a relação água/cimento (0,6), variando cerca de 110% nesse intervalo. Já o CPV mantém-se junto às maiores resistências para todas as relações água/cimento, variando cerca de 65% da relação água/cimento 0,6 para 0,4.

Nota-se que, como esperado, a resistência à compressão dos cinco tipos de cimento estudados decresce significativamente com o aumento da relação água/cimento. Esse comportamento já é consenso no meio técnico. Logo, a resistência de um concreto depende, fundamentalmente, de sua

relação água/cimento e do grau de hidratação, desde que o mesmo esteja bem adensado.

Avaliação da profundidade de carbonatação

Por ser concreto, as frentes de carbonatação em cada face não foram regulares. As faces de moldagem e fundo da forma não obtiveram valores homogêneos, provavelmente por problemas de exsudação, o que justifica a sua não-utilização na análise dos dados. Sendo assim, durante a análise, escolheu-se a profundidade média das faces laterais (Figura 4) como parâmetro de comparação, já que esses valores eram os que melhor indicavam um crescimento com a idade da frente de carbonatação.

O tratamento estatístico dos dados obtidos para carbonatação foi realizado por meio de regressão múltipla não-linear com auxílio do software SPSS 8.0. Inicialmente, foi determinada a tendência de curva do modelo não-linear, tendo em vista o comportamento observado nos ensaios. Em seguida, foi feito o ajuste dos coeficientes. O modelo proposto está apresentado na equação 1.

$$Pmf_{laterais} = B_0 \times ac^{B_1} \times id^{B_2} \quad (1)$$

Onde:

$Pmf_{laterais}$ = profundidade média de carbonatação das faces laterais;

ac = relação água/cimento;

id = idade do concreto;

B_0 , B_1 e B_2 = constantes calculadas pelo programa SPSS 8.0.

Pela análise estatística, foram encontradas as estimativas dos coeficientes, que permitem delimitar os modelos, apresentados nas equações 2 a 6.

$$Pmf_{laterais\ CPB1} = 53,0 \times ac^{6,5} \times id^{0,6} \quad R^2=75,0\% \quad (2)$$

$$Pmf_{laterais\ CPB2} = 245,0 \times ac^{9,3} \times id^{0,5} \quad R^2=80,0\% \quad (3)$$

$$Pmf_{laterais\ CPB3} = 332,0 \times ac^{12,8} \times id^{0,5} \quad R^2=75,0\% \quad (4)$$

$$Pmf_{laterais\ CPB4} = 217,3 \times ac^{10,33} \times id^{0,5} \quad R^2=77,4\% \quad (5)$$

$$Pmf_{laterais\ CPV} = 2579,5 \times ac^{13,8} \times id^{0,5} \quad R^2=86,0\% \quad (6)$$

A influência da idade sobre o CPB1 foi um pouco diferente da dos demais. Enquanto a profundidade de carbonatação dos demais cimentos guardava relação com a raiz quadrada da idade (coeficiente = 0,5), para o CPB1 o coeficiente encontrado foi 0,6. Comparado aos demais cimentos, o CPB1, nas idades iniciais, apresenta um efeito relativamente mais fraco e, com o passar do tempo, esse efeito

passa a ser relativamente mais forte. As causas desse comportamento ainda demandam maiores investigações.

A Tabela 6 mostra as profundidades carbonatadas em função da idade para os concretos moldados com cimento Portland branco estrutural para as três relações água/cimento delimitadas (0,4; 0,5; 0,6), juntamente com os valores de profundidade definidos pelo modelo correspondente para cada idade de leitura e tipo de concreto.

A Figura 7 apresenta as curvas dos modelos previstos, com todos os concretos analisados nas relações água/cimento 0,5 e 0,6 (já que, para a relação água/cimento 0,4, os valores não foram significativos), variando a sua idade. A Figura 8 mostra o comportamento da profundidade de carbonatação em função da relação água/cimento.

Analisando os resultados, percebe-se que todos os concretos moldados com CPB1 apresentaram desempenho inferior quando comparados com os demais concretos. Comparando-se os concretos moldados com os outros tipos de cimento Portland branco com o concreto de referência, todos apresentaram desempenho superior, exceto para a relação água/cimento 0,6 com o concreto moldado com CPB2.

Observando a composição química dos cimentos (Tabela 1), notou-se que a profundidade de carbonatação dos diferentes tipos de cimento seguiu uma tendência de comportamento que parece estar relacionada com os teores de resíduo insolúvel (RI) e anidrido carbônico (CO₂), como mostra a Figura 9. Para melhor visualização dessa tendência no gráfico, o eixo y foi fixado em valores apenas comparativos. Por isso, alguns componentes, para que melhor se enquadrassem no eixo y, foram divididos ou multiplicados por valores definidos conforme necessário (como por exemplo, RI * 5). A determinação do resíduo insolúvel permite detectar o grau de combinações entre os diferentes componentes das matérias-primas, que podem ser adições de substâncias inertes, tais como calcário e argila, mas estas, em quantidades desproporcionadas, influem de forma negativa nas propriedades do cimento. Por exemplo, observando apenas os cimentos brancos, o CPB3 (melhor desempenho) possui valor para resíduo insolúvel e anidrido carbônico inferior aos demais cimentos (RI = 0,35 e CO₂ = 0,33). Já o CPB1 (pior desempenho) possui valores mais elevados (RI = 1,8 e CO₂ = 8,61). Os valores dos demais aumentam na mesma seqüência de resultados para os concretos analisados ante o fenômeno de carbonatação.

	0,4			0,5			0,6		
	Id	Pm	Pmf prev	Id	Pmf laterais	Pmf prev	Id	Pmf laterais	Pmf prev
CPB1	100	0,0	2,2	49	3,6	6,1	13	5,1	8,9
	156	0,0	2,8	56	5,0	6,6	14	8,6	9,3
	221	0,0	3,5	63	5,3	7,0	16	9,6	10,1
				70	8,8	7,5	16	10,9	10,1
				86	10,7	8,5	23	12,1	12,6
				156	11,1	12,1	29	18,0	14,4
				170	14,3	12,8	29	19,9	14,4
			176	23,7	13,0	36	29,6	16,5	
CPB2	114	0,0	0,5	14	1,2	1,5	9	1,9	6,4
	170	0,0	0,6	28	1,5	2,1	13	4,8	7,6
	221	0,0	0,7	35	2,0	2,3	14	5,2	7,9
				70	3,6	3,3	16	6,1	8,5
				114	3,7	4,2	23	8,0	10,2
				156	5,2	4,8	30	12,7	11,6
				170	5,2	5,1	36	17,0	12,7
						43	17,1	13,9	
CPB3	121	0,0	0,3	92	0,9	1,7	28	1,1	4,2
	172	0,0	0,4	121	0,5	2,0	35	2,2	4,7
							41	4,0	5,1
							44	2,4	5,3
							51	2,5	5,7
							99	7,7	7,8
							100	11,0	7,9
						107	5,7	8,2	
						128	8,3	8,9	
						134	10,2	9,2	
CPB4	121	0,0	0,1	42	0,6	1,1	24	1,8	5,4
	165	0,0	0,2	85	0,5	1,6	28	2,2	5,9
	172	0,0	0,2	92	2,3	1,6	35	4,0	6,6
				121	1,5	1,9	42	5,2	7,2
							44	4,9	7,4
							51	7,9	7,9
							56	7,9	8,3
						84	13,8	10,2	
						128	17,0	12,6	
CPV	163	0	0,1	84	1,6	1,7	21	7,4	13,6
	214	0	0,1	100	1,8	1,8	54	16,3	16,5
				121	1,7	2,0	54	18,2	16,5
				149	1,8	2,2	72	27,4	19,0
				163	3,2	2,3	72	17,9	19,0
						84	14,9	20,5	

* As medidas são apresentadas em mm, sendo Pmf_{laterais} a profundidade média da face carbonatada medida experimentalmente. A coluna indicada como Pmf_{prev} representa a profundidade média carbonatada prevista pelos modelos ajustados, sendo Id a idade em dias.

Tabela 6 - Profundidades médias carbonatadas

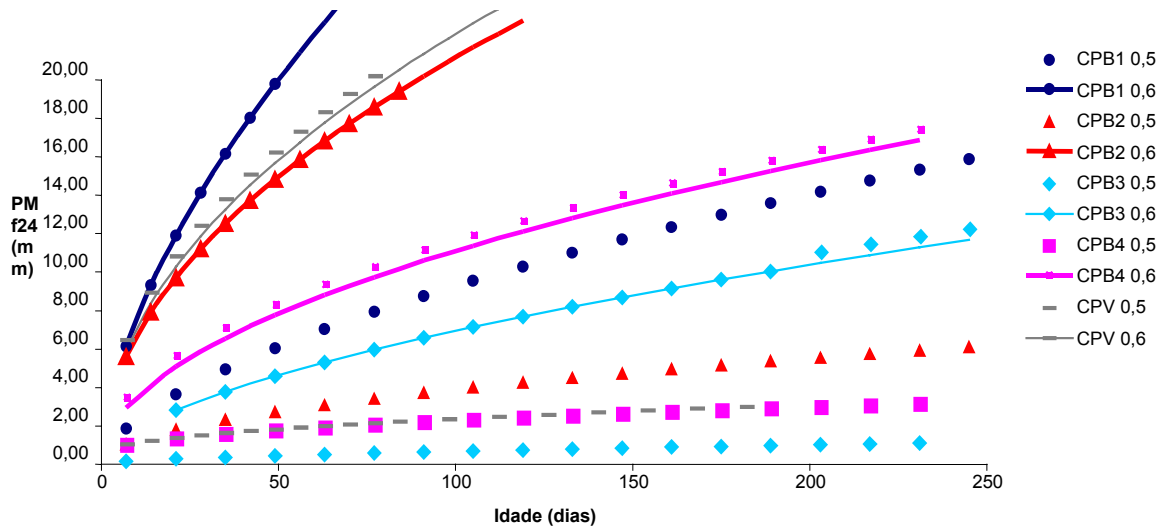


Figura 7 - Curvas do modelo de profundidade de carbonatação em função da idade

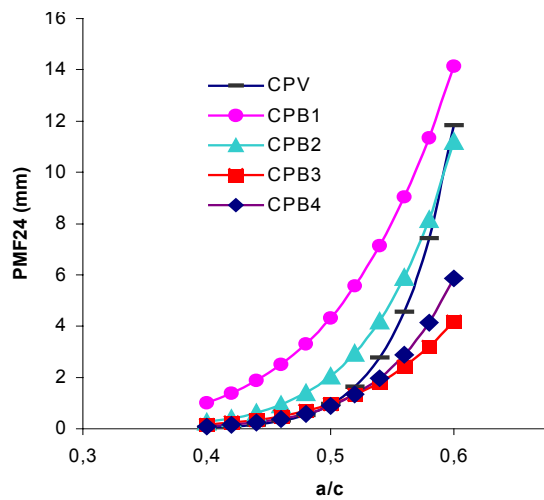


Figura 8 - Curvas do modelo de profundidade de carbonatação em função da relação água/cimento

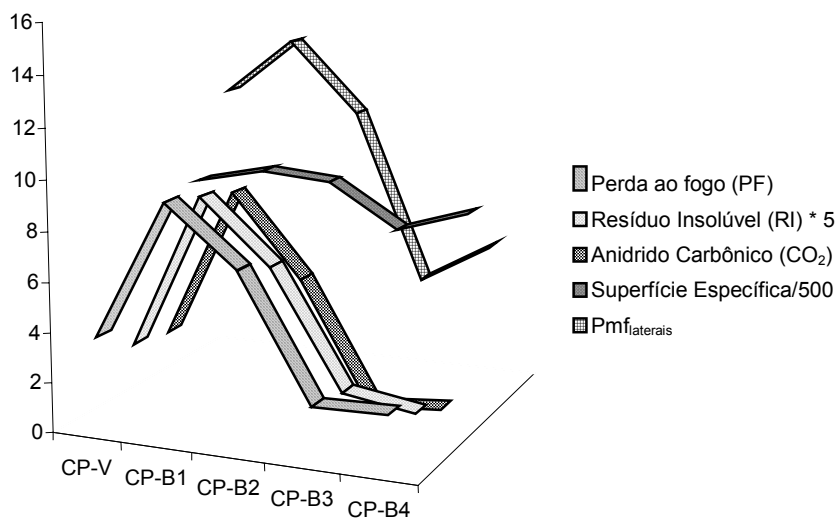


Figura 9 - Resultados obtidos na caracterização de cada tipo de cimento comparados à profundidade de carbonatação

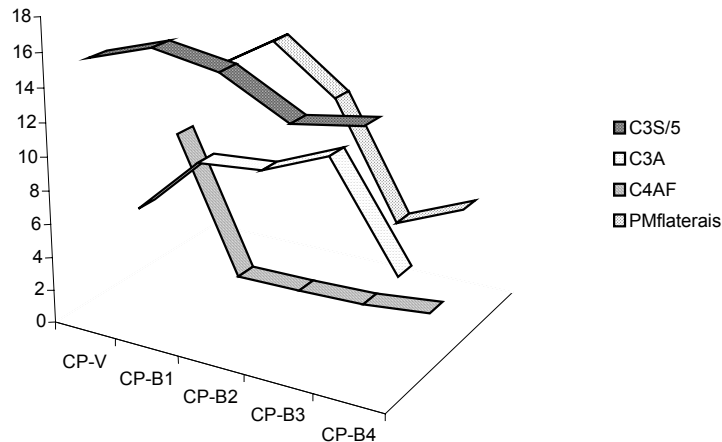


Figura 10 - Compostos químicos de cada tipo de cimento comparados à profundidade de carbonatação

Da mesma forma, os valores encontrados para perda ao fogo (PF) seguem a mesma tendência que os resultados encontrados no ensaio de carbonatação. A determinação da PF do cimento visa a verificar a boa cozedura e o grau de envelhecimento natural do cimento (fixação por parte dos componentes anidros mais instáveis, do vapor de água existente no ar, provocando reações incipientes de hidratação, provocando a redução da sua resistência mecânica). A carbonatação dos concretos com cimentos brancos seguiu a mesma tendência que seguiu a PF, ou seja, quanto maior a PF, maior a carbonatação. Os valores para cada cimento são de: CPB1 – PF = 9,37; CPB2 – PF = 7,01; CPB4 – PF = 2,16; CPB3 – PF = 2,09. No entanto, todos os valores se encontram dentro do limite máximo que a NBR 12989 determina.

Outra tendência observada foi com relação aos valores encontrados para superfície específica (*blaine*). O CPB1 teve maior superfície específica (4.500 cm²/g), e, na sequência, o CPB2 e o CPB4. O cimento que obteve menor superfície específica foi o CPB3 (3.490 cm²/g).

Quando a carbonatação é comparada às porcentagens de compostos químicos do cimento, o único composto que parece ter alguma correlação direta, em função de suas quantidades e proporções entre cimentos, é o C₃S, conforme pode ser visualizado no gráfico da Figura 10. No entanto, a comparação não parece ser conclusiva, já que esses compostos químicos podem reagir conjuntamente ou não.

Nos raros trabalhos que abordam carbonatação de concretos com cimento Portland branco (KATZ, 2003; CARVALHO; CALAVEIRA, 2002), foi constatado que os concretos de cimentos brancos tiveram desempenho superior aos de cimentos

cinzas, mas a falta de análise química dos cimentos utilizados nessas pesquisas impossibilita uma análise comparativa mais aprofundada.

Conclusões

Analisando a resistência à compressão, observou-se que todos os concretos com cimento branco obtiveram desempenho similar ao dos concretos moldados como referência (CPV). Por outro lado, observou-se que não há relação direta entre a resistência à compressão com os de profundidade de carbonatação.

A profundidade de carbonatação foi modelada em função da relação água/cimento e do grau de hidratação (idade) dos concretos, através de modelos não-lineares que apresentaram coeficientes de determinação que variaram entre 75% e 86%, valores que caracterizam bons ajustes, tendo em vista a variabilidade presente nas análises de carbonatação.

Os concretos com relação água/cimento de 0,4 não carbonataram. A maior carbonatação se deu para os concretos de cimentos CPB1, CPV e CPB2 na relação água/cimento de 0,6. Já os concretos moldados com CPB3 obtiveram melhor desempenho em todas as relações água/cimento.

Os concretos moldados com CPB4 na relação água/cimento de 0,6 tiveram desempenho similar aos moldados com CPB1 na relação água/cimento de 0,5. Já o melhor desempenho para relação água/cimento de 0,6 foi para os concretos moldados com CPB3, que obtiveram desempenho superior aos moldados com CPB1 (relação água/cimento de 0,5), o que comprova que, para esse fenômeno, além da relação água/cimento, o tipo de cimento tem influência.

Analisando física e quimicamente os cimentos, foi constatado que, quanto maior a perda ao fogo, o resíduo insolúvel, o anidrido carbônico e a superfície específica do cimento, maior a profundidade de carbonatação do concreto com ele confeccionado, ou seja, menor sua durabilidade.

Referências

ANDRADE, J.J.O. **Durabilidade de estruturas de concreto armado**: análise das manifestações patológicas nas estruturas no estado de Pernambuco. 1997. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

ARANHA, P.M.S. **Contribuição ao estudo das manifestações patológicas em estruturas de concreto armado na região Amazônica**. 1994. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5739**: Concreto: ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994a.

_____. **NBR 7211**: Agregados para concreto. Rio de Janeiro, 1983.

_____. **NBR 7217**: Agregados : determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 1987a.

_____. **NBR 7220**: Agregados: determinação de impurezas húmicas em agregado miúdo. Rio de Janeiro, 1987b.

_____. **NBR 9479**: Câmaras úmidas e tanques para cura de corpos-de-prova de argamassa e concreto. Rio de Janeiro, 1994b.

_____. **NBR 9937**: Agregados: determinação da absorção e da massa específica do agregado graúdo. Rio de Janeiro, 1987c.

BAUER, E. **Avaliação comparativa da influência da adição de escória de alto-forno na corrosão das armaduras através de técnicas eletroquímicas**. 1995. 236 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

BENITEZ, A.; BALZAMO, H.; MIGOYA, E. Estudo de hormigones convencionales elaborados com cemento gris y cemento blanco utilizando un

aditivo de doble efecto. In: JORNADAS DE DESARROLLO E INNOVACIÓN, 4., 2002, Buenos Aires. **Anais...** Buenos Aires: INTI, 2002. Disponível em: <http://www4.inti.gov.ar/GD/4jornadas2002/index.html>. Acesso em: 20 jan. 2003.

BENITEZ, A.; BALZAMO, H.; MIGOYA, E. Hormigones de alta prestación elaborados com cemento gris y cemento blanco. In: JORNADAS DE DESARROLLO E INNOVACIÓN, 4., 2002, Buenos Aires. **Anais...** Buenos Aires: INTI, 2002. Disponível em: <http://www4.inti.gov.ar/GD/4jornadas2002/index.html>. Acesso em: 20 jan. 2003.

BENSTED, J. Early hydration of Portland cement: effects of water/cement ratio. **Cement and Concrete Research**, New York, v.13, n.4, p.493-498, July 1983.

CARVALHO, F.C.; CALAVERA, J. Estabilidade colorimétrica e influência da incorporação de pigmentos em concretos submetidos a diferentes estados de exposição ambiental. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 44., Belo Horizonte, 2002. **Anais...** São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2002. 1 CD-ROM.

CHANDRA, S.; BJÖRNSTRÖM, J. Influence of cement and superplasticizers type and dosage on the fluidity of cement mortars: Part I. **Cement and Concrete Research**, New York, v.32, n.10, p. 1605-1611, Oct. 2002.

CONSEIL INTERNACIONAL DU BATIMENT POUR LA RECHERCHE LÉTUDE ET LA DOCUMENTATION; RÉUNION INTERNATIONALE DES LABORATORIES D'ESSAIS ET DE RECHERCHES SUR MATÉRIAUX ET LES CONSTRUCTIONS. **Prediction of service life of building materials and components**. Rotterdam: CIB W 80, RILEM 71-PSL, 1983. 98 p.

COELHO, M.A.M.; SILVA, M.G.; SOUZA, F.L.S.; ZANDONADE, E. Estudo da carbonatação e retração em concretos de alto desempenho com elevados teores de escória de alto-forno. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 44., Belo Horizonte, 2002. **Anais...** São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2002.

DUNSTER, A.M.; KENDRICK, D.; PARSONAGE, J.R. The mechanism of hardening and hydration of white Portland cement admixed with salicylaldehyde. **Cement and Concrete Research**, New York, v.24, n.3, p.542-550, 1994.

- HAMAD, B. S. Investigations of chemical and physical properties of white cement. **Advanced Cement Based Materials**, New York, v.2, n.4, p.161-167, July 1995.
- HANSEN, T.B. Temperature dependency of the hydration of dense cement paste systems containing micro silica and fly ash. **Nordic Concrete Research**. Oslo, n.27, 2001. Disponível em: <http://www.itn.is/ncr/publications/doc-27-3.pdf>. Acesso em: 20 dez. 2002.
- HELENE, P.R.L.; GALANTE, R. Concreto Colorido, São Paulo, 1999. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CIMENTO, 5., São Paulo. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 1999. 1 CD-ROM.
- HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: Pini, 1992. 349 p.
- HEREN, Z.; ÖLMEZ, H. The influence of ethanolamines on the hydration and mechanical properties of Portland cement. **Cement and Concrete Research**, New York, v.26, n.5, p.701-705, Mar. 1996.
- ISAIA, G.C.; HELENE, P.R.L. Durabilidade de Concreto de Elevado Desempenho com Pozolanas. In: SEMINÁRIO QUALIDADE E DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO, Porto Alegre, 1993. **Anais...** Porto Alegre: UFRGS/PPGEC/NORIE, 1993. p.13-33.
- JOHN, V.M.; TUDISCO, M. Durabilidade e carbonatação do concreto na revisão da NBR 6118. In: SEMINÁRIO QUALIDADE E DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO, 1993, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: UFRGS/CPGEC/NORIE, 1993. p. 62-73.
- KAZMIERCZAK, C. S. **Contribuição para a análise da eficiência de películas aplicadas sobre as estruturas de concreto armado com o objetivo de proteção contra a carbonatação**. 1995. 168 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.
- KATZ, A. Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. **Cement and Concrete Research**, New York, n.33, p.703-711, 2003.
- LEA, F.M. **The Chemistry of Cement and Concrete**. Great Britain: Edward Arnould, 1970.
- LEVY, S.M.; HELENE, P.R.L. Restauração e recuperação de estruturas de concreto armado de escolas estaduais no Estado de São Paulo. **Revista Técnica**, São Paulo, n.47, p.53-58, jul./ago. 2000.
- MARTINS, A.R.; MONTICELLI, I.; CAMARINI, G. Carbonatação em concretos submetidos a diferentes procedimentos de cura. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CIMENTO, 43., Foz do Iguaçu, 2001. **Anais...** São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2001.
- MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 1994. 573 p.
- MENEK, N.; HEREN, Z. Analysis of triethanolamine in white cement pastes by voltammetric methods. **Cement and concrete research**, New York, v.29, n.1, p 777-779, Jan. 1999.
- MONTEIRO, E.C.B. **Estudo da capacidade de proteção de alguns tipos de cimentos nacionais, em relação à corrosão de armaduras sob a ação conjunta de CO₂ e ions cloretos**. 1996. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 1996.
- NEPOMUCENO, A.A. **Comportamiento de los morteros de reparacion frente a la carbonatacion y a la penetracion de cloruros en estructuras de hormigon armado dañadas por corrosion de armaduras, estudio mediante la tecnica de resistencia de polarizacion**. 1992. 371 f. Tese - Escuela Tecnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politecnica de Madrid, Madrid, 1992.
- NERO, J.M.G.; NUNES, A. **Fundamentos para a prescrição e utilização do betão branco**. Lisboa: SECIL, 2000.
- NEVILLE, A.M. **Propriedades do concreto**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1997. 828 p.
- PESSÔA, P.O.A.; NEPOMUCENO, A.A.; Influência da reserva alcalina na fase de iniciação e propagação da corrosão em argamassas com baixa relação água/cimento. In: JORNADAS SUL-AMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, 30., 2002, Brasília. **Anais...** Brasília: Universidade de Brasília, 2002.
- PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (PCA). White cement concrete and colored concrete construction. **Concrete Technology Today**, v.20, n.3, Nov. 1999.

- PUERTAS, F.; BLANCO-VARELA, M.T.; VÁZQUEZ, T.; PALOMO, A. Modelling of the burnability of white cement raw mixes made with CaF_2 and CaSO_4 . **Cement and Concrete Research**, New York, v.26, n.12, p.457-464, Dec. 1995.
- PUERTAS, F.; BLANCO-VARELA, M.T.; VÁZQUEZ, T.; PALOMO, A. Influence of sand nature on burnability of white cement raw mixes made using CaF_2 and CaSO_4 fluxing/mineralizer pair. **Cement and Concrete Research**, New York, v.26, n.6, p.1361-1367, June 1996.
- REUNION INTERNATIONALE DE LABORATOIRES D'ESSAIS ET MATERIAUS (RILEM). Measurement of hardened concrete carbonation depth: RILEM Recommendation CPC-18. **Materials and Structures**, n.102, p.435-440, Nov./Dec. 1984.
- RICHARDSON, I.G.; GROVES, G.W. The structure of the calcium silicate hydrate phase present in hardened pastes of white Portland cement/blast-furnace slag blends. **Journal of Materials Science**, n.32, p.4793-4802, 1997.
- ROTHSTEIN, D.; THOMAS, J.J.; CHRISTENSEN, B.J.; JENNINGS, H.M. Solubility behavior of Ca-, S-, Al-, Na Si-bearing solid phases in Portland cement pore solutions as a function of hydration time. **Cement and Concrete Research**, New York, v.32, n.10, p.1663-1671, Oct. 2002.
- SILVA, V.M.; LIBORIO, J.B.L. O Efeito da Carbonatação em concretos e argamassas com e sem adição de sílica ativa. In: JORNADAS SUL-AMERICANA DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, 30., 2002, Brasília. **Anais...** Brasília: Universidade de Brasília, 2002.
- SILVA FILHO, L.C.P. **Durabilidade do concreto à ação de sulfatos**: análise do efeito da permeação de água e da adição de microssílica. 1994. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.
- SINGH, N.B.; DWIVEDI, M.P.; SINGH, N.P. Effect of superplasticizer on the hydration of a mixture of white Portland cement and fly ash. **Cement and Concrete Research**, New York, v.22, n.1, p.121-128, Jan. 1992.
- SINGH, N. B.; SINGH, A. K. Effect of melment on the hydration of white Portland cement. **Cement and Concrete Research**, New York, v.19, n.4, p.547-553, July 1989.
- SORA, I.N.; PELOSATO, R.; BOTTA, D.; DOTELLI, G. Chemistry and microstructure of cement pastes admixed with organic liquids. **Journal of the European Ceramic Society**, v.22, n.9-10, p.1463-1473, Sept. 2002.
- STÜMER, S.; MÜLLER, A.; STARK, J. Hydration of C_3A and $\text{C}_2(\text{A},\text{F})$ – Separated from sulphate-resisting and white Portland cement – under conditions of normal hardening and heat treatment. **Cement and Concrete Research**, New York, v.24, n.3, p.503-513, Jan. 1994.
- TAYLOR, H. F. W. **Cement Chemistry**. London: British Library, 1992.
- VAGHETTI, M.A.O. **Efeitos da cinza volante com cinza de casca de arroz ou sílica ativa sobre a carbonatação do concreto de cimento Portland**. 1999. 113 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1999.
- VAGHETTI, M.A.O.; ISAIA, G.C.; GASTALDINI, A.L.G. Influência da pré-cura ao ar dos concretos com pozolanas na carbonatação acelerada. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 43., Foz de Iguaçu, 2001. **Anais...** São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2001.
- WERNER, K.; CHEN, Y.; ODLER, I. Investigation on stress corrosion of hardened cement pastes. **Cement and Concrete Research**, New York, v.30, n.9, p.1443-1451, Sept. 2000.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq pelo auxílio concedido para o desenvolvimento desta pesquisa.