



**ENTAC2006**

A CONSTRUÇÃO DO FUTURO | XI Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído | 23 a 25 de agosto | Florianópolis/SC

## **ESTUDO DA CARBONATAÇÃO NA CAMADA DE COBRIMENTO DO CONCRETO EM PROTÓTIPOS COM ALTOS TEORES DE ADIÇÃO MINERAL**

**William W. Cadore (1); Geraldo C. Isaia (1); Antônio L. G. Gastaldini (1); Felipe B. Diesel (1)**

(1) Departamento de Estruturas e Construção Civil - Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) – Santa Maria – RS - e-mail: [williamcadore@yahoo.com.br](mailto:williamcadore@yahoo.com.br)

### **RESUMO**

**Proposta:** Este estudo analisou a camada de cobrimento estrutural do concreto com e sem o uso da cal hidratada em mistura ternária de 70% de escória de alto forno, 20% cinza volante e 10% de cimento ARI em comparação a traços de referência. **Método de pesquisa/Abordagens:** Para o estudo da camada de cobrimento do concreto estrutural foram moldados protótipos de vigas, expostos em cura ambiental. A análise da carbonatação foi em testemunhos extraídos aos 91 e aos 300 dias, já que as reações pozolânicas completam-se em idades superiores aos 28 dias. O ensaio de foi realizado em câmara climática com teor de 5% de CO<sub>2</sub>. **Resultados:** A análise dos resultados dos ensaios foi em comparação das misturas com cal em relação às misturas sem cal e as misturas de referência. Observa-se que a adição de cal hidratada nas misturas diminui as profundidades carbonatadas e conseqüentemente os coeficientes de carbonatação. **Contribuições/Originalidade:** Uso das adições minerais em função da durabilidade das estruturas de concreto.

Palavras-chave: *carbonatação, durabilidade, altos teores de adições minerais, concreto de alto desempenho, ensaios acelerados.*

### **ABSTRACT**

**Propose:** This study analyzed the covercrete layer of structural concrete with or without the use of the hydrated lime in ternary mixture of 70% of ground granulated blast-furnace slag, 20% of fly ash and 10% of cement ARI in comparison with reference. **Methods:** It was molded prototypes of beams, exposed in environmental cure for the study of the covercrete layer of the structural concrete. The analysis of the carbonation was in extracted testimonies to the 91 and the 300 days, since the reactions pozolânicas are completed in superior ages to the 28 days. The rehearsal it was executed in climatic chamber with tenor of 5% of CO<sub>2</sub>. **Findings:** The analysis of the results of the rehearsals was in comparison of the mixtures with hydrated lime in relation to the mixtures without hydrated lime and the reference mixtures. It is observed that the addition of hydrated lime in the mixtures it reduces the carbonated depths and consequently the carbonatação coefficients. **Originality/value:** Use of the mineral additions in function of the durability of the concret structures.

Keywords: *carbonation, durability, high contents of mineral additions, high performance concrete, accelerated rehearsal.*

## **1.0 ANÁLISE ECONÔMICA, ECOLÓGICA E DA DURABILIDADE EM FUNÇÃO DA CARBONATAÇÃO**

### **1.1 Análise econômica e ecológica**

O consumo das matérias primas, resultado do crescimento sócio-econômico mundial, tem causado um grande desequilíbrio no meio ambiente. Os presentes estatísticas apontam que anualmente são despejados 7 bilhões de toneladas de CO<sub>2</sub> na atmosfera, oriundos das indústrias e da queima de combustíveis fósseis (FOLHA ONLINE CIÊNCIA – janeiro de 2006; CARBONO BRASIL – março 2006)

O cimento é umas das principais fontes geradoras de CO<sub>2</sub>, sendo que esta quantidade de gás carbônico contribui para o aumento do efeito estufa. Esta produção tem preocupado o mundo por suas alterações climáticas, bem como o aquecimento global devido ao aumento e acúmulo de gases na atmosfera. Embora já passados um ano de vigência do protocolo de Kyoto - uma convenção das Nações Unidas entre os países para estabelecer princípios que limitem e inibam a poluição, a principal federação poluidora não apresenta sinais de cooperação ao tratado.

Porém pelo mundo são vistos sinais de preocupação e adequação de modelos que visem alternativas para esse problema como o caso de ISAIA et. al (2004) que em pesquisa desenvolvida no Grupo de Estudos e Pesquisas em Concreto (GEPECON) do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria, investigando o uso de adições minerais em concreto estrutural, visando a durabilidade do concreto com altos teores de adições minerais, observou que à medida que aumenta o teor de adições minerais, a emissão de gases poluentes decrescem na mesma proporção da diminuição do teor de cimento na mistura, confirmando pesquisa mostrada por CARVALHO (2002).

Constata-se, portanto que o uso de adições, minimiza a emissão de gases poluentes, e a deposição final dos rejeitos industriais. E os benefícios vão além dos ambientais, as adições podem gerar também um menor custo do concreto, pois estes materiais muitas vezes são rejeitos, portanto encontrados por preços razoáveis, sobretudo, gerando lucro para as empresas “poluidoras” e diminuição final no custo do concreto com a mistura.

### **1.2 A questão da durabilidade das estruturas**

Em virtude de manifestações patológicas como a corrosão das armaduras, o número de estruturas de concreto armado com esse tipo de problema tem crescido muito nos últimos anos, decorrentes do envelhecimento precoce das construções existentes.

Essa perda da capa protetora natural oferecida à armadura pela camada de cobrimento do concreto pode ocorrer através de diversos mecanismos sendo preponderantes a desp passivação por carbonatação. Na maioria das vezes, todo o componente estrutural é atacado pelo ambiente externo, porém a manifestação da corrosão se dá somente de processo de corrosão eletroquímica onde regiões anódicas alteram-se com regiões de caráter preponderantemente catódico.

As adições minerais nos concretos vêm a ser uma das formas de aumentar as características de durabilidade das estruturas. O emprego das pozolanas tem sido a tendências das pesquisas devido as suas propriedades de formação de silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) secundários de baixa densidade, contribuindo para o refinamento do tamanho dos poros, ou seja, a transformação de vazios capilares grandes em muitos vazios de pequenos tamanhos.

### 1.3 A carbonatação no concreto

A carbonatação é um fenômeno natural que acontece nas estruturas onde há presença de CO<sub>2</sub> na atmosfera. Segundo HELENE (1993), “A penetração do CO<sub>2</sub> no concreto se dá por um mecanismo de difusão (...)”, onde o gás ioniza-se combina com a água formando o ácido carboxílico, somente então neste estado que ataca pelos poros, que coincide com a baixa do pH e alcalinidade devido ao consumo do Ca(OH)<sub>2</sub> pelas reações pozolânicas. Logo então, o que influencia a carbonatação é o tipo e quantidade de cimento (reserva alcalina), quanto maior a quantidade de cimento maior a quantidade de C-H.

O processo, denominado carbonatação do concreto, ocorre lentamente, segundo a reação principal:  $Ca(OH)_2 + CO_2 \rightleftharpoons CaCO_3 + H_2O$  (equação 1). O concreto apresenta pH em torno de 13, porém o pH do CaCO<sub>3</sub> é cerca de 9 (à temperatura ambiente), o que altera, substancialmente, as condições de estabilidade química da camada de cobrimento. Esta por sua vez é a que da a proteção à armadura pelo processo de corrosão do aço.

## 2.0 OBJETIVO

Esta pesquisa teve por finalidade verificar a influência na durabilidade das estruturas de concreto frente a carbonatação com a variação das adições minerais de escória e cinza volante em misturas ternárias com e sem adição de da cal hidratada na camada de cobrimento do concreto estrutural. Os teores de adição mineral são de 70% para escória, 20% para a cinza volante em substituição ao cimento e 20% de cal hidratada em substituição em massa da areia. A adição da cal hidratada tem por finalidade repor a reserva alcalina do concreto devido às reações pozolânicas e de carbonatação.

Portanto este trabalho visa a previsão da evolução da deterioração das estruturas de concreto armado através de modelos de comportamento que viabilizam resistência em função da durabilidade e não durabilidade em função da resistência. A abordagem científica da degradação da camada de cobrimento do concreto viabiliza e estima a vida útil das estruturas de concreto expostas durante determinados períodos de tempo em ambientes agressivos como a simulação da atmosfera na câmara climatizada.

## 3.0 DESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS

### 3.1 Dados iniciais

O método de dosagem utilizado na pesquisa é o proposto por HELENE & TERZIAN (1992). Os traços de referência foram moldados inicialmente, com as relações água aglomerante de 0,40; 0,60 e 0,80, fixando o teor de argamassa, de 52 %. O método de dosagem corrige o aumento de volume de argamassa resultante da adição mineral, com redução no volume de areia.

As misturas tiveram as substituições do cimento por adição mineral e da areia em substituição de cal, apresentados na tabela 3.1, que também apresenta as siglas utilizadas para cada mistura no trabalho.

Tabela 3.1 Quantidade de materiais

Mistura	a/ag	CP <sup>4</sup>	CV	E	Cal	Areia	Água	Aditivo <sup>5</sup>
		Kg.m <sup>-3</sup>	Kg.m <sup>-3</sup>	Kg.m <sup>-3</sup>	Kg.m <sup>-3</sup>	Kg.m <sup>-3</sup>	Kg.m <sup>-3</sup>	Kg.m <sup>-3</sup>
R <sup>1</sup>	0,40	462,31	-	-	-	636,60	184,93	-
	0,60	312,61	-	-	-	791,85	187,57	-
	0,80	226,80	-	-	-	913,33	187,57	-
E <sup>2</sup>	0,30	56,08	112,16	392,5437	-	314,60	168,23	1,91
	0,40	47,33	94,66	331,3228	-	563,72	189,33	1,18
	0,50	37,80	75,60	264,5919	-	690,21	185,21	0,76
EC <sup>3</sup>	0,30	65,40	130,80	457,78	130,80	194,23	206,66	9,81
	0,40	47,29	94,58	331,02	94,58	456,34	185,37	4,73
	0,50	37,76	75,52	264,33	75,52	582,27	183,14	2,15

<sup>1</sup> concreto de referência; <sup>2</sup> 70% escória alto forno + 20% de cinza volante; <sup>3</sup> 70% de escória alto forno + 20% de cinza volante + 20% cal; <sup>4</sup> cimento portland; <sup>5</sup> aditivo superplastificante.

Tabela 3.2 Propriedade químicas e físicas dos aglomerantes e pozolanas

Composição Química	Teor em massa			
	CPV - ARI	Cinza Volante	Escória	Cal Hidratada
Perda ao Fogo	3	1,2	0	26,1
SiO <sub>2</sub>	19,3	64,6	34,07	0,9
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,7	27,3	12,97	0,4
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3	2,2	0,55	0,2
CaO	63,4	1,5	41,05	73,1
MgO	1,8	0,8	0,54	0,4
SO <sub>3</sub>	3,1	0,1	0,03	0,2
Na <sub>2</sub> O	1	0,1	0,06	1
K <sub>2</sub> O	0,8	1,5	1,79	

### 3.2 Protótipos e extração dos testemunhos

Os protótipos prismáticos de 70x20x15 foram moldados com a intenção de aproximar o estudo de laboratório com uma viga estrutural em obra, comparando o desempenho dos testemunhos extraídos destes protótipos com corpos de prova moldados e curados sob condições controladas.

Após a moldagem, os protótipos foram colocados ao ar livre, com seu eixo longitudinal orientado no sentido norte-sul, apoiados sobre roletes de concreto. Os protótipos ficaram armazenados e expostos às condições ambientais até a data das extrações dos testemunhos, que foram realizadas aos 28, 91, 182 e 300 dias de idade. Os ensaios de carbonatação acelerada somente foram realizados com os testemunhos extraídos aos 91 e aos 300 dias.



Figura 3.1 – Cura dos protótipos

De cada prisma foram extraídos seis corpos de prova cilíndricos com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, sendo estes testemunhos fracionados em discos de 5 cm de altura nas devidas camadas a serem estudadas. *Camada 1*: de 0,0 cm à 1,0 cm; *Camada 2*: de 2,0 cm à 3,0 cm; *Camada 3*: de 4,50 cm à 5,0 cm.

Para o ensaio de carbonatação acelerada utilizou-se 3 discos de 10 cm de diâmetro por 5 cm de altura para cada camada totalizando 162 discos analisados para as duas idades correspondentes.

Para cada camada foi designada a seguinte nomenclatura: C1 – camada 1; C2 - camada 2; C3 – camada 3; e para cada semana de exposição na câmara climatizada a seguinte nomenclatura: W1 – primeira período; W2 – segundo período; W3 - terceiro período.

### 3.3 Pré-condicionamento dos testemunhos

Os testemunhos extraídos que foram submetidos ao ensaio acelerado, sofreram pré-condicionamento, conforme preconiza a norma RILEM TC 116-PCD (1999) para determinação da perda de peso necessária (água), para obter-se uma concentração média intermediária de umidade que está em equilíbrio com  $(75 \pm 2) \%$  de umidade relativa de um ambiente aéreo com temperatura de  $(22 \pm 2) ^\circ \text{C}$  e com uma distribuição uniforme da água evaporável no corpo-de-prova.

Os testemunhos a serem ensaiados foram identificados, pesados e pintados na face lateral e inferior a camada a ser analisada com três demãos de verniz poliuretânico (PVC). As face superior foi mantidas de modo a permitir a penetração do  $\text{CO}_2$  no sentido longitudinal. Após foram seladas com filme de PVC, saco plástico selado e plástico aluminado selado a fim de manter a vedação, sendo mantidas em estufa a  $50^\circ \text{C}$  sem trocas externas por um tempo não inferior a 14 dias e não superior 27 dias. A temperatura de  $50^\circ \text{C}$  acelera a redistribuição do gradiente de umidade axial no sentido de obter-se uma distribuição homogênea da umidade por todo o corpo de prova.

### 3.4 Ensaio acelerado de carbonatação

Com o objetivo de simular uma atmosfera com presença de  $\text{CO}_2$ , realizou-se o ensaio em câmara climática por um tempo muito inferior ao de uma mesma peça em exposição natural. O ensaio acelerado com teor de 5% de  $\text{CO}_2$  e 75 % de U.R, e foi realizado conforme a RILEM CPC - 18, em câmara climática.

O teor elevado de  $\text{CO}_2$  permite realizar o ensaio em um tempo muito menor do que se o ensaio fosse realizado em uma atmosfera com teor normal de gás carbônico. Se considerarmos que as amostras

estivessem expostas a uma atmosfera urbana, de 0,3% de concentração de gás carbônico, a mesma profundidade de carbonatação alcançada com o teor de 5% de CO<sub>2</sub> e 12 semanas de ensaio, seria alcançado apenas com 200 semanas, ou seja em um período superior a 4 anos, conforme equação proposta por NEVILLE (1997).

Os ensaios de acelerados tem sido utilizados para estimarem o período de tempo que levaria pra se alcançar a mesma profundidade carbonatada com um outro teor de CO<sub>2</sub>, através de uma relação, proposta por NEVILLE (1997), onde  $t_a / t_n = C_n / 5$ ; onde  $t_a$  é o tempo de ensaio acelerado a 5% de concentração de CO<sub>2</sub>, e  $t_n$  é o tempo que levaria para se alcançar a mesma profundidade carbonatada a uma concentração de CO<sub>2</sub> de  $C_n$  %.

Porém os tempos de exposição na câmara não foram iguais a todos os testemunhos fracionados. Visto que os traços com adições consomem maior quantidade de Ca(OH)<sub>2</sub> nas reações pozolânicas, proporcionando uma tendência de maior carbonatação, tiveram menor tempo de exposição. Portanto os períodos de exposição ficaram os seguintes: Traços de referência: 4, 8 e 12 semanas; e Traços com adição mineral 3, 6 e 9 semanas de exposição.

A medição da profundidade de carbonatação é feita ao fim da exposição nas determinadas semanas de exposição com o uso de digitalização das imagens e retirada de média de 100 leituras, fazendo um tratamento estatístico a fim de que todos os valores não ultrapassassem 10% de coeficiente de variação. Para a definição da zona carbonatada utilizou-se de fenolftaleína, depois de rompido diametralmente em prensa hidráulica. Foi tomado o cuidado de também ser retirar os valores com paquímetro digital que foram comparados com os arquivos digitalizados, não verificando diferença significativa.

A profundidade carbonatada é possível de ser verificada visualmente pela coloração transparente (pH abaixo de 9 – ponto de viragem), já que a região não carbonatada apresenta uma coloração rósea (pH acima que 9).

## **4.0 RESULTADOS**

### **4.1 Introdução**

A pesquisa estudou 9 misturas em 4 idades: 28, 91, 182 e 300 dias. Porém para o ensaio acelerado foram utilizadas as idades de 91 e 300 dias. Na presente análise será apresentado apenas os resultados dos 90 dias.

O estudo da análise da camada do cobrimento do concreto, substituiu a areia em massa adicionando a cal hidratada na mistura com o objetivo de repor a reserva alcalina do C-H, consumido pela reações pozolânicas. Os valores adotados nestas pesquisas coincidem com os de MIRA, PAPADAKIS & TSIMAS (2002), onde utilizaram teores de 10 e 20%. Também estes valores se aproximam de outras pesquisas no grupo de pesquisa GEPECON, onde encontrou este teor de 20% dito como satisfatório.

A adição da cal hidratada promove uma mudança na estrutura das propriedades do concreto, aumentando o pH da solução, comparado com a mistura sem adição da cal.

As análises e conclusões referem-se a comparação direta entre as misturas com e sem cal e com as misturas de referência.

### **4.2 Profundidades carbonatadas e coeficientes de carbonatação**

A seguir na tabela podemos observar as profundidades carbonatadas das camadas estudadas e com as relações  $a/a_g$  e os coeficientes de carbonatação acelerada.

Tabela 4.1 – Profundidades carbonatadas (mm) e coeficientes de carbonatação acelerada (mm/sem<sup>0.5</sup>)

Série	Camada	Relação a/ag	e - 1° per	e - 2° per	e - 3° per	KCO2 (mm/sem <sup>0.5</sup> )
R4	C1	0.40	0.22	0.51	0.46	0.1439
	C2	0.40	0.38	0.90	0.99	0.3506
	C3	0.40	0.56	1.40	1.46	0.3657
R6	C1	0.60	3.14	3.30	2.70	2.2668
	C2	0.60	6.04	6.66	7.28	2.4398
	C3	0.60	8.96	9.56	9.84	2.5032
R8	C1	0.80	12.49	12.10	11.80	6.8504
	C2	0.80	19.40	18.76	18.46	7.0514
	C3	0.80	24.41	26.55	24.41	6.6821
E3	C1	0.30	7.53	7.46	7.50	6.4111
	C2	0.30	12.32	16.53	16.79	6.7890
	C3	0.30	24.06	22.93	24.96	7.1660
E4	C1	0.40	14.85	13.71	14.11	9.3130
	C2	0.40	22.70	23.46	22.31	9.5484
	C3	0.40	28.77	30.22	29.50	9.3104
E5	C1	0.50	15.39	15.31	14.36	10.1590
	C2	0.50	23.29	23.69	22.85	9.9303
	C3	0.50	33.05	31.40	29.86	9.4579
EC3	C1	0.30	1.14	0.41	0.44	2.8028
	C2	0.30	5.62	5.54	5.99	2.6234
	C3	0.30	11.57	10.98	10.26	2.5675
EC4	C1	0.40	10.00	7.52	8.30	7.4172
	C2	0.40	15.97	16.27	17.06	7.1310
	C3	0.40	25.69	25.16	26.06	7.4636
EC5	C1	0.50	10.08	11.01	9.55	8.6564
	C2	0.50	21.86	20.04	19.25	8.6915
	C3	0.50	28.27	29.43	28.89	8.3535

Observa-se que a adição de cal hidratada reduziu as profundidades de carbonatação das misturas com adição mineral, em todas as idades de ensaios. Para todas as idades de ensaio, a mistura ternária E5 apresentou as maiores profundidades carbonatadas para as três relações a/ag. As menores profundidades carbonatadas são encontradas na mistura de referência R4, também a mistura R6 e EC3 apresentam profundidades carbonatadas semelhantes. Porém os traços semelhantes E e EC apresentam diferenças significativas.

Observa-se que, como para os valores de profundidade carbonatada, ocorre um acréscimo nos coeficientes de carbonatação, mesmo com a adição de cal, quando comparados com os concretos de referência. Porém, novamente comparados os traços E e EC, a cal hidratada promove uma redução nos coeficientes de carbonatação acelerada.

Pode-se dizer também que não existe uma diferença significativa entre as camadas 2 e 3, visto que os valores dos coeficientes de carbonatação não são superiores a 5%. O que podemos observar é que a adição da cal hidratada promoveu um maior refinamento nos poros na camada superficial dos traços EC comparados com o traço E.

Portanto, pode-se dizer que a adição de cal hidratada provoca uma redução para todas as misturas, o que evidenciando o bom desempenho da adição de cal nestas misturas, com relação as profundidades carbonatadas e os coeficientes de carbonatação acelerada.

### 4.3 Coeficientes de carbonatação x relação a/ag

Os gráficos a seguir mostram as misturas com cal e sem cal assim como a mistura de referência. Observa-se a evolução dos coeficientes de carbonatação, com o aumento da relação a/ag.

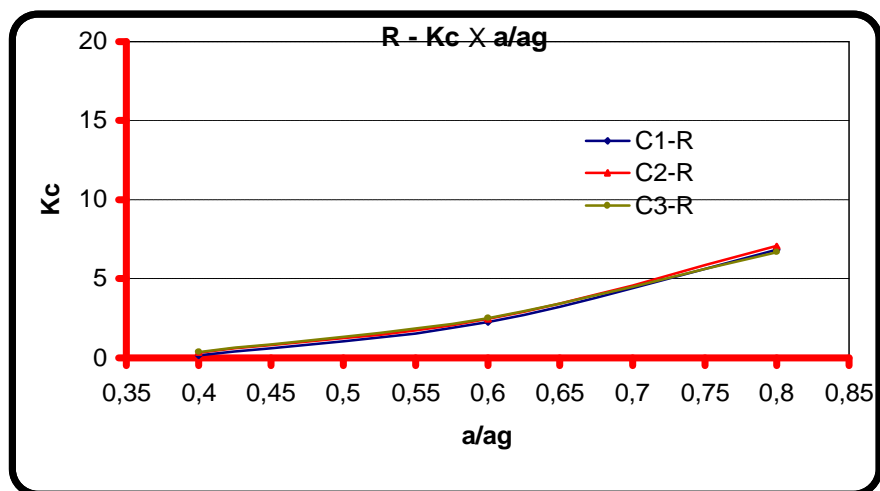


Figura 4.1 – Traços de referencias - Kc x a/ag

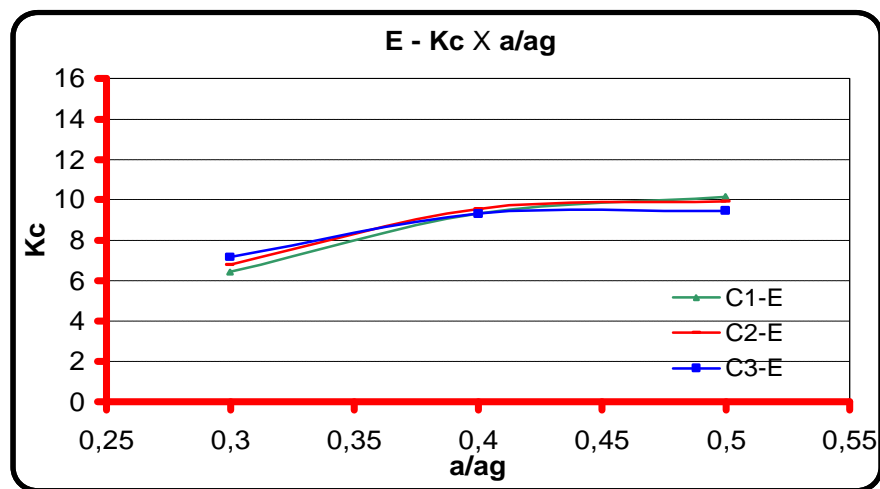


Figura 4.2 – Traços E+CV - Kc x a/ag

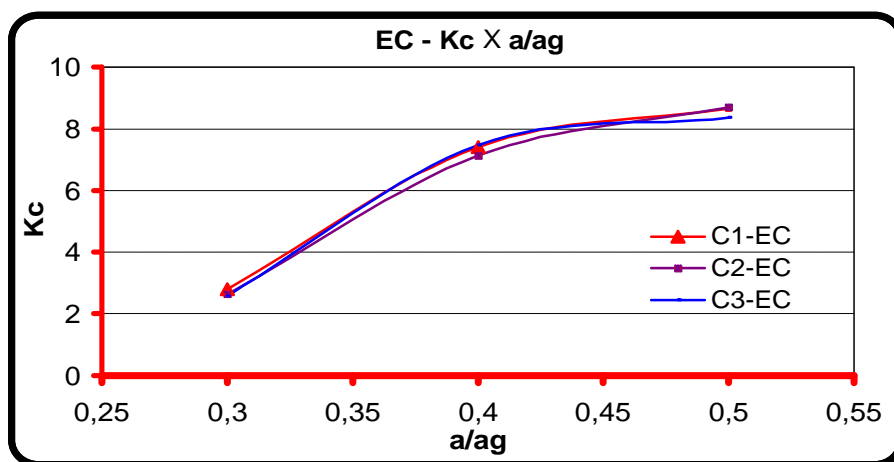


Figura 4.3 – Traços E+CV+C - Kc x a/ag



Observa-se que para todas as misturas, o aumento relativo do coeficiente de carbonatação em relação a mistura de referência é crescente com a diminuição da relação a/ag, ou seja quanto maior a relação a/ag, menor o crescimento relativo dos coeficientes de carbonatação.

#### **4.4 Discussão dos resultados**

De uma maneira geral, com a adição de cal hidratada nas misturas com altos teores de adições minerais ocorre uma redução nas profundidades carbonatadas.

As misturas com adição de cal tiveram as profundidades carbonatadas, de uma maneira geral, superiores as misturas de referência. Observa-se também para todas as misturas, que a redução da relação a/ag provoca uma redução nas profundidades carbonatadas, confirmando os trabalhos.

Quando comparadas as misturas com cal com as misturas de referência, observa-se que o acréscimo relativo é maior para as menores relações a/ag. A redução da relação a/ag é mais efetiva na redução da profundidade carbonatada para as misturas de referência.

As maiores profundidades carbonatadas foram da mistura ternária E, o que comprova a eficiência da adição de cal para a mistura EC. As menores profundidades carbonatadas foram para as misturas EC3, e para as misturas de referência.

A constatação da redução das frentes carbonatadas ocorre devido a reposição da reserva alcalina da cal nas adições. O consumo do C-H nas reações pozolânicas nas misturas sem cal evidenciou uma maior profundidade carbonatada que na mistura com adição da cal.

Quando utilizamos a cal, é criada uma estrutura mais densa, que é responsável pela diminuição na carbonatação do concreto, de acordo também com estudos de MIRA, PAPADAKIS & TSIMAS (2002) que adicionaram a cal hidratada em concretos que contendo materiais pozolânicos, obtendo também um significativo incremento na durabilidade.

Portanto a utilização de altos teores de adições minerais em concreto, tem um inconveniente, que é um aumento na velocidade de neutralização do pH da camada de cobrimento do concreto, o que pode levar a processos de corrosão das armaduras. Em decorrência disso a adição da cal hidratada em concretos com altos teores de adições minerais, visou suprir a reserva alcalina perdida pela substituição de cimento por adições minerais, assim como produzir uma pasta com menor porosidade.

Em uma análise da classificação dos coeficientes de carbonatação, pode-se dizer que a mistura EC3, teve o melhor comportamento de todas as misturas com adições minerais, superada apenas pela mistura de referência.

De acordo com a pesquisa, a adição de cal hidratada reduz as profundidades carbonatadas das misturas com altos teores de adições minerais, bem como os coeficientes de carbonatação acelerada, ao mesmo tempo reduzindo a permeabilidade e a interconexão de poros das pastas estudadas, assim como a redução da porosidade das pastas.

#### **5.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

AITCIN, P. C. **Concreto de alto desempenho**. São Paulo: Editora Pini, 2000.

CARBONO BRASIL – **Nível dos mares deve subir 1,5 metro até 2200**. Disponível na Internet em : <http://www.carbonobrasil.com/>, visitado em março de 2006.

CARVALHO, J. **Análise do Ciclo de Vida ambiental aplicada à construção civil – Estudo de caso: comparação entre cimentos portland com adição de resíduos**. 2002, 102 p. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

FOLHA ONLINE CIÊNCIA – **Emissão CO<sub>2</sub> pode aumentar 50% até 2020**. Disponível na Internet

em : <http://www1.folha.uol.com.br/folha/ciencia/ult306u10603.shtml>, visitado em fevereiro de 2006.

HELENE, P. R. L., TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. 1 ed., São Paulo: Editora Pini. 1992.

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**. São Paulo, 1995. 280 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1995.

ISAIA, G. C.; VAGHETTI, M. A.O.; GASTALDINI, A. L. **Efeito de misturas pozolânicas sobre a carbonatação do concreto de cimento Portland**. Rio de Janeiro, IBRACON 1998.

\_\_\_\_\_. **Carbonatação acelerada e natural de concreto com alto teor de pozolanas: um estudo preliminar**. Foz do Iguaçu – PR, IBRACON 2001.

ISAIA, G.; GASTALDINI, A. G. - **Environmentals and Economics Outlook on Concrete with High Mineral Additions Contents: CASE STUDY** . Revista ANTAC, 2004

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **CONCRETO – Estrutura, Propriedade e Materiais**. 1 ed. São Paulo, PINI. 1994.

MIRA P., PAPADAKIS V. G., TSIMAS S. **Effect of lime putty addition on structural and durability properties of concrete**. CEMENT AND CONCRETE RESEARCH, v. 32, p. 683-689. USA: Pergamon Press, 2002.

NEVILLE, A. **Propriedades do concreto**. São Paulo: Pini, 1997.

OHGA, H.; NAGATAKI, S. **Prediction of carbonation depth of concrete with fly ash**. In: Malhotra, V. M. (ed.) International Conference on fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete, 3rd, Trondheim, 1989. *Proceedings*. American Concrete Institute, Detroit, 1989, 2 v., v. 2, p. 275-294 (SP-114).

RILEM. **Recommendations of TC 116-PCD. Tests for gas permeability of concrete**. Revista Materials and Structures. V. 32, n. 217, p. 163-179, abril 1999.

STUMPP, M. J. **carbonatação de concretos com altos teores de adições mineral e cal hidratada**. Santa Maria, 2003. 141 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, 2003.

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**. Santa Maria, 1999. 113 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, 1999.

WOLF, J.; DAL MOLIN, D. **Carbonatação de argamassas e concretos - Fatores intervenientes -** . Simpósio sobre a Patologia das Edificações - Prevenção e Recuperação. 24 e 25 de outubro de 1989. Porto Alegre / RS. pp 118-133.

## 6.0 AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer FAPERGS, CAPES e CNPq, a Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) pela disponibilização do espaço e dos laboratórios, ao Laboratório de Materiais e Construção Civil (LMCC) do Centro de Tecnologia (CT) da UFSM e aos alunos bolsistas e voluntários.