

# ESTUDO DA DURABILIDADE DE CONCRETOS COM ADIÇÃO DE CINZA VOLANTE VIA METODOLOGIA DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA

## STUDY ON DURABILITY OF CONCRETE WITH FLY ASH ADDITION BY RESPONSE SURFACE METHODOLOGY

Edna Possan<sup>1</sup>; Simone Dorneles Venquiaruto<sup>2</sup>; Denise Coitinho Carpena Dal Molin<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universidade Tecnológica Federal do Paraná, UTFPR, Medianeira – Brasil

<sup>2,3</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Sul, NORIE/UFRGS, Porto Alegre - Brasil

epossan@gmail.com

### RESUMO

Neste trabalho, emprega-se a Metodologia de Superfície de Resposta (MSR) para investigar o desempenho de diferentes teores de adição de cinza volante na durabilidade do concreto. Essa Metodologia é indicada para a otimização de produtos e processos, através da modelagem das variáveis de interesse. Para tal, a durabilidade foi modelada em termos de permeabilidade ao oxigênio, penetração de cloretos, profundidade de carbonatação e resistência à compressão axial, em concretos com relações água/aglomerante de 0,35, 0,50 e 0,60, produzidos com adição de cinza volante nos teores de 0, 25 e 50%. Excetuando a degradação por carbonatação, os resultados indicam que a adição desta pozzolana ao concreto é benéfica para a durabilidade. A MSR mostrou-se apropriada para a determinação da região que minimiza a profundidade de carbonatação, a penetração ao oxigênio e a penetração de íons cloreto no concreto, indicando que, de modo geral, teores de 25% de cinza volante são favoráveis à durabilidade.

**Palavras-chave:** metodologia de superfície de resposta, durabilidade, carbonatação, adições minerais.

### ABSTRACT

In this work, the Response Surface Methodology (RSM) is employed to investigate the performance of different fly ash replacement levels on the durability of concrete. This methodology is recommended to optimize products and processes, through the modeling of aimed variables. Hence, the durability was modeled in terms of oxygen permeability, chloride penetration, carbonation depth and compressive strength, in concrete with water/binder ratio of 0,35, 0,50 and 0,60, produced to different fly ash replacement levels (0, 25 and 50%). The study showed that, except for the degradation by carbonation, the addition of this pozzolan to the concrete is beneficial for the durability. The MSR is appropriate to determine the region that minimizes the carbonation depth, the oxygen penetration and the penetration of chloride ions in concrete, showing that in general percentages of 25% of fly ashes are favorable to durability.

**Keywords:** durability, response surface methodology, carbonation, chloride ions, fly ash, Mineral admixtures.

## INTRODUÇÃO

### 1.1 A durabilidade do concreto

A corrosão das armaduras é a principal causa de degradação das estruturas de concreto armado, sendo desencadeada especialmente pela ação da carbonatação e penetração de íons cloretos. Em ambiente urbano de exposição, a durabilidade das estruturas de concreto é dependente da concentração de poluentes atmosféricos, sobretudo, do dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), principal responsável pela carbonatação do concreto.

Em ambientes com teor de umidade em torno de 50 a 80% e na presença de  $\text{CO}_2$ , o fenômeno de carbonatação é uma das formas de iniciação da corrosão, cujos danos associados demandam custos consideráveis em intervenções de manutenção, reparo e reabilitação (PARROT, 1986; MEHTA, 1991, POSSAN, 2010). Por outro lado, em ambientes marinhos, os íons cloretos assumem o papel de destaque no processo de corrosão do aço imerso no concreto (NEVILLE, 1997) sendo considerada como a causa de degradação mais importante de uma estrutura [PAGE, 1981, SAETTA, SCHREFLER, VITALIANI, 1995; THOMAS, BAMFORTH, 1999].

Nas últimas décadas, face à elevação da agressividade do ambiente de exposição, às mudanças nos materiais de construção e métodos construtivos, entre outros fatores, foram observados elevados índices de degradação do concreto. Essa problemática incentivou a comunidade técnico-científica a buscar alternativas para melhoria da qualidade dos concretos produzidos, tentando reduzir as manifestações patológicas e os custos de manutenção, reparo e reabilitação das estruturas de concreto. A utilização de pozolanas adicionadas ao concreto, como a cinza volante, é uma das alternativas que contribui neste sentido.

O emprego da cinza volante na produção do concreto também traz vantagens ambientais, uma vez que é um subproduto industrial (usinas termoelétricas) e sua geração é crescente. Além disso, possui baixo custo de aquisição e pode ser empregada em substituição parcial na fabricação do cimento, implicando na redução de custos do concreto final. Embora do ponto de vista ambiental e econômico o emprego de subprodutos e resíduos, como a cinza volante, seja interessante, é de fundamental importância o conhecimento das implicações técnicas

devidas a sua utilização. Neste sentido, vários trabalhos foram desenvolvidos (THOMAS e BAMFORTH, 1999; METHA, 1985; SWAMY, 1997), avaliando as propriedades mecânicas (NEVILLE, 1997; ISAIA, 1995; BOUZOUBAÂ; ZHANG e MALHOTRA, 1999) e de durabilidade (NEVILLE, 1997; ISAIA, 1995) dos concretos produzidos com cinza volante.

Venquiaruto (2002) destaca que, quase na totalidade, as propriedades dos concretos são beneficiadas pela incorporação de adições minerais às misturas. No entanto, há alguns efeitos colaterais associados à utilização de elevados teores de cinza volante em substituição ao cimento, como a progressão mais lenta das resistências mecânicas iniciais, e a menor alcalinidade devido ao consumo de hidróxido de cálcio pelas reações pozolânicas. Jiang, Lin e Cai (2000), citam que em geral, a presença desta pozolana implica em carbonatação mais rápida do concreto. Já para a penetração de cloretos verifica-se o contrário: penetração mais lenta do agente agressivo.

Segundo Isaia (1995) quanto maior o teor desta adição menor será a penetração de cloretos para o interior do concreto. Outro fator importante para a durabilidade é a relação água/aglomerante do concreto, sendo que quanto mais elevada for essa relação maior será a profundidade de carbonatação e a penetração de íons cloretos através do concreto (NEVILLE, 1997).

Quanto às propriedades de durabilidade, verifica-se que a eficácia da cinza volante está atrelada à agressividade do ambiente de exposição da estrutura, se urbano ou marinho, sendo dependente do teor empregado e da relação água/aglomerante do concreto. Deste modo torna-se primordial a determinação do teor ótimo desta adição para que a degradação do concreto seja minimizada, a qual será conduzida via metodologia de superfície de resposta (MSR).

### 1.2 Metodologia de superfície de resposta (MSR)

A MSR foi desenvolvida por Box e Wilson em 1951 (BOX, 1978), e aplicada, primeiramente, no campo da engenharia química. Atualmente, sua aplicação envolve as ciências químicas, físicas, clínicas e engenharias. Myers e Montgomery (1995) citam que, de forma geral, consiste em um conjunto de técnicas de planejamento e análise de experimentos empregados na modelagem matemática de respostas. Ou seja, procura-se identificar o relacionamento que existe entre os fatores controláveis (variáveis

independentes) e as respostas (variáveis dependentes) do sistema analisado.

Visto que a grande maioria dos problemas analisados via superfície de resposta não possuem uma forma de relacionamento conhecida entre as variáveis em estudo, faz-se necessário encontrar um modelo matemático que descreva o comportamento entre as variáveis dependentes e independentes do sistema. Segundo Montgomery e Runger (2003), os modelos comumente usados são os polinomiais de primeira e segunda ordem (Equações 1 e 2, respectivamente). Entretanto outros modelos não-lineares também podem ser empregados.

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i \quad (\text{Equação 1})$$

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=1}^n c_i x_i^2 \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

$y$  é a função que representa o estado limite (resposta);

$a$ ,  $b$ , e  $c$ , são as constantes do modelo que serão calculadas.

A aplicação da MSR para a otimização de projetos de experimentos de engenharia é recente, destacando-se o emprego para estudos e otimização das propriedades de durabilidade, em especial a carbonatação do concreto (DUPRAT e SELLIER, 2006; POSSAN, ANDRADE e DAL MOLIN, 2006 e 2008; LOVATO et al., 2011).

Bayramovet et. al. (2004) empregaram essa metodologia buscando otimizar os parâmetros de fratura do concreto reforçado com fibra de aço. Para os autores, a MSR é uma aproximação promissora, pois reúne diversos critérios de desempenho relacionados à fratura do concreto com mínima fragilidade na otimização. Duprat e Sellier (2006), utilizaram a MSR objetivando reduzir custos computacionais na previsão da probabilidade de corrosão da armadura inserida no concreto, encontrado resultados satisfatórios quanto à minimização das simulações numéricas necessárias.

Lovato et al. (2011) fizeram uso desta metodologia para avaliar as propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregado reciclado de construção e demolição (C&D). Possan, Andrade, Dal Molin (2006) investigaram a influência do teor de adição de sílica ativa na carbonatação do concreto via MSR, destacando que a metodologia de superfície de resposta apresenta elevado potencial para a otimização de projetos de engenharia. Contudo, os autores destacam que os requisitos necessários à elaboração do projeto de experimentos, à modelagem das respostas e à análise dos dados devem ser atendidos.

## 2 METODOLOGIA

Com base em um projeto de experimentos, cujas variáveis de resposta são a permeabilidade ao oxigênio, a penetração de cloretos, a profundidade de carbonatação e a resistência à compressão axial do concreto, objetiva-se determinar o teor de cinza volante e a relação água/aglomerante que maximizam a durabilidade do concreto. Para tal, técnicas estatísticas de análise de dados como a Análise de variância (ANOVA) e a metodologia de superfície de resposta (MSR) foram empregadas.

### 2.1 Projeto de experimentos

As variáveis de resposta empregadas neste trabalho foram compiladas dos trabalhos de Venquiaruto (2002), Frizzo (2001) e Cervo (2001), realizados simultaneamente, com a mesma metodologia e materiais. As variáveis controláveis e de resposta estudadas, os materiais empregados na confecção dos concretos e a caracterização dos agregados são apresentados nas tabelas 1, 2 e 3, respectivamente.

**Tabela 1 - Descrição das Variáveis Analisadas.**

Variável	Variáveis controláveis		
	Identificação	Unidades	Níveis
Relação água/aglomerante	a/agl	-	0,35, 0,50 e 0,65
Teor de adição de cinza volante	CV	(%)	0, 25 e 50
Variável	Variáveis de resposta		
	Identificação	Unidades	Níveis
Resistência à compressão axial	$f_c$	MPa	91 dias
Permeabilidade ao oxigênio	$K$	$K \times 10^{-17} m^2$	91 dias
Profundidade de carbonatação	$e_c$	mm	4, 8 e 12 semanas
Penetração de cloretos	$C$	Coulombs	91 dias

**Tabela 2 - Materiais empregados e custo por m<sup>3</sup> de concreto para os traços com cinza volante (CV).**

CV (%)	a/agl	Aglomerante (kg/m <sup>3</sup> )		Aditivo (%)	Água (dm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	Aditivo (dm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	Agregados (kg/m <sup>3</sup> )		Custo/m <sup>3</sup> (US\$)
		Cimento	CV				Miúdo	Graúdo	
0	0,35	488,40	-	2	161,17	9,77	698,41	1010,99	170,48
	0,50	359,11	-	0	179,55	0	804,40	991,14	123,38
	0,65	283,94	-	0	184,56	0	866,02	979,60	101,27
25	0,35	366,30	122,10	6,50	139,20	31,74	664,53	1011,46	168,06
	0,50	269,33	89,78	1,50	174,18	5,38	779,53	991,48	112,40
	0,65	212,95	70,99	0,80	182,29	2,27	846,37	951,24	90,55
50	0,35	244,20	244,20	7,50	134,31	36,63	630,62	1011,93	151,05
	0,50	179,55	179,55	1,75	173,28	6,28	754,64	991,82	97,59
	0,65	141,97	141,97	0,80	182,29	2,27	826,72	980,13	78,57

**Tabela 3 – Características físicas dos agregados miúdo e graúdo**

Peneiras (mm)	Porcentagem Agregado graúdo	Retida acumulada Agregado miúdo
12,5	23	-
9,5	75	-
6,3	99	-
4,8	100	1
2,4	100	11
1,2	100	31
0,6	100	52
0,3	100	79
0,15	100	100
Módulo de finura	6,75	2,74
Dimensão máxima – mm	19	4,8
Massa específica – Kg/dm <sup>3</sup>	2,5	2,6
Massa unitária – Kg/dm <sup>3</sup>	1,26	1,65
Absorção de água - %	2,82	0,5
Índice de forma	3	-

A adição de cinza volante se deu em massa, em substituição parcial ao Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V ARI). Como a substituição em massa de cimento por adições de menores massas específicas pode ocasionar aumento no volume de argamassa seca em até 23% (ISAIA, 1991), foi necessário realizar a correção do volume de agregado miúdo. Este procedimento evitou que o volume de argamassa seca crescesse muito e afetasse a demanda de água, que seria aumentada.

A redução foi feita subtraindo-se o volume de agregado miúdo, correspondente ao aumento de volume da pasta provocado pela adição. Nas tabelas 4 e 5 são mostradas as principais características dos aglomerantes.

Para garantir a trabalhabilidade mínima do concreto, empregou-se aditivo superplastificante de pega normal à base de naftaleno (teor de sólidos de 32,5%, densidade de 1,18 g/cm<sup>3</sup> e pH de 7,68). A trabalhabilidade do concreto foi fixada em 65±10 mm, determinada pelo abatimento do tronco de cone, conforme norma brasileira NBR 7223. A porcentagem de argamassa, dada em volume de material seco, foi fixada em 54%.

**Tabela 4 - propriedades físico-químicas dos aglomerantes.**

Propriedades físicas	Aglomerantes		Propriedades Químicas	Aglomerantes	
	CPV	FA		CPV ARI	FA
Massa específica (Kg/m <sup>3</sup> )	3125,00	2360,00	Perda ao fogo	2,09	1,16
Finura # 0,075 mm	0,25	-	SiO <sub>2</sub>	19,59	64,57
Área específica (m <sup>2</sup> /g)*	1,80	3,50	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,79	27,27
Tempo de início de pega (min)	160,00	-	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,07	2,21
Tempo de fim de pega (min)	195,00	-	CaO	64,35	1,51
Resistência (MPa)	1 dia	18,10	MgO	1,69	0,76
	3 dias	36,00	SO <sub>3</sub>	2,75	0,06
	7 dias	39,00	Na <sub>2</sub> O	0,07	0,15
	28 dias	50,90	K <sub>2</sub> O	0,98	1,50

**Tabela 5 – Principais características granulométricas dos aglomerantes.**

Material	Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	Partículas			
		Diâmetro médio (µm)	> 3µm	Porcentagem entre 3 e 30µm	> 50µm
Cimento CP V ARI	3125	11,38	25,89	70,38	0,00
Cinza Volante	2360	27,74*	12,02	51,46	18,52

\*Diâmetro médio para cinza in natura (sem moagem). Destaca-se que com quatro horas de moagem, em moinho de bolas, o diâmetro da cinza pode ser reduzido para 9,22 µm (VENQUIARUTO, 2002; FRIZZO, 2001; CERVO, 2001) o que aumenta a eficiência da cinza assim como os custos, face ao processo de moagem.

## 2.2 Testes de laboratório

O ensaio de resistência à compressão axial foi realizado em corpos-de-prova cilíndricos de 100x200 mm, aos 28 e 91 dias. A cura se deu em câmara úmida ( $T 23 \pm 2^\circ\text{C}$  e UR > 95%) até a data do teste, segundo prescrições das normas brasileiras NBR 5738: 2003 e NBR 5739: 2007.

Os corpos-de-prova de concreto destinados aos ensaios de carbonatação acelerada (dimensões de 100 x 70 mm) foram curados em câmara úmida por uma semana. A seguir foram pré-condicionados segundo a recomendação da RILEM TC 116 (1999).

O procedimento de pré-condicionamento constitui-se de uma etapa de pré-secagem e subsequente fase de redistribuição de umidade, com duração de quatro semanas, tendo por objetivo dotar os corpos de prova de uma concentração de umidade de equilíbrio de  $75 \pm 2\%$ , com uma distribuição uniforme da água evaporável no corpo-de-prova, para uma temperatura de  $20 \pm 1^\circ\text{C}$ .

A aceleração da carbonatação foi realizada em câmara automatizada, de alimentação contínua, com 5% de  $\text{CO}_2$ , umidade relativa de  $70 \pm 5\%$  e temperatura de  $25 \pm 2^\circ\text{C}$ . As profundidades de carbonatação foram obtidas com emprego de indicador químico (fenolfetaleína) nas idades de exposição ao  $\text{CO}_2$  de quatro, oito e 12 semanas. As medidas foram tomadas de acordo com os procedimentos da RILEM CPC 18 (1988), sendo os corpos-de-prova rompidos diametralmente.

O ensaio de permeabilidade ao oxigênio foi realizado aos 91 dias, em corpos-de-prova de 50 x 150 mm. As amostras permaneceram em câmara úmida por 49 dias e depois foram pré-condicionadas de acordo com as prescrições da RILEM TC 116 (1999).

A determinação do coeficiente de permeabilidade K foi feita utilizando-se a equação Hagen-Poiseuille para fluxo laminar de um fluido compressível através de corpos porosos, com pequena capilaridade, sob condições uniformes.

Conforme recomendações da ASTM C 1202 (1997), foi realizado o ensaio acelerado de penetração de cloretos, em amostras de 95 x 51 mm às idades de 28 e 91 dias. O ensaio consiste na fixação do corpo-de-prova entre duas células de acrílico, preenchidas com 3 % de NaCl e 0,3 N de NaOH, onde se aplica um potencial de 60V, realizando leituras durante seis horas de ensaio.

Neste trabalho, foram analisados somente os resultados obtidos aos 91 dias, visto que os benefícios de resistência e durabilidade, advindos do emprego de cinza volante no concreto, são percebidos mais claramente em idades mais avançadas.

## 3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

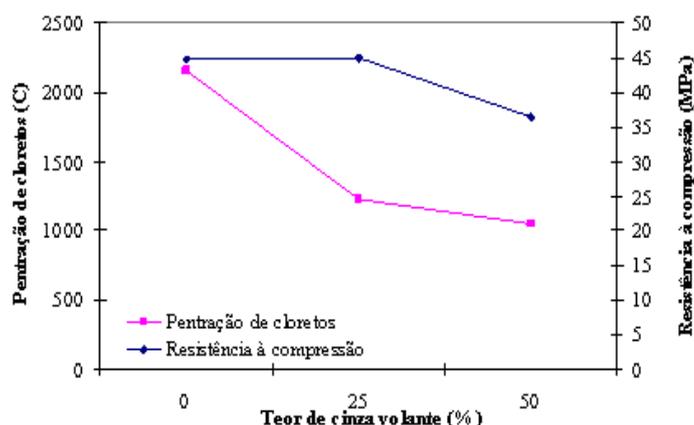
### 3.1 Análise de variância

Os resultados médios obtidos nos ensaios de durabilidade são apresentados na tabela 6.

Pela análise de variância (ANOVA), para um nível de confiança de 95%, os efeitos isolados da relação água/aglomerante e do teor de cinza volante foram significativos, para todas as variáveis de resposta (resistência à compressão axial, permeabilidade ao oxigênio, penetração de cloretos e profundidade de carbonatação).

Exceto para a penetração de cloretos, a interação entre estes efeitos também foi significativa. De acordo com a figura 1 e conforme a literatura (THOMAS e BAMFORTH, 1999; METHA, 1985; SWAMY, 1997), observa-se que a adição de cinza volante ao concreto é benéfica para a durabilidade no que se refere à penetração de íons cloreto.

Figura 1 – resistência à compressão x penetração de cloretos



**Tabela 6 - Resultados dos ensaios de durabilidade para a idade de 91 dias.**

Identificação das misturas		Variáveis de resposta			
a/agl	CV	Penetração de cloretos (Coulombs) <sup>1</sup>	Permeabilidade ao oxigênio ( $K \times 10^{-17} \text{ m}^2$ ) <sup>2</sup>	Profundidade de carbonatação (mm) <sup>3</sup>	$f_c$ (MPa) <sup>1,2,3</sup>
0,65	0	2773,935	45,41555	21,275	37,3
0,50	0	2542,32	18,69745	13,21	42,0
0,35	0	1164,33	10,0651	0,01	55,1
0,65	25	1913,31	14,0539	29,5	32,5
0,50	25	1206,945	8,4731	21,02	46,2
0,35	25	557,955	1,853	0,01	56,2
0,65	50	1399,545	11,7383	40,74	25,2
0,50	50	1157,76	2,8137	30,94	36,8
0,35	50	590,94	0,89595	19,175	47,5

Dados oriundos de: <sup>1)</sup> Cervo (2001); <sup>2)</sup> Frizzo (2001); <sup>3)</sup> Venquiaruto (2002).

À medida que aumenta o teor de adição há uma redução na penetração destes íons no concreto. Metha (1985), Isaia (1996) e Cervo (2001), atribuem esta redução à alteração na estrutura de poros da matriz cimentante, em concretos com adições minerais.

Para os teores estudados, verificou-se que a penetração de cloretos foi considerada baixa de acordo com a ASTM C-1202 (1997), exceto para as misturas de referência, ou seja, sem adição. Ressalta-se que um teor de 25% de cinza volante já apresenta uma redução de cloretos significativa, comprovado pela ANOVA. Já o aumento no teor de substituição de cinza volante, de 25% para 50%, reduziu a penetração de cloretos em até 53,3% para 40 MPa e 32,8% para 60 MPa.

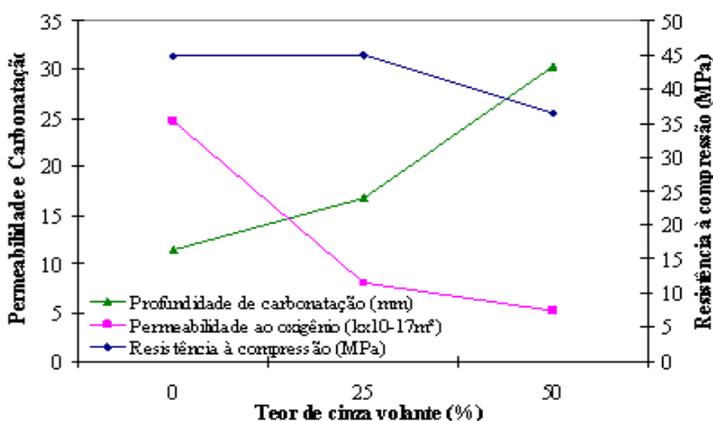
Para a resistência à compressão axial, observa-se pela análise de Fischer que a variação do teor de adição de cinza volante de 0 a 25% não apresenta variações significativas de resistência.

Contudo, a adição nos teores de 25 a 50% reduz esta propriedade. Segundo Metha (1985), esse comportamento pode ser explicado pelo fato da reatividade da cinza volante ser diretamente proporcional à quantidade de partículas menores do que 10  $\mu\text{m}$ , e inversamente proporcional à quantidade de partículas maiores do que 45  $\mu\text{m}$  (ver tabela 2). Misra et al. (1994) também concluíram em seus estudos que o aumento da porcentagem de adição mineral nas misturas investigadas não acarretava em ganho de resistência mecânica.

Elevados níveis de substituição exigem grande finura para melhorar o desempenho da resistência de concretos com cinzas volantes (BOUZOUBAË, ZHANG e MALHOTRA, 1999; VENQUIARUTO, 2002).

Na figura 2 verifica-se o comportamento da carbonatação e da permeabilidade ao oxigênio em função dos teores de adição empregados e da resistência à compressão do concreto. Segundo Frizzo (2001) há uma relação exponencial inversa entre a permeabilidade ao oxigênio e a resistência à compressão axial do concreto, com um coeficiente de correlação de Pearson entre 0,86 e 0,99.

**Figura 2 – resistência à compressão x permeabilidade ao oxigênio e profundidade de carbonatação.**



Percebe-se que o comportamento da permeabilidade ao oxigênio apresenta-se inversamente proporcional à profundidade de carbonatação. Com a análise dos coeficientes de permeabilidade (tabela 6) observa-se que o uso de cinza volante nos teores de 25% e 50% promoveu uma densificação da matriz em relação às misturas de referência, reduzindo significativamente a permeabilidade ao oxigênio nas misturas com pozolanas.

Para a carbonatação o efeito benéfico das adições não foi verificado, uma vez que o incremento de cinza volante promoveu um aumento da profundidade carbonatada, ao encontro do observado na literatura (ISAIA, 1995; JIANG, LIN e CAI, 2000; VENQUIARUTO, 2002; PAULETTI, 2009; POSSAN, 2010).

Para Neville (1997), este comportamento pode ser associado à redução do conteúdo de hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) na pasta, que são consumidos com o desenvolvimento das reações pozolânicas. Tais reações reduzem o pH da fase líquida dos poros, ocasionando um avanço na frente carbonatada.

Considerando os resultados da pesquisa em igualdade de resistência à compressão axial para 40 MPa e 60 MPa, Venquiaruto (2002) observou para ambas as resistências, que a variação de 25% para 50% de cinza volante no concreto, em geral, não é vantajosa, pois o coeficiente de carbonatação cresce com o aumento do teor de adição.

Diante do exposto, verifica-se que a durabilidade do concreto não pode ser vinculada somente à resistência à compressão, uma vez que outros fatores, como presença, teor e tipo de adições, finura da adição, tipo de cimento, entre outros, interferem no comportamento microestrutural deste material, interferindo nas propriedades de durabilidade.

Neste sentido, Ho e Lewis (1987) sugerem como uma possível forma de assegurar a durabilidade das estruturas de concreto a especificação direta da qualidade requerida para o material, como por exemplo, a sua resistência à carbonatação, penetração de íons cloreto, absorção de água e difusão de oxigênio.

Assim, dependendo do tipo de estrutura e do ambiente de serviço, mais de um critério poderia ser necessário especificar.

### 3.2 Exploração da superfície de resposta para as variáveis de estudo

A avaliação via MSR exige a modelagem das variáveis de resposta em função das variáveis dependentes empregadas no projeto de experimento.

Os modelos de comportamento, obtidos por regressão não-linear, para as variáveis de resposta de resistência à compressão axial, permeabilidade ao oxigênio, penetração de cloretos e profundidade de carbonatação, são apresentados nas equações 3, 4, 5 e 6, respectivamente.

(Equação 1)

$$f_c = \exp(4,64 - 1,86 \cdot agl + 0,011 \cdot cv)$$

(Equação 2)

$$k = 13,73 - 0,12 \cdot agl - 0,72 \cdot cv + 0,016 \cdot agl \cdot cv - 0,011 \cdot agl^2 + 0,178 \cdot cv^2$$

(Equação 3)

$$C = 0,40 - \frac{agl}{1250} - \frac{cv}{85} - \frac{0,40}{10000} (agl + cv) + \frac{0,30}{1000} \cdot cv^2$$

(Equação 4)

$$e_c = 4,81 \cdot (agl - 0,40)^{2,4} \cdot (1 - cv)^{-0,7} \cdot t^{0,94 + cv^{1,2}}$$

Onde:

$f_c$  = Resistência à compressão axial (MPa);

$k$  = permeabilidade ao oxigênio ( $k \times 10^{-17} \text{m}^2$ )

$C$  = penetração de cloretos (Coulombs);

$e_c$  = profundidade de carbonatação (mm);

$agl$  = relação água/cimento (intervalo de 0,35 a 0,65);

$cv$  = teor de adição de cinza volante (intervalo de 0 a 20%);

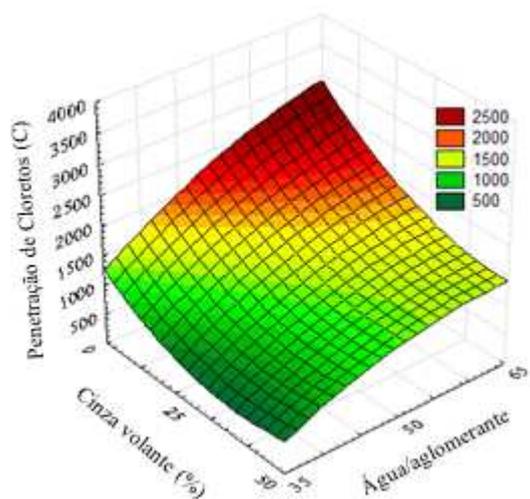
$t$  = tempo de exposição ao  $\text{CO}_2$  (intervalo de 0 a 84 dias)

Para o estudo das variáveis dependentes, penetração de cloretos, permeabilidade ao oxigênio e carbonatação do concreto a reposta menor é melhor. Para o estudo da resistência à compressão axial, maior é melhor. As superfícies de resposta para estas variáveis, em função da relação água/aglomerante e do teor de cinza volante empregados, são apresentadas nas figuras 3, 4, 5 e 6, respectivamente.

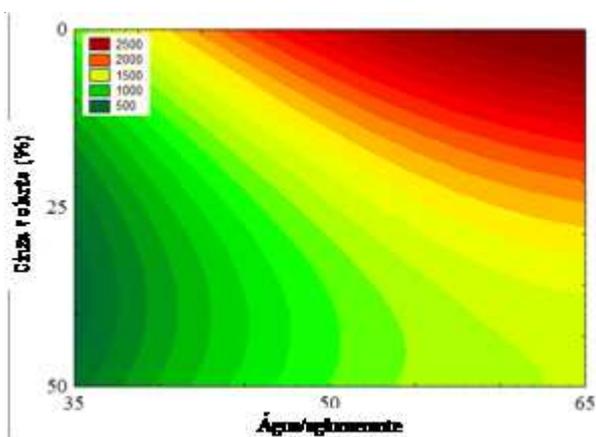
Observa-se na figura 3 que, para todos os níveis de relação a/agl, a adição de 25 a 50% de cinza volante reduz substancialmente a penetração de cloretos, corroborando a análise feita das figuras 1 e 2.

Em relação à permeabilidade ao oxigênio (figura 4), a variação de teores de cinza volante no concreto é vantajosa para relações água/aglomerante de até 0,50

**Figura 3 - Superfície de resposta (a) e de contorno (b) para a penetração de cloretos (C)**

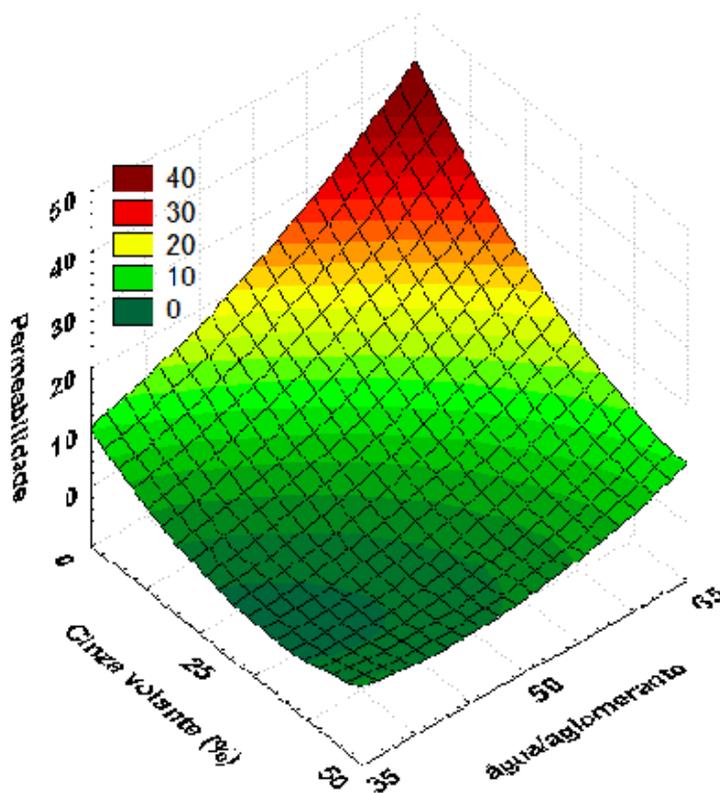


(a)



(b)

**Figura 4 - Superfície de resposta para a permeabilidade ao oxigênio (K)**



De um modo geral, nota-se a existência de uma região que minimiza a profundidade de penetração de cloretos (figura 3) e a permeabilidade ao oxigênio (figura 4) através do concreto.

Esta região é situada entre os teores de adição de cinza volante de 25 a 50%, com uma relação a/agl em torno de 0,35 a 0,50.

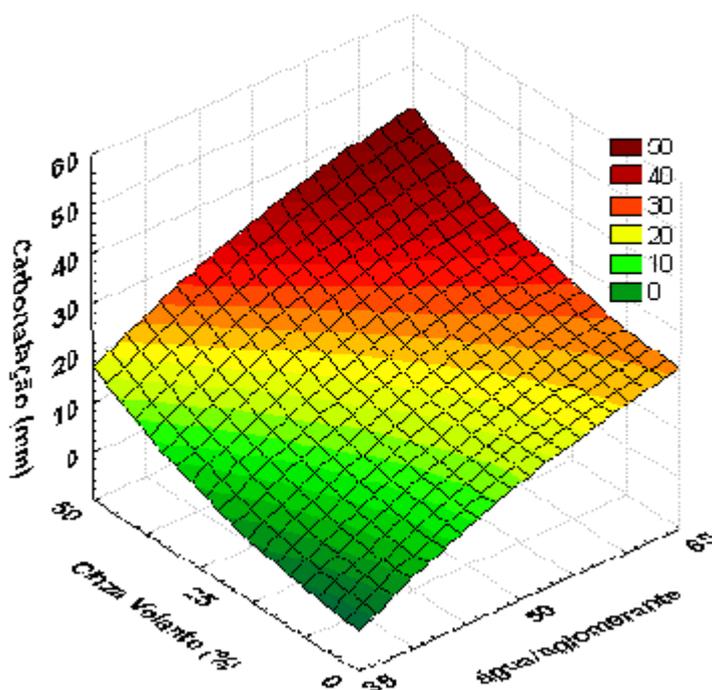
Tal fato é atrelado ao refinamento dos poros devido à baixa relação a/agl e à presença de adições, o que dificulta o ingresso dos agentes agressivos através do concreto (BOUZOUBAË, ZHANG, MALHOTRA, 1999 e ISAIA, 1995).

No que diz respeito à carbonatação (figura 5), o incremento de cinza volante não contribui para a redução da profundidade carbonatada.

Contudo, o emprego de 25% desta adição em concretos de relação a/agl baixa (0,35) pode ser efetuado sem prejuízos à durabilidade, visto que, para estas misturas, a profundidade de carbonatação observada é muito baixa.

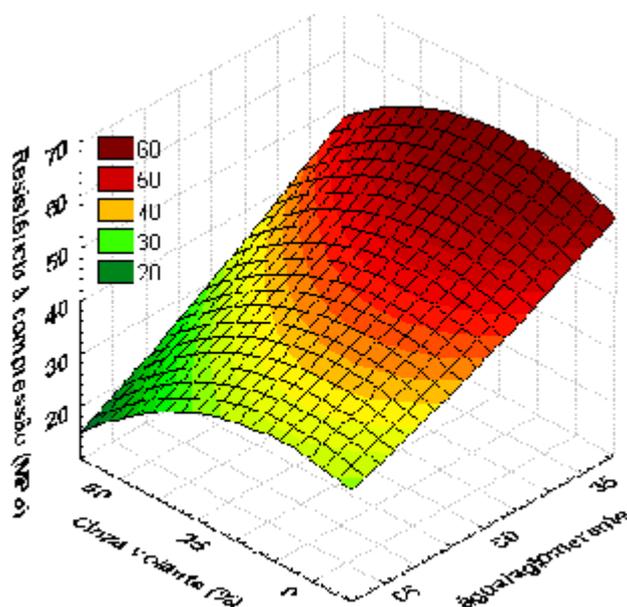
Khunthongkeaw et al. (2006) constaram experimentalmente que o emprego de até 10% de cinza volante não eleva a profundidade de carbonatação do concreto.

**Figura 5 - Superfície de resposta para a profundidade de carbonatação (mm)**



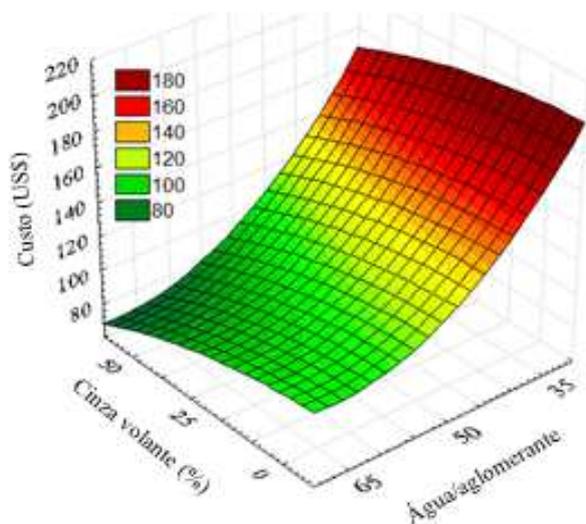
Com relação à resistência, quanto maior o teor de adição e a relação a/agl, menor a resistência (figura 6). Considerando a premissa, maior é melhor, verifica-se que concretos com relação a/agl e cinza volante inferiores a 0,50 e 25%, respectivamente, elevam a resistência à compressão.

**Figura 6 - Superfície de resposta para a resistência à compressão (MPa)**



Um fator importante a observar quando se faz uma otimização são os custos associados à produção dos concretos. Na figura 7, verifica-se que com o aumento do teor de adição de cinza volante e da relação água/aglomerante há uma significativa redução dos custos/m<sup>3</sup> do concreto. Misturas com relação a/agl 0,35, com 50% de adição de cinza volante, têm um custo de produção cerca de 11% inferior à mistura de referência (sem adição).

**Figura 7 - Superfície de resposta (a) e de contorno (b) para os custos/m<sup>3</sup> (US\$)**

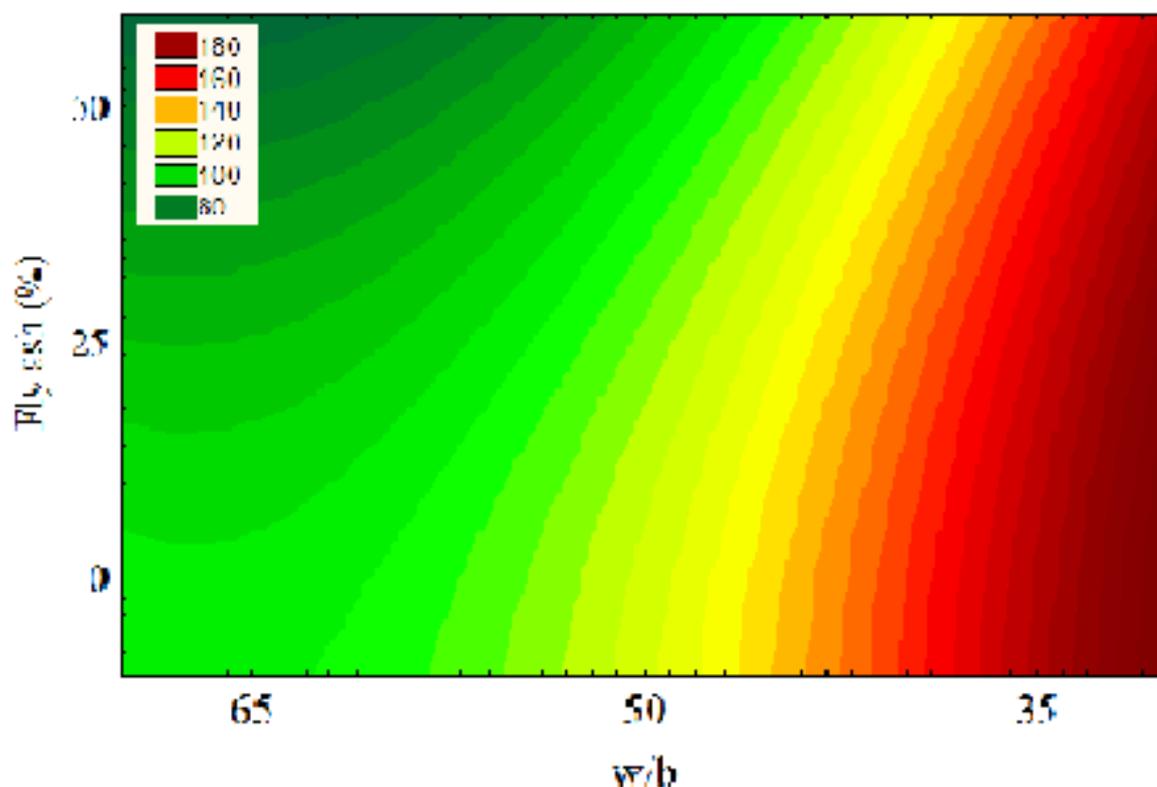


Quando a relação a/agl é elevada para 0,50 e 0,65, o custo/m<sup>3</sup> de concreto tem redução de aproximadamente 21%, para concretos com 50%, e de 10%, para misturas com 25% de adição de cinza volante, em relação ao concreto sem esta adição.

Logo, para todos os níveis de relação a/agl a adição de cinza volante é benéfica em relação ao custos de produção do concreto. Entretanto a análise de custos deve ser sempre associada às propriedades de durabilidade do concreto, buscando a melhor solução do ponto de vista econômico e técnico.

### CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para esta pesquisa, considerando todas as propriedades estudadas, a adição de cinza volante, quando apropriadamente incorporada ao concreto, é benéfica à durabilidade para concretos de relação água/aglomerante inferiores a 0,50. Constatou-se, ainda, que há preponderância da relação água/aglomerante nas propriedades mecânicas e de durabilidade dos concretos, sendo que concretos com relação a/agl reduzidas apresentam melhor desempenho de durabilidade.



De forma geral, observa-se que o aumento do teor de cinza volante reduz a permeabilidade ao oxigênio e a penetração de cloretos através do concreto, o que é desejável. Já a profundidade de carbonatação aumenta de forma significativa com a elevação do teor de cinza volante, especialmente para elevadas relação a/agl, o que não é almejado. Para a resistência à compressão axial do concreto, verifica-se que não há diferença significativa entre os concretos sem adição e com 25% de cinza volante. Contudo, em concretos com 50% de adição, a resistência é reduzida substancialmente.

Quanto à otimização, o emprego de até 50% desta adição reduz consideravelmente a penetração de cloretos, a permeabilidade de oxigênio através do concreto e os custos/m<sup>3</sup>, para concretos de relação água/aglomerante inferiores a 0,50, sendo viável na produção de concretos expostos em ambiente marinho. Já para concretos expostos a alta concentração de CO<sub>2</sub> (ambiente urbano), em função da reserva alcalina, recomenda-se o uso de até 25% desta adição para relações a/agl reduzidas (inferior a 0,50).

Destaca-se que o emprego de cinza volante, além de conferir benefícios de durabilidade, contribui na redução do impacto ambiental através do consumo destes resíduos e ainda apresenta substancial redução de custos de produção do concreto. Concretos produzidos com 25 e 50% de adição de cinza volante apresentam, respectivamente, custos em torno de 10 e 22% menores que o concreto sem adição, indicando que o emprego desta cinza pode conferir benefícios econômicos na produção do concreto.

## Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo fomento da bolsa de doutorado. À Tatiana Cervo e Benildo Frizzo que gentilmente forneceram os dados para este trabalho. Ao professor Geraldo Isaia pela orientação dos trabalhos que geram essa pesquisa.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto – procedimentos para modelagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto – ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

ASTM C 1202, **Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration**, 1997.

BAYRAMOV, F; et. al. Optimization of steel fibre reinforced concretes by means of statistical response surface method. **Cement & Concrete Composites**, 2004; 26, p. 665–675.

BOUZOUBAË, N.; ZHANG, M.H.; MALHOTRA, V.M.; Golden, D. M. Blended fly ash – A review. **ACI Materials Journal**, 1999; Detroit.

BOX, G. E. P. **Statistics for experimenters: an introduction to design, data analysis, and model building**. New York: John Wiley, 1978. 653 p.

CERVO, T. **Influência da finura e do teor de pozolana na penetração de cloretos e na solução aquosa dos poros do concreto**. 2001. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, 138p.

DUPRAT, F; SELLIER, A. Probabilistic approach to corrosion risk due to carbonation via an adaptive response surface method. **Probabilistic Engineering Mechanics**, 2006; 21, p.207-116.

FRIZZO, B. **Influência do teor e da finura de pozolanas na permeabilidade ao oxigênio e na absorção capilar do concreto**. 2001. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, 139p.

ISAIA, G. C. **Avaliação técnico-econômica de concreto de alta resistência com elevados teores de cinzas volantes**. Porto Alegre, 1991. 302p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, 1991.

ISAIA, G.C. **Efeitos de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concreto de elevado desempenho: um estudo de durabilidade com vistas à corrosão da armadura**. 1995. Tese (Doutorado em Engenharia) – Departamento de Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 280p.

JIANG, L.; LIN, B.; CAI, Y. A model for predicting carbonation of high-volume fly ash concrete. **Cement and Concrete Research**, 2000; (30), p. 669-702.

LOVATO P.S.; POSSAN, E.; DAL MOLIN D.C.C., MASUERO, A.B.; RIBEIRO, J.L.D. Modeling of mechanical properties and durability Of recycled aggregate concretes. **Construction and Build Materials** (2011), doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.06.043.

MEHTA, P.K. **Durability of concrete - fifty years of progress?** In: Durability of concrete second International conference, Montreal, 1991: ACI, 31p. (SP-126).

METHA, P.K. Influence of fly ash characteristics on the strength of Portland – Fly ash Mixtures. **Cement and Concrete Research**, 1985; 15, USA: Pergamon Press, p. 53-64.

MISRA, S.; YAMAMOTO, A.; TSUTSUMI, T. et al. Application of rapid chloride permeability test to quality control of concrete. In: MALHOTRA, V. M. (ed) International conference: Durability of concrete, 3 rd, Nice- France, 1994. **Proceedings...** Detroit: American Concrete Institute, 2 V., p.487-502 (SP-145).

MONTGOMERY DC. RUNGER GC. **Applied Statistics and Probability for Engineers**. John Wiley & Sons, New York, 2003. (3rd edition).

MYERS. R. H.; MONTGOMERY. D. C. **Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments**. Canada: John Wiley & Sons. 1995.

NEVILLE, A.M. **Properties of Concrete**. 4th ed., Wiley, New York; 1997, 844p.

PAGE, C.L. et al., Diffusion of chloride ions in hardened cement pastes. **Cement and Concrete Research**, 1981; 11, p. 395-406.

PARROT, L.J. A review of carbonation in reinforced concrete. Wexham Springs, **Cement and concrete Association**, 1986; 69p.

PAULETTI, C. **Estimativa da carbonatação natural de materiais cimentícios a partir de ensaios acelerados e de modelos de predição**. 2009. Tese de Doutorado em co-tutela (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre e École Doctorale Mécanique, Energétique, Génie Civil et Procédés, Institut National des Sciences Appliquées, Toulouse.

POSSAN, E.; ANDRADE, J.J.O.; DAL MOLIN, D.C.C. Emprego da metodologia de superfície de resposta no estudo da carbonatação do concreto com sílica ativa. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 48, Rio de Janeiro, 2006. **Anais...** São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2006.

POSSAN E.; ANDRADE J.J.O.; DAL MOLIN D.C.C. **Application of statistic techniques to study concrete degradation process: an example of using RSM**. In: V International Aci/Canmet conference on high performance concrete structures and materials, 2008, Manau, ACI/CANMET, 2008.

POSSAN, E. **Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto armado em ambiente urbano**. Tese de Doutorado em Engenharia Civil - Universidade Federal do Rio do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

RILEM. Recommendations of CPC-18. **Measurement of hardened concrete carbonation depth**. Materials and Structures, 1988; 21 (126), p. 453-455.

RILEM. Recommendations of TC116-PCD. **Tests for gas permeability of concrete**. Materials and Structures, 1999; 32(217), p. 163-179.

SAETTA, A.V.; SCHREFLER, B.A.; VITALIANI, R.V. 2 – D Model for carbonation and moisture/ heat flow in porous materials. **Cement and Concrete Research**, 1995; 25 (8), p. 1703-1712.

SWAMY, R.N. **Design for Durability and Strength Through the Use of Fly Ash and Slag in Concrete**. In: Proceedings of Mario Collepardi Symposium on Advances in Concrete Science and Technology, 7 October 1997; Rome, p.127-194.

THOMAS, M.D.; BAMFORTH, P. B. Modeling Chloride Diffusion in Concrete: Effect of Fly-Ash and Slag. **Cement and Concrete Research**, 1999; 29, p. 487-495.

VENQUIARUTO, S.D. **Influência da finura e do teor de adições minerais na carbonatação do concreto**. 2002. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, 133p.

Artigo enviado: 7 de julho de 2011

Artigo aceito: 2 de fevereiro de 2012