

## CARBONATAÇÃO DO CONCRETO ESTRUTURAL COM ALTOS TEORES DE ADIÇÕES MINERAIS E DIFERENTES FINURAS

Venquiaruto, S. D.(1); Isaia, G. C. (2); Gastaldini, A. L. G. (3)

(1) *Mestranda do Curso de pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria*  
Av. Medianeira, N.º 700, Apto 201, Santa Maria (RS) CEP 97.060 - 001  
Email: [svenquiaruto@bol.com.br](mailto:svenquiaruto@bol.com.br)

(2) *Professor Doutor, Departamento de Estruturas e Construção Civil*  
Universidade Federal de Santa Maria  
Email: [gisaia@pro.via-rs.com.br](mailto:gisaia@pro.via-rs.com.br)

(3) *Professor Doutor, Departamento de Estruturas e Construção Civil*  
Universidade Federal de Santa Maria  
Email: [gastaldn@ct.ufsm.br](mailto:gastaldn@ct.ufsm.br)

### RESUMO

Este trabalho objetivou investigar o comportamento da carbonatação no concreto frente as variações do teor e finura de misturas cimentícias com pozolanas. As misturas binárias compostas por cinza volante, cinza de casca de arroz e sílica ativa, foram obtidas pela substituição em massa de cimento de 8% para sílica ativa e 25% e 50% para cinza volante e cinza de casca de arroz. Para cada porcentagem de substituição moldou-se dois traços com duas finuras distintas. Ao todo foram realizadas onze moldagens com relações água/aglomerante 0,35, 0,50 e 0,65. Posteriormente as amostras foram ensaiadas para a determinação das resistências à compressão axial e das profundidades de carbonatação por meio de ensaio acelerado. A investigação experimental para a determinação dos coeficientes de carbonatação consistiu de três etapas: cura úmida por 7 dias, pré-condicionamento dos corpos de prova e ensaio de carbonatação acelerada em três diferentes idades. Os ensaios de carbonatação foram realizados em uma câmara climatizada automatizada com taxa constante de 5% de CO<sub>2</sub>, temperatura de 24°C e umidade relativa de 75%. Os resultados foram analisados comparando-se as diferentes misturas com uma de referência, somente com cimento. Pela análise dos dados constatou-se que o comportamento da carbonatação foi mais significativa nos traços com os maiores teores de substituição de cimento e maiores finuras de adições minerais.

**PALAVRAS - CHAVE: carbonatação, adições minerais, finura, teor de substituição.**

### 1 INTRODUÇÃO

O fenômeno da carbonatação dos concretos é muito complexo, pois muitas variáveis físico-químicas se inter-relacionam e determinam um processo de maior ou menor intensidade de avanço da frente carbonatada

Essas variáveis são pesquisadas há várias décadas, contribuindo para melhor interpretação do fenômeno na microestrutura do concreto, auxiliando também na busca de novas misturas e adições que aumentem a durabilidade e a vida útil das estruturas.

A finura, a natureza e a dosagem de cimento ou adições minerais, a relação a/c ou a/ag, a porosidade, a permeabilidade, a duração e as condições de cura e a resistência à compressão axial são algumas das principais variáveis que influenciam na carbonatação.

O efeito das adições minerais no cimento Portland depende do modo como é realizada a mistura. Estudos realizados por BRANCA et al. (1992) concluíram que as misturas com adições de cinza volante sem a redução do teor de cimento apresentaram menor penetração de  $\text{CO}_2$ , enquanto que sob a forma de substituição de cimento houve aceleração do processo de carbonatação.

SCISLEWSKI e WOJTOWICZ (1996) analisaram concretos com adições de sílica ativa com baixos teores (5% e 15%) e concluíram que o processo de carbonatação era mais agressivo nestas misturas do que no traço de referência. ISAIA (1995), encontrou para um concreto com 10% e 20% de sílica ativa coeficientes de carbonatação cerca de 7,5 e 11 vezes, respectivamente, maiores que o concreto de referência.

Ensaio de durabilidade com respeito à carbonatação de concretos com cinza de casca de arroz realizados por SUGITA et al (1992), demonstraram que para teores de reposição de cimento até 30%, as profundidades carbonatadas foram iguais ou inferiores ao concreto de referência. Estudos com teores de reposição de 30% de cinza de casca de arroz realizados por ISAÍÁ (1995) e ISAÍÁ et al (1998), apresentaram coeficiente de carbonatação superior em até 3,5 vezes o concreto de referência. As diferentes adições promovem grau de porosidade diversos à matriz da pasta do material cimentício, alterando os mecanismos de difusão de fluidos e, principalmente modificando as relações entre o grau de porosidade e a resistência mecânica. Por essa razão, existe uma grande variação entre as relações  $a/ag$  e os coeficientes de carbonatação para um mesmo nível de resistência em concretos com níveis diferentes de adições. (ISAIA, 1999).

As relações  $a/ag$  também são fatores determinantes no comportamento da carbonatação do concreto. Diversos autores, como PAPADAKIS et al. (1991), concluíram que quanto maior for a relação água/aglomerante utilizada, maior será a difusibilidade ao  $\text{CO}_2$ .

Com relação à finura dos aglomerantes, estudos realizados por VENUAT apud PARIS (1973) mostrou ser nula a influência da finura na velocidade de carbonatação durante o primeiro ano. Posteriormente, a carbonatação é tanto mais rápida quanto maior a finura das adições. Mas para efeitos práticos, as variações foram tão pequenas que poderiam ser consideradas nulas.

## 2 INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL

Investigou-se onze misturas aglomerantes, com relações  $a/ag$  0,35, 0,50 e 0,65, compostas com cinza volante, cinza de casca de arroz, sílica ativa e uma de referência, sem adição mineral.

As misturas binárias foram obtidas pela substituição de pozolanas, com duas finuras distintas, em massa de cimento de 8% para sílica ativa, 25% e 50% para cinza volante e cinza de casca de arroz.

Na tabela 1 estão demonstradas a finura e a porcentagem das adições minerais utilizadas nas onze misturas investigadas.

Tabela 1 – Denominação da finura e do teor de adição mineral por mistura.

MISTURA	FINURA ( $\text{m}^2/\text{g}$ )	TEOR DE SUBSTITUIÇÃO %		
		CINZA DE CASCA DE ARROZ	CINZA VOLANTE	SÍLICA ATIVA
REF	-	-	-	-
A - (CV25)	3,5	-	25	-
A - (CV50)	3,5	-	50	-
B - (CV25)	4,6	-	25	-
B - (CV50)	4,6	-	50	-
A - (CA25)	23	25	-	-
A - (CA50)	23	50	-	-
B - (CA25)	36,3	25	-	-
B - (CA50)	36,3	50	-	-
(SA8) - MV	17,2	-	-	8
(SA 8) - GS	8,0	-	-	8

## 3 ESTUDO EXPERIMENTAL

A caracterização dos materiais seguiram os procedimentos propostos pela ABNT e por normas estrangeiras.

### 3.1 Aglomerantes

Utilizou-se um cimento Portland de alta resistência inicial, CPV-ARI, de conformidade com EB-NBR 573. Este tipo de cimento possibilita a introdução de maiores teores de adição mineral nas misturas, devido ao teor mais elevado de  $C_3S$  e, conseqüentemente, uma maior disponibilidade de CH necessário às reações pozolânicas. A tabela 2 apresenta as características físicas e mecânicas do cimento.

Tabela 2 - Características Físicas e Mecânicas Do Cimento.

CIMENTO	CPV –ARI
Massa Específica ( Kg/m <sup>3</sup> )	3125
Área Específica ( m <sup>2</sup> /g ) - Método Bet	1,8
Finura # 0,075 mm - NBR 11581	0,25
Início de Pega ( min )	160
Fim de Pega ( min )	195
Resistência - 1 dia ( MPa )	18,1
Resistência - 3 dias ( MPa )	36
Resistência - 7 dias ( MPa )	39
Resistência - 28 dias ( MPa )	50,9

Das pozolanas utilizadas nesta pesquisa, apenas a sílica ativa, adquirida de fabricante nacional, veio industrializada. A cinza volante e a cinza de casca de arroz, fornecidas por empresas da região, passaram por processos de moagem, peneiramento e secagem em laboratório.

A diferenciação da finura das cinza volante e cinza de casca de arroz, foi realizado em um moinho de bolas, com períodos de moagem de 1 e 4 horas.

Os ensaios de caracterização das adições minerais foram realizados de acordo com as seguintes normas: Superfície específica – NBR 7224; Superfície específica BET – ASTM D- 3663; Análise Granulométrica à laser – ABCP.

Na tabela 3 estão representados o tempo de moagem, a massa específica e a área específica das misturas investigadas.

Tabela 3 – Massa Específica Das Adições Minerais.

MATERIAL	TEMPO DE MOAGEM	MASSA ESPECÍFICA (Kg/m <sup>3</sup> )	ÁREA ESPECÍFICA BET (m <sup>2</sup> /g)
A - ( CV )	1 hora	2360	3,5
B - ( CV )	4 horas	2495	4,6
A - ( CA )	1 hora	2070	23
B - ( CA )	4 horas	2110	36,3
( S.A8 ) - MV	-	2170	17,2
( S.A8 ) - GS	-	2107	8

Pela análise da tabela 2 e 3, verifica-se que o cimento foi o que apresentou a maior massa específica entre os aglomerantes ensaiados. Na tabela 4 são apresentadas as composições químicas dos diferentes materiais que compuseram os aglomerantes dos concretos desta pesquisa.

Tabela 4 – Composição Química dos Aglomerantes.

COMPOSIÇÃO QUÍMICA	TEOR EM MASSA %		
	CPV-ARI	CV	CCA
Perda ao Fogo	2,09	1,16	9,14
SiO <sub>2</sub>	19,59	64,57	86,50
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,79	27,27	0,28
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,07	2,21	0,14
CaO	64,35	1,51	0,45
MgO	1,69	0,76	0,28
SO <sub>3</sub>	2,75	0,06	0,02
Na <sub>2</sub> O	0,07	0,15	0,08
K <sub>2</sub> O	0,98	1,50	1,55

Os resultados da tabela 4 mostram os altos percentuais de dióxido de sílica, SiO<sub>2</sub>, com 64% e 86% para cinza de casca de arroz e cinza volante, respectivamente. Verificou-se também que a cinza de casca de arroz apresentou 9% de perda ao fogo, valor considerado alto, pois este fato é gerador de muita demanda de água. Os valores da sílica ativa não estão disponíveis.

### 3.2 Agregados

Como agregado miúdo utilizou-se areia natural quartzosa, proveniente de rio da região. A distribuição de tamanho dos grãos enquadrou-se dentro dos limites compostos pela NBR 7211 para a zona 3.

Utilizou-se como agregado graúdo, pedra britada de rocha basáltica, oriunda de jazida da região, e diâmetro máximo de 19 mm.

A tabela 5 apresenta as características físicas dos agregados: composição granulométrica –NBR 7217; massa específica do agregado miúdo – NBR 9776; massa específica e absorção do agregado graúdo – NBR 9937; massa unitária solta- NBR 7251 e índice de forma por paquímetro – NBR 780.

Tabela 5 - Características Físicas dos Agregados.

Peneiras ( mm )	Porcentagens Retidas Acumuladas	
	Brita 1	Areia Zona 3
12,5	23	-
9,50	75	-
6,30	99	-
4,80	100	1
2,40	100	11
1,20	100	31
0,60	100	52
0,30	100	79
0,15	100	100
Módulo de Finura	6,75	2,74
Dimensão Máxima Característica (mm)	19	4,8
Massa Específica - Kg/dm <sup>3</sup>	2,50	2,60
Massa Unitária Solta – Kg/dm <sup>3</sup>	1,26	1,65
Absorção de Água - %	2,82	0,50
Índice de Forma	3	-

### 3.3 Superplastificante

Para este experimento foi utilizado um superplastificante de pega normal, à base de naftaleno, isento de cloretos, não cáustico, com teor de sólidos de 32,5%, densidade de 1,18 g/cm<sup>3</sup> e pH de 7,68, de acordo com as prescrições da EB-1763 para o Tipo S.

### 3.4 Dosagem dos concretos

Para cada uma das misturas aglomerantes e relações a/ag investigadas, foram realizados preliminarmente os ensaios de trabalhabilidade com o concreto fresco, que objetivou determinar a consistência desejada para os traços, através de variação na quantidade de água ou aditivo superplastificante.

O volume de argamassa no concreto de referência foi determinado através de variação da areia das misturas-testes, até obter-se a consistência desejada pelo abatimento do cone de Abrams, que foi especificado em 60±15 mm.

A metodologia de dosagem das misturas foi a de substituição de cimento em massa, segundo o método de HELENE e TERZIAN(1992), e para a obtenção da curva de Abrams de cada mistura individualmente, foi necessário um mínimo de três níveis de resistência.

A substituição em massa de cimento Portland por adições minerais de menores massas específicas resultaria em um aumento no volume de argamassa seca. Por esse fato, os traços originais foram corrigidos pela retirada do volume correspondente de agregado miúdo à medida que se aumentava o teor das adições.

As moldagens eram efetuadas após os abatimentos atingirem valores dentro dos limites pré-fixados. O adensamento foi realizado em mesa vibratória, com os concretos lançados nos moldes de  $\phi$  10X20cm em duas camadas sucessivas.

### 3.5 Cura dos concretos e preparação dos corpos de prova

Para os ensaios de resistência à compressão axial, os corpos de prova permaneceram em câmara úmida com  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  e 95% de umidade relativa até as datas dos ensaios, diferentemente dos ensaios de carbonatação, em que os corpos de prova permaneceram em câmara úmida por 7 dias.

Devido à limitações da câmara climática as amostras utilizadas nos ensaios de carbonatação precisaram ser redimensionadas. Inicialmente com dimensões de  $\phi$  10cm por 20cm, os corpos de prova foram divididos em amostras de  $\phi$  10cm por 7cm. As sobras de concreto foram posteriormente utilizadas na etapa de pré - condicionamento.

A tabela 6 apresenta as idades de ensaio e as dimensões dos corpos de prova.

Tabela 6 – Idades de Ensaios e Tamanho dos Corpos de Prova.

Ensaio	Idades Cronológicas	Corpos de Prova ( cm )
Carbonatação Acelerada	4, 8 e 12 semanas	$\phi$ 10x 7
Resistência À Compressão	28 e 91 dias	$\phi$ 10x20

### 3.6 Pré - condicionamento dos corpos de prova

Posterior aos procedimentos de cura úmida e preparação dos cortes , as amostras foram identificadas e conservadas ao ar, em ambiente de laboratório por cinco semanas. Neste período, primeiramente seus topos foram impermeabilizados, o que possibilitou a penetração do  $\text{CO}_2$  somente pelas superfícies laterais, para posteriormente passarem para a fase de pré-condicionamento.

O pré-condicionamento é um método normalizado pela RILEM TC 116 - PCD ( 1999 ) para pré-condicionar corpos de prova de concreto moldados para medição da permeabilidade a gases e absorção capilar de água. Este procedimento tem como objetivo dotar todas amostras de concreto com uma distribuição homogênea da concentração de equilíbrio da água evaporável a  $( 75 \pm 2 )$  % de umidade relativa , correspondente a saturação parcial dos poros do concreto.

O procedimento de pré-condicionamento constitui-se de uma etapa de pré-secagem e uma subsequente fase de redistribuição de umidade.

A etapa de pré-secagem pode ser dividida em dois procedimentos: a determinação do conteúdo total da água evaporável (**We**) e a determinação do conteúdo de água evaporável (**We<sub>75</sub>**) à umidade constante de 75%.

Para a obtenção do conteúdo total da água evaporável utiliza-se um corpo de prova de  $\phi$  10x7 cm. Primeiramente a amostra tem seu peso inicial determinado (**mo**), para em seguida ser acondicionada em estufa a  $105^\circ\text{C}$  para a determinação do **md** (massa do corpo de prova após a secagem em estufa). A permanência da amostra em estufa deve continuar até que seja observada perda de peso inferior a 0,5g entre duas leituras consecutivas.

A concentração da água evaporável **We** é calculada do conteúdo da água evaporável **We** (  $\text{We} = \text{mo} - \text{md}$ ) e a massa seca do corpo de prova (**md**) por :  $\text{We} = \text{We} / \text{md}$ .

Para a determinação do **We<sub>75</sub>** deve ser usado no mínimo 500g de concreto triturado em grão de diâmetro equivalente a 5mm . O concreto é moído manualmente com um pilão de ferro e em seguida é realizado o peneiramento nas peneiras 6,3mm e 2,8mm. O material retido na peneira 2,8mm corresponde ao diâmetro de 5mm que será usado como amostra, o material retido na peneira 6,3mm deve ser novamente moído e peneirado. Este procedimento de moagem e peneiramento deve ser realizado até que alcance o peso mínimo preestabelecido para a amostra.

Para o ensaio de desorção, o concreto moído é colocado em um recipiente aberto para permitir livre acesso do ar ambiente. A atmosfera ambiente deve ser obtida em uma câmara de atmosfera controlada com uma temperatura de  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$  e umidade relativa de  $(75 \pm 2)$  % até que seja atingida a umidade de equilíbrio (variação de peso menor do que 0,1g entre duas leituras consecutivas). O ensaio de desorção determina a massa do concreto no equilíbrio com  $(75 \pm 2)$  % de umidade relativa (**me<sub>75</sub>**).

Em sequência as amostras são colocadas em estufa para a determinação da massa seca do concreto moído (md). As condições de equilíbrio são alcançadas se a modificação do peso da amostra é menor do que 0,1g, entre duas leituras consecutivas.

A concentração da umidade de equilíbrio  $We_{75}$  é calculada por:  $We_{75} = (We_{75} / md)$ , sendo que  $We_{75} = (me_{75} - md)$ .

Com os valores obtidos da concentração inicial de água evaporável  $We$ , da concentração da umidade de equilíbrio  $We_{75}$  e da massa original do corpo de prova no fim da cura úmida ( $mo$ ) poderá ser determinado o ( $\Delta m$ ) de cada amostra que corresponde a perda de peso que cada amostra deverá adquirir durante a etapa da pré-secagem para que se alcance as condições internas de equilíbrio. Assim:  $\Delta m = [ ( We - We_{75} ) / ( 1 + We ) ] * mo$ .

A pré-secagem dos corpos de prova é realizada em câmara climática ventilada a uma temperatura de 50°C. As amostras permanecem na câmara até que seja atingido o pré-ajustamento da perda de massa,  $\Delta m$ , de cada amostra. A pré-secagem deve continuar até a perda de água calculada,  $\Delta m$ , seja atingida dentro do nível de precisão de 5%:  $[ ( \Delta m_{obs} - \Delta m_{calc} ) / \Delta m_{calc} ] < 0,05$ , sendo  $\Delta m_{obs}$  = mudança de peso observada durante o ensaio (g), e  $\Delta m_{calc} = \Delta m$ .

Durante o processo de secagem, a perda de peso dos corpos de prova deve ser monitorada por pesagens repetidas em pequenos intervalos de tempo. Para misturas usuais de concreto, o tempo de secagem necessário depende da difusividade do vapor de água no concreto e pode variar entre algumas horas a aproximadamente duas semanas.

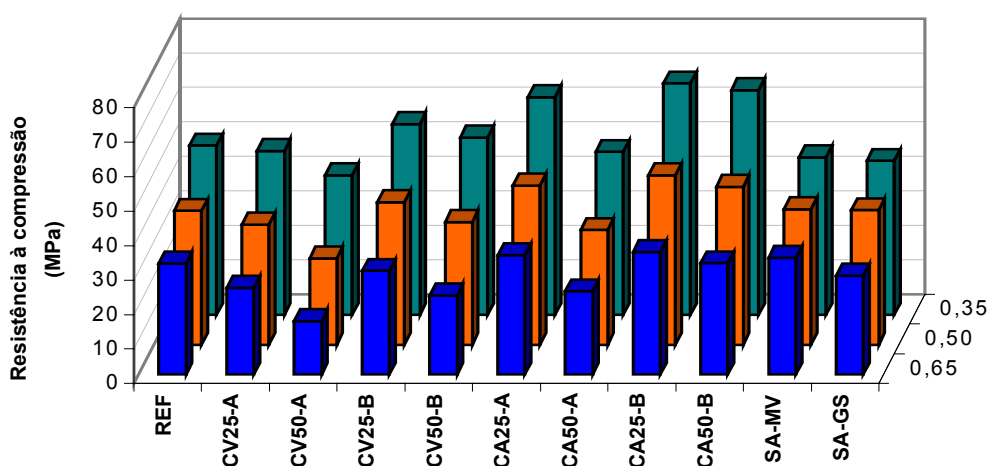
Posterior a etapa de pré-secagem, os corpos de prova são selados e estocados em estufa a uma temperatura de 50°C. Desde que não aconteça qualquer troca de umidade com o ambiente, a temperatura elevada acelerará a redistribuição do gradiente de umidade axial no sentido a uma distribuição homogênea. Nesta etapa, o período de redistribuição de umidade deve ter duração mínima de 14 dias. Finalizado este procedimento os corpos de prova são retirados da estufa para alcançarem temperatura de equilíbrio nas condições de laboratório ( $20 \pm 1$ )°C no estado selado, com o objetivo de prevenir secagem adicional, enquanto resfria durante o mínimo de 24 horas. Posteriormente as amostras são acondicionadas na câmara climática para os ensaios de carbonatação.

#### 4 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

A resistência mecânica é uma das mais importantes propriedades dos concretos. Nesta pesquisa, para permitir a análise dos desempenhos das misturas frente às propriedades da carbonatação, realizou-se os ensaios de compressão axial segundo as NBR 5738 e NBR 5739.

Moldou-se três corpos de prova para cada relação a/ag das mistura investigadas. As amostras foram rompidas aos 28 e 91 dias.

As **figuras 1 e 2** demonstram os resultados finais adotados para os 28 e 91 dias para todas as misturas investigadas.



**Figura1** - Resistência à compressão axial das misturas investigada aos 28 dias

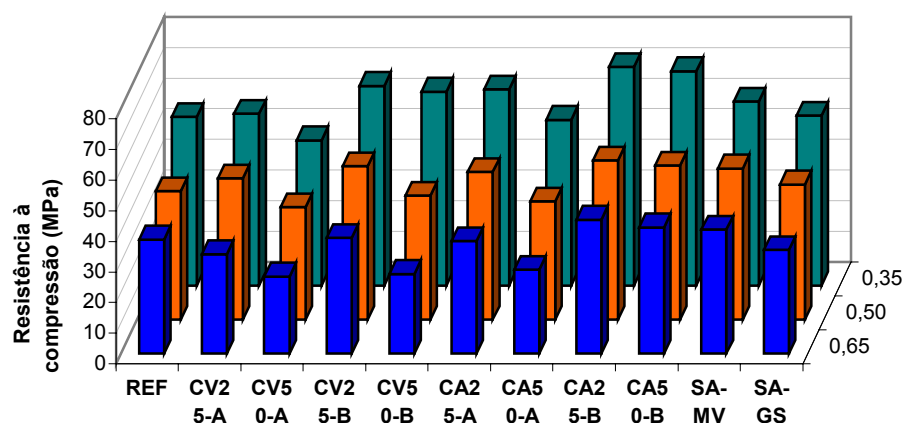


Figura2 - Resistência à compressão axial das misturas investigada aos 91 dias

## 5 ENSAIOS DE CARBONATAÇÃO ACELERADA

O ensaio de carbonatação acelerada, normalizado pela RILEM sob a designação CPC-18, tem por objetivo a comparação de profundidades de carbonatação de concreto de várias misturas, sob determinadas condições de cura.

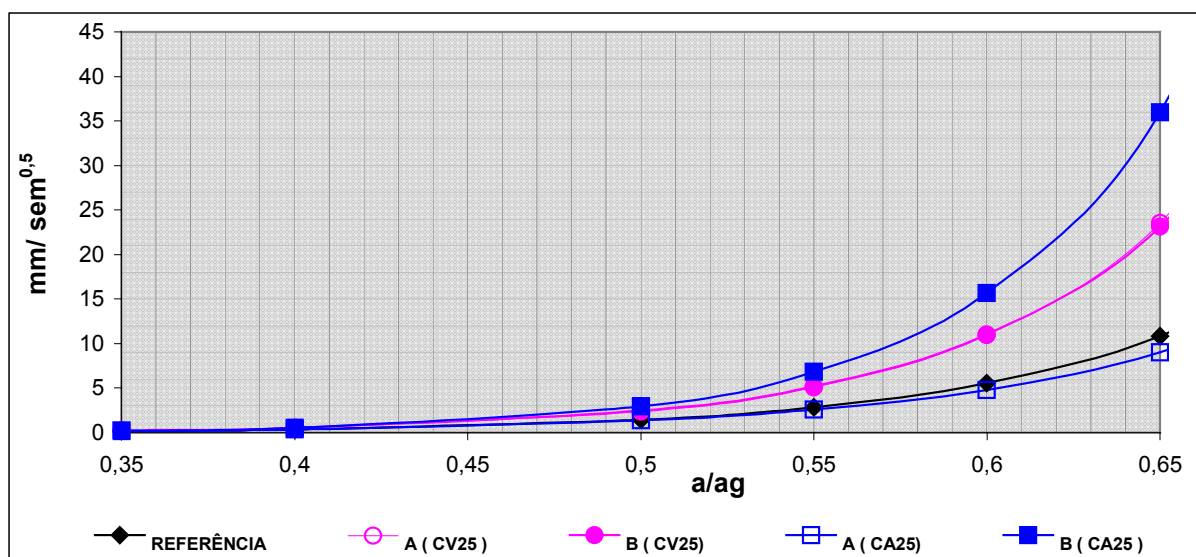
Para a determinação das profundidades carbonatada empregou-se solução de 1% de fenolftaleína, 70% de álcool etílico e 29% de água destilada. A solução de fenolftaleína torna o concreto não carbonatado ( $\text{pH} \approx 12$ ) vermelho-carmim e permanece incolor no concreto carbonatado ( $\text{pH} < 9$ ).

A câmara climatizada e automatizada permitiu o controle efetivo da concentração de  $\text{CO}_2$ , da temperatura ambiente e da umidade relativa, as quais foram fixadas em  $5,0 \pm 0,2\%$ ,  $22 \pm 2^\circ\text{C}$  e  $75 \pm 2\%$  respectivamente.

As idades de permanência dos corpos de prova na câmara climatizada foram fixadas em 4, 8 e 12 semanas, quando os corpos de prova atingiam idades cronológicas de 10, 14 e 18 semanas.

Nas idades de teste, os corpos de prova eram rompidos diametralmente e efetuava-se a aspersão com a solução de fenolftaleína, possibilitando leituras em mm das profundidades carbonatadas.

As figuras 3, 4 e 5 apresentam os resultados obtidos, expresso em gráficos semelhantes ao de Abrams com os coeficientes de carbonatação em função das relações  $a/\text{ag}$ .



\* “A”- traços com adições moídas por uma hora; “B”- traços com adições moídas por 4 horas.

FIGURA 3 : Coeficientes de carbonatação para as misturas com 25% de adição mineral. Neste gráfico as curvas do traço A(CV25) e B(CV25) estão superpostas.



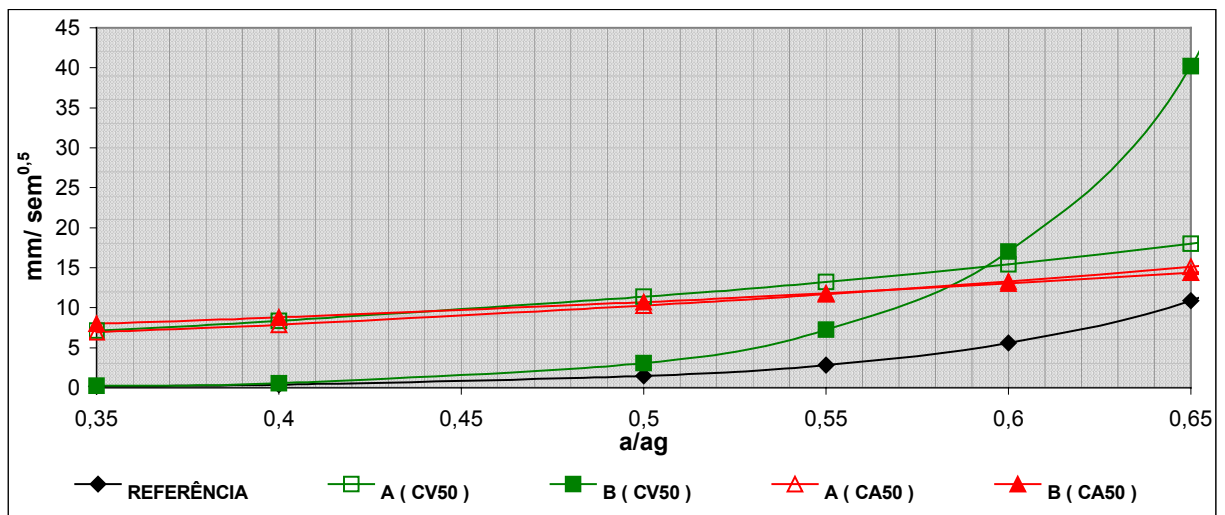


FIGURA 4 : Coeficientes de carbonatação para as misturas com 50% de adição mineral.

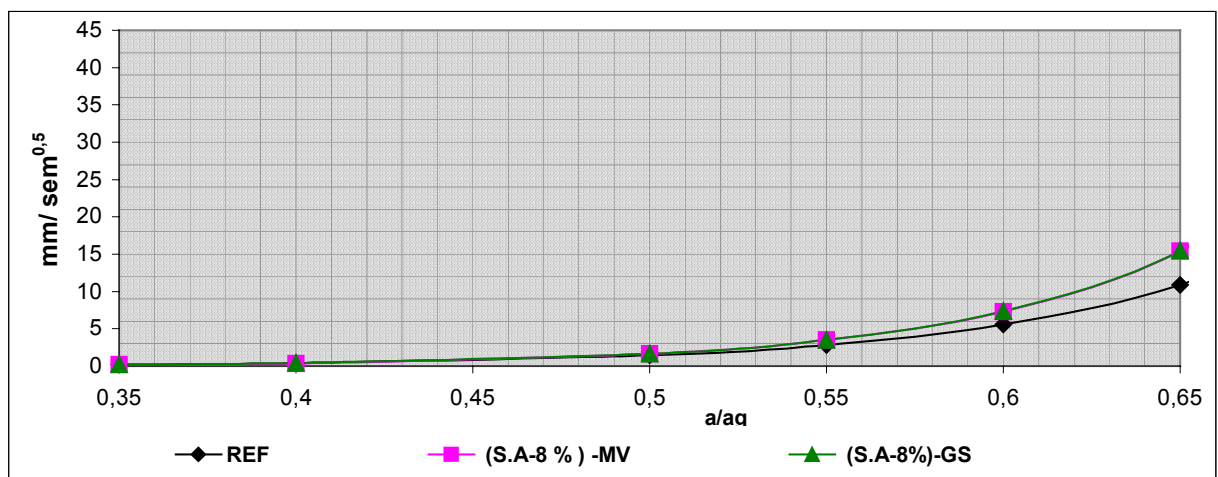


FIGURA 5 : Coeficientes de carbonatação para as misturas com 8% de adição mineral

## 6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados dos dados da resistência mecânica e carbonatação foram analisados como obtidos nos ensaios, ou seja, em igualdade de relações  $a/ag$ , fixadas preliminarmente em 0,35; 0,50 e 0,65.

Na figura 1 é apresentado o gráfico que mostra o desenvolvimento da resistência à compressão com as relações  $a/ag$  para a idade de 28 dias das onze misturas investigadas. As misturas contendo médios teores de substituição (25%) apresentaram resultados de resistência à compressão axial semelhantes ou superiores às misturas com 50% de adição mineral, observação também feita por MISRA et al. (1994). MEHTA (1985) em estudos com cinzas volantes concluiu que a reatividade dessa pozzolana era diretamente proporcional a quantidade de partículas menores do que  $10\mu m$ , e inversamente proporcional as partículas maiores do que  $45\mu m$ . O que demonstra que o ganho de resistência mecânica pode não estar associado diretamente a porcentagem da adição mineral utilizada, mas sim, a distribuição do tamanho de suas partículas.

Aos 91 dias, figura 2, observa-se um comportamento semelhante, com as misturas ordenadas em função de sua reatividade, com considerável ganho de resistência. Os concretos com cinza volante e cinza de casca de arroz apresentaram os melhores resultados, o que demonstra o aumento da reatividade destas pozzolanas com o passar do tempo.

Da mesma forma que aos 28 dias, o aumento da porcentagem de substituição das pozzolanas não acarretou em maiores resistências. Os traços com adições na forma mais fina apresentaram os maiores valores de resistência.

A forte influência da variável  $a/ag$  no ganho de resistência mecânica foi observado para todas as misturas investigadas, tanto aos 28 quanto aos 91 dias



Os concretos com adições de cinza volante e cinza de casca de arroz com relações  $a/ag$  0,35 e 0,50 apresentaram os melhores resultados para idades mais avançadas.

Analisando o desenvolvimento da resistência em função da finura das adições concluiu-se, que para as misturas com a mesma porcentagem de adições e diferentes finuras, o ganho de resistência foi maior nos traços com adições na forma mais fina.

BOUZOUBAÂ et al (1999) pesquisaram o desenvolvimento da resistência mecânica em misturas com a mesma porcentagem de cinzas volantes, porém com diferentes finuras. Concluíram que as misturas com cinzas volantes naturais apresentaram resistências inferiores às misturas com pozolanas que passaram por processos de moagem, fato também constatado por GIERGICZNY E WERYNSKA (1989).

Verificou-se que o desenvolvimento da resistência é tanto maior quanto menor for a porcentagem de substituição por adições minerais. Para ambos os traços com cinza volante e cinza de casca de arroz, as maiores resistências foram verificadas para as misturas com os menores teores de adições.

Os traços I(S.A1-8%) e K(S.A2-8%) apresentaram pequena diferença de resistência nas duas idades de testes.

Os gráficos das figuras 3, 4 e 5 foram elaborados pelo mesmo princípio das curvas de Abrams e permitiram a observação dos coeficientes de carbonatação para as relações água/aglomerantes não ensaiadas.

Pela análise da figura 3, observa-se que até aproximadamente a relação  $a/ag=0,45$  os coeficientes de carbonatação são inferiores a  $4\text{mm/sem}^{0,5}$  para todas as misturas. O traço com CA na forma mais fina apresentou maior carbonatação em relação ao traço com CA na forma menos fina. O mesmo não ocorreu para os traços com CV, que apresentaram curvas coincidentes. Acredita-se que o médio teor utilizado associado com a pequena diferença na superfície específica BET da CV, obtidos com 1 hora ( $3,5\text{m}^2/\text{g}$ ) e 3 horas ( $4,6\text{m}^2/\text{g}$ ), tenham influenciado esse comportamento.

Na figura 4, observa-se claramente que o teor de substituição de 50% de adições minerais ocasionou o aumento dos coeficientes de carbonatação das misturas binárias. Todos os traços apresentaram coeficientes superiores ao da mistura de referência. O traço com CV na forma menos fina apresentou coeficientes de carbonatação superiores ao da mistura mais fina até a relação  $a/ag=0,50$ . A partir desse ponto com o aumento da relação  $a/ag$ , a mistura mais fina apresentou os maiores coeficientes. Os traços com CA apresentaram curvas quase coincidentes, porém com a mistura mais fina apresentando os maiores coeficientes.

Os traços com sílica ativa, figura 5, com teores de substituição de 8%, apresentaram coeficientes de carbonatação bem próximos dos coeficientes da mistura de referência. Apesar da diferença da finura dessas misturas os coeficientes de carbonatação encontrados foram muito semelhantes.

Com relação a carbonatação, observou-se que a presença de adições minerais aceleraram o processo de carbonatação devido as reações pozolânicas e conseqüente redução da reserva alcalina na pasta. Os maiores coeficientes de carbonatação foram verificados para misturas com maiores teores de substituição (50%) e maiores relações  $a/ag$ .

Verificou-se que as misturas com cinza de casca de arroz com maiores finuras apresentaram maiores coeficientes de carbonatação em relação as misturas com menores finuras. Os traços com 25% de cinza de casca de arroz, figura 3, apresentaram valores bem distintos, com as curvas bem distanciadas. Para as misturas com 50% de cinza de casca de arroz, figura 4, as curvas quase coincidiram.

Pela análise da figura 3, misturas com cinza volante com 25% de adição mineral, observa-se que as curvas dos traços A(CV25) e B(CV25) ficaram superpostas, porém para as misturas com 50% de cinza volante, figura 4, as curvas apresentaram-se bem distintas. Até a relação  $a/ag=0,60$ , figura 4, a mistura de cinza volante na forma menos fina apresentou os maiores coeficientes de carbonatação, a partir deste ponto, com o aumento das relações  $a/ag$  a mistura na forma mais fina apresentou os maiores coeficientes.

O gráfico da figura 4, para as amostras com sílica ativa, demonstram que a mistura (S.A8)-MV de maior finura apresentou coeficientes de carbonatação um pouco superior que a mistura de sílica ativa na forma menos fina.

## 7 CONCLUSÕES

Concluiu-se que para as misturas investigadas os maiores valores de resistência, tanto aos 28 quanto aos 91 dias, foram verificados para os traços com menores relações  $a/ag$ , maiores finuras e menores porcentagens de adições minerais.

Com relação à carbonatação, as maiores profundidades carbonatadas foram verificadas nas misturas com os maiores teores de substituição e maiores relações a/ag. Observou-se que o tipo de adição mineral, o teor e a relação a/ag influenciam mais do que a finura das adições na carbonatação do concreto.

## 8 REFERÊNCIAS

BRANCA,C., FRATESI,R., MORICONI,G., SIMONCINI,S., **Influence of fly ash on concrete carbonation and rebar corrosion**. In: MALHOTRA,V.M. (ed) International Conference on fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete, 4<sup>th</sup>, Istanbul, Turkey,1992. **Proceedings**. Detroit: American Concrete Institute, 1993, 2v., v.1, p.245-255 ( SP-132).

BOUZOUBAÂ , B. N., ZHANG, M. H., MALHOTRA, V.M, and GOLDEN, D. M., Blended Fly Ash Cement – A Review. **Aci Materials Journal/ November- December 1999**.

CHENG, H., AND OSBAECK, B., “**Effect of Fly Ashes Grinding on the Hydration and Strength Development of Fly Ash Cements**”, 8th International Congress on the Chemistry of Cement, V.4, 1986, pp 46-52.

GIERGICZNY, Z., AND WERYNSKA, A. “**Influence of Fineness of Fly Ashes on Their Hydraulic Activity, Fly Ashes, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete**, SP-114,V.1, V.M. Malhotra, ed.,1989, pp. 97-115.

HELENE, P.R.L. E TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo. 1ª Ed. PINI. 1992.

HO, D.W.S., LEWIS, R.K. Carbonation of concrete and its prediction. **Cement and Concrete Research**, v.17, p 489-504, 1987.

ISAIA, G.C., VAGHETTI,M., GASTALDINI, A. **Efeitos de misturas pozolânicas sobre a carbonatação do concreto de cimento portland**. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 40º, Rio de Janeiro, 1998. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 1998. p.30 (CD-ROM).

ISAIA, G.C. **Efeitos de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concreto de elevado desempenho: um estudo de durabilidade com vistas a corrosão da armadura**. São Paulo, 1995. Tese ( doutorado). Escola Politécnica. Univ. de São Paulo.

ISAIA, G.C. **Carbonatação do concreto: uma revisão**. Santa Maria, 1999. Universidade Federal de Santa Maria.

METHA, K.P. **Influence of fly ash characteristics on the strength of portland-fly ash mixtures**.Cement and Concrete Research, v.15, 1985, p 669-674.

PARIS, J.M.F. **La carbonatación de la pasta hidrata de cemento portland interpretación físico-química**. Madrid, Instituto Eduardo Torroja de la construcción y del cemento, 1973. 69p.

PAPADAKIS, V.G. et alli. **Fundamental Modeling and Experimental Investigation of Concrete Carbonation**. ACI Material Journal, v. 88, nº 4, July-Aug. 1991, p-363-373.

RILEM TC 116 PCD., Materials and Structures, v.32, april 1999, p.174-179.

SCISLEWSKI, Z., WOJTOWICZ,M. **The influence of silica fume on durability of concrete and reinforced concrete**. In: SJÖSTRÖM, C. (ed) International Conference on Durability of Building Materials and Components, 7<sup>th</sup>, Stockholm, 1996. **Proceedings**. London: E & FN Spon, 1996, 2v., v.1, p. 309-317.

SUGITA, S., SHOYA, M., TOKUDA, H., **Evaluation od pozzolanic acitivity of rice husk ash**. In: MALHOTRA, V.M. (ed ) International Conference on fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete, 4<sup>th</sup>, Istanbul, Turkey, 1992. **Proceedings**. Detroit: American Concrete Institute, 1993, 2v., v.1, p. 495-512 ( SP-132).