

Influência das adições minerais na durabilidade do concreto

A. Castro, UFG; R. Ferreira, UFG; A. Lopes, FURNAS;
A. Paula Couto, UFG; V. Braun, UFG; H. Carasek, UFG; O. Cascudo, UFG*

Resumo

Este trabalho apresenta parte do estudo desenvolvido dentro do programa de P&D da ANEEL, ciclo 2000-2001, que tem como um dos objetivos discutir a influência das adições minerais na durabilidade do concreto frente à ação de íons cloreto e carbonatação, além de outras propriedades. Com este intuito, foram moldados concretos contendo adições de sílica ativa, metacaulim, cinza de casca de arroz, cinza volante e escória de alto-forno em substituição parcial da massa de cimento, além do concreto sem adição, com variação da relação água/aglomerante. Os corpos-de-prova foram submetidos a ensaios de resistência à compressão, resistividade elétrica superficial, absorção por capilaridade, penetrabilidade de íons cloreto, carbonatação acelerada e carbonatação natural. Como resultados, ressaltam-se o comportamento distinto apresentado pelas adições de elevada reatividade e de baixa reatividade. Podendo-se ainda destacar o aumento da resistência à compressão em até 33%, e uma redução de até 87% da penetrabilidade de íons cloreto que algumas adições apresentaram em relação ao concreto de referência. Com relação ao desempenho frente ao gás carbônico, foi realizada uma correlação entre os dois processos de carbonatação, cuja velocidade de carbonatação acelerada resultou em cinco vezes superior à velocidade obtida pelo processo natural.

Palavras Chave: adições minerais, carbonatação, cloretos, concreto, durabilidade.

I. INTRODUÇÃO

Por razões econômicas e ecológicas, o uso de subprodutos pozzolânicos e cimentícios como adições no concreto está aumentando gradativamente. A utilização destas adições minerais tem contribuído para um melhor desempenho das estruturas de concreto, englobando os seguintes aspectos: econômicos, com a redução de energia na produção do aglomerante; ecológicos, quanto à utilização de subprodutos industriais; e técnicos, melhorando as propriedades do concreto e, conseqüentemente, aumentando sua durabilidade [1 e 2]. SABIR et al. [3] chegam a afirmar que o passo mais importante do desenvolvimento do concreto, neste último século, foi o início da utilização destes subprodutos na produção do concreto, como a cinza volante, escória de alto-forno e sílica ativa. Esta utilização é agora estendida a outros resíduos como a cinza de casca de arroz e a metacaulim.

As adições minerais reagem com os produtos de hidratação do cimento; sendo que a reação química

principal, denominada reação pozzolânica, é facilitada pela dissociação da sílica amorfa (proveniente dessas adições), produzindo sílica na solução de poros, que então reage com o hidróxido de cálcio para formar gel de C-S-H. A importância técnica desta reação pozzolânica deriva, principalmente, de três aspectos: geralmente é uma reação lenta e, portanto, as taxas de liberação de calor e de desenvolvimento da resistência são conseqüentemente lentas; é uma reação que consome hidróxido de cálcio, o que representa uma contribuição importante para a durabilidade da pasta endurecida de cimento frente a meios ácidos; finalmente, os estudos sobre distribuição do tamanho de poros das pastas de cimento hidratado têm mostrado que os produtos da reação são bastante eficientes no preenchimento dos espaços, tamponamento e obstrução (efeito fíler) dos poros capilares grandes, melhorando assim a resistência e diminuindo a permeabilidade do sistema [3 e 4].

A durabilidade das estruturas de concreto tem sido uma das principais preocupações das pesquisas atuais tendo em vista a predição da vida útil. Entre os temas mais pesquisados que integram os modelos de durabilidade e de vida útil das estruturas de concreto destaca-se a corrosão das armaduras, seja por carbonatação ou ataque de cloretos, por ser a manifestação patológica que mais danos causa, não só pelos aspectos econômicos envolvidos como pelas dificuldades das técnicas de recuperação e sua eficácia em longo prazo.

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo estudar a influência das adições minerais nas propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto.

II. PROGRAMA EXPERIMENTAL

A. Variáveis

A.1. Tipo de adição mineral: Sílica ativa (S), teor de 10%; Cinza de casca de arroz (A), teor de 10%; Metacaulim (M), teor de 10%; Cinza volante (V), teor de 25%; Escória de alto-forno (E), teor de 65%; Sem adição (situação de referência - R). As adições foram empregadas no concreto em misturas binárias e utilizadas em substituição parcial ao cimento Portland, com teores percentuais em massa. Na seleção dos tipos de adições minerais procurou-se englobar os principais materiais utilizados atualmente na produção de concretos, como a cinza volante, a escória de alto-forno e a sílica ativa, além da utilização de “novos” resíduos como a cinza de casca de arroz e a metacaulim. Os teores de substituição foram embasados pela pesquisa bibliográfica realizada anteriormente ao estudo experimental e todos esses materiais são amplamente estudados por pesquisadores de diversas instituições da área de tecnologia do concreto, sendo, portanto, um assunto com grande fonte bibliográfica

* V. Braun; A. Castro; R. Ferreira; A. Paula Couto: Mestres em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Goiás.
H. Carasek; O. Cascudo: Professores Doutores da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás.
A. Lopes: Engenheira Civil, MSc. Trabalha no Departamento de Apoio e Controle Técnico de FURNAS Centrais Elétricas S.A.

A.2. *Relação água/aglomerante:* 0,40; 0,55 e 0,70. A variação da relação água/aglomerante propicia a obtenção de concretos com diferentes estruturas internas, conseqüentemente, têm-se alteradas além das propriedades mecânicas as propriedades relacionadas à durabilidade. Essa multiplicidade de concretos permitiu um melhor entendimento do desempenho das adições minerais, pelo estudo comparativo das propriedades consideradas na pesquisa desenvolvida, quais sejam: resistência à compressão, módulo de elasticidade, absorção e permeabilidade à água, resistividade elétrica superficial, potencial eletroquímico de corrosão, taxa de corrosão gravimétrica, velocidade de carbonatação, entre outras. Destaca-se que neste artigo são apresentadas e discutidas apenas algumas dessas propriedades citadas.

A.3. *Procedimento de cura do concreto:* *Cura CO* – armazenagem em local coberto e ventilado, protegido de intempéries (área de armazenamento), depois de desenformados, ficando nesta condição até a data de ensaio. Esta condição representa as condições reais no período crítico da região metropolitana de Goiânia, correspondendo aos meses de abril a setembro. Trata-se da pior situação, onde os corpos-de-prova ficam sem nenhum procedimento de cura efetiva, tanto antes como depois de desmoldados. *Cura C3* - cura em ambiente de laboratório, sem controle de temperatura e umidade, com molhamento dos corpos-de-prova nos três primeiros dias. Este molhamento foi feito mediante aspersão de água utilizando-se mangueira, com frequência de três vezes ao dia e duração aproximada de 15 minutos cada aspersão. Depois destes 3 dias de cura, os corpos-de-prova foram desenformados e levados para a área de armazenamento, ficando lá até a data de ensaio. *Cura C7* - cura em ambiente de laboratório, sem controle de temperatura e umidade, com molhamento dos corpos-de-prova nos sete primeiros dias. Este molhamento foi feito mediante aspersão de água utilizando-se mangueira, com frequência de três vezes ao dia e duração aproximada de 15 minutos cada aspersão. Depois destes 7 dias de cura, os corpos-de-prova foram encaminhados para a área de armazenamento ficando lá até a data de ensaio. *Cura CQ* - cura química, feita em laboratório com a aspersão de um produto a base de parafina, mediante pulverizador, formando uma película uniforme sobre a superfície logo após a concretagem e desmoldagem, sendo os corpos-de-prova depois encaminhados para a área de armazenamento e ficando lá até a data de ensaio. *Cura CH* - cura em câmara úmida. Os corpos de prova, depois da desmoldagem (36 horas depois), foram mantidos em câmara úmida com controle de temperatura e umidade relativa (temperatura de $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ e umidade relativa superior a 90%) até a idade de 28 dias, em seguida sendo encaminhados para a área de armazenamento e ficando lá até a data de ensaio.

B. Materiais

Para a confecção dos concretos, utilizou-se areia natural de leite de rio, de natureza quartzosa, classificada como fina de acordo com a ABNT NBR 7211. O agregado graúdo utilizado foi pedra britada de rocha do tipo litológico micaxisto, com dimensão máxima característica de 19 mm em conformidade com a ABNT NBR 7211. As distribuições granulométricas desses agregados são apresentadas nas Figuras 1 e 2.

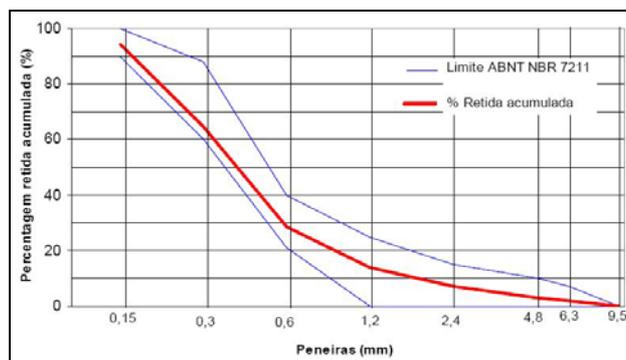


Figura 1 – Curva granulométrica da areia natural.

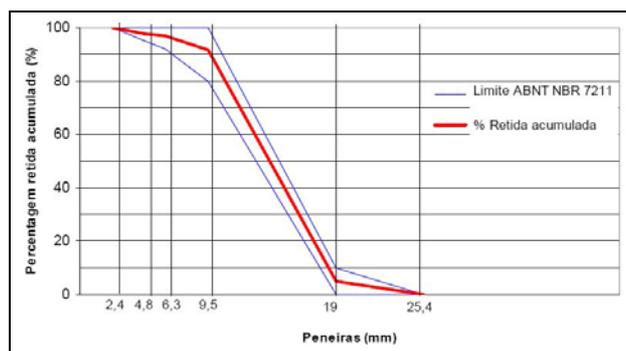


Figura 2 – Curva granulométrica da brita 19 mm.

O aglomerante empregado foi o cimento Portland CP II F-32 cujas características principais estão apresentadas na Tabela 1.

As adições minerais utilizadas foram a sílica ativa, a escória de alto-forno, a cinza de casca de arroz, a cinza volante e o metacaulim, cujas características principais estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Principais características do cimento e adições minerais.

Característica ou Propriedade Determinada	Cimento Portland CP II F32	Sílica Ativa	Meta-caulim	Cinza de Casca de Arroz	Escória de Alto-forno	Cinza Volante	
Massa específica (kg/dm ³)	3,0	2,2	2,5	2,2	2,9	2,3	
Área específica BET (m ² /kg)	(a)	15 990	21 250	19 690	900	1 500	
Componentes Químicos (%)	Perda ao fogo	6,6	4,1	4,3	9,8	0,3	1,2
	(SiO ₂)	18,7	91,1	46,7	82,8	35,0	62,0
	(Al ₂ O ₃)	5,1	0,2	41,4	0,5	12,4	23,3
	(Fe ₂ O ₃)	3,3	0,3	3,5	2,0	0,2	5,4
	(CaO)	62,4	0,8	0,5	1,1	41,6	2,0
	(MgO)	0,7	0,8	0,5	1,3	8,7	1,9
	(Na ₂ O)	0,3	0,2	0,0	0,2	0,3	0,4
	(K ₂ O)	0,5	0,3	0,3	0,6	0,6	3,0
(SO ₃)	3,1	0,5	0,6	0,1	0,1	-	

Obs.: (a) - Área específica Blaine do cimento 3860 m²/kg.

C. Métodos

No desenvolvimento do programa experimental foram utilizados os seguintes métodos de ensaio normalizados: resistência à compressão (ABNT NBR 5739), penetrabilidade de íons cloreto (ASTM C 1202), resistividade aparente superficial (ASTM G 57) e absorção de água por capilaridade (ABNT NBR 9779).

O ensaio de carbonatação acelerada consistiu da submissão do concreto ao ataque do dióxido de carbono pela inserção dos corpos-de-prova em uma câmara de carbonatação. Foi estabelecida temperatura de $(28 \pm 1)^\circ\text{C}$, umidade relativa de 65% e teor de CO₂ entre 5% e 6%. Os protótipos foram inseridos na câmara após atingirem 91 dias

de idade e permaneceram no processo de carbonatação acelerada até registrarem a despassivação das armaduras ou quando completaram 7 ciclos de indução. Cada ciclo correspondeu a uma semana em câmara (com ataque de CO₂) e uma semana fora da câmara (sem ataque de CO₂).

D. Concretos Estudados

No estudo de dosagem foi utilizado o método empregado pelo Departamento de Apoio e Controle Técnico de Furnas, que se fundamenta no desenvolvimento experimental de diversas combinações entre os agregados (alterando o módulo de finura da mistura), de forma a minimizar o consumo de cimento sem prejuízo da resistência mecânica e da trabalhabilidade do concreto.

Durante o desenvolvimento da dosagem, as misturas preliminares resultam em gráficos que relacionam módulo de finura com consumo de água ou resistência à compressão, e relação água/cimento com resistência à compressão ou consumo de cimento. Por fim, fazem-se alguns ajustes do teor de agregado miúdo. Por meio desses gráficos obtém-se o traço desejado.

Este método é empregado usualmente por Furnas no desenvolvimento dos mais variados concretos. A Tabela 2 apresenta as características do proporcionamento dos concretos estudados.

Tabela 2 – Proporcionamento dos concretos estudados.

Concreto	Teor adição (%)	a/ag	Consumo cimento (kg/m ³)	Traço em massa de aglomerante (cimento : adição : areia : brita)
Referência	0	0,40	552,0	1,0 : 0,0 : 0,78 : 2,10
		0,55	368,0	1,0 : 0,0 : 1,70 : 3,15
		0,70	274,0	1,0 : 0,0 : 2,61 : 4,28
Escória de Alto-forno	65	0,40	193,2	0,35 : 0,65 : 0,78 : 2,08
		0,55	128,8	0,35 : 0,65 : 1,70 : 3,14
		0,70	95,9	0,35 : 0,65 : 2,60 : 4,28
Cinza Volante	25	0,40	414,0	0,75 : 0,25 : 0,77 : 2,05
		0,55	276,0	0,75 : 0,25 : 1,68 : 3,11
		0,70	205,5	0,75 : 0,25 : 2,58 : 4,24
Cinza de Casca de Arroz	10	0,40	496,8	0,90 : 0,10 : 0,77 : 2,07
		0,55	331,2	0,90 : 0,10 : 1,69 : 3,13
		0,70	246,6	0,90 : 0,10 : 2,60 : 4,26
Metacaulim	10	0,40	496,8	0,90 : 0,10 : 0,77 : 2,07
		0,55	331,2	0,90 : 0,10 : 1,69 : 3,13
		0,70	246,6	0,90 : 0,10 : 2,60 : 4,26
Sílica Ativa	10	0,40	496,8	0,90 : 0,10 : 0,77 : 2,07
		0,55	331,2	0,90 : 0,10 : 1,69 : 3,13
		0,70	246,6	0,90 : 0,10 : 2,60 : 4,26

III. RESULTADOS OBTIDOS

Neste item são apresentados e discutidos os resultados de resistência à compressão, penetrabilidade de íons cloreto, carbonatação do concreto, resistividade elétrica aparente superficial e absorção de água por capilaridade.

Os resultados individuais de resistência à compressão, penetrabilidade de íons cloreto, resistividade elétrica aparente e absorção de água por capilaridade foram submetidos a uma análise estatística de variância (ANOVA).

Uma vez verificada a significância da influência das variáveis, realizou-se a comparação múltipla de médias pelo método de Duncan, com o intuito de agrupar as médias que não diferem significativamente entre si e separar as que diferem, formando assim os grupos. Enquanto que os resultados de velocidade de carbonatação acelerada e natural foram submetidos a uma análise estatística de correlação.

A. Resistência à Compressão

A análise estatística mostrou que o modelo fatorial adotado é significativo. Além disto, o valor resultante de R²_{mod} foi 0,98, significando que 98% da variação total dos dados é explicada pelo modelo adotado.

A análise de variâncias também evidenciou que os efeitos individuais dos fatores principais analisados – tipo de concreto (adição) e relação a/ag – são estatisticamente significativos a um nível de confiança de 95%. Sobre este aspecto, pode-se constatar que a variável mais influente na resistência à compressão foi a relação a/ag, enquanto o tipo de concreto mostrou-se com menor influência.

Na Figura 3 são mostrados os valores médios de resistência à compressão para cada tipo de concreto (adição), em função da relação a/ag.

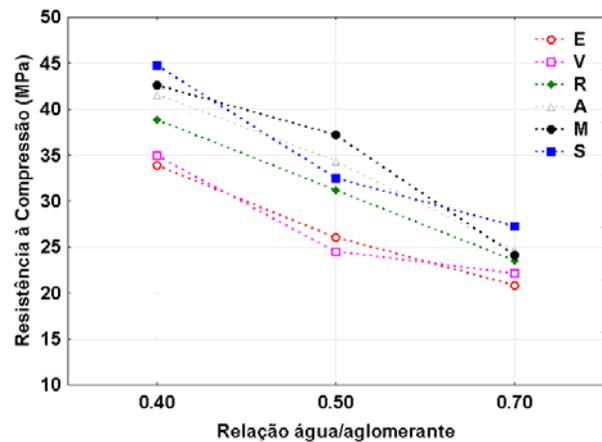


Figura 3 – Valores médios de resistência à compressão para cada concreto em função da relação a/ag.

Analisando-se esta figura percebe-se um comportamento bem definido, e já consagrado, caracterizado pela redução da resistência à compressão com o aumento da relação a/ag, comportamento este que está em conformidade com a lei de Abrams, a qual sugere uma relação aproximadamente parabólica entre a resistência à compressão e a relação água/cimento.

Na Figura 4 são mostrados, os valores médios globais de resistência à compressão para cada tipo de concreto (adição), com seus intervalos de confiança de 95% e seus desvios padrões.

É importante observar a tendência geral dos valores de resistência à compressão, cujas médias são crescentes na seguinte ordem: escória de alto-forno e cinza volante, referência, cinza de casca de arroz, metacaulim e sílica ativa.

Nota-se que a substituição parcial do cimento por adições de elevada reatividade pode levar a um significativo incremento de resistência à compressão axial, podendo-se destacar o desempenho dos concretos com sílica ativa e metacaulim, que apresentaram os melhores desempenhos corroborando os resultados de CALDARONE et al.[5].

No entanto, os concretos com adições de baixa reatividade, escória de alto-forno e cinza volante, apresentaram médias globais inferiores à do concreto de referência, como observado por RAMEZANIANPOUR & MALHOTRA [6].

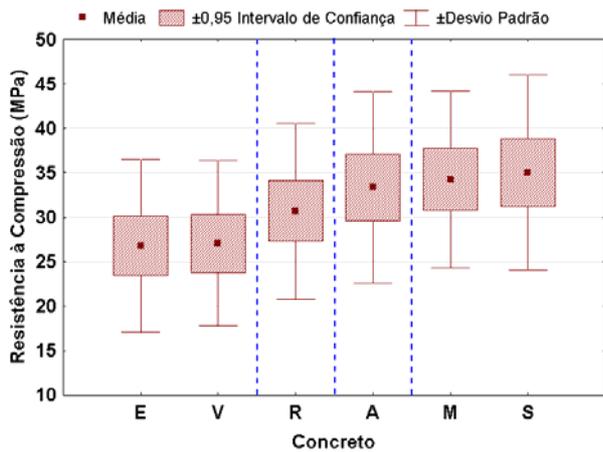


Figura 4 – Valores médios globais de resistência à compressão para todos os concretos. As linhas tracejadas verticais definem os grupos que diferem significativamente de acordo com o teste de Duncan.

B. Penetrabilidade de Íons Cloreto

Os resultados dos ensaios de penetrabilidade de íons cloreto foram analisados com base nos critérios de classificação quanto ao risco de penetração de íons cloreto definidos pela ASTM C 1202, conforme mostrado na Tabela 3; além da análise estatística de variância (ANOVA).

Tabela 3 – Critérios de avaliação dos valores de penetrabilidade de íons cloreto de acordo com a ASTM C 1202.

Carga passante (C)	Penetração de íons cloretos
> 4000	Alta
2000 - 4000	Moderada
1000 - 2000	Baixa
100 - 1000	Muito baixa
<100	Desprezível

A análise estatística dos resultados mostrou que o modelo fatorial adotado é altamente significativo, resultando em um valor de R^2_{mod} igual a 0,98. A análise mostrou, também, que os efeitos individuais dos fatores principais analisados: tipo de concreto (adição) e relação a/ag, são estatisticamente significativos a um nível de confiança de 95%. Neste contexto, pode-se constatar que a variável mais influente foi o tipo de concreto (adição).

No gráfico seguinte (Figura 5) são mostrados os valores médios de carga passante para cada tipo de concreto (adição) em função da relação a/ag.

Analisando-se a Figura 5 percebe-se um comportamento muito bem definido, caracterizado pelo crescimento do valor da carga passante com o aumento da relação a/ag; comportamento similar também foi observado por GRUBER et al. [7].

Percebe-se que este comportamento é mais pronunciado no concreto de referência, enquanto que nos concretos com adições este aumento é pouco acentuado. Esta constatação vem comprovar que, em algumas situações, o benefício do emprego das adições minerais pode ser mais importante do que a redução da relação a/ag, conforme também observado por DETWILLER et al. [8] e BODDY et al. [9].

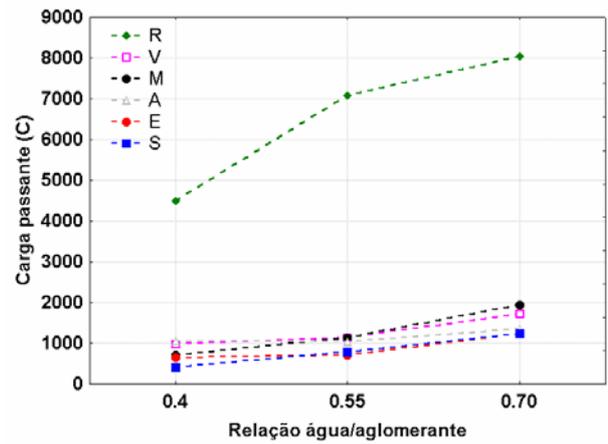


Figura 5 – Valores médios de penetrabilidade de íons cloreto para cada tipo de concreto em função da relação a/ag.

Na Figura 6 são mostrados, os valores médios globais de carga passante para cada tipo de concreto (adição).

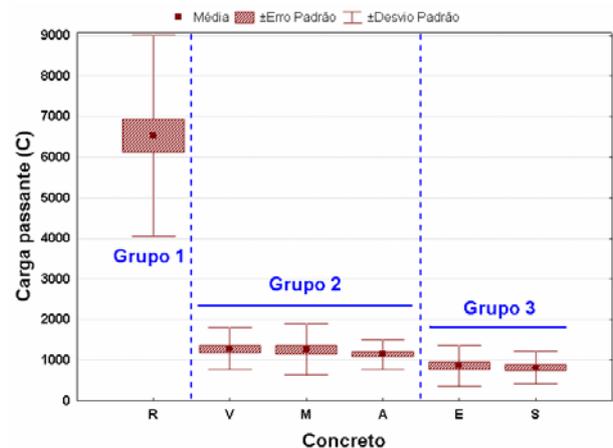


Figura 6 – Valores médios globais de penetrabilidade de íons cloreto para todos os concretos. As linhas tracejadas verticais definem os grupos que diferem significativamente de acordo com o teste de Duncan.

É importante observar nessa figura a tendência geral da penetrabilidade de íons cloreto, cujos valores de carga passante reduzem na seguinte ordem: referência, cinza volante, metacaulim, cinza de casca de arroz, escória de alto-forno e sílica ativa.

Os concretos com adições minerais sempre apresentaram maior resistência à penetração de cloreto quando comparados ao concreto de referência, como se pode notar nas Figuras 5 e 6.

Adicionalmente, a análise de variância apontou a variável tipo de adição mineral como a variável de maior influência sobre o valor da carga passante, ou seja, o emprego de adições minerais é o fator mais importante quando se pretende obter concretos mais resistentes ao ingresso de íons cloreto.

Com relação aos critérios da ASTM C 1202, pode-se observar que os concretos de referência enquadram-se na zona de alta penetrabilidade de íons cloreto; os concretos com adição de cinza volante, cinza de casca de arroz e metacaulim enquadram-se na zona de baixa penetrabilidade de íons cloreto, enquanto que os concretos com escória de alto-forno e sílica ativa enquadraram-se na zona de muito baixa penetrabilidade de íons cloreto. Do ponto de vista de engenharia, a utilização das adições minerais, nos teores estudados, mostrou-se ser indispensável quando se pretende

projetar uma estrutura durável em ambiente de elevada agressividade, principalmente na presença de cloretos.

C. Carbonatação do Concreto

Foram realizadas medidas da profundidade da frente de carbonatação após cada período de ataque, seguindo algumas recomendações da RILEM CPC-18 [10].

Essas profundidades foram mensuradas utilizando-se solução de indicador de pH amarelo de alizarina GG, que representa uma faixa de viragem de pH de 10,1 a 12. Quanto aos coeficientes de carbonatação acelerada (k_C), estes foram obtidos utilizando-se (1), apresentada a seguir.

$$k_C = \frac{x_C - x_0}{\sqrt{t}} \quad (1)$$

Onde: k_C = coeficiente de carbonatação acelerada (mm/ $\sqrt{\text{semana}}$);
 x_C = profundidade da frente de carbonatação (mm);
 x_0 = profundidade da frente de carbonatação ao início do processo acelerado (mm) e t = tempo efetivo de exposição ao gás carbônico (semana).

Os coeficientes de carbonatação acelerada (k_C) foram obtidos conforme apresentado anteriormente, enquanto que os coeficientes de carbonatação natural (k_N) foram calculados com os valores das profundidades da frente de carbonatação nas idades de 91, 182, 301 e 595 dias.

Os valores médios dos coeficientes de carbonatação natural foram relacionados com os valores médios dos coeficientes de carbonatação acelerada, para todas as variáveis de estudos (tipo de adição mineral e a relação água/aglomerante). Os resultados estão apresentados em CASTRO [11] e CASTRO et al. [12].

As correlações dos coeficientes de carbonatação acelerada e natural realizadas por tipo de concreto, considerando individualmente as adições minerais, apresentaram bons índices de determinação (r^2), com valores próximos a 0,85. Apenas o concreto de referência apresentou um valor relativamente baixo, com r^2 igual a 0,53.

Quanto às correlações em que foram considerados os concretos de forma conjunta, de modo geral, elas não resultaram valores tão significativos quanto os desejados, por ainda não haver uma consolidação do comportamento do concreto quanto ao fenômeno natural da carbonatação, cujo processo ainda se encontra incipiente.

Apresentam-se duas correlações: uma realizada com todas as adições (Figura 7) e outra em que foram desconsiderados o concreto de referência e o concreto com sílica ativa (Figura 8).

Observa-se na Figura 7 uma razoável correlação dos processos de carbonatação, que resultou em um índice de determinação (r^2) igual a 0,69. Isto significa que mais de dois terços dos resultados seguiram o comportamento representado pela reta de correlação, conforme (2).

$$k_C = 0,5 + 5,3 k_N \quad (2)$$

Onde: k_C = coeficiente de carbonatação acelerada (mm/ $\sqrt{\text{semana}}$);
 k_N = coeficiente de carbonatação natural (mm/ $\sqrt{\text{semana}}$);

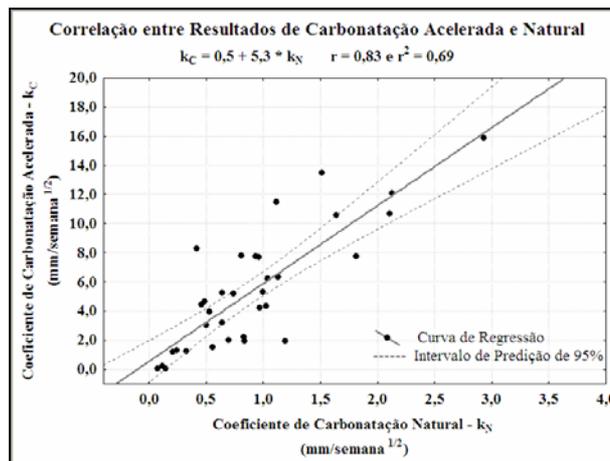


Figura 7 – Correlações entre os valores médios dos coeficientes de carbonatação acelerada e natural, considerados todos os concretos do estudo.

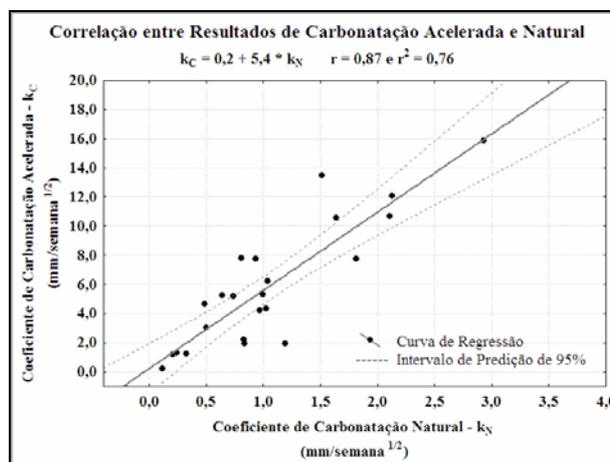


Figura 8 – Correlações entre os valores médios dos coeficientes de carbonatação acelerada e natural, considerados todos os concretos do estudo excetuando o concreto de referência e o concreto com sílica ativa.

Quanto à correlação apresentada na Figura 8, em que foram excluídos os concretos com sílica ativa e de referência, observa-se uma melhor relação entre os processos de carbonatação, cujo valor de r^2 foi 0,76. Neste caso, aproximadamente três quartos dos resultados seguiram o comportamento representado pela reta de correlação, conforme (3).

$$k_C = 0,2 + 5,4 k_N \quad (3)$$

Onde: k_C = coeficiente de carbonatação acelerada (mm/ $\sqrt{\text{semana}}$);
 k_N = coeficiente de carbonatação natural (mm/ $\sqrt{\text{semana}}$);

Observando essas duas equações de regressão, pode-se estimar que os coeficientes de carbonatação acelerada foram aproximadamente cinco vezes superiores aos coeficientes de carbonatação natural, isto é, $k_C \cong 5 k_N$.

SANJUÁN et al. [13] também encontraram este mesmo valor para a relação entre os coeficientes de carbonatação, embora o referido estudo consista de concretos sem adição e concretos com sílica ativa, cinza volante e misturas ternárias dessas duas adições. ROY et al. [14], utilizando o teor de CO_2 de 6% no ensaio acelerado de carbonatação em concretos sem adições minerais, encontraram valores entre 2 e 6, dependendo da relação água/cimento analisada.

D. Absorção de água por capilaridade

A análise estatística mostrou que o modelo fatorial adotado é significativo. Além disso, o valor resultante de R^2_{mod} foi 0,85, significando que 85% da variação total dos dados é explicada pelo modelo adotado.

A análise de variâncias também evidenciou que os efeitos individuais dos fatores principais analisados – tipo de concreto (adição), relação a/ag e procedimento de cura – são estatisticamente significativos a um nível de confiança de 95%. Sobre este aspecto, pode-se constatar que a variável mais influente na absorção de água por capilaridade foi o tipo de concreto (adição).

Na Figura 9 são mostrados os valores médios de absorção de água por capilaridade para cada tipo de concreto (adição), em função do procedimento de cura.

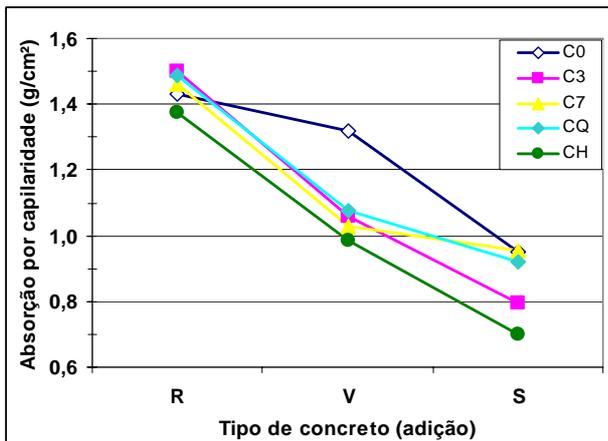


Figura 9 – Valores médios de absorção de água por capilaridade para cada tipo de concreto (adição), em função do procedimento de cura.

Na Figura 9 é possível observar o efeito benéfico das adições minerais, principalmente da sílica ativa, na redução da absorção por capilaridade. Também se pode notar a maior influência positiva que a cura em câmara úmida (CH) propiciou em todas as situações, destacando-se sua importância para os concretos contendo adições.

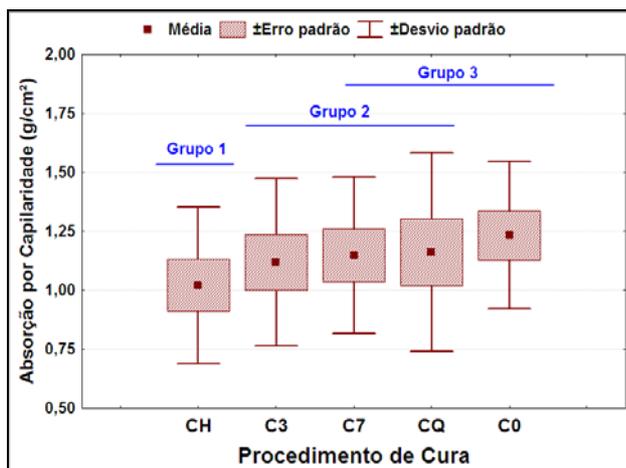


Figura 10 – Valores médios globais de absorção de água por capilaridade para todos os procedimentos de cura. As linhas definem os grupos que diferem significativamente de acordo com o teste de Duncan.

O agrupamento de média por procedimento de cura (Figura 10) destaca com nitidez o melhor desempenho dos concretos curados em câmara úmida (CH) e o pior comportamento daqueles curados ao ar (C0). Agrupados de

forma intermediária estão os concretos dos demais procedimentos de cura (C3, C7 e CQ). Tendo em vista a impossibilidade técnica de se executar a cura CH nas estruturas de concreto, ganham importância do ponto de vista prático os procedimentos de cura C3 e CQ.

Com relação à cura C3 é interessante destacar o seu bom desempenho, mesmo em situações climáticas adversas, de baixa umidade relativa e alta temperatura, referentes ao período de armazenagem prévia dos corpos-de-prova e na realização do ensaio. No levantamento de temperatura e umidade para o ano de 2002 (época da realização desse experimento), durante os meses de julho e agosto de 2002, ocasião de realização da maioria dos ensaios aos 91 dias, pode-se observar uma temperatura máxima média em torno de 35°C nesse período e uma média da umidade relativa ao redor dos 50%.

E. Resistividade Elétrica Superficial

A análise estatística mostrou que o modelo fatorial adotado é significativo. Além disso, o valor resultante de R^2_{mod} foi 0,86, significando que 86% da variação total dos dados é explicada pelo modelo adotado.

A análise de variâncias mostrou também que os efeitos individuais dos fatores principais analisados: tipo de concreto (adições), relação água/aglomerante e tipo de cura são estatisticamente significativos, a um nível de confiança de 95%.

Na Figura 11 são mostrados os valores médios de resistividade elétrica superficial por tipo de concreto (adição), em função do procedimento de cura.

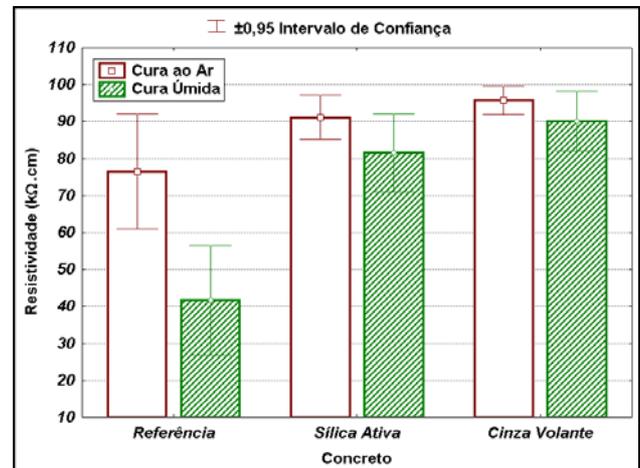


Figura 11 - Valores médios de resistividade elétrica superficial para cada tipo de cura por tipo de concreto utilizado.

Interessante observar na Figura 11 que os concretos de referência apresentaram grande variação na resistividade entre os dois tipos de cura adotados com relação aos demais concretos estudados.

Os concretos de referência submetidos à cura úmida apresentaram menor resistividade por estarem com teor de umidade maior que aqueles submetidos à cura ao ar. Já nos concretos com adições tal diferença de resistividade entre os tipos de cura adotados não é tão significativa devido à maior compactação da pasta de cimento e, portanto, maior dificuldade de perda de umidade da superfície do concreto.

São muitos os critérios existentes que tentam correlacionar a resistividade elétrica do concreto com a sua qualidade ou com o risco da corrosão. Um desses critérios, proposto pelo Comitê Euro-International du Béton [15].

Analisando-se os resultados obtidos, pode-se observar que em quase todos os casos os valores médios (Figura 11) foram superiores a 20 kΩ.cm, o que indica um risco desprezível de corrosão, conforme o CEB. No entanto, apesar dos valores serem altos, cabe ainda uma análise da influência das variáveis nesta propriedade, conforme descrito a seguir.

Considerando-se os valores médios globais de resistividade para os dois tipos de cura utilizados, percebe-se a redução nos valores quando se tem cura úmida. Este resultado aparentemente indicaria uma queda da qualidade do concreto devido à cura, o que não é real. Isto ocorre porque a resistividade é uma propriedade que depende muito do teor de umidade do concreto e, no caso em questão, os concretos submetidos à cura úmida encontra-se mais úmido que aqueles submetidos a cura ao ar, resultando em um menor valor de resistividade.

Observando-se as médias globais dos resultados para cada tipo de concreto utilizado, verifica-se que o emprego das adições melhorou as características da superfície do concreto, sendo o pior resultado observado para o concreto de referência. Os concretos com adições ficaram num mesmo grupo (método de Duncan) com resistividade significativamente superior ao concreto de referência. Neste último caso o ligeiro melhor desempenho (embora estatisticamente não significativo) dos concretos com cinza volante pode estar associado ao maior teor de Al_2O_3 deste material que aumenta a presença de íons na água dos poros do concreto [16].

IV. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao longo de todo o experimento realizado foi possível constatar que as adições minerais, em maior ou menor intensidade, contribuíram beneficentemente em diversas propriedades do concreto. A seguir são então colocados esses efeitos observados.

A incorporação das adições minerais de elevada reatividade traz como consequência um aumento da resistência à compressão dos concretos, alcançando acréscimos médios de 33%, 28% e 21% aos 28 dias de idade para os concretos com sílica ativa, metacaulim e cinza de casca de arroz, respectivamente. O mesmo comportamento não foi observado para os concretos com cinza volante e escória de alto-forno que na média global apresentaram decréscimos de resistência de 12% e 13%, respectivamente.

Este comportamento pode ser atribuído às características químicas, físicas e morfológicas destas adições, cujos altos teores de sílica amorfa e as elevadas áreas específicas – metacaulim (21 250 m²/kg), cinza de casca de arroz (19 690 m²/kg) e sílica ativa (15 990 m²/kg) – proporcionam um aumento da quantidade de pontos de nucleação, acelerando as reações pozolânicas que produzem C-S-H secundário. Promovendo, assim, a densificação da matriz da pasta de cimento Portland.

Os concretos com incorporação de adições minerais apresentam uma acentuada redução na penetrabilidade de íons cloreto. Enquanto os concretos de referência situaram-se, em média, na faixa de alta penetrabilidade, os concretos com adições situaram-se nas faixas de baixa e muito baixa penetrabilidade. As reduções observadas, em relação ao concreto de referência, foram de 87%, 86%, 81%, 79% e

76% para os concretos com sílica ativa, escória de alto-forno, metacaulim, cinza de casca de arroz e cinza volante, respectivamente.

Mesmo concretos que apresentaram resistência à compressão média inferior ao do concreto de referência (escória de alto-forno e cinza volante), mostraram bom desempenho sob a ação de íons cloreto.

Em relação à carbonatação do concreto, quando estes foram tratados de forma conjunta, a correlação realizada entre os coeficientes de carbonatação acelerada e natural apresentou-se razoável, com r^2 igual a 0,69. Em uma segunda correlação realizada, na qual os concretos com sílica ativa e referência foram retirados, o índice de determinação apresentou-se melhor, com valor igual a 0,76; significando que aproximadamente três quartos dos resultados seguiram o comportamento da reta de correlação.

Para os concretos e as condições utilizadas nesta pesquisa, os coeficientes de carbonatação acelerada foram estimados em cinco vezes superiores aos coeficientes de carbonatação natural, com base nas equações das retas de correlação.

Quanto à influência da relação água/aglomerante, tanto no estudo de carbonatação quanto no estudo de cloretos, verificou-se o comportamento esperado, em que as relações água/aglomerante menores produziram os concretos de melhor desempenho.

De modo geral, pode-se afirmar que quando da especificação de um concreto exposto a ação de cloretos, além de definir a resistência à compressão adequada para a classe de agressividade do macro e micro clima da obra, recomenda-se a utilização de uma adição mineral, pois esta certamente dará uma contribuição importante à durabilidade da obra;

Quanto à influência do procedimento de cura, pode-se afirmar que, considerando a inviabilidade técnica da aplicação da cura CH nas estruturas de concreto reais, o resultado mais relevante foi a cura por molhamento durante 3 dias (cura C3). A cura química, embora tenha mostrado sua eficiência ficando próxima das curas por molhamento, apresenta alguma interferência em alguns dos métodos empregados, devido à deposição da parafina na superfície dos corpos-de-prova ensaiados. Numa condição climática rigorosa como a que foi realizada a pesquisa, tendo-se registrado uma temperatura máxima média da ordem de 35°C e uma umidade relativa média de cerca de 50%, não proceder nenhuma operação de cura significa trazer prejuízos ao concreto, especialmente na região do cobrimento da armadura [17];

O emprego das adições minerais melhorou as características da superfície do concreto, conforme observado nos resultados de resistividade elétrica superficial. Os concretos com adições ficaram com resistividade estatisticamente superior ao concreto de referência. Ressalta-se que a resistividade elétrica é uma das principais propriedades controladoras do processo eletroquímico que leva ao fenômeno da corrosão das armaduras;

Com base nos resultados obtidos para as variáveis, materiais e condições de ensaio adotadas nesta pesquisa, pode-se concluir que concretos produzidos com adição de sílica ativa, metacaulim, ou outra adição de elevada reatividade, apresentam um elevado potencial para a durabilidade, seja quanto à ação do gás carbônico, à ação de

cloretos e à resistividade elétrica superficial [11, 15, 17 e 18].

[18] FERREIRA, R. “Influência das adições minerais nas características do concreto de cobrimento e seu efeito na corrosão de armadura induzida por cloretos”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2003. 219 p.

V. AGRADECIMENTOS

Agradecimentos: a FURNAS Centrais Elétricas, em especial ao Departamento de Apoio e Controle Técnico – DCT.C – pelo suporte técnico e financeiro dispensado à realização da pesquisa. À Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, gestora do Programa de P&D.

VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ALDEA, C.M.; YOUNG, F.; WANG, K.; SHAH, S.P. “Effects of curing conditions on properties of concrete using slag replacement,” *Cement and Concrete Research*, v.30, p.465-472, 2000.
- [2] MORAES, R.C.; ISAIA, G.C.; GASTALDINI, A.L.G. *Efeitos da cinza volante, cinza de casca de arroz e filler calcário sobre a resistência mecânica do concreto*. 2000. Disponível em: <<http://www.sistrut.com.br/sistrut.html>> Acesso em: 10 dez.2001.
- [3] SABIR, B.B.; WILD, S.; BAI, J. “Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: review”, *Cement and Concrete Composites*, v.23, p.441-54, 2001.
- [4] MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto - estrutura, propriedades e materiais*, São Paulo: Ed. Pini, 1994.
- [5] CALDARONE, M. A.; GRUBER, K. A.; BURG, R. G. “High-reactivity metakaolin: a new generation mineral admixture”, *Concrete International*. V. 16, n. 11, p. 37-40, 1994..
- [6] RAMEZANIANPOUR, A.A.; MALHOTRA, V.M. “Effect of curing on the compressive strength, resistance to chloride-ion penetration and porosity of concretes incorporating slag, fly ash or silica”, *Cement & Concrete Composites*, n.17, p.125-133, 1995.
- [7] GRUBER, K. A.; RAMLOCHAN, T.; BODDY, A. HOOTON, R. D.; THOMAS, M. D. A. “Increasing concrete durability with high-reactivity metakaolin”, *Cement & Concrete Composites*. v. 23, p. 479-484, 2001.
- [8] DETWILER, R. J.; FAPOHUNDA, C. A.; NATALE, J. “Use of supplementary cementing materials to increase the resistance to chloride penetration of concrete cured at elevated temperatures”, *ACI Materials Journal*. v. 91, n. 1, p 63-66, 1994.
- [9] BODDY, A.; HOOTON, R. D.; GRUBER, K. A. “Long-term testing of the chloride-penetration resistance of concrete containing high-reactivity metakaolin”, *Cement and Concrete Research*. v. 31, p. 759-765, 2001.
- [10] RILEM. “Measurement of hardened concrete carbonation depth: RILEM Recommendation CPC-18”, *Materials and Structures*, p.453-55, 1988..
- [11] CASTRO, A. “Influência das adições minerais na durabilidade do concreto sujeito à carbonatação”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2003. 215 p.
- [12] CASTRO, A; FERREIRA, R.; LOPES, A.; CASCUDO, O.; CARASEK, H. “Relationship between results of accelerated and natural carbonation in various concretes”, in *Proc. International RILEM Congress on Use Recycled Materials in Buildings and Structures*, 2004, Barcelone.
- [13] SANJUÁN, M.A.; ANDRADE, C.; CHEYREZY, M. “Comparison between accelerated and natural carbonation results in different concretes”, in *Proc. 3rd. International Congress on High-Performance Concrete and Performance and Quality of Concrete Structures*, Recife, 2002. Brazil, ACI, 2002. SP 207-17. p.263-78.
- [14] ROY, S.K.; POH, K.B.; NORTHWOOD, D.O. “Durability of concrete accelerated carbonation and weathering studies”, *Building and Environment*, v.34, p.597-606, 1999.
- [15] BRAUN, V. “Influência das condições de moldagem e cura nas características do cobrimento de diversos concretos”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2003. 203 p.
- [16] NEVILLE, A. M. *Propriedade do concreto*. Trad. de Salvador E. Giammuso. 2.ed. ver. e atual. São Paulo: Pini, 1997.
- [17] PAULA COUTO, A. “Influência das condições de cura nas características do cobrimento de diferentes concretos”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2003. 167 p.