Anais do Congresso Brasileiro de Patologia das Construções
CBPAT2016

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

CARBONATAÇÃO ACELERADA E NATURAL EM AMOSTRAS DE CONCRETO COM AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO E CINZA DE CASCA DE ARROZ

T. HENTGES
PPGEC
Unisinos
Rio Grande do Sul
tatiisabel@yahooo.com.br

M. KULAKOWSKI
Profª. Drª. PPGEC
Unisinos
Rio Grande do Sul
marlovak@unisinos.br

C. KAZMIERCZAK
Prof. Dr. PPGEC
Unisinos
Rio Grande do Sul
claudiok@unisinos.br

B. SARTORI
PPGEC
Unisinos
Rio Grande do Sul
engenheirosartori@gmail.com

RESUMO

Gases como o CO_2, o SO_3 e o H_2S atuam com o tempo na superfície exposta das estruturas de concreto de forma que reduzem a alta alcalinidade do concreto e acabam por desproteger a armadura inserida neste. Essa reação é chamada de carbonatação e vem apresentando papel importante em pesquisas. Outro assunto que vem mostrando importância é a utilização de resíduos no concreto. Na pequisa de Sartori foram executados concretos com substituição parcial de 0%, 10% e 20% de cimento por cinza de casca de arroz (CCA) e também de 0%, 25% e 50% de agregado graúdo natural (AGN) por agregado graúdo reciclado de concreto (ARC), os concretos ainda variaram em têm relações água/aglomerante (a/agl): 0,42, 0,53 e 0,64. Algumas amostras dos concretos produzidos foram submetidas ao ensaio acelerado de carbonatação e outras foram expostas ao ambiente para avaliação da carbonatação natural. O objetivo deste trabalho é verificar a profundidade e o coeficiente de carbonatação que se deu ao natural em corpos de prova deixados expostos ao ambiente externo, comparando-os com a carbonatação acelerada. Para isso, assim como executado nas as amostras do ensaio acelerado, os corpos de prova foram rompidos perpendicularmente ao eixo e a profundidade de carbonatação foi medida por meio de asperção de fenolftaleína, onde foram feitos registros fotográficos, análises de imagens no software AutoCad e, por fim, aplicou-se as equações. Os resultados obtidos são semelhantes aos encontrados por Sartori, onde os concretos que apresentam menor coeficiente de carbonatação são aqueles com menor relação a/agl, sendo que a CCA trouxe melhoras significativas e a substituição de AGN por ARC não apresentou diferenças significativas nos resultados.
Palavras-chave: carbonatação, cinza de casca de arroz, agregado reciclado de concreto.

ABSTRACT

Gases such as CO2, SO3 and H2S act in time on the exposed surface of the concrete structures in order to reduce the high alkalinity of the concrete and eventually unlock the reinforcement inserted therein. This reaction is called carbonation and is showing important role in research. Another issue that has been showing importance is the use of waste in concrete. In Sartori (2013), were executed concrete with partial replacement of 0%, 10% and 20% of cement by rice husk ash (RHA) and also 0%, 25% and 50% of natural coarse aggregate (NCA) by recycled concrete coarse aggregate (RCA), the concrete still have varied in water / binder (w/b): 0.42, 0.53 and 0.64. Some specific samples produced were subjected to the accelerated carbonation test and others were exposed to the environment for evaluation of natural carbonation. The objective of this study is to test the depth and carbonation coefficient that was given to the natural left in specimens exposed to the external environment, comparing them with the accelerated carbonation. For this, as well as run on the samples of the accelerated test, the specimens were broken perpendicular to the axis and the carbonation depth was measured by sprinkling of phenolphthalein, which were made photographic records, image analysis in AutoCad software, and finally, the equations applied. The results are similar to those reported by Sartori, where the concrete that have a lower coefficient of carbonation are those with the lowest ratio water / binder, and the RHA brought significant improvements and replacement of NCA by RCA showed no significant differences in the results.
Palavras-chave: carbonatio, rice husk ash, recycled concrete aggregate.

1. INTRODUÇÃO

A carbonatação é uma reação que ocorre em concretos expostos ao ambiente natural onde algumas condições como temperatura, umidade e concentração de CO2 influenciam na velocidade do processo [1]. A composição química do cimento também tem influência significativa, tendo em vista que fatores como o tipo de cimento, a relação água/cimento e as adições minerais podem acelerar ou retardar a carbonatação [2]. Segundo Cascudo e Carasek [3], boas condições de cura também têm grande importância na proteção do concreto à carbonatação, em função de que esta ocorre com a difusão de CO2 de fora para dentro da estrutura, e que uma cura adequada aumenta a hidratação da pasta de cimento na superfície do concreto, diminuindo a porosidade do mesmo.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

A carbonatação é uma das principais causas da corrosão de armaduras em concreto [4] e esse processo ocorre quando os produtos alcalinos da hidratação do cimento – como o $Ca(OH)_2$, que possui solubilidade em água, dissocia-se em íons Ca2+ e OH- em um meio aquoso – reagem com o gás carbônico (CO_2) e outros gases presentes no ar que acessam meios aquosos no interior do concreto através de superfícies porosas. O resultado dessa reação é a formação de CaCO3 sólido e a redução do pH do concreto, facilitando a despassivação da armadura.

Diversas pesquisas vêm sendo feitas para avaliar a utilização de agregados reciclados no lugar de agregados naturais em concretos e argamassas, pois reações como carbonatação podem vir a ocorrer de forma mais fácil nesses novos materiais.

Os ensaios utilizados para estudar a carbonatação em concretos e argamassas vêm sendo questionados devido à sua agressividade, pois, com o objetivo de se obter resultados de melhor leitura, muitos deles incorporam teores de CO_2 muito distantes da realidade. Com isso, o objetivo desse trabalho foi analisar as diferenças entre coeficientes de carbonatação natural e em ensaio acelerado.

2. MATERIAIS

2.1 Cimento

O cimento utilizado no trabalho foi o CP-II-F-32 e sua composição química é apresentada na Tabela 4. Foi escolhido esse cimento por não haver em sua composição qualquer tipo de aditivos, escórias ou pozolanas (conforme ABNT NBR 11578:1991 [5])

Tabela 4 - Caracterização física, química e mecânica do cimento utilizado.

Parâmetro	Lote Abril 2012	Lote Maio 2012
Al2O3 (%)	4,12	4,12
SiO2 (%)	19,42	19,39
Fe2O3 (%)	2,60	2,59
CaO (%)	60,76	60,78
MgO (%)	4,85	4,93
SO3 (%)	3,03	3,08
Perda ao Fogo (%)	6,04	6,08
CaO Livre (%)	2,89	2,24
Resíduo Insolúvel (%)	2	2
Equivalente Alcalino (%)	0,63	0,62
Expansão à Quente (mm)	0,50	1,00
Início de Pega (h:min)	3:20	3:30
Fim de Pega (h:min)	4:30	4:30
Água Cons.Normal (%)	26,20	26,30
Blaine (cm²/g)	3.850	3.720
#200 (%)	3,4	4,2
#325 (%)	16,3	15,5
fc 1 dia (MPa)	16,3	16,9
fc 3 dias (MPa)	29	29,3
fc 7 dias (MPa)	36,9	36,6
fc 28 dias (MPa)	41,9	41,9
Massa específica (g/cm³)	3,11	3,11

2.2 Cinza de Casca de Arroz

A cinza de casca de arroz utilizada como pozolana na psquisa é oriunda da cidade de Alegrete, RS, e produzida pela combustão da casca do arroz (biomassa) em forno de leito fluidizado para a geração de energia. A cinza possui massa específica de 2,12 g/cm³, índice de atividade pozolânica de 104,7% e as demais características são apresentadas na

Tabela 5. Os resultados de difração de raios-x indica um material predominantemente amorfo com picos de sílica cristalina bem definidos de quartzo e cristobalita.

Tabela 5 - Caracterização química da cinza de casca de arroz

Parâmetro	Teor (%)
SiO2	94,99
K2O	1,01
SO3	0,57
Cl	0,43
CaO	0,33
MnO	0,20
Al2O3	0,18
P2O5	0,10
Fe2O3	0,06
TiO2	0,01
MgO	0,01
ZnO	0,00
P.F.	2,12

2.3 Agregado Miúdo

Na pesquisa foi empregada areia natural quartzoza, proveniente do Rio Jacuí , Rio Grande do Sul. Os dados de massa específica e unitária são apresentados abaixo, na Tabela 6 e na Tabela 7.

Tabela 6 – Valores de massa unitária e específica do agregado miúdo natural

Ensaio/NBR	Resultado (g/cm³)
Massa unitária/ NM 45	1,52
Massa específica/ NM 52	2,55

Tabela 7 – Caracterização granulométrica do agregado miúdo natural

Abertura da Peneira	Massa Retida (%)	Massa Acumulado (%)
6,3mm	1	1
4,8mm	2	3
2,4mm	5	8
1,2mm	6	14
0,6mm	11	25
0,3mm	38	63
0,15mm	35	98
<0,15mm	2	100
Dimensão máxima característica (mm)	4,8 mm	
Módulo de Finura	2,12	

2.4 Agregado Graúdo Natural

Como gregado graúdo natural, foi empregada brita basáltica provindo da Linha São Jorge, distrito de Garibaldi, Rio Grande do Sul. Os dados de massa unitária, específica e a caracterização granulométrica obtidos são apresentados na Tabela 8e na

Tabela 9.

Tabela 8 - Valores de massa unitária e específica do agregado graúdo natural

Ensaio/NBR	Brita (g/cm³)
Massa unitária/ NM 45	1,40
Massa específica/ NM 52	2,67

Tabela 9 - Caracterização granulométrica do agregado graúdo natural

Abertura da Peneira	% Retido	%Acumulado
19 mm	0	0
12,5 mm	39	39
9,5 mm	39	78
6,3 mm	22	100
4,8 mm	0	100
< 4,8 mm	0	100
Diâmetro máximo (mm)	19	
Módulo de Finura	6,78	

2.5 Agregado Graúdo Reciclado de Concreto

O agregado graúdo reciclado utilizado na pesquisa foi obtido da britagem do resíduo de concreto da produção de laje pré-fabricada tipo Roth, submetida à cura convencional com fck 35 MPa. A granulometria utilizada foi apenas a passante na peneira de malha de abertura 19 mm e retido na 4,8 mm. A caracterização do agregado reciclado é apresentada na Tabela 7. A curva de absorção de água do agregado reciclado apresentou absorção de 6,29% aos 10 minutos e 10,34% após 24 horas.

Tabela 10 - Granulometria do agregado graúdo reciclado

Abertura de peneira # (mm)	Massa Retida (%)	Massa Acumulada (%)
38	0	0
25	0	0
19	36	36
12,5	43	79
9,5	10	89
6,3	10	99
4,8	1	100,0
Dimensão máxima característica (mm)	25	
Módulo de finura	7,25	

3. MÉTODOS

3.1 Produção dos corpos de prova

Para a produção dos corpos de prova, foi fixado teor de argamassa em 55% e abatimento de tronco de cone de 100±20 mm. Foram produzidos concretos com três fatores de controle: 0%, 10% e 20% de cinza de casca de arroz em substituição ao cimento; 0%, 25% e 50% de agregado graúdo reciclado em substituição ao agregado graúdo natural; e 0,42, 0,53 e 0,64 como sendo as três relações água/aglomerante. Para alcançar abatimento dentro do estabelecido, foi adicionado aditivo superplastificante a base de policarboxilato. As variáveis de resposta foram o coeficiente de carbonatação e a resistência à compressão.

A substituição do cimento por cinza de casca de arroz e do agregado graúdo convencional por ARC foram realizadas em massa com compensação de volume em função da diferença significativa entre as massas específicas dos materiais.

$$M_{AGRC} = \frac{M_{AN}}{\gamma_{AN}} \times \gamma_{AGRC} \quad (1)$$

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

No momento da moldagem foi adicionada uma taxa compensação de água de 50% da taxa de absorção aos 10 minutos do agregado graúdo reciclado.

Todas as amostras foram submetidas à umidade constante e uniforme de 70% após 28 dias de cura úmida e aos 63 dias foram expostas a duas diferentes formas de carbonatação.

3.2 Carbonatação acelerada

Uma amostra de cada traço foram submetidas ao ensaio acelerado de carbonatação pelo período de um mês, sendo este executado em câmaras de carbonatação com umidade relativa de 70% e concentração de 3% de CO2, ambos controlados por medidores.

3.3 Carbonatação natural

As demais amostras foram, ao mesmo tempo, expostas ao ambiente natural para uma futura avaliação de sua carbonatação natural. Essas amostras foram mantidas em local com acesso de luz solar e de intempéries.

3.4 Medições da carbonatação

Para medir a profundidade de carbonatação, os corpos de prova foram rompidos perpendicularmente ao eixo e então foi aspergido fenolftaleína com concentração de 1% como indicador. Como se pode visualizar na Figura 1, na área carbonatada que possui um pH baixo (menor de 8) a fenolftaleína permanece incolor, já na região central em que não houve carbonatação e o pH permaneceu alto (acima de 10), a fenolftaleína reagiu formando uma coloração carmim.

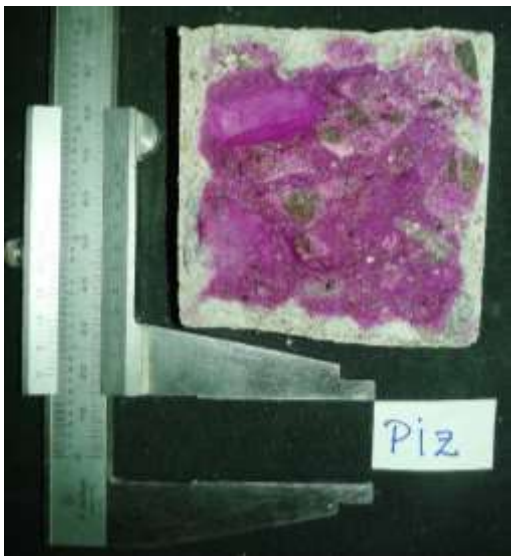

Figura 1 - Amostra após aspersão de fenolftaleína

Na carbonatação acelerada. foram feitas leituras da profundidade de carbonatação aos 1, 3, 7, 28 e 64 dias. Já nas amostras de carbonatação natural, foram feitas leituras aproximadamente aos 1, 2 e 3 anos.

A partir disso foram feitas imagens digitais e, a partir da escala presente junto à imagem, mediu-se a profundidade de carbonatação de cada traço pelo software AutoCAD. As medidas foram feitas apenas nas laterais das amostras, excluindo-se as partes superiores e inferiores da fatia devido à grande possibilidade de diferenças de umidade e porosidade no momento da moldagem, que poderia vir a trazer variações nas medições de carbonatação.

A partir da profundidade de carbonatação e do tempo de exposição das amostras, é possível determinar o coeficiente de carbonatação das amostras de cada traço conforme a Equação 2.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

$$e_c = k\sqrt{t}$$

Onde: e_c = profundidade carbonatada; t = tempo de exposição; k = constante.

4. RESULTADOS

Na Figura 2 apresentam-se imagens das leituras do traço com 50% de ARC e 20% de CCA. Podem-se visualizar as diferenças de profundidade de carbonatação entre as três diferentes relações a/agl, entre três tempos de carbonação acelerada e três tempos de carbonatação natural.

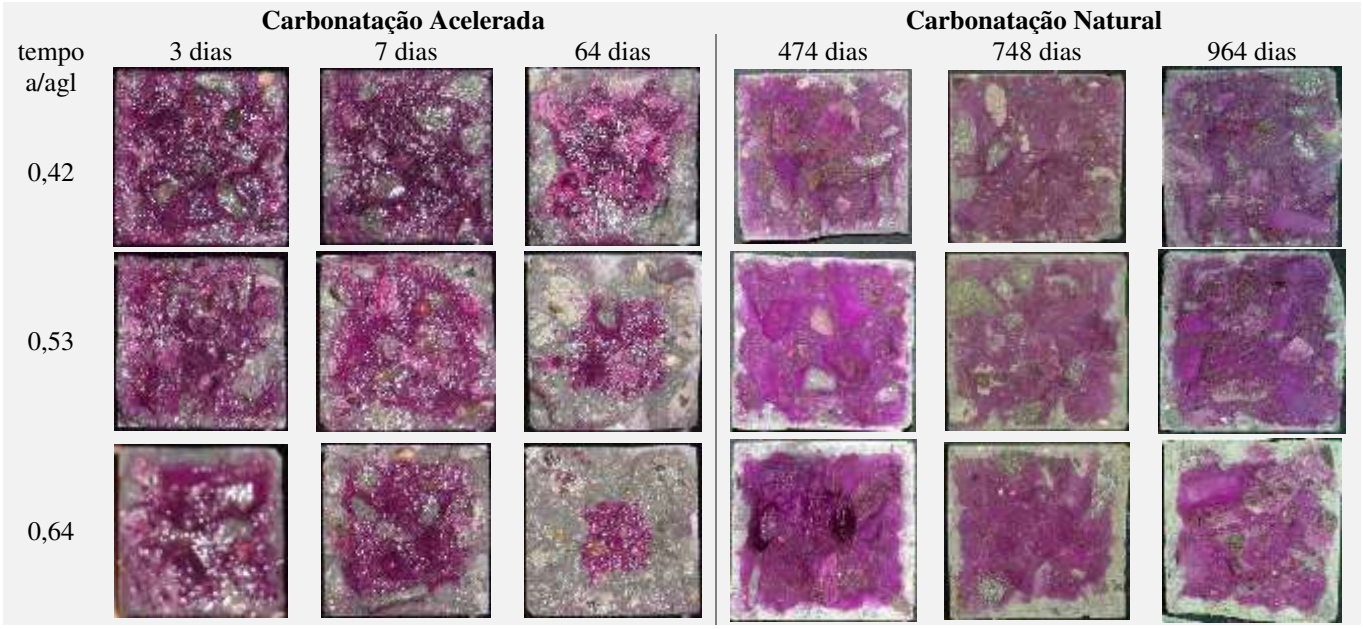

Figura 2 - Imagens de leituras de carbonatação acelerada e natural

Visualizando o estado das amostras no momento da leitura, é possível perceber as diferenças entre o ensaio acelerado (à esquerda) e o natural (direita). As imagens feitas aos 7 dias de ensaio acelerado são as que mais se assemelham com as três leituras do ensaio natural. Podemos observar que quanto maior a relação a/agl, maior a profundidade alcançada pela carbonatação, que nas imagens é representada pela cor natural do concreto no entorno das amostras.

Na Figura 3 são apresentados os coeficientes de carbonatação para os ensaios de carbonatação acelerada e natural. Porém, para melhor visualização, houve alteração na escala e apresentação apenas dos coeficientes de carbonatação natural na Figura 4.

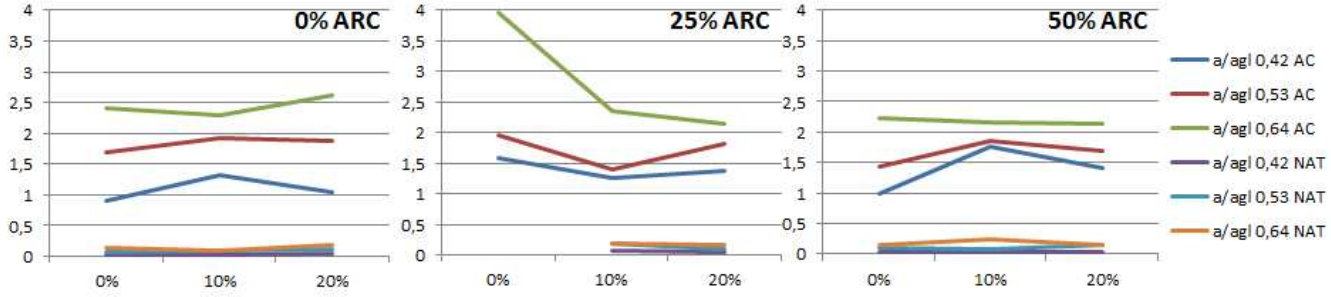

Figura 3 - Coeficientes de carbonatação acelerada e natural

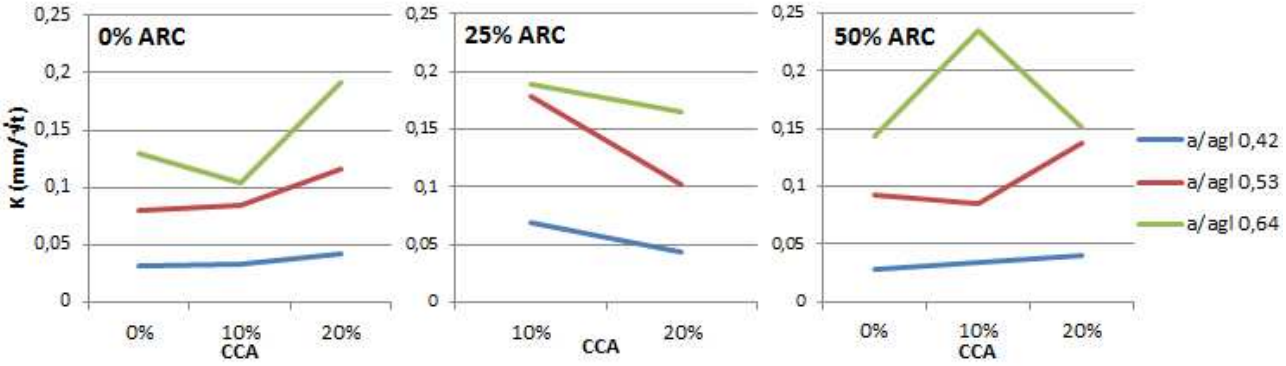

Figura 4 - Coeficientes de carbonatação para o ensaio de carbonatação natural

Em média, os coeficientes de carbonação acelerada apresentam valores 32 vezes maiores que os de carbonatação natural para a relação a/agl 0,42, 17 vezes maior em traços com relação a/agl 0,53, e 15 vezes maior em concretos com a/agl 0,64. Pode-se perceber que a relação a/agl teve grande influência nos resultados, pois quanto maior o valor desta, maior também o coeficiente de carbonatação, estes coeficientes nos concretos com a/agl 0,64 ficaram, em média, duas vezes maiores que o com a/agl 0,42 no ensaio acelerado e 4,22 vezes maiores no ensaio natural.

Esses valores afirmam o colocado por Kulakowski et al. [6], que apresentam o "limite crítico" de relação água/aglomerante entre 0,45 e 0,51, sendo que abaixo disso a caronatação pode ser considerada insignificante. Os autores utilizaram em sua pesquisa a sílica ativa como pozolana.

A cinza de casca de arroz apresenta uma tendência de aumentar os coeficientes de carbonatação quando o concreto possui agregados naturais, porém percebe-se em ambos ensaios acelerado e natural que ela traz benefícios quando os traços incorporam agregado reciclado de concreto.

A Figura 5 apresenta a relação entre a resistência à compressão e os coeficientes de carbonatação acelerada e natural. Mais uma vez alterou-se a escala para melhor visualização quando da carbonatação natural, devido aos seus valores serem consideralvemente mais baixos que os da carbonatação natural.

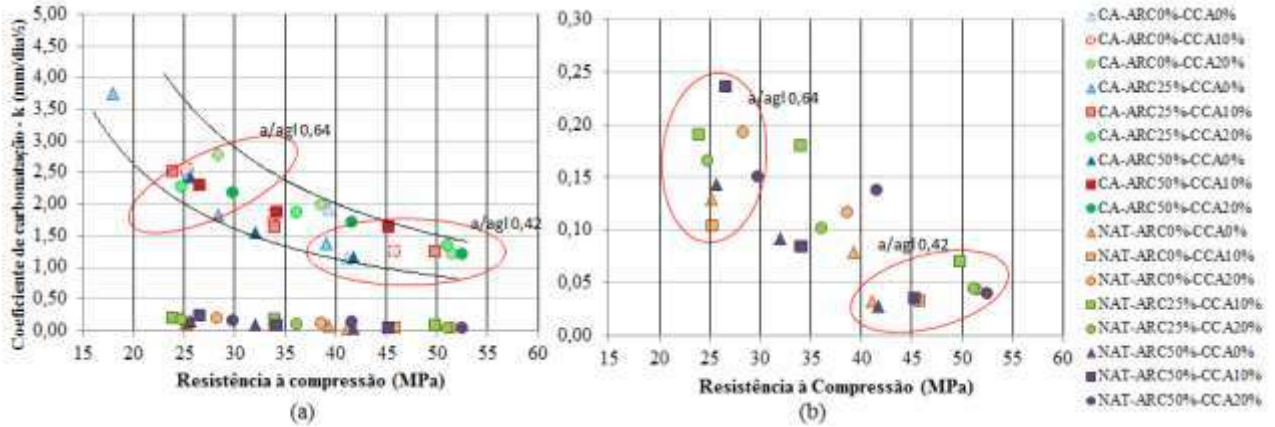

Figura 5 - Relação entre resistência à compressão aos 28 dias e coeficientes de carbonatação (a) acelerada e natural e (b) zoom na natural

Percebe-se, como destacado nos gráficos, que relações a/agl menores acarretam tanto em maior resistência à compressão quanto em menores coeficientes de carbonatação e o oposto ocorre para relações a/agl maiores. Essa correlação pode ser visualizada tanto no ensaio de carbonatação acelerada quanto no ensaio de carbonatação natural. Percebe-se ainda que os traços com e sem ARC e CCA se encontram no mesmo nível de resistência à compressão e de coeficientes.

Por fim, fez-se uma comparação entre os tempos de ensaio acelerado e natural para que se alcance a profundidade medida na última leitura. Essa comparação é apresentada na Tabela 11.

Tabela 11 - Tempo que a carbonatação natural medida representa no ensaio de carbonatação acelerada (dias)

CCA (%)	a/agl	0% ARC		25% ARC		50% ARC	
		Acelerada	Natural	Acelerada	Natural	Acelerada	Natural
0	0,42	1,31	859	-	-	0,46	985
	0,53	0,036	859	-	-	1,13	985
	0,64	1,39	859	-	-	2,33	985
10	0,42	0,76	866	2,07	992	2,70	978
	0,53	1,63	866	0,85	992	1,89	978
	0,64	0,03	866	2,38	992	3,80	978
20	0,42	0,39	859	0,60	971	2,23	964
	0,53	1,64	859	0,86	971	3,01	964
	0,64	3,08	859	2,55	971	2,92	964

A partir da Tabela 8, percebe-se que o ensaio de carbonatação acelerado pode representar de um a três dias o que ocorre em condições naturais pelo período de quase três anos. Os concretos com relações a/agl menores apresentara uma variação, pois alguns demonstram que em algumas horas de ensaio acelerado é possível alcançar a profundidade de carbonatação que levou três anos para acontecer no ambiente externo.

5. CONCLUSÕES

A relação água/aglomerante é o fator que mais influencia nos coeficientes de carbonatação, sendo que quanto maior o teor de o água na mistura, maior também o coeficiente de carbonatação. Em baixas relações a/agl (0,42) o efeito do ARC e da CCA na carbonatação pode ser considerado insignificante, visto que não há alteração no nível de profundidade de carbonatação. Já a resistência à compressão tem aumento relevante quando da presença de cinza de casca de arroz e, principalmente, quando da combinação CCA+ARC, podendo-se dizer que a resistência à compressão apresenta forte influência dos materiais constituintes e, na carbonatação, o que rege é a relação a/agl.

A cinza de casca de arroz apresenta a tendência de aumentar o coeficientesde carbonatação, o que pode ser explicado pela diminuição no diâmetro dos poros do concreto que esse material acarreta, causando um efeito de capilaridade no processo. Porém com a presença de agregado graúdo reciclado de concreto, esse efeito foi oposto, onde a combinação CCA + ARC resultou em concretos mais resistentes à carbonatação, até mesmo aqueles com relação a/agl maior.

As resistências alcançadas no ensaio de compressão axial mostram que concretos com maiores relações a/agl alcançam valores entre 15 MPa e 30 MPa, bem como coeficientes de carbonatação acima de: 2 mm/$t^{1/2}$ para o teste acelerado; e de 0,10 mm/$t^{1/2}$ para o ensaio natural. Já os concretos com menor a/agl tiveram resistências à compressão acima de 40 MPa e coeficientes de carbonatação abaixo de 0,07 mm/$t^{1/2}$ e abaixo de 1,5 mm/$t^{1/2}$ respectivamente para o ensaio natural e acelerado.

Comparando-se o tempo de duração dos dois ensaios para se alcançar a profundidade lida no teste em condições naturais, um dia de ensaio acelerado pode vir a representar a realidade de carbonatação alcançada em um ano.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES, a Fapergs e o CNPq pelo financiamento da pesquisa.

6. REFERÊNCIAS

[1] Kulakowski, M.P., “Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas compostos com adição de sílica ativa”. *Tese de Doutorado*, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2002.

[2] Figueiredo, E. P.; Meira, G., “Corrosão das armaduras das estruturas de concreto”. *Boletim Técnico 6 – Corrosão de armaduras,* ALCONPAT Internacional, 2013, .

[3] Cascudo, O; Carasek, H., “Ação Da Carbonatação no concreto”. *Concreto ciência e tecnologia*. Vol 1, cap 24. 2011.

[4] SALTA, M. M. "Resistência dos betões à penetração de cloretos. Previsão do tempo de iniciação da corrosão nas estruturas". In: *6˚ Encontro Nacional sobre Estruturas Pré-Esforçadas,* Betão Estrutural 1996, Lisboa, 1996.

[5] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), NBR 11578: Cimento Portland Composto. Rio de Janeiro, 1997.

[6] Kulakowski et al. "Carbonation-induced reinforcement corrosion in sílica fume concrete", *Construction and Building Materials*, v. 23, n. 3, 2009, 1189-1195.