

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**CARBONATAÇÃO ACELERADA EM CONCRETOS
COMPOSTOS COM CINZA DE CASCA DE ARROZ DE
DIFERENTES TEORES DE CARBONO GRAFÍTICO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Douglas Garcez Nunes

**Santa Maria, RS, Brasil
2014**

CARBONATAÇÃO ACELERADA EM CONCRETOS COMPOSTOS COM CINZA DE CASCA DE ARROZ DE DIFERENTES TEORES DE CARBONO GRAFÍTICO

Douglas Garcez Nunes

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Construção Civil e Preservação Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Civil

Orientador: Prof. Dr. Antônio Luiz Guerra Gastaldini

**Santa Maria, RS, Brasil
2014**

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Nunes, Douglas Garcez
Carbonatação acelerada em concretos compostos com
cinza de casca de arroz de diferentes teores de carbono
grafítico / Douglas Garcez Nunes.-2014.
149 p. ; 30cm

Orientador: Antônio Luiz Guerra Gastaldini
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, RS, 2014

1. Carbonatação Acelerada 2. Concreto 3. Cinza de
Casca de Arroz 4. Adições Minerais 5. Teor de Carbono
Grafítico I. Gastaldini, Antônio Luiz Guerra II. Título.

© 2014

Todos os direitos autorais reservados a Douglas Garcez Nunes. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho somente com autorização por escrito do autor. Endereço eletrônico: dgarcez@msn.com

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil**

**A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado**

**CARBONATAÇÃO ACELERADA EM CONCRETOS COMPOSTOS
COM CINZA DE CASCA DE ARROZ DE DIFERENTES TEORES DE
CARBONO GRAFÍTICO**

elaborada por
Douglas Garcez Nunes

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Civil

COMISSÃO EXAMINADORA:

Antônio Luiz Guerra Gastaldini, Dr.
(Presidente/Orientador)

Geraldo Cechella Isaia, Dr. (UFSM)

Andre Tavares Cunha Guimarães, Dr. (FURG)

Santa Maria, 28 de fevereiro de 2014.

Dedico este trabalho aos meus avôs, Antão e Lourdes, pela oportunidade de estudar; sem vocês nada disto seria possível.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus pela vida, e a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a realização desta pesquisa.

Em especial, ao meu orientador professor Antônio Luiz Guerra Gastaldini, pela amizade, pelo apoio, pela compreensão e pelos conhecimentos transmitidos ao longo da pesquisa.

Ao professor Geraldo Cechella Isaia, pelos conhecimentos teóricos transmitidos e pela amizade.

À Lisiane, minha esposa, pela motivação e pelo companheirismo, para que pudesse me dedicar na realização deste projeto.

À minha família que me acompanharam e apoiaram para que pudesse me empenhar para a execução deste projeto.

Aos colegas de trabalho da Universidade Federal de Santa Maria, Ademar José Bassan da Luz, Erli Bolsan, Claudio Vasconcelos da Rosa e Nilton Irineu Biachin Roso, pelo incentivo e pela compreensão nos momentos difíceis.

Aos amigos, Tiago Hoppe, Rodrigo de Bivar dos Santos e Marcel Felipe Tonetto Costas, pelas dicas e pelo incentivo em todos os momentos.

Aos colegas de mestrado, Fabrício Beltrame Zamberlan, Monique Pafiadache, Carlos Zinn Mostardeiro Neto e Maisson Tasca pela ajuda nos trabalhos práticos e, também, pela amizade.

Aos bolsistas de iniciação científica do GEPECON, Maurício Silveira, Lucas Lamberti, Henrique Bolacel, Bruno Gonçalves, Pedro Orlando, Daniel Teixeira e Patrícia Osmari, pela amizade e ajuda nos trabalhos laboratoriais.

Aos funcionários do Laboratório de Materiais de Construção Civil, pela ajuda nas horas em que necessitei.

À Universidade Federal de Santa Maria, por possibilitar esta pesquisa.

A todos, meu muito obrigado.

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
Universidade Federal de Santa Maria

CARBONATAÇÃO ACELERADA EM CONCRETOS COMPOSTOS COM CINZA DE CASCA DE ARROZ DE DIFERENTES TEORES DE CARBONO GRAFÍTICO

AUTOR: DOUGLAS GARCEZ NUNES
ORIENTADOR: ANTÔNIO LUIZ GUERRA GASTALDINI
Data e Local da Defesa: Santa Maria, 28 de fevereiro de 2014

O fenômeno da carbonatação acontece naturalmente em estruturas de concreto, exigindo apenas certa concentração de CO_2 no ambiente e determinado teor de umidade. Este fenômeno provoca a redução do pH do concreto a níveis que podem causar a eliminação da película passivadora do aço, podendo ocorrer a instalação do mecanismo de corrosão das armaduras, uma das principais patologias em estruturas de concreto armado. O presente estudo teve por objetivo avaliar a carbonatação acelerada em concretos compostos com cinza de casca de arroz com diferentes teores de carbono grafítico e períodos de cura. Os concretos foram moldados com cinza de casca de arroz com teores de 5%, 10%, 20% e 30% em substituição ao cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI), com diferentes relações água/aglomerante (0,35; 0,50; 0,65) e com períodos de cura em câmara úmida de 3 e 7 dias. Duas misturas com 5% e 10% de sílica ativa em substituição ao cimento Portland foram empregadas como parâmetro de comparação. A carbonatação acelerada foi realizada em corpos-de-prova 10x10cm que passaram pelo pré-condicionamento, conforme preconiza a norma RILEM TC 116-PCD, após serem inseridos em uma câmara climatizada com uma umidade de $(65 \pm 2)\%$, temperatura de $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ e uma concentração de CO_2 de 3% em volume, por períodos de 4, 8, 12 e 16 semanas de exposição ao CO_2 . Já o ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio foi realizado em corpos-de-prova medindo 4x8cm, que foram ensaiados aos 91 dias. Os resultados mostram, de maneira geral, um melhor desempenho da cinza de casca de arroz com menor teor de carbono grafítico frente à carbonatação acelerada, apesar da proximidade dos resultados. O aumento do teor substituição, nos concretos com cinza de casca de arroz, provocou um aumento dos coeficientes de carbonatação, para todas as misturas investigadas. Em igualdade de resistência, constata-se que houve uma diminuição dos coeficientes de carbonatação quando a resistência à compressão aumenta de 40 MPa para 50 MPa para todas as misturas analisadas e para o prazo de cura adotado, evidenciando que o prolongamento no período de cura do concreto reflete diretamente no aumento da vida útil da estrutura.

Palavras-chave: Concreto. Cinza de Casca de Arroz. Adições Minerais. Carbonatação. Teor de Carbono grafítico

ABSTRACT

M.Sc. Dissertation
Graduate Program in Civil Engineering
Federal University of Santa Maria

ACCELERATED CARBONATION OF CONCRETE WITH RICE HUSK ASH WITH DIFFERENT CONCENTRATIONS OF GRAPHITE CARBON

AUTHOR: DOUGLAS GARCEZ NUNES
SUPERVISOR: ANTÔNIO LUIZ GUERRA GASTALDINI
Date and venue of presentation: Santa Maria, February 28th, 2014

Carbonation is a natural phenomenon observed in carbon structures, and it is a result of the combined presence of CO₂ in the environment and moisture. Carbonation may lower the pH of the concrete to such an extent that the passivation layer of the steel is depleted and the onset of frame corrosion is observed, which is one of the major pathologies in reinforced concrete structures. This study aimed to assess accelerated carbonation in concrete samples prepared with rice husk ash (RHA) with different concentrations of graphitic carbon and different curing periods. Concrete samples were prepared with 5%, 10%, 20% and 30% of RHA as a substitution for high early strength Portland cement (Brazilian grade CPV-ARI), different water/binder ratios (0.35; 0.50; 0.65) and wet cured for 3 and 7 days. In addition, two mixes with 5% and 10% silica fume as substitutions for Portland cement were used for comparison. Accelerated carbonation was performed in 10x10cm test specimens (TS) that were preconditioned as determined by standard RILEM TC 116-PCD. These TSs were stored in a controlled temperature chamber (RH 65 ± 2%, temperature 23 ± 2°C, 3% CO₂ b/v), where they were exposed to CO₂ for 4, 8, 12 and 16 weeks. The mercury intrusion porosimetry test was performed in 4x8cm TSs, which were tested after 91 days. Overall results show improved accelerated carbonation performance in the samples prepared with rice husk ash with lower concentrations of graphitic carbon, even though figures were similar. Higher concentrations of RHA in the concrete samples resulted in increased carbonation coefficients for all mixes investigated. For samples of the same strength values, a reduction in carbonation coefficients was observed when their compressive strength increased from 40 MPa to 50 MPa, This was seen in all mixes investigated for the curing period used, which shows that the use of longer curing periods improves the service life of structures.

Keywords: Concrete. Rice husk ash. Mineral additions. Carbonation. Concentration of graphitic carbon.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Concentração de gás carbônico na atmosfera.....	27
Figura 2 - Terminologia do grão de arroz.	36
Figura 3 - Mapa da produção agrícola - Arroz.....	38
Figura 4 - Micrografia eletrônica de varredura da cinza de casca de arroz.	39
Figura 5 - DRX da CCA obtida com o controle de temperatura (amorfa).	42
Figura 6 - DRX da CCA obtida sem o controle de temperatura (cristalina).	42
Figura 7 - Micrografia da CCA: (a) 15 minutos de moagem; (b) 20 horas de moagem.	43
Figura 8 - Variação do índice de atividade pozolânica pelo tempo de moagem.....	44
Figura 9 - Demanda de água nos decorridos tempos de moagem.....	45
Figura 10 - Ilustração esquemática do processo de obtenção da sílica ativa.....	46
Figura 11 - Morfologia da sílica ativa por microscopia eletrônica de transmissão.	47
Figura 12 - Esquematização do fenômeno de carbonatação.	53
Figura 13 - Zonas envolvidas no mecanismo de carbonatação e variação do pH conforme a profundidade.....	54
Figura 14 - Variação da profundidade de carbonatação com o tempo e com a relação a/agl.....	57
Figura 15 - Evolução do coeficiente de carbonatação acelerada com a resistência à compressão de 11 misturas de concreto com e sem pozolana, em igualdade de resistência de 60 MPa.	62
Figura 16 - Correlação entre o coeficiente de carbonatação natural e o teor de hidróxido de cálcio remanescente para nível de resistência de 70 MPa.	63
Figura 17 - Distribuição granulométrica do cimento (CPV-ARI).	70
Figura 18 - Difratograma da amostra de cimento (CPV-ARI).	72
Figura 19 - Difratograma da amostra de CCAC.	73
Figura 20 - Difratograma da amostra de CCAE.....	74
Figura 21 - Difratograma da amostra SA.....	74
Figura 22 - Curva granulométrica do agregado miúdo.	76
Figura 23 - Curva granulométrica do agregado graúdo.....	77
Figura 24 - Esquema de corte dos corpos-de-prova para o ensaio de carbonatação acelerada. (a) CP 10 x 20 cm; (b) CP cortado em duas fatias e (c) detalhe da fatia.	83
Figura 25 - Corpo-de-prova parte moída e inteira.	84
Figura 26 - Sentido da carbonatação.	86
Figura 27 - Câmara de carbonatação.....	86
Figura 28 - Parâmetros do ensaio.....	87
Figura 29 - Corpos-de-prova na câmara de carbonatação.....	87
Figura 30 - Contorno da região carbonatada.....	88
Figura 31 - Contorno dividido em linhas verticais espaçadas 1mm umas das outras.	88
Figura 32 - Determinação do coeficiente carbonatação.	92
Figura 33 - Coeficiente de carbonatação x relação a/agl. Três e sete dias de cura. Misturas de REF, SA e Cinza Clara.	93
Figura 34 - Coeficiente de carbonatação x relação a/agl. Três e sete dias de cura. Misturas de REF, SA e Cinza Escura.....	94
Figura 35 - Coeficiente de carbonatação x teor de adição. Três e sete dias de cura. Misturas de REF, SA e Cinza Clara.	97

Figura 36 - Coeficiente de carbonatação x teor de adição. Três e sete dias de cura. Misturas de REF, SA e Cinza Escura.	98
Figura 37 - Coeficiente de carbonatação x resistência à compressão. Níveis de resistência adotados de 40 MPa, 50 Mpa – três dias de cura.	106
Figura 38 - Coeficiente de carbonatação x relação a/agl. Níveis de resistência adotados de 40 MPa, 50 MPa - três dias de cura.	106
Figura 39 - Coeficiente de carbonatação x resistência à compressão. Níveis de resistência adotados de 40 MPa, 50 Mpa - sete dias de cura.	107
Figura 40 - Coeficiente de carbonatação x relação a/agl. Níveis de resistência adotados de 40 MPa, 50 MPa - sete dias de cura.	107
Figura 41 - Volume acumulado de intrusão x Diâmetro de poros.	110
Figura 42 - Coeficiente de carbonatação x absorção capilar - três dias de cura. ...	114
Figura 43 - Coeficiente de carbonatação x absorção capilar - sete dias de cura....	114
Figura 44 - Coeficiente de carbonatação x volume de intrusão de mercúrio - três dias de cura.	115
Figura 45 - Coeficiente de carbonatação x volume de intrusão de mercúrio - sete dias de cura.	116
Figura 46 - Coeficiente de carbonatação x diâmetro crítico – três dias de cura.	117
Figura 47 - Coeficiente de carbonatação x diâmetro crítico - sete dias de cura.	117
Figura 48 - Coeficiente de carbonatação x resistência à compressão - três dias de cura.	118
Figura 49 - Coeficiente de carbonatação x resistência à compressão - sete dias de cura.	119
Figura 50 - Resistência à compressão x volume de intrusão de mercúrio das misturas investigadas - três dias de cura.	120
Figura 51 - Resistência à compressão x volume de intrusão de mercúrio das misturas investigadas - sete dias de cura.	120

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Proporções das adições minerais em cada mistura de aglomerante.	68
Tabela 2 - Ensaio em argamassa do CPV-ARI.	71
Tabela 3 - Características físicas do cimento.	71
Tabela 4 - Características químicas do cimento.	71
Tabela 5 - Características físicas das adições minerais.	72
Tabela 6 - Características químicas das adições minerais.	73
Tabela 7 - Características físicas dos agregados.	76
Tabela 8 - Traço unitário para o concreto de referência.	78
Tabela 9 - Consumo de materiais por m ³ de concreto.	79
Tabela 10 - Idade de ensaio e tamanho dos corpos-de-prova.	80
Tabela 11 - Profundidades de carbonatação para os diferentes períodos de exposição e o coeficiente de carbonatação.	90
Tabela 12 - Coeficientes C, D e r ² das equações exponenciais que relacionam o coeficiente de carbonatação e a relação a/agl x, dada pela expressão $k = C/Dx$ para cada mistura testada.	102
Tabela 13 - Valores dos coeficientes de carbonatação em igualdade de resistência e suas respectivas relações a/agl.	103
Tabela 14 - Parâmetros do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio.	108
Tabela 15 - Resultados dos ensaios de porosimetria de mercúrio - 91 dias.	109

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Produção brasileira de arroz e casca (safra 2013/2014).....	38
Quadro 2 - Efeito das condições de combustão na estrutura da sílica contida na cinza de casca de arroz.....	41

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
Art.	Artigo
Al_2O_3	Óxido de alumínio
a/agl	Relação água/aglomerante em massa
Agl	Aglomerante
°C	Graus Celsius
CA	Casca de arroz
CaCO_3	Carbonato de cálcio
CCA	Cinza de casca de arroz
CCAC	Cinza de casca de arroz clara
CCAE	Cinza de casca de arroz escura
Ca(OH)_2	Hidróxido de cálcio
CH	Hidróxido de cálcio
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
Cm	Centímetro(s)
CO_2	Dióxido de carbono
CP	Cimento Portland
CPV-ARI	Cimento Portland de alta resistência inicial
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
CV	Cinza volante
Ca^{++}	Íons cálcio
CaO	Óxido de cálcio
EAF	Escória de alto-forno
Fe_2O_3	Óxido de Ferro III
G	Grama(s)
GEEA	Indústria Geradora de Energia Elétrica Alegrete
H	Hora(s)
H_2S	Sulfeto de hidrogênio
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
LMCC	Laboratório de Materiais de Construção Civil
K^+	Íons de potássio
Kg	Quilograma(s)
KOH	Hidróxido de potássio
M	Metro(s)
Mm	Milímetro(s)
Mg	Miligrama(s)
μm	Micrômetro(s)
MPa	Megapascal
MS	Microssílica
m^2/g	Metro(s) quadrado(s) por grama
m^3	Metro cúbico
n°	Número
Na	Sódio
Na^+	Íons de sódio

NaOH	Hidróxido de sódio
NBR	Norma Brasileira Regulamentada
Nm	Nanômetro
OH ⁻	Íons hidróxido
pH	Potencial de hidrogênio
Ppm	Partes por milhão
REF	Mistura de referência, composta somente de cimento Portland como aglomerante
RILEM	Réunion Internationale des Laboratoires d' Essais et des Echerces sur lês Matériau et les Constructions
SiO ₂	Dióxido de silício
AS	Sílica ativa
SO ₂	Dióxido de enxofre
SO ₄ ⁻⁻	Íons sulfato
SNIC	Sindicato Nacional da Indústria de Cimento
U.R.	Umidade relativa do ar
3d	Cura de três dias
7d	Cura de sete dias
5C	Mistura composta de 5% de cinza de casca de arroz clara e 95% de CPV-ARI
10C	Mistura composta de 10% de cinza de casca de arroz clara e 90% de CPV-ARI
20C	Mistura composta de 20% de cinza de casca de arroz clara e 80% de CPV-ARI
30C	Mistura composta de 30% de cinza de casca de arroz clara e 70% de CPV-ARI
5E	Mistura composta de 5% de cinza de casca de arroz escura e 95% de CPV-ARI
10E	Mistura composta de 10% de cinza de casca de arroz escura e 90% de CPV-ARI
20E	Mistura composta de 20% de cinza de casca de arroz escura e 80% de CPV-ARI
30E	Mistura composta de 30% de cinza de casca de arroz escura e 70% de CPV-ARI
5SA	Mistura composta de 5% de sílica ativa e 95% de CPV-ARI
10SA	Mistura composta de 10% de sílica ativa e 90% de CPV-ARI
Ø	Diâmetro
#	Abertura da malha de uma peneira padronizada

LISTA DE ANEXOS

Anexo A - Resultados de absorção capilar obtidos por Mostardeiro Neto (2011) – Tabela 4.5	142
Anexo B - Resultados de absorção capilar obtidos por Mostardeiro Neto (2011) – Tabela 4.6.	144
Anexo C - Resultados de resistência à compressão obtidos por Da Silva (2012) – Tabela 5.1.	146
Anexo D - Resultados de resistência à compressão obtidos por Da Silva (2012) – Tabela 5.2.	148

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	26
1.1 Justificativa	26
1.2 Definição temática	30
1.2.1 Apresentação do tema	30
1.3 Objetivos	30
1.3.1 Objetivo geral	30
1.3.2 Objetivos específicos	31
1.4 Estrutura da dissertação	31
2 CARBONATAÇÃO DA CCA E SA NO CONCRETO	34
2.1 Adições minerais	34
2.1.1 Considerações iniciais	34
2.1.2 Casca de arroz	35
2.1.3 Cinza de casca de arroz	39
2.1.4 Sílica ativa	45
2.1.5 Características do concreto com adições	48
2.2 Carbonatação acelerada	50
2.2.1 Considerações iniciais	50
2.2.2 Fatores que influenciam a carbonatação	56
2.2.2.1 Relação água/aglomerante	56
2.2.2.2 Dosagem do cimento e adições minerais	58
2.2.2.3 Cura	59
2.2.2.4 Concentração de CO ₂	59
2.2.2.5 Saturação dos poros	60
2.2.2.6 Resistência à compressão	61
2.2.2.7 Teor de hidróxido de cálcio remanescente	62
2.2.2.8 Temperatura	63
3 MATERIAIS E MÉTODOS	66
3.1 Considerações iniciais	66
3.2 Materiais	67
3.2.1 Caracterização dos materiais	69
3.2.1.1 Aglomerantes	69
3.2.1.2 Agregados	75
3.3 Dosagem dos concretos	77
3.3.1 Moldagem e cura dos corpos-de-prova	80
3.4 Ensaios realizados	82
3.4.1 Carbonatação Acelerada	82
3.4.2 Porosimetria por intrusão de mercúrio	89
4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	90
4.1 Considerações iniciais	90
4.2 Análise dos resultados da carbonatação acelerada	90
4.3 Análise dos resultados em igualdade de resistência	100
4.4 Porosimetria por intrusão de mercúrio	108
4.5 Integração dos resultados	112
4.5.1 Comparação entre carbonatação acelerada e absorção capilar	112
4.5.2 Comparação entre carbonatação acelerada, volume total de intrusão de mercúrio e diâmetro crítico	115

4.5.3 Comparação entre carbonatação acelerada e resistência à compressão	118
4.5.4 Comparação entre resistência à compressão, volume total de intrusão de mercúrio e diâmetro crítico	119
5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	122
5.1 Sugestões para pesquisas futuras.....	126
REFERÊNCIAS	128
ANEXOS	140

1 INTRODUÇÃO

1.1 Justificativa

A consciência da sociedade sobre o meio ambiente nos últimos anos tem atribuído importância cada vez maior aos materiais de construção e seu impacto neste. Várias pesquisas vêm sendo desenvolvidas no sentido de atender não só aos aspectos técnicos e econômicos como também aos aspectos ecológicos, através da substituição do cimento por resíduos agroindustriais, agregados reciclados, entre outros.

Material indispensável à sociedade, o concreto, depois da água, é o material mais consumido pelo homem e também o mais amplamente utilizado em construções, em virtude da sua capacidade de fornecer excelente durabilidade às estruturas, quando bem dosado e executado, e de suas propriedades mecânicas a um relativo baixo custo, segundo Mehta e Monteiro (2008).

No ano de 2013, foram produzidos, no Brasil, mais de 70 milhões de toneladas de cimento, segundo o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC, 2014). Este elevado volume é justificado pela versatilidade que o concreto apresenta, pois seus componentes são facilmente encontrados e, além disso, ele pode ser misturado e moldado, de acordo com as exigências do projeto, no próprio local onde será utilizado.

Perante o grande consumo de cimento, visando ao uso racional e sustentável das jazidas fornecedoras de matérias-primas para produção do clínquer e tendo em vista, ainda, a maior vida útil das estruturas de concreto, tem-se procurado soluções que contribuam para aumento da durabilidade e para a minimização do impacto ambiental gerado pela produção do concreto.

Dentre os maiores problemas de durabilidade das estruturas de concreto armado está a corrosão das armaduras, seja pela ação de cloretos ou pela carbonatação. Esta última resulta das reações químicas que ocorrem entre o dióxido de carbono atmosférico e os produtos hidratados do cimento, hidróxidos e silicato de cálcio hidratado (C-S-H), uma vez que exista suficiente quantidade de água nos poros. Como resultado, ocorre a formação de carbonatos menos solúveis e,

também, a redução da alcalinidade da água dos poros (GOÑI, 1997), conduzindo a uma despassivação da armadura (CEUKELAIRE; NIEUWENBURG, 1993) e a mudanças na estrutura dos poros (MATALLA, 1997).

O dióxido de carbono (CO_2) presente na atmosfera é resultado da queima de combustíveis fósseis, especialmente aquela feita pelo setor industrial e de transporte. Na construção civil, o concreto tem como seu principal constituinte o cimento Portland (CP), responsável por grande emissão de CO_2 . Esse problema tem se agravado devido ao aumento do teor de CO_2 na atmosfera, que vem crescendo, conforme ilustra a figura 1. A maior parte dos estudos atuais prevê que, se não forem ampliados os esforços para conter as emissões de CO_2 , até o final do século XXI, a concentração deste elemento na atmosfera poderá atingir até o dobro da atual, que é de 375 ppm. Já outras estimativas mais alarmantes revelam que a concentração poderá chegar até próximo de 1000 ppm (UNEP, 2013).

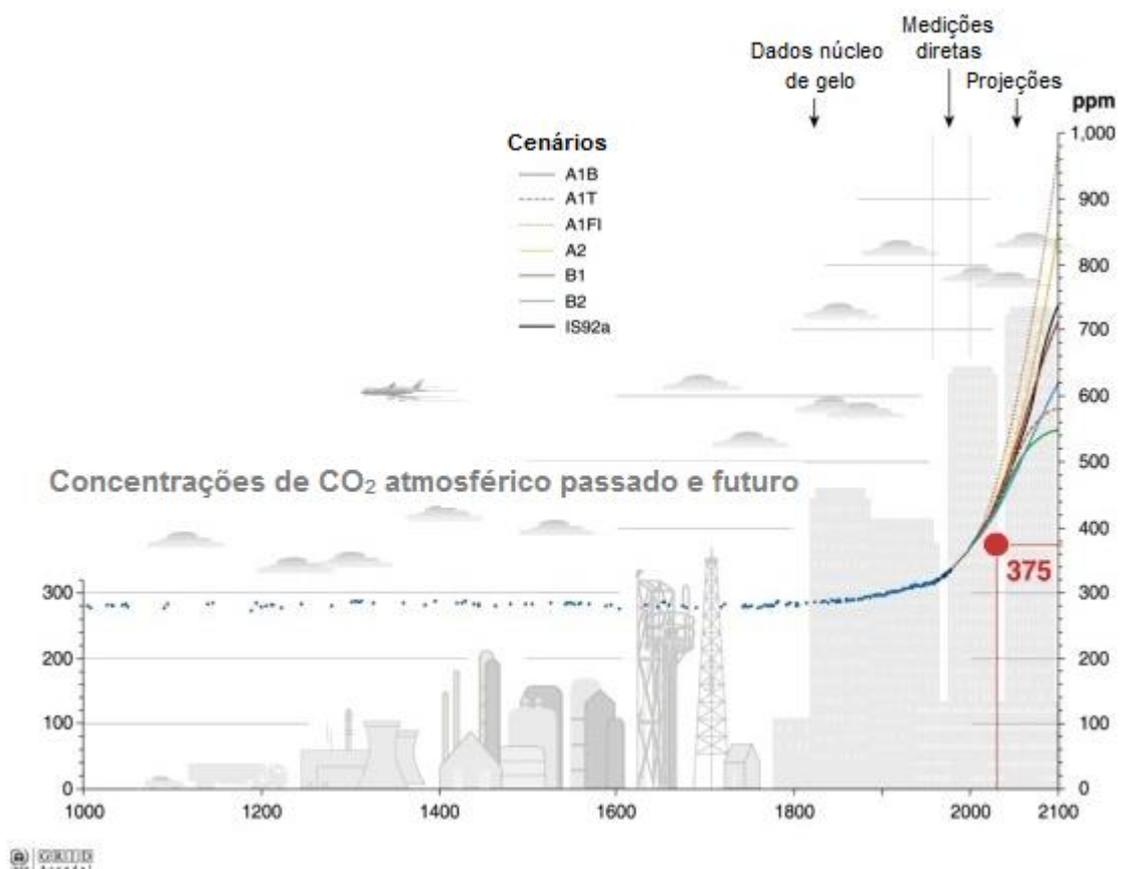


Figura 1 - Concentração de gás carbônico na atmosfera.

Fonte: Adaptado da Grid Arendal (2005).

Há mais de sessenta anos encontram-se relatos de pesquisas nacionais e internacionais sobre a influência da penetração de CO₂ nas estruturas de concreto. De modo geral, o fenômeno da carbonatação acontece naturalmente em estruturas de concreto, exigindo apenas certa concentração de CO₂ no ambiente e determinado teor de umidade. Apesar de a carbonatação progredir lentamente da superfície para o interior da estrutura, segundo Cascudo (1997), contribui decisivamente para o rebaixamento do pH e a despassivação da armadura, podendo ocasionar o processo de corrosão da estrutura.

É essencial que as estruturas de concreto apresentem um bom desempenho e a durabilidade prevista ao longo de sua vida útil. Segundo Neville (1997), o uso de adições minerais justifica-se, além da diminuição do impacto ambiental, pelo aprimoramento das propriedades do concreto e pelos menores custos de manutenção.

O uso de adições minerais no concreto, tendo em vista a melhoria de algumas características de durabilidade, é uma tendência mundial entre os pesquisadores. Com a finalidade de atender aos requisitos mundiais de sustentabilidade, essas adições são oriundas de subprodutos da produção agrícola ou industrial, como a cinza de casca de arroz (CCA), a cinza volante (CV), a sílica ativa (SA) e o metacaulim, entre outros, oferecendo um destino sustentável de aproveitamento desses resíduos.

O desempenho do concreto quando parte do cimento é substituído por CCA moída tem sido relatado por vários autores (PRUDÊNCIO JUNIOR, SANTOS, DAFICO, 2003; ISAIA, GASTALDINI, 2004; VAGHETTI, 1999). A reação pozolânica envolvendo essa adição refina os poros, diminuindo a permeabilidade do concreto.

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2014), a produção esperada de arroz para este ano é de mais de 12 milhões de toneladas, sendo o Estado do Rio Grande do Sul responsável por grande parte dessa produção. Conforme Mehta e Monteiro (2008), cada tonelada de arroz produz em torno de 200 kg de casca, que, quando queimada, gera 40 kg de cinza; a cinza formada durante a queima não controlada geralmente possui uma grande quantidade de minerais de sílica não reativos e, portanto, deve ser moída e transformada em partículas muito finas para desenvolver atividade pozolânica.

Entretanto, pode-se obter uma cinza altamente pozolânica através da queima controlada quando a sílica é mantida na forma não cristalina e em estrutura celular.

No entanto, apesar da quantidade disponível da CCA, especialmente no Estado do Rio Grande do Sul, a utilização dessa adição mineral encontra restrições no mercado da construção civil por motivos como a sua cor escura, que confere aos cimentos, às argamassas e aos concretos aos quais é adicionada uma coloração escura, acarretando um problema de ordem estética na sua aceitação no meio técnico. Além disso, para apresentar cinzas amorfas, há necessidade de queima em fornos com controle de temperatura, o que muitas vezes não ocorre. Também há o custo de moagem envolvido para melhoria da pozolanicidade da CCA, o que eleva o seu valor comercial.

A utilização da SA como material pozolânico também vem sendo estudada por vários pesquisadores (CARMO, 2006; HOFFMANN, 2001; VIEIRA, 2003), e todos são unânimes quanto às melhorias do desempenho dos concretos e das argamassas com essa adição. Dessa forma, o uso desse material é proposto, nesta pesquisa, a fim de estabelecer um parâmetro de comparação com a cinza de casca de arroz clara (CCAC) e com a escura (CCAÉ).

Apesar disso, ainda não existe consenso nas pesquisas quanto às adições minerais trazerem ou não benefícios para os estudos de carbonatação (ISAIA; GASTALDINI, 2004). Isso ocorre devido ao consumo de hidróxido de cálcio (CH) proporcionado pelas adições. Isto é, há uma redução de CH remanescente e de outros álcalis, o que faz com que a profundidade da carbonatação aumente ao longo do tempo de exposição do concreto ao CO_2 em relação aos concretos sem adições minerais.

Assim, o presente estudo teve por objetivo avaliar a influência da CCA de diferentes teores de carbono gráfico obtida com queima controlada, com o objetivo primário de gerar energia, e do período de cura na carbonatação acelerada. A CCA com teor de carbono gráfico de 0,41% foi denominada “clara” (CCAC), e a com teor de 3,69% foi denominada “escura” (CCAÉ) por apresentarem essas características. Adotaram-se teores de 5%, 10%, 20% e 30% de CCAC e CCAÉ, além de períodos de cura de três e sete dias. Uma mistura com SA, em teor de 5% e 10% de substituição ao cimento, foi utilizada para comparação dos resultados.

O presente trabalho faz parte de uma pesquisa maior que verificou o desempenho de concretos com adição de CCA com diferentes teores de carbono grafítico. Mostardeiro Neto (2011) pesquisou o comportamento da absorção capilar e a resistividade elétrica ao substituir o cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI) por 10%, 20% e 30% das cinzas estudadas. Da Silva (2012), ao substituir teores de 5%, 10%, 20% e 30%, verificou o desempenho dos concretos em relação à retração total, à penetração de cloretos e à resistência mecânica. Também utilizando as mesmas adições, Zamberlan (2013), ao substituir teores de 5%, 10%, 20% e 30%, analisou o desempenho dos concretos em relação à penetração de cloretos.

1.2 Definição temática

1.2.1 Apresentação do tema

A pesquisa consiste no estudo de concretos com diferentes adições minerais (CCAC e CCAE), com diferentes teores de carbono grafítico e de SA.

Tem-se como objetivo avaliar o desempenho das adições minerais comparando-o aos concretos frente à carbonatação acelerada.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Esta pesquisa tem como objetivo analisar o desempenho de concretos de cimento Portland com alta resistência inicial (CPV-ARI), com e sem adição de CCA de diferentes teores de carbono grafítico e de SA, frente à carbonatação acelerada. Para isso, foram moldados concretos de referência (sem adição), com diferentes

teores de CCA e SA, os quais, após a cura e o pré-condicionamento por períodos predefinidos, foram submetidos ao ensaio de carbonatação acelerada.

1.3.2 Objetivos específicos

Com a finalidade de atender ao objetivo geral da pesquisa, foi proposto averiguar a influência da CCAC, CCAE e da SA, aplicados em substituição ao cimento nos teores de 5%, 10%, 20% e 30% para as CCAs e 5% e 10% para a SA, no desempenho dos concretos, frente à carbonatação acelerada, averiguar e comparar a influência dos diferentes prazos de cura úmida 3 e 7 dias e das diferentes relações água/aglomerante (a/agl) frente à carbonatação acelerada em concretos com e sem CCAC, CCAE e SA, analisar o comportamento dos concretos com e sem CCAC e SA em relação à porosimetria por intrusão de mercúrio além de fazer uma inter-relação entre a carbonatação, a absorção capilar, o volume total de intrusão de mercúrio, o diâmetro crítico e a resistência à compressão.

1.4 Estrutura da dissertação

Esta dissertação está estruturada da seguinte forma:

No capítulo 1, “Introdução”, é comentada a importância da utilização de adições minerais no concreto, tanto em relação à questão ambiental como à durabilidade das estruturas e exposição dos objetivos a serem atingidos.

No capítulo 2, “Carbonatação da CCA e SA no concreto”, as adições minerais, com ênfase em CCA são discutidas, bem como a ação do CO₂, mais especificamente, no que diz respeito à carbonatação.

No capítulo 3, “Materiais e métodos”, é feita a identificação das variáveis que envolvem a pesquisa, além da caracterização dos materiais, dosagem dos concretos e descrição dos ensaios realizados.

No capítulo 4, “Análise e discussão dos resultados”, são apresentados e debatidos os resultados dos ensaios realizados, os quais foram analisados de forma a atender aos objetivos traçados.

Por fim, no capítulo 5, “Conclusões e considerações finais”, são destacados os resultados encontrados na pesquisa e apresentadas as sugestões para futuros trabalhos.

2 CARBONATAÇÃO DA CCA E SA NO CONCRETO

Neste capítulo, serão revistos temas como: a casca de arroz, suas características e seus usos; a cinza de casca de arroz (CCA), seu método de obtenção, suas características, seus usos e sua aplicação como pozolana; e a sílica ativa (SA), sua forma de obtenção, suas características e seus usos, baseando-se em estudos relativos às adições minerais pertinentes a esta pesquisa.

Também serão abordados os conceitos e mecanismos dos processos referentes à carbonatação acelerada, foco desta pesquisa.

2.1 Adições minerais

2.1.1 Considerações iniciais

As adições minerais vêm sendo utilizadas no concreto estrutural ou na fabricação de cimento composto há bastante tempo com o intuito de melhorar as propriedades de resistência mecânica e de durabilidade deste. Os pesquisadores e tecnólogos estão empenhados na busca por estudos experimentais e teóricos que esclareçam o comportamento desse material frente às propriedades de resistência e durabilidade.

Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2007), a durabilidade do concreto consiste na sua capacidade de resistir às influências ambientais e conservar a segurança, a estabilidade e o comportamento adequado durante o período correspondente à sua vida útil.

O conhecimento das características de cada adição mineral, como o tamanho das partículas, a massa específica, a superfície específica, a composição química, entre outras, passou a ter importância para o entendimento da influência dessas adições nas propriedades do concreto, tanto no estado fresco quanto no endurecido.

As adições minerais podem ter caráter pozolânico (cinza volante com baixo teor de cálcio e CCA), cimentante (escória granulada de alto-forno) ou pozolânicos e

cimentantes (cinza volante com alto teor de cálcio). A escória de alto-forno (EAF) finamente moída é autocimentante, pois não precisa de hidróxido de cálcio (CH) para formar produtos cimentantes como o silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Contudo, as quantidades de produtos cimentantes formados pela escória não são suficientes para a aplicação desse material isoladamente para fins estruturais, necessitando, para isso, da combinação com o cimento Portland (CP), o que faz com que se acelerem as reações de hidratação da escória pela presença do CH e gipsita do cimento (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

2.1.2 Casca de arroz

O arroz (*Oryza sativa* L.) é uma espécie hidrófila, cujo processo evolutivo tem levado à sua adaptação às mais variadas condições ambientais. O arroz é considerado o produto de maior importância econômica em muitos países em desenvolvimento, pois representa a base alimentar de mais da metade da população mundial. A maior riqueza nutricional do grão de arroz está no seu alto teor de amido, nas suas proteínas e nas suas vitaminas, dependendo do processamento a que ele foi submetido. A colheita recolhe os grãos de arroz ainda com casca, conhecido por arroz em casca. Dentro da casca está o grão, protegido pela película, um conjunto de finas camadas de células diferenciadas de cor acastanhada. O peso de cada grão é de 10mg a 45mg (peso seco), do qual a casca é responsável por 20% (SOUSA, 2005)

A casca de arroz é uma cobertura protetora, formada durante o crescimento do grão, constituída por camadas fibrosas, esponjosas ou celulares, que são altamente silicosas (HOUSTON, 1972). A figura 2 demonstra a divisão, de forma geral, do grão de arroz.

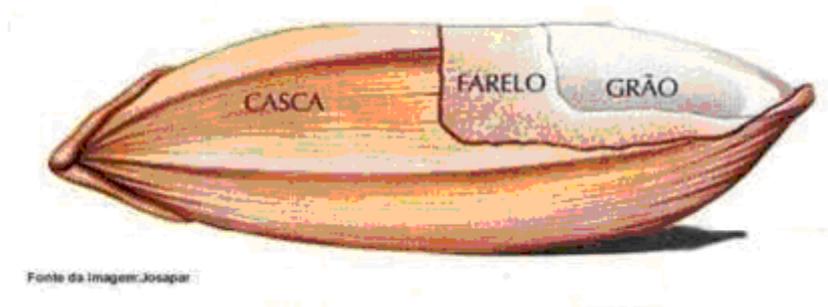


Figura 2 - Terminologia do grão de arroz.

Fonte: Nitzke e Biedrzycki (2004)

Segundo Sousa (2005), o processo industrial básico de processamento do arroz em casca é constituído por duas etapas: o descasque, em que é removida cerca de 20% da casca, obtendo-se o arroz em película, conhecido como arroz integral, e o branqueamento, em que se retira a película por fricção entre rolos. Este processo retira 10% do peso do grão.

A casca de arroz é uma capa lenhosa do grão, dura, com alto teor de sílica, composta por aproximadamente 50% de celulose, 30% de lignina e 20% de sílica de base anidra (MEHTA, 1992). A casca de arroz removida possui baixo valor comercial, pois a sílica e as fibras contidas não possuem valor nutritivo na alimentação humana ou animal (REAL; ALCALÁ; CRIADO, 1996).

A casca de arroz é composta, segundo Houston (1972), por quatro camadas estruturais: a) epiderme externa, coberta com uma espessa cutícula de células silificadas; b) esclerênquima ou fibra hipoderme, com parede lignificada; c) célula parênquima esponjosa e d) epiderme interna.

Diversos usos para a casca de arroz vêm sendo estudados por vários autores (POUEY, 2006). A seguir, são citadas algumas das inúmeras utilizações da casca de arroz, segundo Houston (1972), Nitzke e Biedrzycki (2004).

- Uso na agropecuária: no tratamento de solos como fertilizante corretivo, embora com baixo teor de nutrientes. Na criação de animais confinados, a casca de arroz é empregada usualmente como cama e, posteriormente, já com alto valor fertilizante devido à incorporação de nutrientes provenientes dos dejetos dos animais, é misturada ao solo.

- Uso na construção civil: associada à argila, a casca de arroz é usada na produção de tijolos, painéis e telhas com bom isolamento térmico, como os utilizados em produtos pré-moldados.

- Uso na obtenção de sílica com alto grau de pureza: a partir da combustão da casca de arroz tratada com banhos químicos, a casca de arroz é aplicada na indústria cerâmica, fabricação de fotocélulas, próteses dentárias, entre outros.

- Na geração de energia: devido ao alto poder calorífico da casca de arroz, seu uso como combustível alternativo é amplamente utilizado, como em substituição à lenha.

O Brasil está entre os dez principais produtores mundiais de arroz, com mais de 11 milhões de toneladas por safra. Essa produção é oriunda de dois sistemas de cultivo: o irrigado e o de sequeiro.

O cultivo do arroz no Brasil destaca-se na Região Sul, que é responsável, atualmente, por 78,24% da produção total deste cereal (CONAB, 2014). No Brasil há centenas de usinas de beneficiamento de arroz, das quais cerca de 300 estão localizadas no Rio Grande do Sul, onde há a produção de mais de 1,5 milhão de toneladas de casca de arroz.

A casca de arroz é classificada como resíduo sólido, conforme definição da NBR 10004 (ABNT, 2004a). A Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 005 de 1993, em seu art. 7º, determina que os resíduos sólidos sejam descartados segundo normas estabelecidas pela ABNT. A figura 3 e o quadro 1 mostra a produção brasileira de arroz em casca na safra 2013/2014, evidenciando a produção da Região Sul.

Os resíduos sólidos são separados em três classes, conforme a Resolução do CONAMA nº 23 de 1996: a) Classe I, resíduos perigosos; b) Classe II, resíduos não perigosos e não inertes e c) Classe III, resíduos inertes. A mesma legislação ainda define “outros resíduos” que representam os resíduos domésticos ou o resultado da incineração destes. De acordo com esta classificação, a casca de arroz é considerada um resíduo sólido pertencente à Classe II, cujos resíduos, segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004a), possuem propriedades como biodegradabilidade e combustibilidade (WALTER; ROSSATO, 2010).

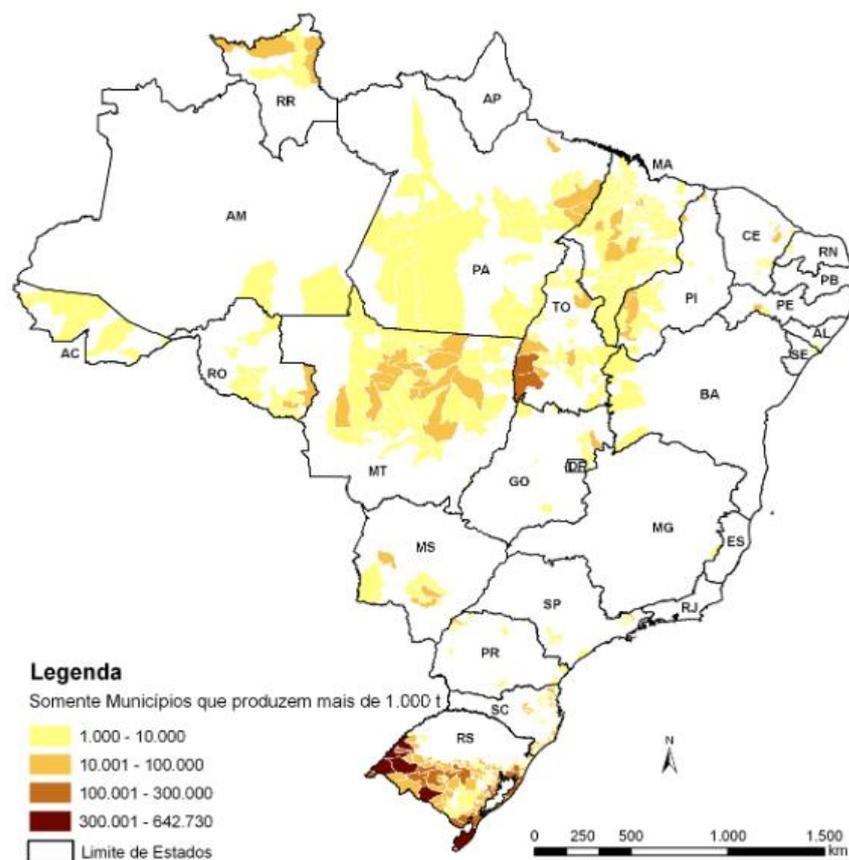


Figura 3 - Mapa da produção agrícola - Arroz.

Fonte: Conab (2014)

Quadro 1 - Produção brasileira de arroz e casca (safra 2013/2014).

Região	Produção de arroz	Produção de casca *
	Mil toneladas	Mil toneladas
Norte	1.024,50	204,90
Nordeste	795,50	159,10
Centro - Oeste	708,10	141,62
Sudeste	130,80	26,16
Sul	9.562,80	1.912,56
Paraná	170,70	34,14
Santa Catarina	1.058,20	211,64
Rio Grande do Sul	8.333,90	1.666,78
Brasil	12.221,70	2.444,34

*Cálculo segundo Mehta e Monteiro (2008): cada tonelada de arroz gera 200 kg de casca.

Fonte: CONAB (2014)

2.1.3 Cinza de casca de arroz

A CCA é um subproduto resultante da queima da casca de arroz para a produção de energia calorífica empregada, como, por exemplo, no processo de secagem e parboilização dos grãos junto às beneficiadoras do cereal. Pode também ser resultante do processo de geração de outras formas de energia, como a energia elétrica, em usinas termelétricas, ou ainda, de processos de calcinação para obtenção de sílica com alto teor de pureza.

No processo de combustão da casca de arroz a lignina e a celulose (matéria orgânica) podem ser removidas, restando principalmente sílica e algumas impurezas como carbono, potássio, cálcio e sódio, o que resulta em uma estrutura porosa, como mostrado na figura 4. Assim, sua utilização como adição, para produção de concretos, influencia beneficentemente os aspectos relacionados à resistência mecânica e à durabilidade.

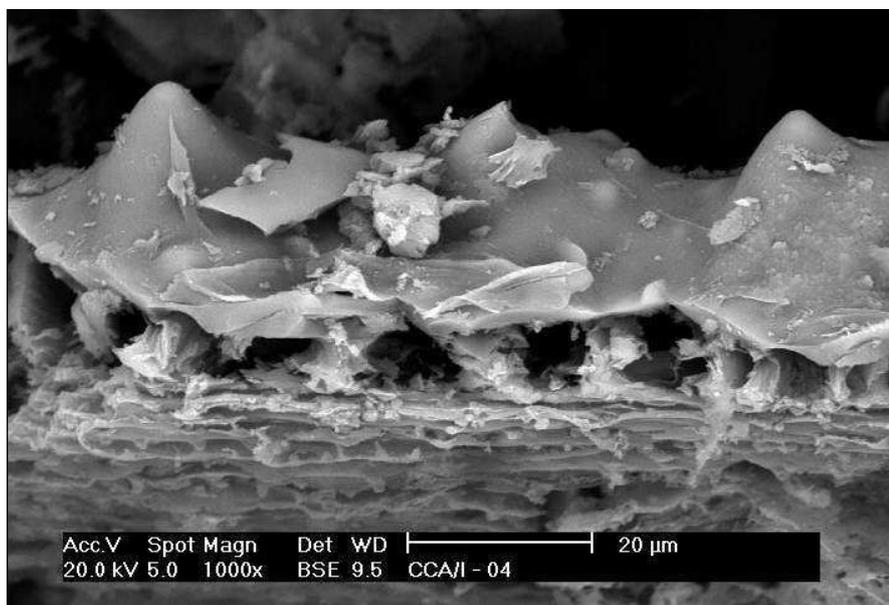


Figura 4 - Micrografia eletrônica de varredura da cinza de casca de arroz.

Fonte: Dafico (2001)

A CCA equivale a cerca de 20% da casca queimada e é um material leve, volumoso e altamente poroso. A sua composição química e a sua atividade pozolânica estão ligadas ao processo de combustão.

Conforme Dafico e Prudêncio Junior (2002), as diferentes tonalidades possíveis da CCA estão associadas à presença de impurezas, ao processo de combustão e às transformações estruturais ocorridas no material, decorrentes da variação da temperatura de queima. Quando parcialmente queimada, a casca de arroz gera uma cinza com maior teor de carbono, possuindo uma cor escura, indicativa da presença de matéria orgânica não queimada. A cor branca, por sua vez, indica a completa carbonização do material.

Os autores apontam que o uso da CCA com altos teores de carbono (de 15% a 25%) ainda é restrito devido ao tom escuro dos concretos e das argamassas produzidas com esta cinza. Porém, a princípio, não há nenhum dano ao concreto em função da cor; o concreto pode ser tão bom ou melhor do que outro de cor clara. Porém, segundo os autores, o mercado não usa a lógica do cientista. Além disso, os altos teores de carbono podem elevar o consumo de aditivos nos concretos se for tomada com base outra cinza com menores quantidades de carbono.

Mehta (1992), em estudos experimentais com a finalidade de obter condições ótimas de queima para produção de cinzas com reatividade pozolânica, indica que, quando a temperatura de queima situa-se na faixa de 500°C a 700 °C ou quando o tempo de combustão é menor do que um minuto em temperaturas entre 700°C e 800 °C, a sílica residual é mantida em fase amorfa e com alta porosidade interna, indicada pela área específica de 50m²/g a 100m²/g, medida por meio do método de adsorção de nitrogênio.

Para Bartha (1995 apud POUHEY, 2006), a queima da casca de arroz à temperatura de até 500°C gera como resíduo uma cinza escura, rica em carbonos fixos e constituída basicamente de sílica amorfa. Em queimas a partir de 750°C, a cinza torna-se mais clara, devido à oxidação dos carbonos fixos, e a sílica, mais cristalina. A remoção dos carbonos fixos ocorre devido à presença do oxigênio no ar.

Pouey (2006) afirma que o processo de combustão depende do tipo de equipamento utilizado (céu aberto, fornalhas tipo grelha ou leito fluidizado), da temperatura de queima e do tempo de exposição da casca de arroz. Diversos autores citados por Mehta (1992) concluíram que, com o aumento da temperatura

acima de 870°C, a sílica presente na CCA transforma-se em sílica cristalina. O quadro 2 mostra os efeitos das condições da combustão da casca de arroz nas diferentes temperaturas, segundo Mehta (1992).

Chandrasekhar et al. (2003) afirmam que a queima sem controle de temperatura da casca de arroz fornece como produto a CCA rica em sílica, normalmente na forma cristalina. Se submetida à queima controlada, a sílica pode ser amorfa, caracterizada por alta reatividade. As figuras 5 e 6 apresentam os difratogramas de raios-X(DRX) da CCA obtida com e sem o controle de temperatura, respectivamente, sendo amorfa na primeira e cristalina na segunda.

Quadro 2 - Efeito das condições de combustão na estrutura da sílica contida na cinza de casca de arroz.

Temperatura de combustão	Tempo de queima	Ambiente de combustão	Estrutura da sílica
500-600°C	1 min	Moderadamente oxigenado	Amorfa
500-600°C	30 min	Moderadamente oxigenado	Amorfa
500-600°C	2 h	Moderadamente oxigenado	Amorfa
700-800°C	15min-1h	Moderadamente oxigenado	Amorfa
700-800°C	15min-1h	Muito oxigenado	Parcialmente cristalina
>800°C	1h	Muito oxigenado	Cristalina

Fonte: Mehta (1992)

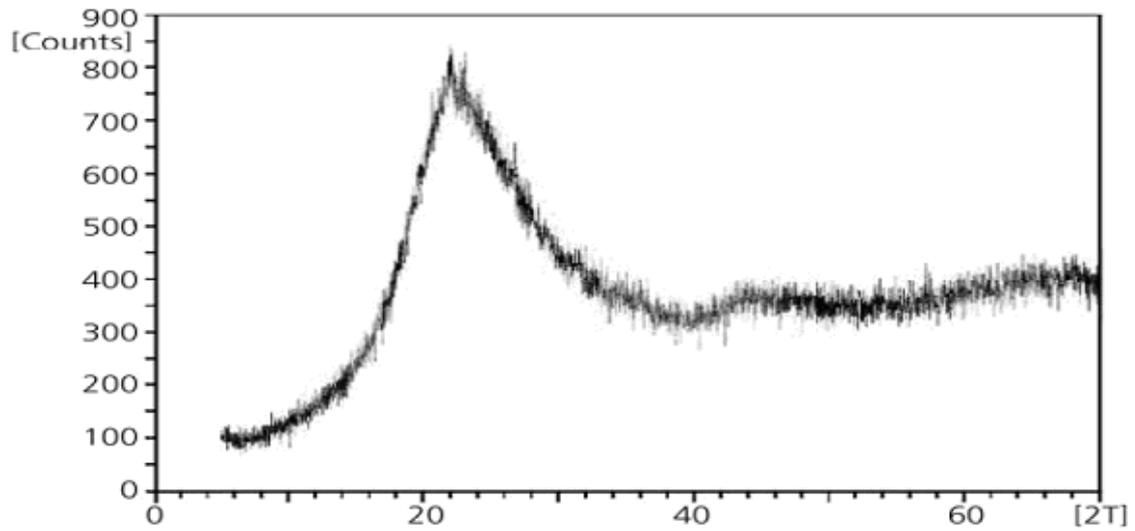


Figura 5 - DRX da CCA obtida com o controle de temperatura (amorfa).

Fonte: Prudêncio Junior, Santos e Dafico. (2003)

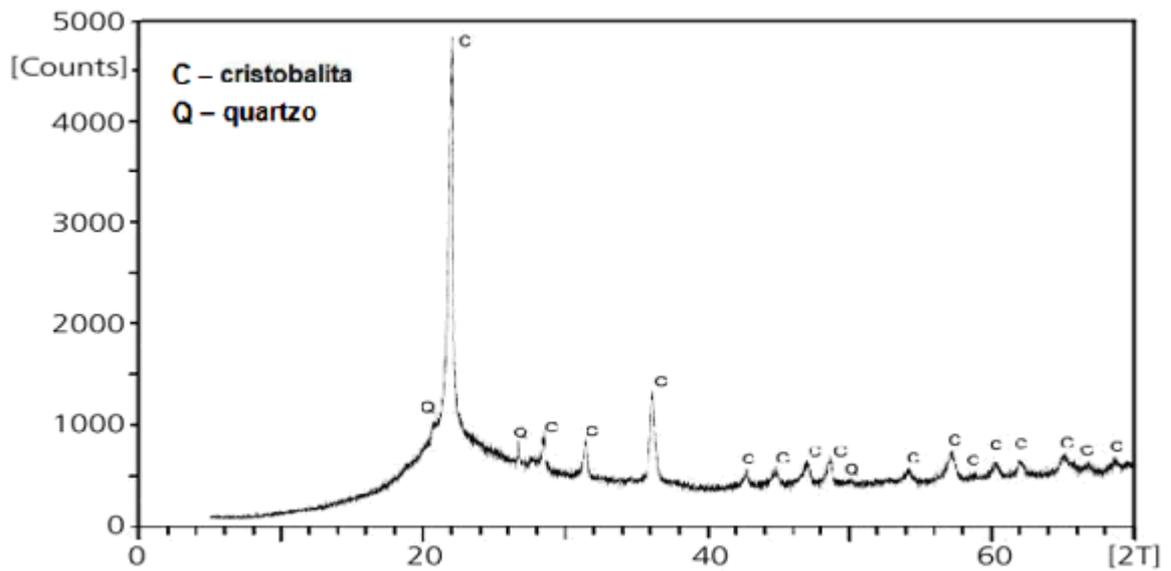


Figura 6 - DRX da CCA obtida sem o controle de temperatura (cristalina).

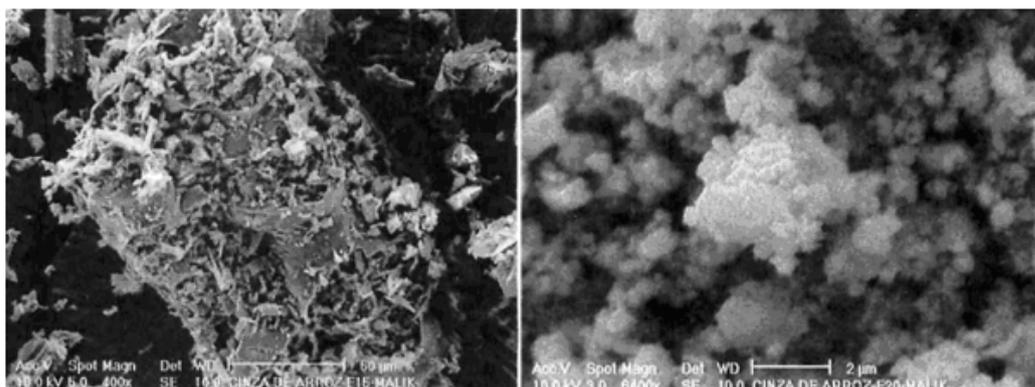
Fonte: Prudêncio Junior, Santos e Dafico (2003)

Para Rêgo (2004), a atividade pozolânica da CCA é fortemente influenciada tanto pelas condições de queima quanto pela heterogeneidade das composições físicas (finura) e químicas (teor de dióxido de silício – SiO_2) da cinza.

Segundo Isaia (1995), a CCA queimada sem controle do processo de queima e com presença de fases cristalinas não pode ser considerada de baixa pozolanicidade sem que tenham sido apresentadas evidências de mau comportamento quando adicionadas a concretos e argamassas.

O desempenho da CCA obtida de queima sem controle efetivo do tempo e da temperatura de queima apresentou-se como satisfatório mesmo para cinzas que exibiam picos cristalinos nos ensaios de difração de raios-X, contrariando a opinião de especialistas internacionais, segundo Prudêncio Junior, Santos e Dafico (2003).

Outro fator importante na atuação da CCA como adição no concreto é a moagem, pois modifica propriedades físicas da cinza, como a superfície específica e a finura. Estas propriedades estão diretamente ligadas à trabalhabilidade. De acordo com Cordeiro (2009), a moagem consiste na fragmentação de uma estrutura sólida quando submetida a esforços mecânicos, realizados por elementos que provocam deformação das partículas a ponto de conferir maior compacidade à mistura, tornando as partículas inicialmente aciculares, mais próximas da forma esférica, conforme demonstrado na figura 7.



(a)

(b)

Figura 7 - Micrografia da CCA: (a) 15 minutos de moagem; (b) 20 horas de moagem.

Fonte: Santos (1997 apud PRUDÊNCIO JUNIOR; SANTOS; DAFICO, 2003)

Diferentes tipos de corpos moedores podem ser utilizados para a cominuição das partículas de CCA, dentre eles o moinho de bolas horizontal e vertical, o agitador, o planetário e o micronizador. O grau de moagem, além de estar diretamente relacionado ao tipo e às características de cada moinho, sofre influência significativa da temperatura de queima.

Prudêncio Junior, Santos e Dafico (2003) constataram que, à medida que se aumenta o tempo de moagem, a pozolanicidade também aumenta. No entanto, em moagens prolongadas esse efeito não se mantém. O autor atribui este fato à dificuldade de dispersar partículas muito finas na argamassa, conforme evidencia a figura 8.

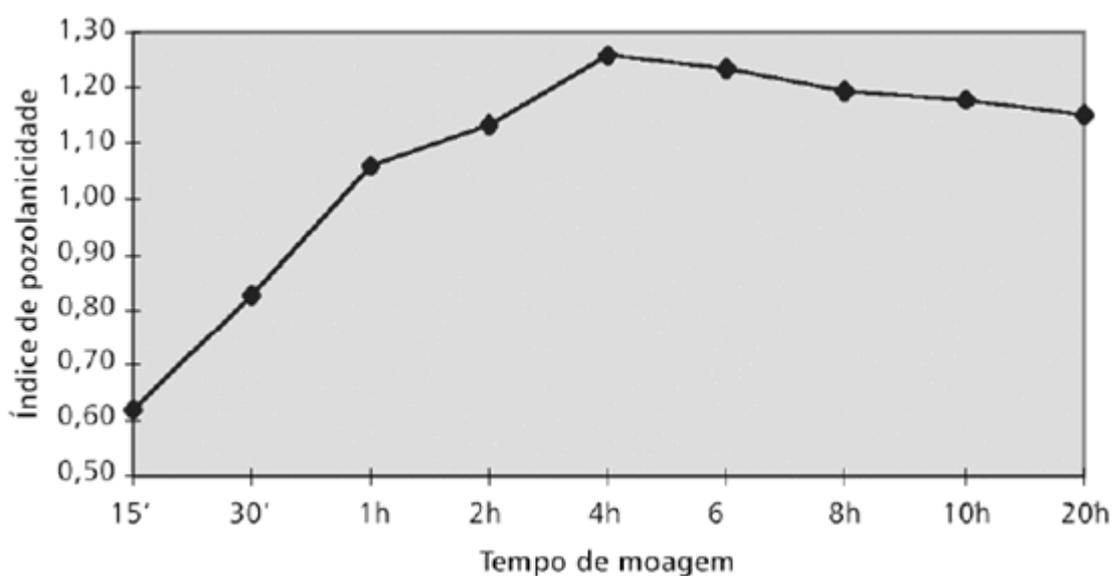


Figura 8 - Variação do índice de atividade pozolânica pelo tempo de moagem.

Fonte: Santos (1997 apud PRUDÊNCIO JUNIOR; SANTOS; DAFICO, 2003)

O crescimento da área superficial está diretamente ligado ao aumento do tempo de moagem, o qual influencia o aumento da resistência à compressão, segundo Guedert (1989).

Prudêncio Junior, Santos e Dafico (2003) constataram, ainda, que a diminuição da demanda de água das argamassas conforme o aumento do grau de

moagem, o que atribuem à destruição progressiva da estrutura esponjosa da cinza (Figura 9).

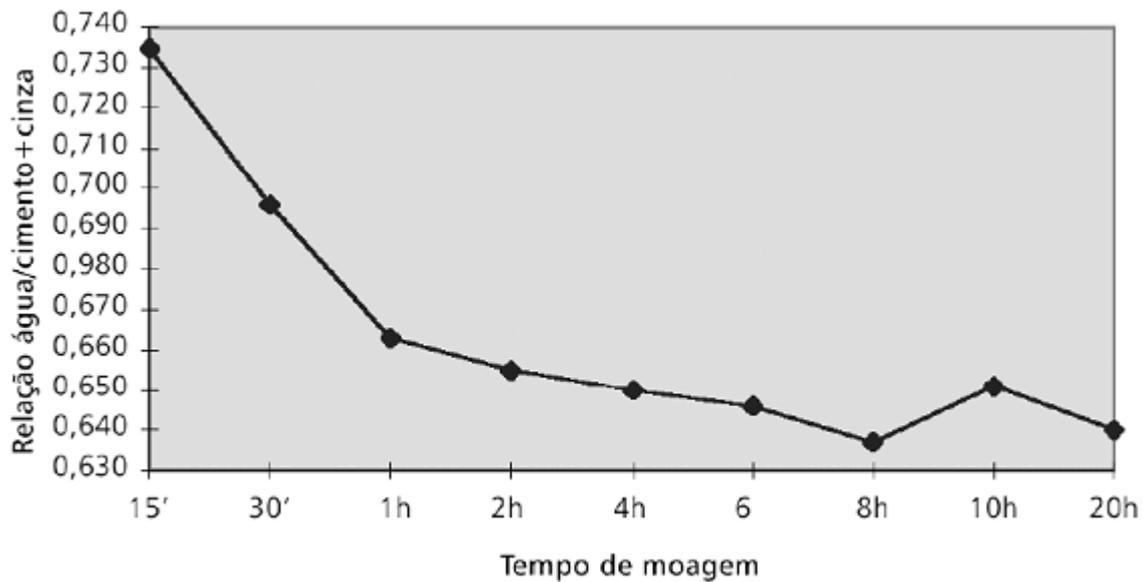


Figura 9 - Demanda de água nos decorridos tempos de moagem.

Fonte: Santos (1997 apud PRUDÊNCIO JUNIOR; SANTOS; DAFICO, 2003)

2.1.4 Sílica ativa

A SA é um subproduto da fabricação de silício metálico ou de ligas de ferro-silício. Para sua obtenção, utilizam-se como matérias-primas o quartzo e o carbono (carvão). No caso do ferro-silício, utiliza-se também o minério de ferro como fonte de ferro. O processo é realizado em forno elétrico a temperaturas elevadas, entre 1600°C e 2000°C. O quartzo é reduzido e o carbono é liberado na forma de dióxido de carbono (CO₂), gerando o SiO₂ ou a sílica amorfa em estado de gás dentro dos fornos. Ao resfriar, o SiO₂, que se desprende na forma de gás, oxida-se e, após, condensa-se em um material composto de partículas esféricas extremamente pequenas, com aspecto vítreo e alta reatividade (SILVA; LIBORIO, 2005). O processo de obtenção da SA está demonstrado no esquema da figura 10.

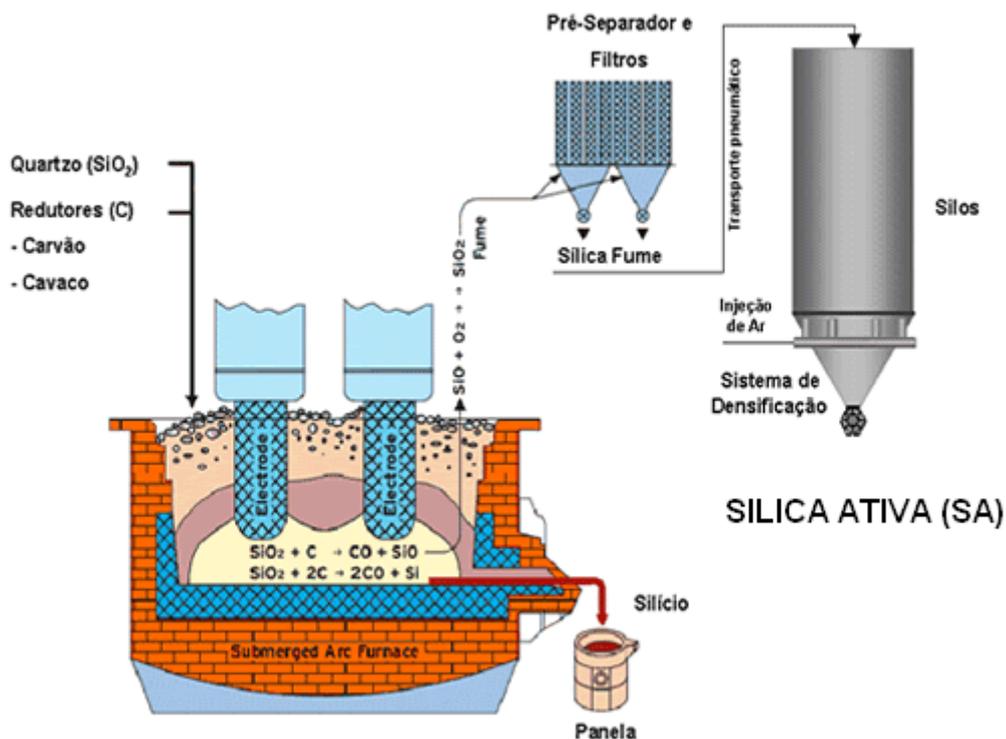


Figura 10 - Ilustração esquemática do processo de obtenção da sílica ativa.

Fonte: Adaptado de Tecnosil (2014).

As principais características da SA são: granulometria, área específica e pozolanicidade (por ser amorfa). Para Anjos et al. (2004), as partículas da SA apresentam uma morfologia de esferas quase perfeitas (Figura 11), com diâmetros que podem variar de $0,02\mu\text{m}$ a $0,5\mu\text{m}$ (com diâmetro médio de $0,1\mu\text{m}$) e área superficial em torno de $20\text{m}^2/\text{g}$. Na composição da SA pode haver uma variação de 85% a 95% de sílica amorfa, com algumas impurezas, como silício metálico (MITCHELL; HINCKZAK; DAY, 1998).

Sua composição química varia em função do tipo de fábrica de produção, da origem da matéria-prima e do método de operação da fabricação. Segundo Aïtcin (1998), quanto maior o teor de silício da liga, maior será o teor de SiO_2 da SA. A sílica produzida durante a fabricação do silício metálico geralmente contém mais de 90% SiO_2 , ao passo que a SA produzida durante a fabricação de uma liga de ferro-silício apresenta teor de SiO_2 que pode variar de 40% a 90% de silício ligado ao ferro.

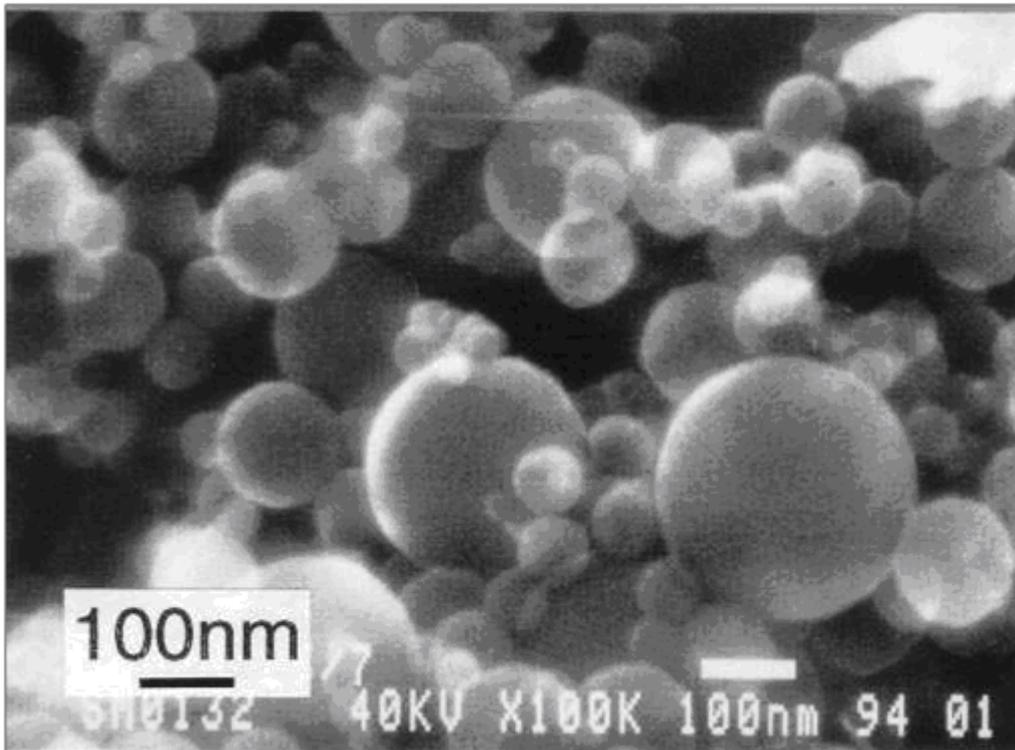


Figura 11 - Morfologia da sílica ativa por microscopia eletrônica de transmissão.

Fonte: Mitchell, Hinckzak e Day (1998)

Os primeiros estudos sobre a utilização da SA datam da década de 1950. Porém, o uso efetivo da sílica em concretos com CP iniciou em 1970, na Escandinávia, e demorou cerca de dez anos para chegar à América do Norte, devido à implementação de leis ambientais que impediram o descarte deste subproduto em aterros, tornando seu uso economicamente viável em várias aplicações, em particular, em concretos e argamassas.

Diversos pesquisadores estudaram o desempenho dos concretos com a substituição parcial do CP por SA. Os estudiosos verificaram de forma unânime que os efeitos nas suas propriedades são benéficos, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido das misturas.

Para Metha e Malhotra (1996), a contribuição da SA para a resistência à compressão do concreto está diretamente relacionada a diversos fatores, tais como: teor na mistura; suas características físicas, químicas e mineralógicas; composição do cimento; relação água/aglomerante (a/agl); tipo e dosagem do aditivo;

temperatura; umidade; dosagem e processo de cura úmida. Os autores estudaram o teor ótimo de substituição do cimento por SA, concluindo que este varia de 7% a 10%, podendo chegar, em situações especiais, a 15%. Aïtcin (1998) sugere que os teores ideais são de 8% a 10% da massa de cimento para melhorias nas propriedades mecânicas do concreto.

Para o desempenho citado, a SA a ser utilizada em substituição do CP deve estar em conformidade com as normas NBR 13956 (ABNT, 1997a) e NBR 13957 (ABNT, 1997b), possuindo alto teor de sílica amorfa e quantidades pequenas de alumina, ferro, álcalis, cálcio, carbono e demais impurezas.

2.1.5 Características do concreto com adições

O uso de adições minerais, geralmente, gera uma série de benefícios para o concreto. Estes benefícios são citados por Mehta e Malhotra (1996), de forma geral, conforme três categorias:

- Benefícios tecnológicos: aumento da durabilidade do concreto e melhoria de suas propriedades mecânicas.
- Benefícios econômicos: no concreto, o CP é, geralmente, o material de maior custo, e a utilização de pozolanas, via de regra, acarreta diminuições no seu consumo e no de energia elétrica utilizada para sua produção. Assim sendo, a redução do uso do cimento resulta em economia para a produção do concreto, desde que não utilizados aditivos químicos.
- Benefícios ecológicos: grande parte das pozolanas provém de resíduos de processos industriais. Na maioria destes resíduos, constata-se a presença de elementos poluentes que podem provocar sérios danos ao meio ambiente e à saúde humana.

A substituição do cimento por pozolanas resulta ao concreto alterações em suas propriedades, tanto no seu estado fresco quanto no seu estado endurecido. Essas propriedades tendem a refletir a ação física, principalmente, no que se refere ao tamanho das partículas, bem como à ação química resultante da atividade pozolânica e à atuação em conjunto das duas ações.

Para Sensale e Dal Molin (1999), vários são os efeitos das pozolanas altamente reativas (CCA e SA) no concreto, devido às características das partículas. O efeito microfíler é aquele associado ao aumento da densidade da mistura dado ao tamponamento dos poros promovido pelas minúsculas partículas das pozolanas. Outro efeito é a reação pozolânica, na qual ocorre o consumo do CH pela sílica amorfa presente nas pozolanas altamente reativas, causando a alteração da microestrutura da zona de transição da pasta com o agregado, o que resulta em uma interface mais uniforme e menos porosa.

Mehta e Monteiro (2008) afirmam que, em concretos frescos que mostram tendência à exsudação e à segregação, a incorporação de partículas finamente divididas geralmente melhora a trabalhabilidade por reduzir o tamanho e o volume dos vazios. Assim, quanto mais fina for a adição mineral menor será a quantidade necessária do material para aumentar a coesão e, conseqüentemente, a trabalhabilidade. Os autores também alegam que, para determinada consistência, o uso de materiais de área específica muito elevada tende a aumentar o consumo de água em argamassas e concretos.

Mehta (1989) constatou o aumento da trabalhabilidade decorrente da forma esférica da SA em misturas nas quais utilizou teores de adição na ordem de 2% a 3% em relação à massa do cimento. Esta melhoria pode ser refletida na maior facilidade de bombeamento e lançamento do concreto, compensando possíveis diminuições do abatimento da mistura. Com relação à adoção de maiores teores de SA. Mehta e Malhotra (1996), tendo como base diversas pesquisas com o uso de 10% de SA, constataram que o aumento da necessidade de água por parte da mistura não é constante; em concretos com baixo consumo de cimento (100 kg/m^3) há um decréscimo da demanda de água com a adição de SA, ao passo que em concretos com maior consumo ($>250 \text{ kg/m}^3$) a demanda de água aumenta com a adição de SA.

Outra característica dos concretos com pozolanas de alta reatividade é o melhor desempenho na resistência à compressão devido à ação química e física das adições. Mehta e Monteiro (2008) creditam essa melhoria, principalmente, à resistência devido ao processo de refinamento dos poros e dos cristais presentes na pasta de cimento hidratada, pois provocam um aumento da resistência na zona de transição.

Para Dal Molin (1995), a melhoria da estrutura interna do concreto permite uma estimativa do seu desempenho tanto em termos mecânicos como, indiretamente, em termos de durabilidade. A autora estudou concretos com diferentes relações a/agl e substituição de 10% de SA na massa do cimento. Em seu estudo, constatou que, aos 28 dias de idade, os concretos obtiveram uma melhoria média de 13,51% em relação aos concretos que não continham a adição.

Os concretos com adições também se caracterizam por serem mais resistentes a agentes agressivos, como cloretos e sulfatos, devido à diminuição da difusão, já que esses concretos são menos porosos ou têm maior refinamento dos poros, o que resulta em misturas mais compactas.

2.2 Carbonatação acelerada

2.2.1 Considerações iniciais

O concreto apresenta descontinuidades que podem comprometer suas funções estruturais, já que sua microestrutura, por melhor que tenham sido o preparo e a execução da estrutura de concreto armado, apresenta microfissuras, poros e vazios, pontos críticos tanto para a resistência à compressão quanto para o ingresso de fluídos agressivos na estrutura.

O fenômeno da carbonatação acontece naturalmente em estruturas de concreto, exigindo apenas certa concentração de CO_2 no ambiente e determinado teor de umidade. Apesar de a carbonatação progredir lentamente da superfície para o interior da estrutura, segundo Cascudo (1997), contribui decisivamente para o rebaixamento do pH e para a despassivação da armadura, podendo ocasionar o processo de corrosão da estrutura.

A alcalinidade da pasta é mantida principalmente devido à presença de íons hidróxido (OH^-), cálcio (Ca^{++}), potássio (K^+), sódio (Na^+), sulfato (SO_4^{--}), presentes na solução dos poros, que mantêm um pH elevado, entre 12 e 14.

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), quando o valor do pH se encontra nessa faixa, entre 12 e 14, e na presença de oxigênio, as barras de aço presentes

no interior do concreto recobrem-se de uma capa de óxidos muito aderente (γ - Fe_2O_3), que lhes protege de qualquer sinal de corrosão, desde que o concreto mantenha seu valor de pH alto. Entretanto, o filme de óxidos pode ser destruído se o concreto tiver a sua alcalinidade reduzida devido à ação do processo de carbonatação ou à presença de íons cloreto, conforme salienta Parrot (1990).

A diminuição do pH da solução dos poros do concreto acarreta a despassivação da armadura, podendo iniciar um processo corrosivo desta. Para tanto, deve existir oxigênio, umidade (eletrólito) e uma diferença de potencial, quando ocorre a formação de uma célula de corrosão. A corrosão produz óxidos e hidróxidos de ferro, que aumentam de volume, fissurando e lascando o concreto, o que compromete sua estrutura.

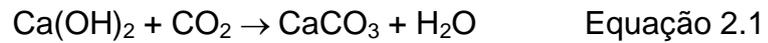
A carbonatação é um fenômeno físico-químico no qual, a partir da reação de gases ácidos, presentes no ambiente, com os produtos alcalinos do concreto, provenientes da reação de hidratação do cimento, ocorre a formação de solução de poros com pH, após precipitação, inferior a 9. Os principais gases ácidos que levam à carbonatação e que podem ser encontrados no ar atmosférico, principalmente em ambientes urbanos, são o sulfeto de hidrogênio (H_2S), o dióxido de enxofre (SO_2) e o CO_2 . Este último é comumente encontrado no meio ambiente, em diferentes concentrações.

O processo recebe o nome de carbonatação pela reação de neutralização do hidróxido de cálcio pelo CO_2 , resultando em carbonato de cálcio (CaCO_3), ou seja, pela transformação de um hidróxido alcalino em um sal de baixa solubilidade.

O processo ocorre por difusão gasosa do CO_2 existente na atmosfera na fase aquosa da solução dos poros e pela posterior reação química do CO_2 ionizado sob a forma HCO_3^- com o CH e outros constituintes sólidos carbonatáveis, como os álcalis do cimento: hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), o hidróxido de potássio (KOH) e hidróxido de sódio (NaOH), além do C-S-H, a longo prazo

Conforme Kazmierczak e Helene (1993), a penetração do gás carbônico no concreto dá-se preponderantemente por um mecanismo de difusão devido à diferença de concentração entre o meio externo e o interior do concreto. Sabe-se que a maior concentração de CO_2 no ar pode favorecer o aumento da taxa de carbonatação. Em ambientes urbanos, com tráfego intenso, a concentração, em volume, de CO_2 no ar pode variar entre 0,1% e 1,2%.

A principal reação que caracteriza o processo de carbonatação do concreto é a seguinte:



O processo físico-químico que envolve a reação de carbonatação pode ser representado pelas seguintes etapas, conforme Papadakis, Vayenas e Fardis. (1991).

O hidróxido de cálcio, formado nas reações de hidratação do cimento, é dissolvido pela água presente na solução dos poros, segundo a equação 2:



O gás carbônico penetra no concreto, transporta-se por difusão através da fase gasosa do poro da matriz e ioniza-se na solução aquosa, conforme a equação 3 e a equação 4:



O gás carbônico dissolvido reage com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) dissolvido, bem como com os outros produtos carbonatáveis da pasta de cimento, conforme a equação 5, formando os carbonatos:



A figura 12 abaixo apresenta, esquematicamente, o processo de carbonatação (Bakker, 1988 adaptado por CASCUDO, 2005)

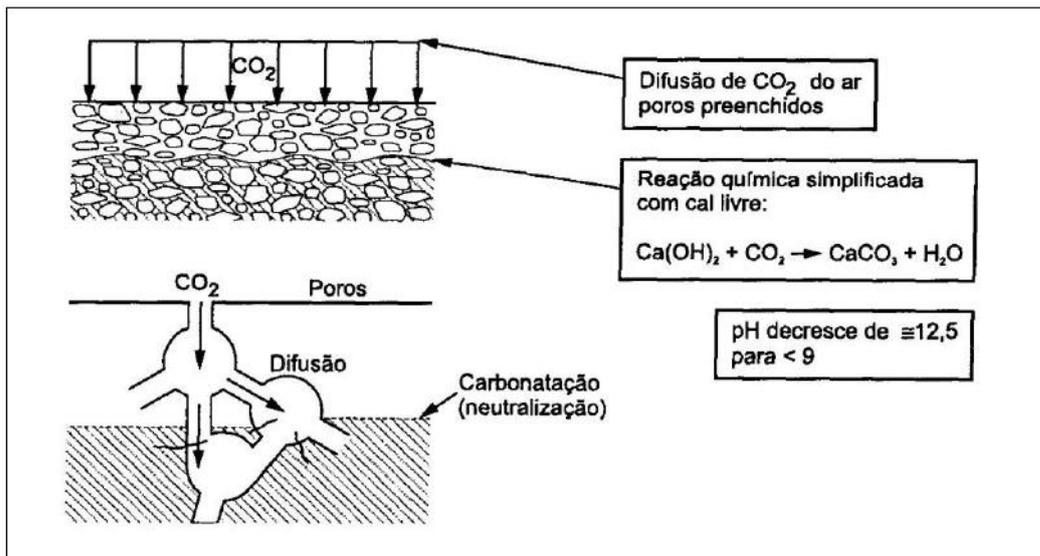


Figura 12 - Esquemática do fenômeno de carbonatação.

Fonte: Bakker (1988 adaptado por CASCUDO, 2005).

Com o avançar das reações, ocorre o consumo do hidróxido de cálcio do interior dos poros, o que faz com que o pH diminua. Pode-se, assim, definir três zonas: a) a zona carbonatada, em que o Ca(OH)_2 foi convertido em CaCO_3 , b) a zona não carbonatada, em que o CO_2 ainda não penetrou e c) uma zona intermédia, na qual se desenvolve a reação de carbonatação, como representado na figura 13 (Costa, 1999)

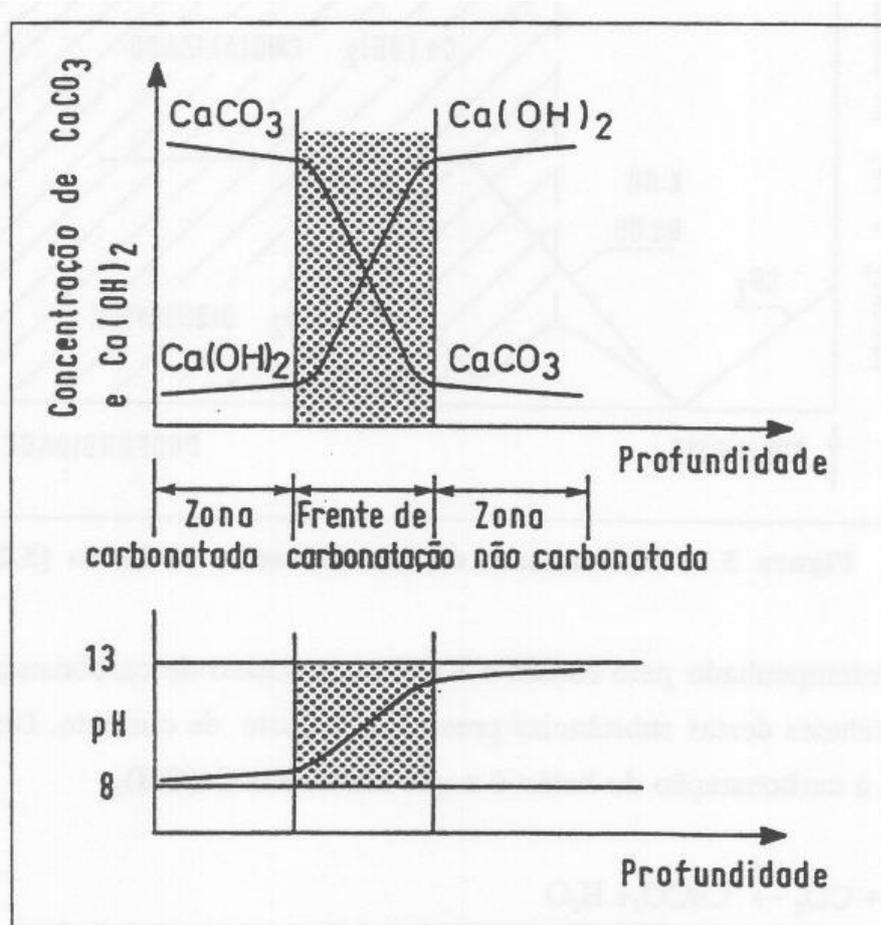


Figura 13 - Zonas envolvidas no mecanismo de carbonatação e variação do pH conforme a profundidade.

Fonte: Costa (1999)

Assim, os produtos provenientes da reação do CO_2 alteram a estrutura de poros da pasta de cimento, uma vez que os subprodutos do fenômeno de carbonatação ficam depositados nos vazios capilares do concreto.

Cabe salientar que o CO_2 reage não somente com o CH da pasta de cimento endurecida, mas também pode reagir com o C-S-H. Sabe-se que as reações de carbonatação são muito complexas e que, de certa forma, prevalece a reação principal, na qual um composto cristalino, Ca(OH)_2 , é transformado em outro também cristalino, o CaCO_3 . Outras reações também ocorrem, mas são menos importantes. Nelas verifica-se a formação de compostos cristalinos com o óxido de alumínio (Al_2O_3) e óxido de Ferro III (Fe_2O_3).

Os produtos oriundos do processo de carbonatação podem promover alterações substanciais na microestrutura do concreto. Entende-se que a permeabilidade do concreto está intimamente ligada à composição da rede de poros do material, que engloba a distribuição, o tamanho, a tortuosidade e a interconectividade destes. Sendo assim, alterações promovidas pelo processo de neutralização na microestrutura do concreto ocasionam, conseqüentemente, modificações na permeabilidade do material.

Ceukelaire e Nieuwenburg (1993) verificaram que, para concretos de CP comum, ocorreu um aumento do volume de sólidos de cerca de 11%, além de o peso molecular destes concretos ter aumentado 35% para a formação do CaCO_3 a partir do Ca(OH)_2 . Da mesma forma, Van Gerven et al. (2003) relataram aumento ainda maior do volume de sólidos, cerca de 17% na conversão da portlandita em calcita. Devido à sua baixa solubilidade, os cristais de CaCO_3 formados a partir da portlandita precipitam-se e promovem a colmatação e, posteriormente, a obstrução da rede de poros do concreto. Esse processo promove alterações na microestrutura dos concretos com CP puros e, devido a isso, reduz a permeabilidade destes.

Para Shutter e Audenaert (2004) a carbonatação em concretos com a incorporação de adições minerais aumenta a porosidade dos concretos. Para explicar esse fato o autor argumenta que, em concretos com a incorporação de adições minerais, uma segunda reação torna-se mais pronunciada: a carbonatação do C-S-H. Segundo Neville (1997), quando o CH se esgota, devido à sua menor liberação em função do menor teor de clínquer do material cimentício e às reações secundárias com as pozolanas, ocorre carbonatação do C-S-H e a formação de sílica gel, com poros grandes, maiores que $100\mu\text{m}$. Esse fato acarreta um acréscimo na porosidade e, conseqüentemente, na permeabilidade do material, facilitando a difusão do CO_2 através da rede de poros do concreto, promovendo, assim, a carbonatação.

Logo, o controle da carbonatação tem importância vital na durabilidade das estruturas de concreto armado. A manutenção da alcalinidade da camada de cobrimento da armadura é de fundamental importância para a vida útil da estrutura.

2.2.2 Fatores que influenciam a carbonatação

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

A velocidade de penetração da frente carbonatada está vinculada diretamente aos seguintes fatores:

- relação a/agl;
- dosagem de cimento ou adições minerais;
- condições de cura;
- concentração de CO₂ no ar;
- saturação dos poros;
- resistência à compressão;
- teor de CH;
- temperatura.

2.2.2.1 Relação água/aglomerante

A relação a/agl apresenta uma relação diretamente proporcional à profundidade de carbonatação. Isto é, quanto maior for a relação a/agl utilizada no traço de concreto maior será a profundidade de carbonatação para uma mesma idade de ensaio acelerado ou natural. Para Papadakis, Vayenas e Fardis (1991), o aumento da relação a/agl aumenta a porosidade, que, por sua vez, aumenta a difusão, resultando em maior velocidade de carbonatação.

Os resultados da observação de Soretz (apud HELENE, 1986), realizada em uma série de concretos de boa qualidade, constituídos de agregados normais, são apresentados na figura 14.

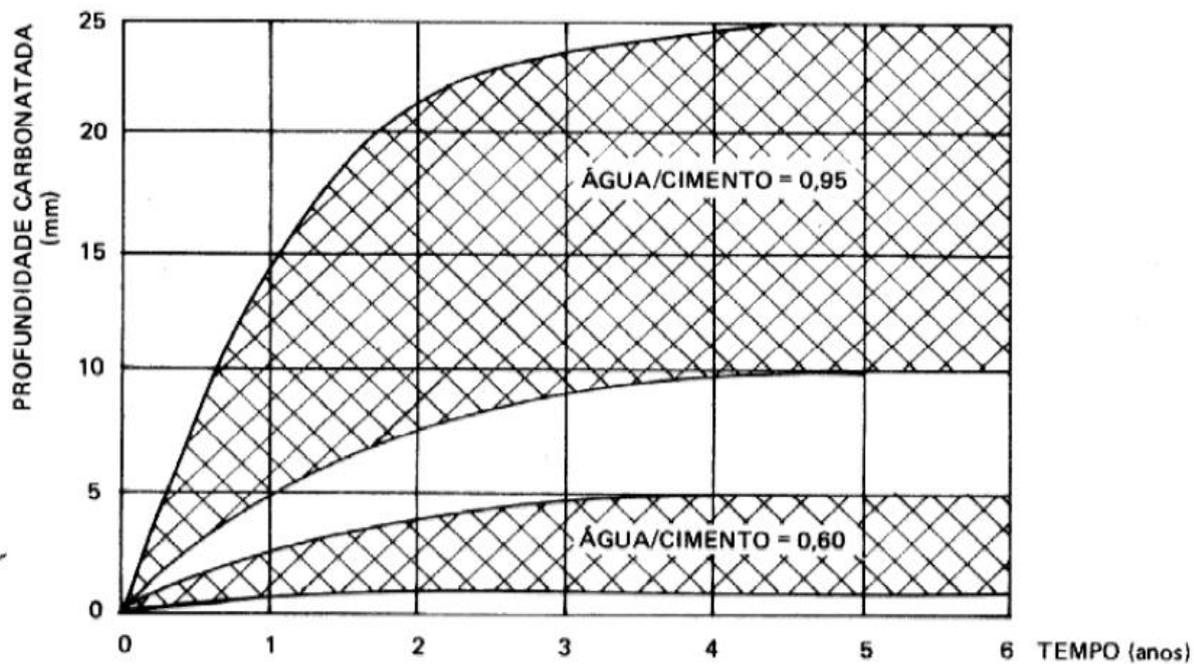


Figura 14 - Variação da profundidade de carbonatação com o tempo e com a relação a/agl.

Fonte: Soretz (apud HELENE, 1986)

Isaia (1995) quando estudou concretos com adições de cinza volante (CV), microssílica (MS) e CCA, em misturas binárias e ternárias com substituições variando de 10% a 50%, também observou que o aumento na relação a/agl proporcionou aumento nas profundidades de carbonatação. Segundo o autor, o fato deve-se ao aumento da porosidade e da permeabilidade do concreto, o qual fica mais suscetível à difusão do CO_2 atmosférico.

Para Castro (2003), a estrutura física da pasta de cimento exerce uma grande influência sobre a carbonatação do concreto. Quanto maior for a interconectividade entre eles maior será a facilidade de difusão do CO_2 e, conseqüentemente, maior será a velocidade da reação de carbonatação. A porosidade da pasta apresenta relação direta com a relação a/agl. Dessa forma, quando a relação a/agl apresenta um acréscimo, a porosidade da pasta aumenta, ocasionando maior permeabilidade e maior facilidade de difusão do CO_2 através da rede de poros do concreto, gerando um aumento da profundidade carbonatada em um mesmo intervalo de período de ensaio.

2.2.2.2 Dosagem do cimento e adições minerais

O tipo de cimento influi na profundidade de carbonatação dos concretos, segundo Helene, Mitidieri e Thomaz (1995) em estudo no qual pesquisaram diferentes tipos de cimento. Os índices de profundidade carbonatada do cimento CP V (cimento Portland ARI) foram inferiores aos dos cimentos CP II E (cimento Portland composto) e CP III (cimento Portland de alto-forno). O cimento CP II E mostrou um teor de EAF (escória de alto forno) de 13,7%, o CP III de 67,8% e o CP V não tinha qualquer tipo de adição mineral incorporada ao cimento.

Gastaldini (1996) estudou a influência da CV, CCA, EAF e SA sobre a porosidade total e o diâmetro médio dos poros em misturas binárias e ternárias de Cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI). Os resultados mostraram que as adições minerais provocaram um efeito benéfico na microestrutura das pastas, devido ao refinamento dos poros e à redução da porosidade total, o que resultou em uma pasta com menor permeabilidade a agentes agressivos.

Segundo Vaghetti (1999), que estudou 11 traços de concreto com adições minerais de CCA, CV, SA em misturas binárias e ternárias, com teores entre 10% e 50% de substituição, constatou que houve um aumento de profundidade carbonatada com o aumento do teor de substituição de cimento por uma ou mais adições minerais.

Isaia, Vaghetti e Gastaldini (1998) estudaram a carbonatação em concretos de CP puros e com a presença de adições minerais. Os resultados mostraram que em cimentos com adições minerais, apesar de estas propiciarem maior refinamento dos poros e dos grãos aumentando a tortuosidade dos capilares e diminuindo a permeabilidade, prepondera o efeito da menor reserva alcalina, resultando em uma frente de carbonatação mais veloz do que no CP comum.

A aparente desvantagem apresentada por concretos com a incorporação de adições minerais de apresentarem menor reserva alcalina pode ser minimizada com uma cura úmida adequada, segundo Helene (1993), pois esta cura reduz a porosidade e a permeabilidade do concreto, dificultado, por sua vez, a penetração do CO₂.

2.2.2.3 Cura

A profundidade de carbonatação do concreto, conforme Pauletti (2004), depende do processo de cura empregado, pois é a cura que afeta as propriedades de hidratação do CP. Devido ao fato de influenciar a microestrutura do concreto, a cura tem um papel decisivo no desenvolvimento da reação de carbonatação, principalmente em concretos elaborados com CCA em substituição ao CP.

Fattuhi (2002) pesquisou a carbonatação em concretos de CP puros, com relação a/agl de 0,6 e com períodos de cura úmida de 1, 3, 7, 21 e 28 dias. Os resultados mostraram que, quando o período de cura úmida foi aumentado de um dia para 3, 7, 21 e 28 dias, as profundidades de carbonatação do concreto apresentaram valores em média de 61%, 43%, 25%, e 17% inferiores, respectivamente.

Em geral, a literatura é unânime: quanto maior o tempo do processo, maior será o ganho das propriedades do concreto, o qual apresentará menor porosidade e, conseqüentemente, menor carbonatação.

2.2.2.4 Concentração de CO₂

De acordo com Neville e Brooks (1993), o gás CO₂ está presente na atmosfera em aproximadamente 0,03% por volume de ar.

Ensaio acelerados realizados em laboratório geralmente utilizam teores de CO₂ elevados, acima dos normais atmosféricos, com o objetivo de acelerar a reação, obtendo resultados em menor intervalo de tempo.

Neville (1997) destaca que as proporções mais usuais são as de 4% e 5% de concentração de CO₂.

Devido à falta de padronização e à inexistência de uma norma para a realização deste ensaio, no que diz respeito a diversas variáveis relacionadas, como o tipo de cura, o tempo de cura, o tempo de sazonalidade e o teor de CO₂, cada pesquisador adota um procedimento específico, inviabilizando, dessa forma, a comparação entre resultados obtidos por diferentes pesquisadores.

Assim, ao passo que, em uma situação de ambiente natural, as concentrações de CO₂ variam até o valor de 1,2%, em pesquisas aceleradas de laboratório, os teores de CO₂, muitas vezes, chegam a 100%.

Um estudo comparativo de corpos-de-prova de concreto com pozolanas ensaiados com carbonatação acelerada foi realizado por Isaia, Vagheti e Gastaldini (2001) em câmara condicionada com 10% de CO₂ e carbonatação em ambiente de laboratório por dois anos. Os resultados mostraram que, para misturas com até 25% de pozolanas, o incremento do coeficiente de carbonatação acelerada foi pequeno para relações a/agl de até 0,45 e moderado para relações a partir deste valor, e que, para concretos com teor de 50% de pozolanas, os incrementos dos coeficientes de carbonatação acelerada foram muito significativos a partir da relação a/agl de 0,35.

2.2.2.5 Saturação dos poros

O grau de saturação dos poros é um fator decisivo para a reação de carbonatação do concreto, conforme Papadakis, Vayenas e Fardis (1992), pois o processo de difusão do CO₂ através da rede de poros é fortemente influenciado pela quantidade de água no interior da rede.

A umidade relativa entre 70% e 90% tem particular importância sobre os danos induzidos por carbonatação e sobre a corrosão das armaduras, segundo Parrot (1994), pois, em baixas umidades, o processo de corrosão do aço poderá ser reduzido e, em elevadas umidades relativas, a taxa de carbonatação será minimizada. Para Parrot (1990), a taxa máxima de carbonatação pode ser observada para a exposição de umidade relativa de 60%.

Para umidade relativa de 30% ou inferior, pode não haver carbonatação ou, se houver, esta se processa de forma muito lenta. Para Papadakis, Vayenas e Fardis (1991), a umidade é o fator chave para o processo de carbonatação.

2.2.2.6 Resistência à compressão

A resistência à compressão é uma função direta da relação a/agl e também serve de parâmetro para comparação entre as profundidades carbonatadas e os coeficientes de carbonatação.

Segundo Parrot (1987), uma de suas vantagens seria a de que os resultados de resistência à compressão axial estão, frequentemente, mais disponíveis e que as diferenças entre as relações a/agl podem ser representada por essa variável.

Por outro lado, o autor enfatiza que a medida da carbonatação por meio da resistência à compressão do concreto não pode ser generalizada. Isto é, a medida da carbonatação, além de ser função da resistência mecânica do concreto, também depende de fatores como nível de compactação da pasta, conteúdo total de hidróxido de cálcio para reagir com o CO_2 , condições de cura, concentração de dióxido de carbono, entre outros.

Isaia, Vagheti e Gastaldini (1998) mostraram em seus estudos que em misturas binárias de SA (10% e 20%), CV (25% e 50%), CCA (25% e 50%) e em misturas ternárias de CV + SA (15+10% e 30+20%) e CV + CCA (10+15% e 20+30%) existe uma relação entre os coeficientes de carbonatação e a resistência à compressão axial. Os autores concluíram que, para o mesmo nível de resistência, os coeficientes de carbonatação variaram do menor para o maior valor, apresentando uma variação de 122 vezes aos 28 dias e de 97 vezes aos 91 dias. Os autores empregaram nessa pesquisa relações a/agl cada vez menores, conforme o aumento do teor de adição mineral em substituição ao CP, com o objetivo de alcançarem patamares de resistência mecânica de 60 MPa. Os resultados podem ser visualizados na figura 15.

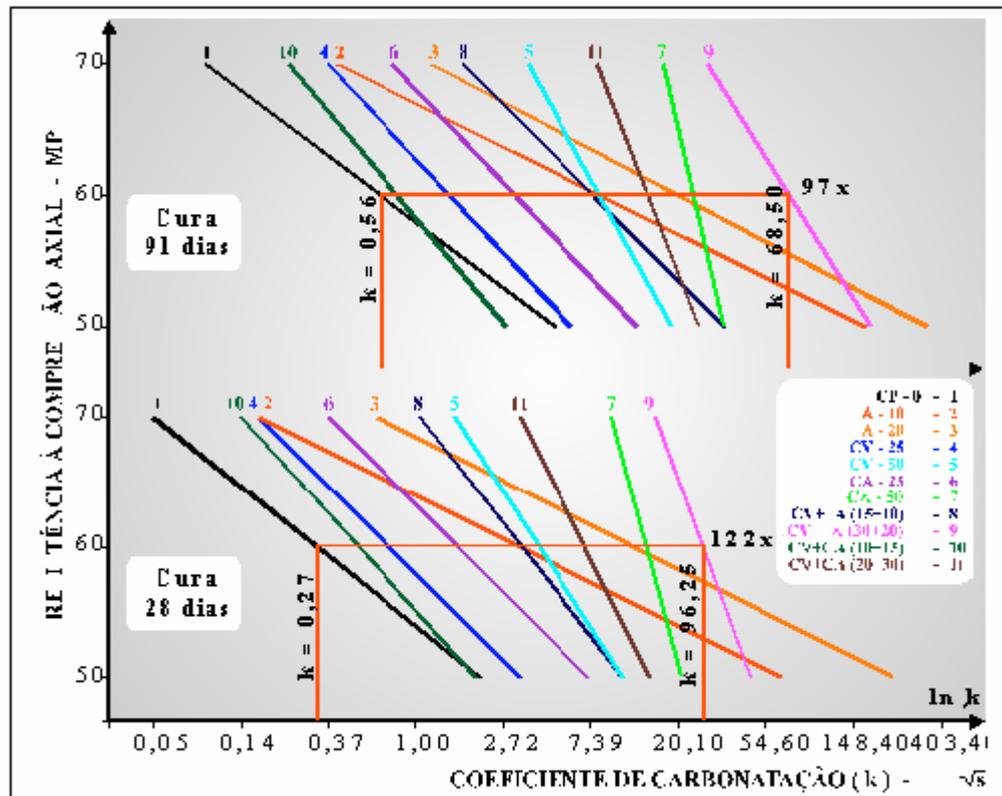


Figura 15 - Evolução do coeficiente de carbonatação acelerada com a resistência à compressão de 11 misturas de concreto com e sem pozolana, em igualdade de resistência de 60 MPa.

Fonte: Isaia, Vagheti e Gastaldini (1998).

2.2.2.7 Teor de hidróxido de cálcio remanescente

A velocidade de carbonatação é influenciada pelo teor de CH presente na pasta do concreto, visto ser a reação de carbonatação realizada entre os gases atmosféricos, principalmente o CO_2 , e os álcalis do concreto, principalmente o CH. Isso se dá uma vez que quanto maior o teor de CH, maior a reserva alcalina e mais lento o avanço da frente carbonatada, pois haverá maior teor de CH a ser consumido pelas reações de carbonatação.

Para Isaia, Vagheti e Gastaldini (1998), a relação entre o teor de CH remanescente e os coeficientes de carbonatação, em misturas binárias e ternárias de SA, CV e CCA é representado pela figura 16. Os resultados mostram que os

teores mais elevados de substituição apresentam menores teores de hidróxido de cálcio remanescente e, por sua vez, maiores coeficientes de carbonatação.

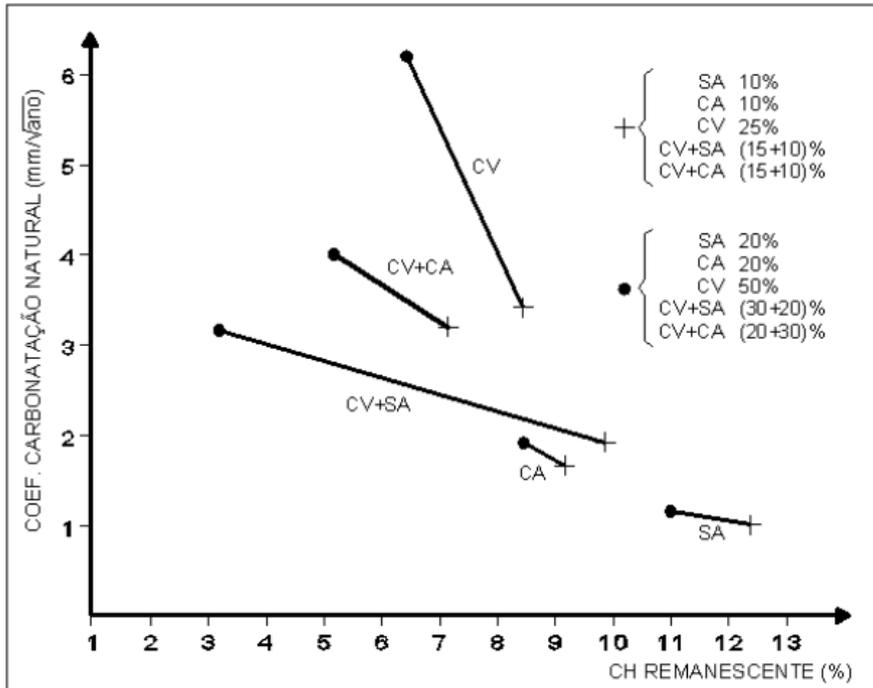


Figura 16 - Correlação entre o coeficiente de carbonatação natural e o teor de hidróxido de cálcio remanescente para nível de resistência de 70 MPa.

Fonte: Isaia, Vagheti e Gastaldini (1998).

2.2.2.8 Temperatura

Helene (1986) afirma que a temperatura normalmente funciona de acordo com a teoria de Arrhenius, segundo a qual o incremento de temperatura implica um aumento da taxa de reações químicas. Segundo Neville (1997), pequenas variações de temperatura pouco influenciam a profundidade carbonatada.

Para Papadakis, Vayenas e Fardis (1991), a temperatura entre 20°C e 40°C praticamente não influencia a carbonatação do concreto, pois, nestes níveis, o processo ainda é controlado pela difusão. No entanto, conforme Kazmierczak (1995), a velocidade de carbonatação é afetada pelas variações e pela temperatura,

pois esta influencia a existência de vapor d'água ou a saturação dos poros capilares, a qual também aumenta a velocidade de difusão.

Há um consenso, entre os autores que já pesquisaram sobre o assunto, de que a temperatura possui pequena influência sobre a velocidade de carbonatação; no entanto, quando associada a outros fatores relacionados ao ambiente de exposição podem contribuir significativamente para o avanço ou retardo do fenômeno de neutralização.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Considerações iniciais

Para que se obtenham os resultados dos objetivos preestabelecidos, foi feita a análise da carbonatação acelerada, de concretos compostos com adições minerais, em especial cinza de casca de arroz clara (CCAC), cinza de casca de arroz escura (CCAÉ) e sílica ativa (SA), nos períodos de três e sete dias de cura úmida. Para isso, as misturas com CCA tiveram seu desempenho comparado ao das misturas contendo SA e cimento puro (CP V-ARI).

Os ensaios de laboratório foram conduzidos de forma a investigar como o teor de substituição e o período de cura influenciam o coeficiente de carbonatação destes concretos.

Foram realizados seguintes ensaios:

- a) carbonatação acelerada;
- b) porosimetria por intrusão de mercúrio;

As variáveis utilizadas na pesquisa foram:

- Variáveis independentes: aquelas que alteram as propriedades do material cimentante e influenciam a relação sólido/espaco da pasta e seu grau de compactidade. São elas:

- a) adições minerais: CCAC, CCAÉ e SA;
- b) teor de substituição: 5%, 10%, 20% e 30% de CCAC e CCAÉ e 5% e 10% de SA;
- c) relação água/aglomerante (a/agl): 0,35; 0,50; 0,65;
- d) período de cura úmida: três e sete dias;
- e) idade de realização dos ensaios: carbonatação acelerada (4, 8, 12,16 semanas), porosimetria por intrusão de mercúrio (91 dias).

- Variáveis dependentes: aquelas que são influenciadas pelas variáveis independentes. São elas:

- a) carbonatação acelerada: coeficiente de carbonatação;
- b) porosimetria por intrusão de mercúrio: volume de intrusão de mercúrio;

A pesquisa foi realizada na cidade de Santa Maria, Rio Grande do Sul, com experimentos executados no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC), anexo ao Centro de Tecnologia (CT) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

3.2 Materiais

A fim de avaliar a influência da substituição do cimento Portland (CP) por diferentes teores de CCAC e CCAE frente à carbonatação acelerada, foram testadas as seguintes misturas:

- mistura de referência (REF): tendo como aglomerante apenas o cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CPV-ARI);
- mistura com 5% de CCAC (5C) em substituição ao cimento Portland (CPV-ARI);
- mistura com 10% de CCAC (10C) em substituição ao cimento Portland (CPV-ARI);
- mistura com 20% de CCAC (20C) em substituição ao cimento Portland (CPV-ARI);
- mistura com 30% de CCAC (30C) em substituição ao cimento Portland (CPV-ARI);
- mistura com 5% de cinza de CCAE (5E) em substituição ao cimento Portland (CPV-ARI);
- mistura com 10% de cinza de CCAE (10E) em substituição ao cimento Portland (CPV-ARI);
- mistura com 20% de cinza de CCAE (20E) em substituição ao cimento Portland (CPV-ARI);
- mistura com 30% de cinza de CCAE (30E) em substituição ao cimento Portland (CPV-ARI);
- mistura com 5% de SA (5SA) em substituição ao cimento Portland (CPV-ARI);

- mistura com 10% de SA (10SA) em substituição ao cimento Portland (CPV-ARI);

A tabela 1, a seguir, demonstra, de maneira resumida, todas as misturas que foram testadas.

Tabela 1 - Proporções das adições minerais em cada mistura de aglomerante.

Nomenclatura das misturas	Proporção dos materiais (% do total aglomerante)			
	Cimento (CPV-ARI)	Cinza de casca de arroz clara	Cinza de casca de arroz escura	Silica ativa
REF	100	-	-	-
5C	95	5	-	-
10C	90	10	-	-
20C	80	20	-	-
30C	70	30	-	-
5E	95	-	5	-
10E	90	-	10	-
20E	80	-	20	-
30E	70	-	30	-
5SA	95	-	-	5
10SA	90	-	-	10

Para cada mistura, foram estudadas três relações de água/aglomerante (a/agl), sendo elas: 0,35; 0,50 e 0,65. Todas as misturas tiveram amostras com dois períodos de cura úmida (três e sete dias) para atenderem aos objetivos propostos por esta pesquisa. Os materiais utilizados nesta investigação experimental foram:

- CPV-ARI: em conformidade com a NBR 5733 (ABNT, 1991a);
- CCAC: procedente da indústria Geradora de Energia Elétrica Alegrete/RS (GEEA/RS), moída no LMCC da UFSM, através do moinho de bolas por 1 hora;
- CCAE: também procedente da indústria GEEA/RS já moída na indústria;
- SA: proveniente de fornecedor nacional;

- areia: o agregado miúdo natural utilizado foi areia quartzosa encontrada na região de Santa Maria/RS, previamente lavada e seca em estufa a 105 - 110°C;
- brita: o agregado graúdo utilizado foi a pedra britada originária de rocha diabásica do município de Itaara/RS, previamente lavada e seca;
- água: a água utilizada na moldagem dos corpos-de-prova proveio de poços artesianos que abastecem todo o campus da UFSM. Para a elaboração da solução de fenolftaleína ser utilizada no ensaio de carbonatação acelerada, usou-se água destilada.
- aditivo: com objetivo de manter a igualdade de consistência entre as diversas misturas investigadas, utilizou-se aditivo químico plastificante de pega normal cuja dosagem recomendada pelo fabricante é de 0,2% a 1,0% do peso do aglomerante. Quando a dosagem do plastificante não foi suficiente para atingir a consistência desejada (abatimento de 100 ± 10 mm), utilizou-se um aditivo superplastificante sintético com base de polímeros policarboxilatos, cuja dosagem recomendada é de 0,2% a 5,0% do peso do aglomerante.
- gás carbônico: foi fornecido pela empresa White Martins.

3.2.1 Caracterização dos materiais

3.2.1.1 Aglomerantes

As características químicas e físicas dos aglomerantes foram obtidas por ensaios realizados conforme as seguintes normas:

- a) NBR 11579 (ABNT, 1991b): Cimento Portland – Determinação da finura por meio da peneira 75 micrômetros (número 200);
- b) Análise química: NBR NM 10 (ABNT, 2004a), 11-1 (ABNT, 2004b), 12 (ABNT, 2004c), 13 (ABNT, 2004d), 14 (ABNT, 2004e), 15 (ABNT, 2004f), 16 (ABNT, 2004g), 17 (ABNT, 2004h), 18 (ABNT, 2004i), 19 (ABNT, 2004j), 21 (ABNT, 2004k);

- c) Distribuição granulométrica a laser: Associação Brasileira de Cimento Portland, SP (ABCP/SP);
- d) NBR NM 23 (ABNT, 2001a): Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação de massa específica;
- e) NBR NM 43 (ABNT, 2002): Cimento Portland – Determinação da pasta de consistência normal;
- f) NBR NM 65 (ABNT, 2003d): Cimento Portland – Determinação do tempo de pega;
- g) NBR NM 76 (ABNT, 1998): Cimento Portland – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método Blaine).

A figura 17 apresenta a distribuição granulométrica a laser do cimento utilizado na pesquisa.

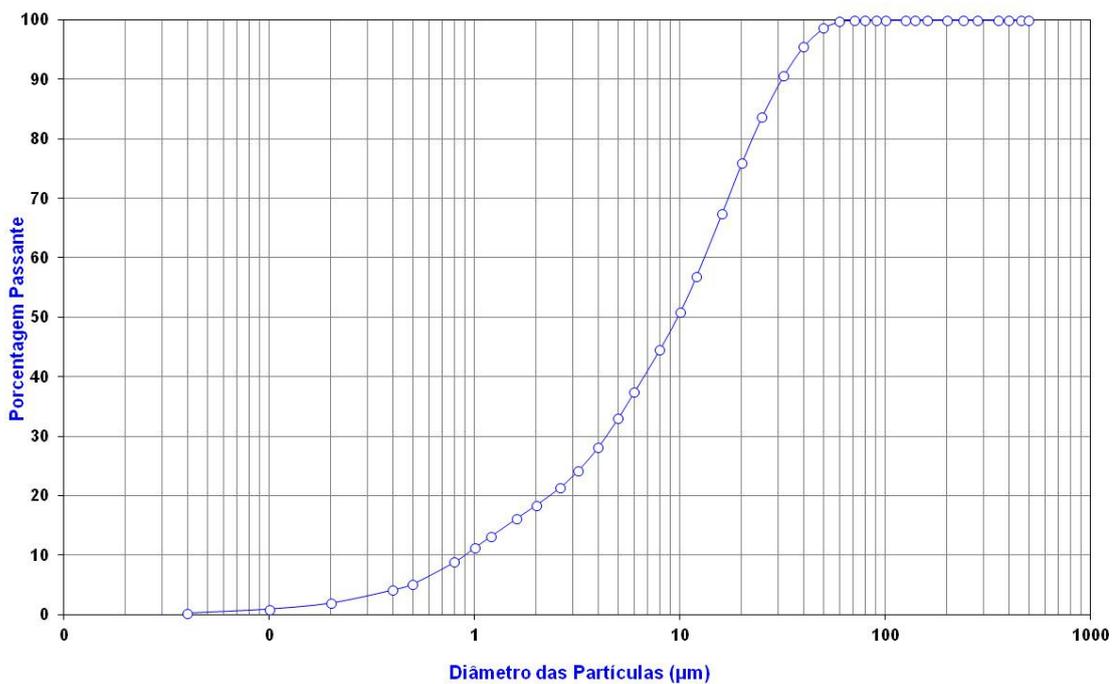


Figura 17 - Distribuição granulométrica do cimento (CPV-ARI).

As tabelas 2, 3 e 4 apresentam, respectivamente, as características mecânicas e físicas e a composição química do cimento.

A figura 18 representa o difratograma da amostra de cimento.

Tabela 2 - Ensaio em argamassa do CPV-ARI.

Classificação NBR 5733	CPV-ARI
Resistência à compressão axial (NBR 7215)	(MPa)
1 dia	14,3
3 dias	33,0
7 dias	36,8
28 dias	49,2
Tempo de pega	
Início de pega (min.)	180
Fim de pega (min.)	250

Tabela 3 - Características físicas do cimento.

Características físicas	
Massa específica (g/cm ³)	3,13
Finura #0,075 mm	0,22
Superfície específica (m ² /g)	1,14

Tabela 4 - Características químicas do cimento.

(continua)

Composição química	% em massa dos materiais
SiO ₂	19,19
Al ₂ O ₃	5,16
Fe ₂ O ₃	2,95
CaO	62,64
MgO	2,75
SO ₃	2,52
Na ₂ O	0,12
K ₂ O	0,64
TiO ₂	0,23
SrO	0,28
P ₂ O ₅	0,13

(conclusão)

Cal livre	1,39
Resíduo insolúvel	0,49
Carbono grafítico	1,93
Perda ao fogo	3,39

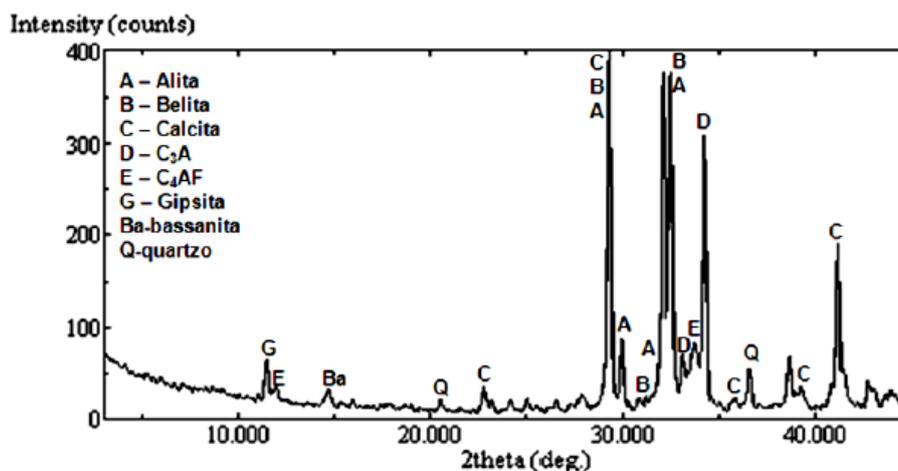


Figura 18 - Difratograma da amostra de cimento (CPV-ARI).

As tabelas 5 e 6 apresentam, respectivamente, as características físicas e a composição química das adições minerais utilizadas nesta pesquisa.

As figuras 19, 20 e 21 representam, respectivamente, os difratogramas das amostras de CCAC, CCAE e SA.

Tabela 5 - Características físicas das adições minerais.

Características físicas	CCAC	CCAE	SA
Massa específica (g/cm ³)	2,11	2,12	2,20
Superfície específica BET (m ² /g)	18,89	20,73	18,83

Tabela 6 - Características químicas das adições minerais.

Composição química	% em massa dos materiais		
	CCAC	CCAE	SA
SiO ₂	93,54	88,12	94,20
Al ₂ O ₃	0,52	0,56	0,27
Fe ₂ O ₃	0,20	0,15	0,15
CaO	0,79	0,83	0,61
MgO	0,49	0,49	0,57
SO ₃	0,05	0,10	0,11
Na ₂ O	0,03	0,21	0,15
K ₂ O	1,65	1,60	0,40
Carbono grafítico	0,41	3,69	-
Perda ao fogo	2,32	5,88	2,03

Através do teor de perda ao fogo e conseqüentemente de carbono grafítico, pode-se determinar a quantidade de material não queimado nas amostras. Segundo Uchikawa (1986 apud RÊGO, 2004), valores de perda ao fogo maiores de 15% indicam grande quantidade de cinza de casca de arroz não queimada, o que pode diminuir a reatividade da pozolana.

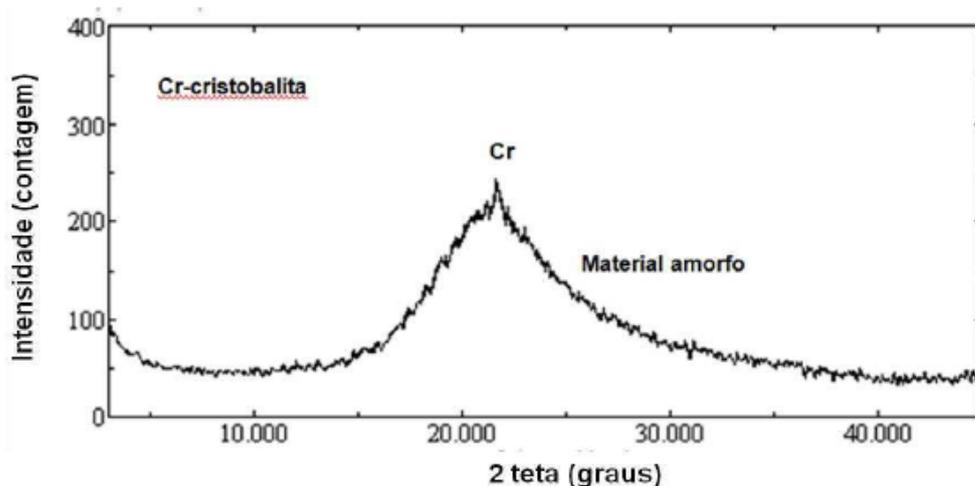


Figura 19 - Difratograma da amostra de CCAC.

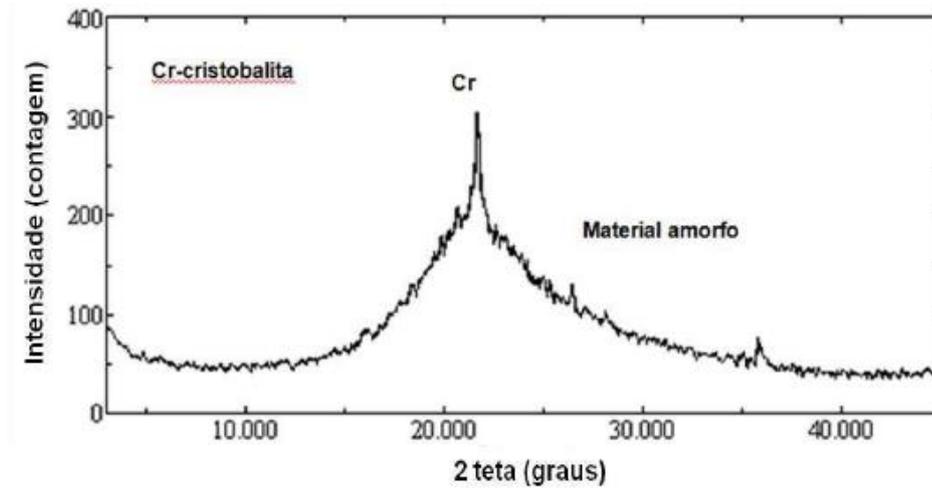


Figura 20 - Difratograma da amostra de CCAE.

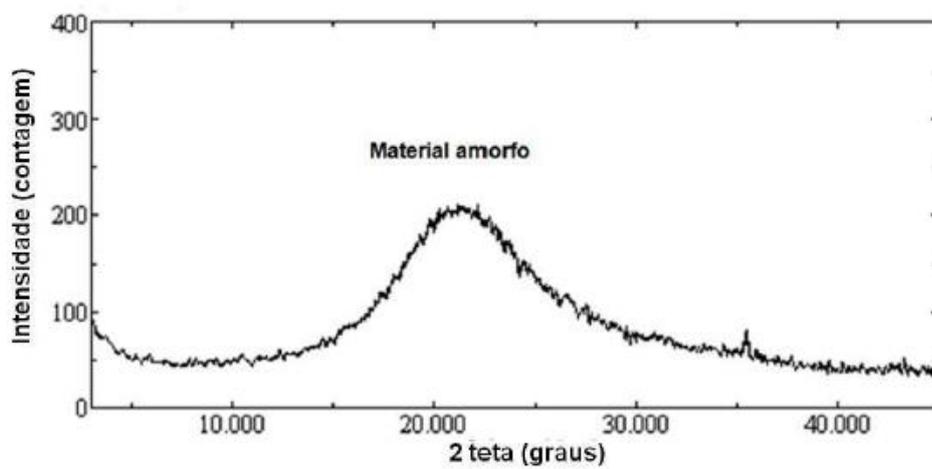


Figura 21 - Difratograma da amostra SA.

As CCA e a SA apresentam difratogramas semelhantes, em que todos são considerados materiais amorfos, mesmo com a CCAE apresentando um maior teor de carbono gráfico. Fato que pode ser atribuído à queima controlada realizada nas cinzas.

3.2.1.2 Agregados

As características físicas dos agregados foram obtidas por ensaios realizados conforme as seguintes normas:

- a) NBR NM 26 (ABNT, 2001b): Agregados – Amostragem;
- b) NBR NM 52 (ABNT, 2003b): Agregado miúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente;
- c) NBR NM 53 (ABNT, 2003c): Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água;
- d) NBR NM 248 (ABNT, 2003e): Agregados – Determinação da composição granulométrica;
- e) NBR 7809 (ABNT, 2006a): Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro.
- f) NBR NM 45 (ABNT, 2006c): Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios.

Como agregado miúdo, utilizou-se areia natural, de origem quartzosa, proveniente do município de Santa Maria, RS. A areia foi lavada para remoção de possíveis impurezas que poderiam influenciar o desempenho do concreto. Após a lavagem, a areia foi seca em estufa entre 105°C e 110°C, para remoção da umidade.

Para agregado graúdo, utilizou-se pedra britada, proveniente de rocha de origem diabásica, procedente do município de Itaara, RS. Este material foi lavado para remoção de componentes que poderiam alterar o desempenho do concreto e, posteriormente, foi seco para remoção da umidade.

Na tabela 7, são apresentadas as características físicas dos agregados, e, nas figuras 22 e 23, podem ser observadas as distribuições granulométricas do agregado miúdo e graúdo, respectivamente.

Tabela 7 - Características físicas dos agregados.

Grandeza física	Agregado miúdo	Agregado graúdo
Massa específica (Kg/dm ³)	2,66	2,48
Massa unitária (Kg/dm ³)	1,62	1,38
Módulo de finura	1,85	6,92
Índice de forma	-	2,23
Dimensão máxima característica (mm)	1,2	19,0
Absorção de água (%)	-	2,87

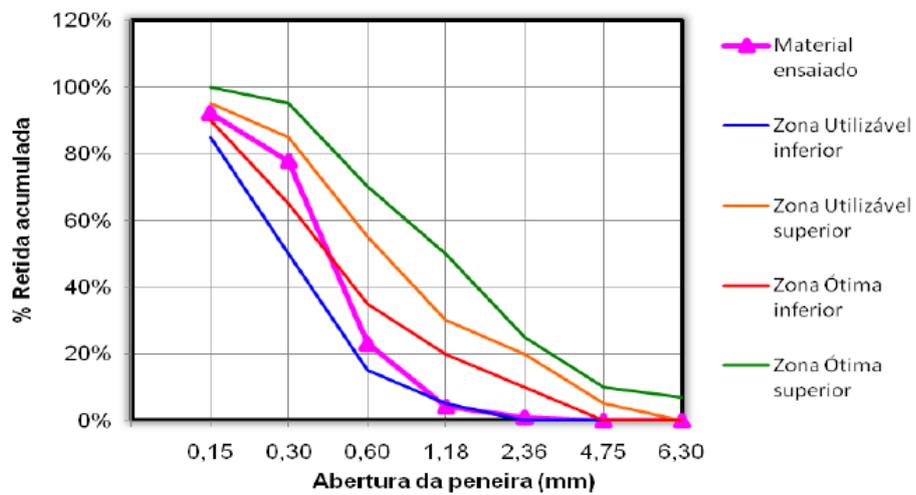


Figura 22 - Curva granulométrica do agregado miúdo.

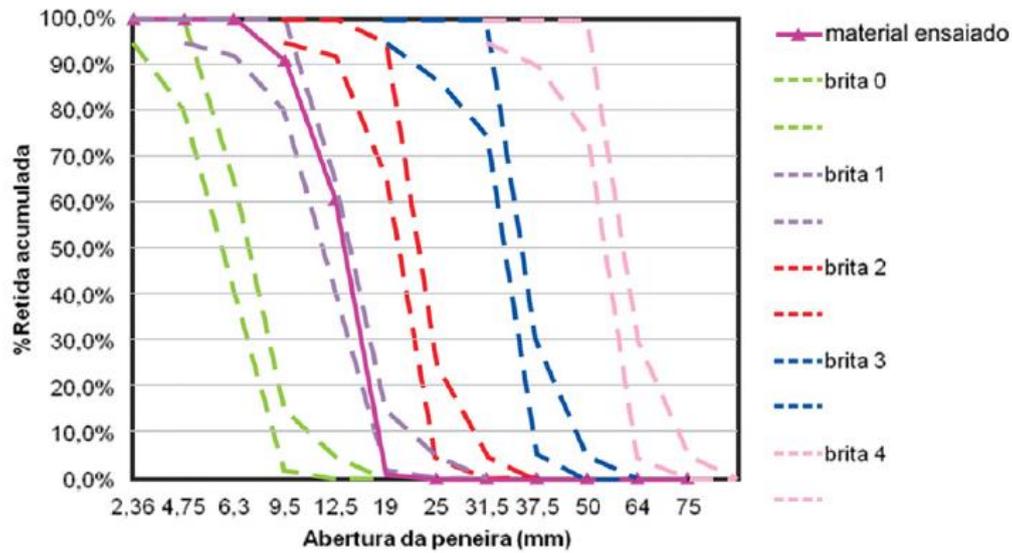


Figura 23 - Curva granulométrica do agregado graúdo.

3.3 Dosagem dos concretos

A dosagem dos materiais para moldagem dos concretos foi realizada de acordo com os procedimentos propostos por Helene e Terzian (1992), considerando um teor ótimo de argamassa de 51% em massa de materiais secos.

Para manter o teor de argamassa constante em todas as misturas e igual ao da REF, fez-se uma compensação no teor de agregado miúdo nos traços com adições minerais (devido à menor massa específica das adições minerais em relação ao cimento).

Os concretos foram dosados com três relações a/agl (0,35; 0,50; 0,65), a fim de obter as curvas que indicassem o comportamento do concreto com diferentes aglomerantes, resultando nos traços unitários apresentados na tabela 8, para a REF.

Tabela 8 - Traço unitário para o concreto de referência.

Relação a/agl	Traço unitário
0,35	1 : 1,30 : 2,21
0,50	1 : 2,06 : 2,94
0,65	1 : 2,83 : 3,68

O consumo de materiais por m³ de concreto utilizados na pesquisa apresenta-se na tabela 9.

Tabela 9 - Consumo de materiais por m³ de concreto.

Mistura	Relação	Materiais em Kg/m ³									
		a/agl	Agil	Cim	CCAC	CCAE	SA	Areia	Brita	Água	Aditivo plast.
REF	0,35	487	487	-	-	-	633	1076	170	2,44	-
	0,50	359	359	-	-	-	739	1055	180	-	-
	0,65	284	284	-	-	-	802	1043	185	-	-
5C	0,35	487	463	24	-	-	618	1076	170	3,16	-
	0,50	359	341	18	-	-	732	1055	180	-	-
	0,65	284	270	14	-	-	798	1043	185	-	-
10C	0,35	487	438	49	-	-	610	1076	170	4,87	1,95
	0,50	359	323	36	-	-	725	1055	180	1,08	-
	0,65	284	256	28	-	-	789	1043	185	0,29	-
20C	0,35	487	389	98	-	-	591	1076	170	4,87	3,90
	0,50	359	287	72	-	-	711	1055	180	2,51	-
	0,65	284	227	57	-	-	778	1043	185	1,00	-
30C	0,35	487	340	147	-	-	574	1076	170	4,87	7,30
	0,50	359	251	108	-	-	697	1055	180	3,59	1,44
	0,65	284	199	85	-	-	767	1043	185	1,99	-
5E	0,35	487	463	-	24	-	618	1076	170	3,04	-
	0,50	359	341	-	18	-	732	1055	180	-	-
	0,65	284	270	-	14	-	798	1043	185	-	-
10E	0,35	487	438	-	49	-	610	1076	170	4,87	2,19
	0,50	359	323	-	36	-	725	1055	180	1,26	-
	0,65	284	256	-	28	-	789	1043	185	0,43	-
20E	0,35	487	389	-	98	-	591	1076	170	4,87	4,14
	0,50	359	287	-	72	-	711	1055	180	2,87	-
	0,65	284	227	-	57	-	778	1043	185	1,14	-
30E	0,35	487	340	-	147	-	574	1076	170	4,87	7,55
	0,50	359	251	-	108	-	697	1055	180	3,59	1,61
	0,65	284	199	-	85	-	767	1043	185	2,13	-
5SA	0,35	487	463	-	-	24	618	1076	170	2,92	-
	0,50	359	341	-	-	18	732	1055	180	-	-
	0,65	284	270	-	-	14	798	1043	185	-	-
10SA	0,35	487	438	-	-	49	610	1076	170	4,87	1,70
	0,50	359	323	-	-	36	725	1055	180	0,90	-
	0,65	284	256	-	-	28	789	1043	185	-	-

3.3.1 Moldagem e cura dos corpos-de-prova

Foram moldados, para cada relação a/agl das misturas utilizadas, corpos-de-prova cilíndricos para os ensaios de carbonatação acelerada e porosimetria por intrusão de mercúrio, de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2003a), segundo a tabela 10. O adensamento foi realizado em mesa vibratória.

Tabela 10 - Idade de ensaio e tamanho dos corpos-de-prova.

Ensaio	Idade de ensaio	Dimensão dos cps	Vibração
	(dias)	(cm)	(camadas)
Carbonatação Acelerada	119,147,175 e 203	Ø 10x20	2
Porosimetria	91	Ø 4x8	2

Com a finalidade de conferir consistência a cada mistura (90 ± 10 mm), realizou-se o ensaio de abatimento de tronco de cone, de acordo com a NBR NM 67 (ABNT, 1998).

A colocação dos materiais na betoneira seguiu a sequência proposta por Hoppe (2005):

- 100% de agregado graúdo;
- 60% de água;
- 100% do aglomerante, homogeneizado;
- 100% do total calculado de aditivo (plastificante e/ou superplastificante) + 20% de água, esperando-se o efeito do(s) aditivo(s);
- 20% de água + 100% de agregado miúdo.

A fim de igualar a temperatura do concreto fresco para os diferentes traços a 18°C , a partir da temperatura inicial dos agregados e dos aglomerantes, a temperatura da água foi corrigida conforme a equação 3.1, proposta por Mehta e

Monteiro (2008), que correlaciona a temperatura do concreto com a massa e a temperatura inicial dos materiais constituintes.

$$T = \frac{0,22 \times (T_m \times M_m + T_c \times M_c) + T_a \times M_a}{0,22 \times (M_m + M_c)} \quad \text{Equação 3.1}$$

Onde:

T é a temperatura da massa de concreto (°C);

T_m é a temperatura dos agregados (°C);

T_c é a temperatura do cimento (°C);

T_a é a temperatura da água (°C);

M_m é a massa de agregados (kg);

M_c é a massa de cimento (kg);

M_a é a massa de água (kg).

As temperaturas foram medidas com o uso de termômetro digital. Com a fórmula acima, foi possível encontrar a temperatura da água a ser utilizada na mistura. No inverno, houve necessidade de aquecer a água. O processo inverso foi necessário no verão.

Após a moldagem, os corpos-de-prova foram mantidos nos moldes por 24 horas, para posterior desmoldagem. Decorrido este período, os corpos-de-prova foram identificados e armazenados em câmara úmida climatizada com temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ e umidade relativa maior que 95%, permanecendo até completarem o período de cura estipulado (três e sete dias).

Os corpos-de-prova destinados aos ensaios de carbonatação foram curados em câmara úmida em períodos de três e sete dias, permanecendo em ambiente de laboratório até a data dos ensaios. Já os corpos-de-prova que foram utilizados no ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio foram mantidos imersos em água com cal a fim de manter o meio alcalino e a hidratação até a data dos ensaios.

3.4 Ensaios realizados

3.4.1 Carbonatação Acelerada

O ensaio consiste na determinação das profundidades e dos coeficientes de carbonatação, cada corpo-de-prova moldado nas dimensões de 10x20 cm e cortado em duas partes iguais de aproximadamente 10x10 cm.

Para o ensaio os corpos-de-prova foram pré-condicionados, conforme preconiza a norma RILEM TC 116-PCD (1999), visando dotá-los de uma concentração de umidade em equilíbrio (75 ± 2)% em um ambiente aéreo, com temperatura de $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ e com distribuição uniforme de água evaporável. Partindo-se da idade escolhida para o ensaio, de 91 dias, adotou-se o tempo de sazramento de 41 dias, conforme esquema proposto por Frizzo (2001), que consiste em subtrair de forma retroativa, da idade de ensaio, os prazos necessários para a realização do experimento. As fases deste e seus prazos estimados foram, respectivamente: redistribuição da umidade, 14 dias; pré-secagem, 10 dias; determinação dos parâmetros de pré-secagem, 10 dias; selagem lateral, 3 dias; corte, 1 dia. Quatro dias foram destinados a possíveis imprevistos; quando esse período não foi necessário, utilizou-se esse tempo para a redistribuição da umidade. A seguir, uma descrição dos passos envolvidos nesta fase da pesquisa:

Acondicionamento dos corpos-de-prova: após completarem o período de cura de três e sete dias e depois de retirados da câmara úmida, os corpos-de-prova para os ensaios de carbonatação acelerada foram cortados em duas fatias de dimensões 10 x 10 cm (diâmetro x altura) e identificados. A figura 24 apresentam os detalhes dos corpos-de-prova cortados para os ensaios de carbonatação acelerada. Todos os corpos-de-prova, exceto aqueles utilizados para gerar os parâmetros do pré-condicionamento, foram acondicionados em sala climatizada, com temperatura controlada de $23 \pm 1^\circ\text{C}$ e umidade relativa de $75 \pm 2\%$, onde permaneceram durante todo o período em que foram gerados os parâmetros de pré-condicionamento. Concomitantemente, tiveram suas superfícies laterais seladas e um dos topos das faces laterais selado com três demãos de verniz poliuretânico.

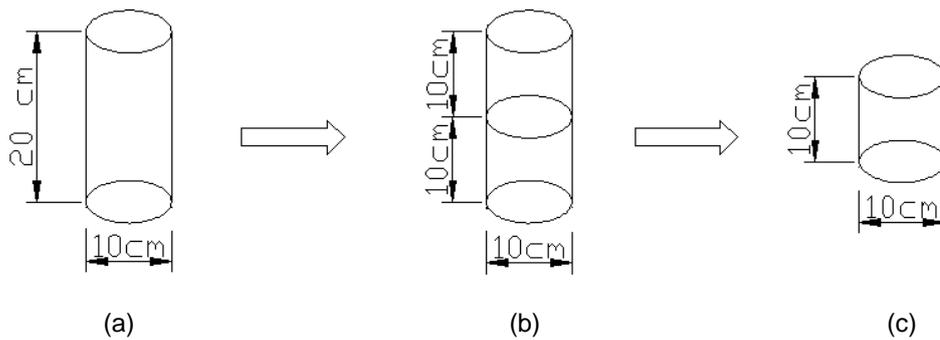


Figura 24 - Esquema de corte dos corpos-de-prova para o ensaio de carbonatação acelerada. (a) CP 10 x 20 cm; (b) CP cortado em duas fatias e (c) detalhe da fatia.

Geração dos parâmetros do pré-condicionamento: como o objetivo deste procedimento é dotar os corpos-de-prova com teor de umidade homogêneo de $75 \pm 2\%$, foram adotados os procedimentos abaixo, recomendados pela RILEM TC 116 – PCD (1999):

a) Uma das fatias foi pesada, para que fosse obtido o seu peso inicial (m_0).

b) Esta fatia foi levada para uma estufa, a uma temperatura de 105°C , e pesada diariamente, em intervalos de 24 horas, até atingir peso constante $\pm 0,5$ g, entre duas pesagens consecutivas. Quando isto aconteceu, foi determinado seu peso seco (m_d).

c) A outra fatia foi moída e peneirada nas peneiras # 6,3mm e 2,4mm. Os grãos retidos na peneira #6,3mm foram moídos novamente, e aqueles retidos na peneira #2,4 mm foram selecionados. O material passante na peneira mais fina era eliminado. O material selecionado, em torno de 500 g, foi colocado em uma bandeja, devidamente identificado, pesado, e, após, obteve-se seu peso inicial. Após, foi levado a uma câmara climática da marca Caron modelo 6034, com temperatura controlada de $20 \pm 1^\circ\text{C}$ e umidade relativa de $75 \pm 2\%$, e pesado, em intervalos de 24 horas até que a diferença de peso entre duas pesagens consecutivas fosse de no máximo 0,1 g. Quando isto aconteceu, foi obtido seu peso em equilíbrio de umidade relativa do ar (U.R.) de 75% (m_{e75}). A figura 25 mostra o corpo-de-prova parte moída e inteira.



Figura 25 - Corpo-de-prova parte moída e inteira.

d) Esta amostra, após atingir a constância de peso para a U.R. de 75% descrita no item c, foi levada para uma estufa, com temperatura controlada de 105°C, e pesada em intervalos de 24 horas até que a diferença de peso entre uma pesagem e outra fosse de no máximo 0,1 g. Ao atingir esta diferença, foi determinado o peso seco da amostra moída (m_{d75});

e) Com os valores obtidos nos itens **a** e **b**, foi possível obter o conteúdo total de água evaporável (W_e) e, conseqüentemente, a concentração de água evaporável (w_e), através das equações 3.2, 3.3 e 3.4:

$$w_e = W_e / m_d \quad \text{Equação 3.2}$$

onde, $W_e = m_0 - m_d \quad \text{Equação 3.3}$

$$w_e = \frac{(m_0 - m_d)}{m_d} \quad \text{Equação 3.4}$$

f) O conteúdo de W_e para a U.R. de 75% (W_{e75}) e a concentração da umidade de equilíbrio (w_{e75}) foram obtidos a partir dos valores descritos nos itens **c** e **d**, através das equações 3.5, 3.6 e 3.7:

$$w_{e75} = W_{e75} / m_{d75} \quad \text{Equação 3.5}$$

onde, $W_{e75} = m_{e75} - m_{d75} \quad \text{Equação 3.6}$

$$w_{e75} = \frac{(m_{e75} - m_{d75})}{m_{d75}} \quad \text{Equação 3.7}$$

g) A partir dos valores calculados nos itens **e** e **f**, foi obtida a variação de peso (Δm), correspondente à perda de umidade, para a fatia descrita no item **a**, conforme a equação 3.8:

$$\Delta m = [(w_e - w_{e75}) / (1 + w_e)] \times m_0 \quad \text{Equação 3.8}$$

h) Na sequência, todas as fatias foram pesadas e, através de uma regra de três, foram obtidos os valores de Δm para cada uma. As fatias foram, então, armazenadas em uma estufa ventilada com temperatura controlada de 50°C e pesadas em intervalos sucessivos até atingirem a perda de peso correspondente ao Δm ; o que significa que todas as fatias deveriam atingir teor de umidade de 75%. Para a obtenção desta perda de peso, foi permitida uma tolerância de 5% de variação para o Δm , para mais ou para menos, calculada pela equação 3.9:

$$[(\Delta m_{\text{obs}} - \Delta m_{\text{calc}}) / \Delta m_{\text{calc}}] < 0,05 \quad \text{Equação 3.9}$$

Redistribuição de umidade: à medida que foram atingindo a perda de peso Δm , as amostras foram sendo levadas para uma estufa, com temperatura de 50°C, objetivando a distribuição da umidade. Esta fase teve uma duração de, no mínimo, 14 dias, até atingir a idade de 13 semanas. Esta fase garante que todos os corpos-de-prova estarão dotados de teor de umidade constante e igual a 75%, em qualquer porção de seu interior. Para não haver perda de umidade para o exterior, cada fatia foi envolvida por duas camadas de filme de PVC, colocadas dentro de dois sacos plásticos e, por último, seladas em embalagens iguais às de café, material que se apresentou como a maneira mais eficiente de evitar a perda de umidade.

Os corpos-de-prova ficaram nessa situação até um dia antes do ensaio, quando foram transferidos para a sala climatizada, que os manteve selados até

momentos antes de serem inseridos na câmara de carbonatação, onde apenas uma das faces conduzira à carbonatação, conforme apresentado na figura 26.

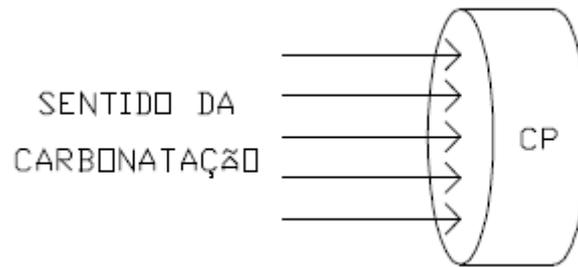


Figura 26 - Sentido da carbonatação.

Os corpos-de-prova foram inseridos em uma câmara de carbonatação da marca Caron, modelo 6034, com concentração de 3% de dióxido de carbono (CO_2), $23 \pm 2^\circ\text{C}$ de temperatura e teor de umidade de $65 \pm 2\%$, conforme apresentado nas figuras 27,28 e 29. A concentração de CO_2 é comumente dada pela quantidade, em volume, de gás introduzido na câmara de carbonatação (PAULETTI, 2004).



Figura 27 - Câmara de carbonatação.



Figura 28 - Parâmetros do ensaio.



Figura 29 - Corpos-de-prova na câmara de carbonatação.

O ensaio de carbonatação acelerada foi realizado nas idades de 4, 8, 12 e 16 semanas, a contar a partir da data de entrada na câmara. Para cada idade, foram ensaiados dois corpos-de-prova de 10 x 10 cm (diâmetro x altura), por relação a/agl.

O ensaio consistiu em retirar os corpos-de-prova da câmara de carbonatação e rompê-los diametralmente. Foram utilizados dois corpos-de-prova por ensaio, os quais, quando rompidos diametralmente, geraram quatro superfícies carbonatadas.

Feito isso, foi aspergida uma solução de 1% de fenolftaleína, 29% de água destilada e 70% de álcool absoluto sobre a superfície do concreto à mostra.

A fenolftaleína muda de cor de acordo com o pH. Para valores de pH acima de 9, sua coloração é vermelho carmim e, abaixo deste valor, ela se apresenta incolor. Vale ressaltar que este é um método de medição indireta, ou seja, a superfície que apresenta a cor vermelho carmim não indica necessariamente ausência de carbonatação, mas sim pH superior a 9. Depois de aspergida a solução, foram tiradas fotos das amostras com câmera digital.

Com a foto digitalizada e com o auxílio do *software* AutoCad, a imagem foi colocada em escala, a fim de que fosse feito o contorno ao redor da superfície carbonatada, conforme apresentado na figura 30.



Figura 30 - Contorno da região carbonatada.

Este contorno foi dividido em linhas espaçadas de 1mm umas das outras, conforme apresentado na figura 31, através de uma rotina chamada COTA, foi medida a altura de cada uma das divisões.



Figura 31 - Contorno dividido em linhas verticais espaçadas 1mm umas das outras.

A rotina COTA gerou automaticamente um arquivo em formato Excel, a partir do qual foram gerados os valores que, depois, foram transferidos para uma planilha, em que foram obtidas as profundidades médias de carbonatação, por meio de análise estatística.

3.4.2 Porosimetria por intrusão de mercúrio

O ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio foi utilizado para determinar o volume e a distribuição do diâmetro médio dos poros na pasta de cimento Portland. Neste método, o mercúrio penetra nos poros, sob a ação de pressão externa e sem a ação da capilaridade.

Foram moldados corpos-de-prova cilíndricos de dimensões 4 x 8 cm (diâmetro x altura). Na data do ensaio, 91 dias, com o auxílio de uma serra, retirou-se uma fatia dos corpos-de-prova e, posteriormente, foram extraídas as amostras com talhadeira e martelo. As amostras extraídas em forma cúbica, com aproximadamente 0,6 cm de aresta, foram secas e acondicionadas em recipientes fechados. As determinações de porosimetria por intrusão de mercúrio foram realizadas no equipamento AutoPore IV - Micromeritics de acordo com o procedimento descrito pela norma ISO 15901-1/2005.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 Considerações iniciais

Neste capítulo, serão apresentados os resultados, obtidos através dos ensaios realizados, com o auxílio de tabelas e gráficos, a fim de melhor compreendê-los.

4.2 Análise dos resultados da carbonatação acelerada

Na tabela 11, são apresentados os valores das profundidades de carbonatação das misturas investigadas, bem como o coeficiente de carbonatação, obtido através da inclinação da reta da regressão linear das profundidades carbonatadas em função do tempo, mostrados na figura 32.

Tabela 11 - Profundidades de carbonatação para os diferentes períodos de exposição e o coeficiente de carbonatação.

(continua)

Cura (dias)	Mistura	a/agl	Profundidade carbonatação (mm) x semana					Kc (mm/ $\sqrt{\text{sem}}$)
			0	4	8	12	16	
3d	REF	0,35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10 ⁽¹⁾
		0,50	0,00	6,50	7,60	8,95	11,01	2,67
		0,65	0,00	11,93	14,07	18,25	22,71	5,49
7d	REF	0,35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10 ⁽¹⁾
		0,50	0,00	3,85	6,85	7,95	10,00	2,50
		0,65	0,00	10,77	13,23	18,28	20,26	5,11
3d	5C	0,35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10 ⁽¹⁾
		0,50	0,00	7,09	7,80	9,65	12,45	2,95
		0,65	0,00	13,17	17,50	22,36	24,30	6,23
7d	5C	0,35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10 ⁽¹⁾
		0,50	0,00	4,02	6,97	8,80	11,90	2,89
		0,65	0,00	12,29	15,39	21,06	23,90	5,99

		(continuação)						
		0,35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10 ⁽¹⁾
3d	10C	0,50	0,00	7,81	9,13	10,92	14,02	3,35
		0,65	0,00	14,63	19,76	23,32	25,19	6,49
		0,35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10 ⁽¹⁾
7d	10C	0,50	0,00	7,60	8,87	10,62	13,59	3,27
		0,65	0,00	14,08	19,41	23,01	25,01	6,44
		0,35	0,00	4,86	6,39	7,37	8,44	2,12
3d	20C	0,50	0,00	8,89	11,00	13,57	15,54	3,88
		0,65	0,00	15,48	22,30	25,61	27,75	7,19
		0,35	0,00	4,05	5,34	6,91	7,97	2,00
7d	20C	0,50	0,00	8,48	10,03	11,90	15,33	3,67
		0,65	0,00	15,21	22,22	25,45	27,61	7,17
		0,35	0,00	7,46	9,71	10,73	13,28	3,25
3d	30C	0,50	0,00	12,35	17,65	21,85	22,69	5,96
		0,65	0,00	19,23	30,02	33,64	44,36	10,82
		0,35	0,00	7,14	9,26	10,24	12,85	3,13
7d	30C	0,50	0,00	11,99	17,46	20,10	20,62	5,46
		0,65	0,00	18,15	29,28	32,68	40,31	10,09
		0,35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10 ⁽¹⁾
3d	5E	0,50	0,00	7,21	7,99	9,93	13,55	3,16
		0,65	0,00	13,50	17,92	22,94	24,48	6,32
		0,35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10 ⁽¹⁾
7d	5E	0,50	0,00	6,37	7,53	9,51	12,95	3,04
		0,65	0,00	12,78	16,27	22,21	24,01	6,13
		0,35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10 ⁽¹⁾
3d	10E	0,50	0,00	8,28	9,60	11,40	14,00	3,39
		0,65	0,00	14,46	19,93	23,46	25,89	6,63
		0,35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10 ⁽¹⁾
7d	10E	0,50	0,00	8,10	9,10	11,10	13,65	3,30
		0,65	0,00	14,85	19,83	23,38	25,36	6,52
		0,35	0,00	4,94	6,48	7,37	8,64	2,16
3d	20E	0,50	0,00	9,02	12,11	13,92	16,05	4,04
		0,65	0,00	15,72	22,43	25,81	28,06	7,26
		0,35	0,00	4,13	5,71	6,92	8,01	2,02
7d	20E	0,50	0,00	8,40	10,79	13,24	15,58	3,87
		0,65	0,00	15,25	22,37	25,38	27,83	7,20
		0,35	0,00	7,62	9,92	10,80	13,79	3,35
3d	30E	0,50	0,00	11,48	17,40	21,17	22,71	5,93
		0,65	0,00	19,73	30,01	33,89	44,64	10,87

		(conclusão)						
7d	30E	0,35	0,00	7,15	9,21	10,20	12,92	3,14
		0,50	0,00	11,31	17,23	21,05	21,64	5,74
		0,65	0,00	18,16	29,47	32,99	41,58	10,33
3d	5SA	0,35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10 ⁽¹⁾
		0,50	0,00	7,12	8,55	10,12	12,67	3,06
		0,65	0,00	12,68	16,70	21,51	23,92	6,07
7d	5SA	0,35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10 ⁽¹⁾
		0,50	0,00	4,97	7,39	9,48	11,63	2,88
		0,65	0,00	12,54	15,51	21,37	23,64	5,97
3d	10SA	0,35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10 ⁽¹⁾
		0,50	0,00	7,86	9,11	11,31	13,58	3,32
		0,65	0,00	13,21	18,94	23,17	24,97	6,47
7d	10SA	0,35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10 ⁽¹⁾
		0,50	0,00	7,77	8,68	10,80	13,11	3,18
		0,65	0,00	13,90	18,14	22,69	24,81	6,34

⁽¹⁾ Como não foi obtida profundidade de carbonatação pelo método adotado, foi atribuído o valor de 0,10 para os cálculos das equações de carbonatação.

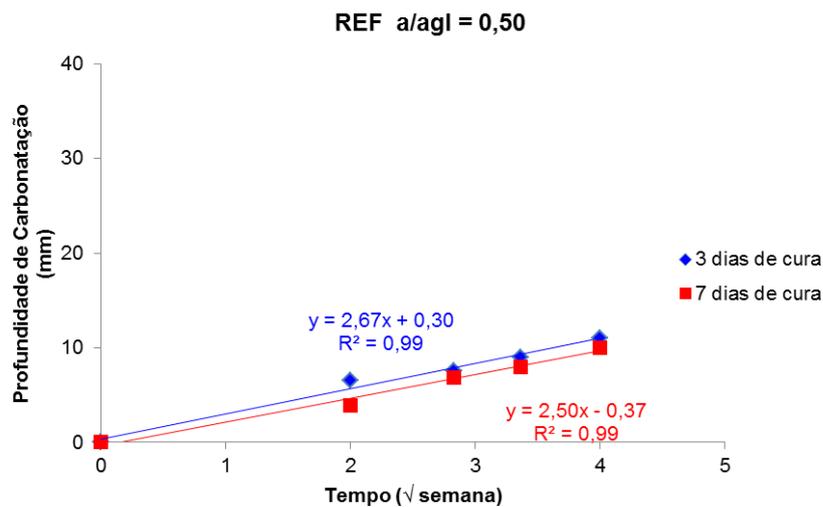


Figura 32 - Determinação do coeficiente carbonatação.

Nas figuras 33 e 34, são apresentados os coeficientes de carbonatação, para todas as misturas e as respectivas relações a/agl. Observou-se que os coeficientes crescem conforme aumenta da relação a/agl e conforme o uso de adições.

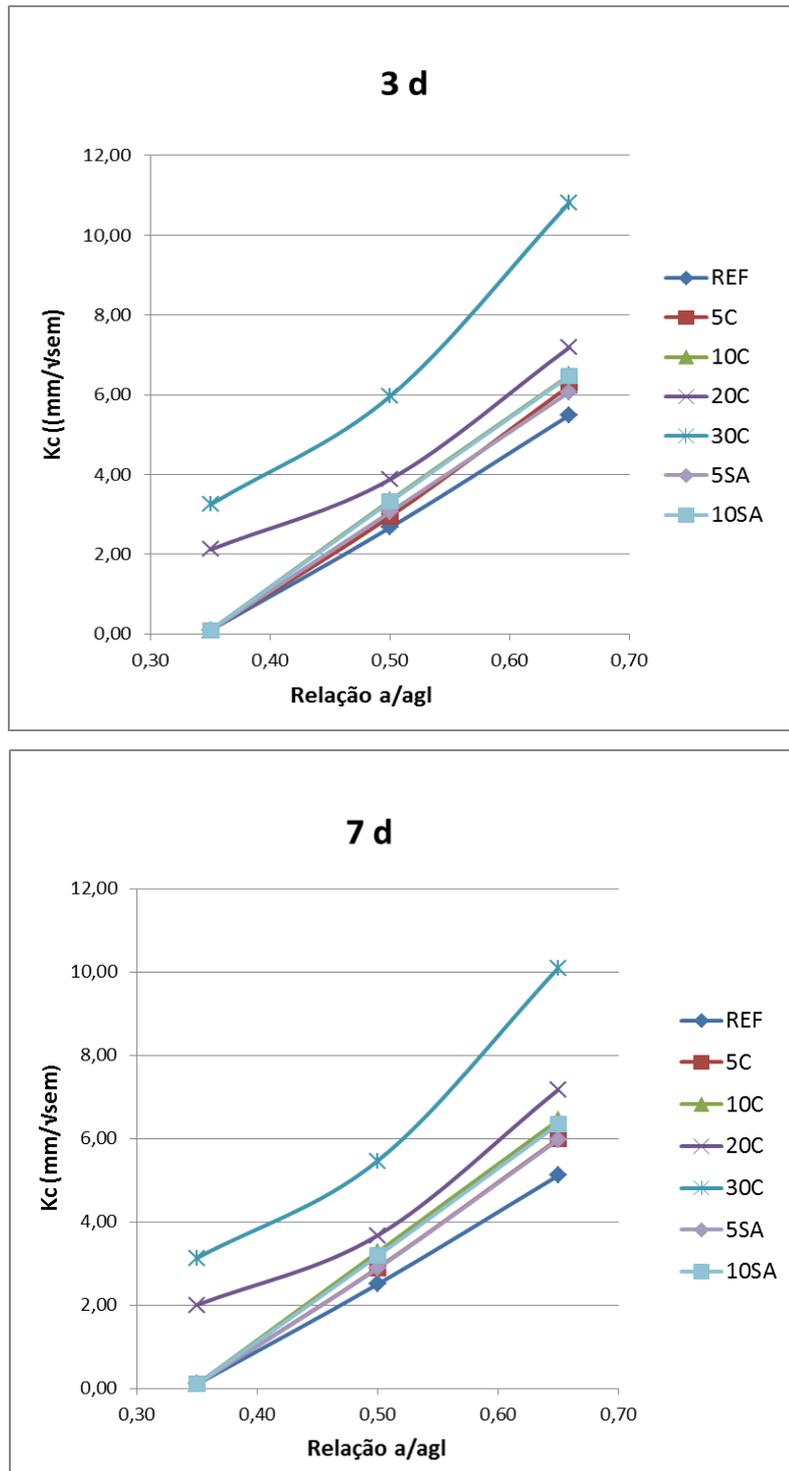


Figura 33 - Coeficiente de carbonatação x relação a/agl. Três e sete dias de cura. Misturas de REF, SA e Cinza Clara.

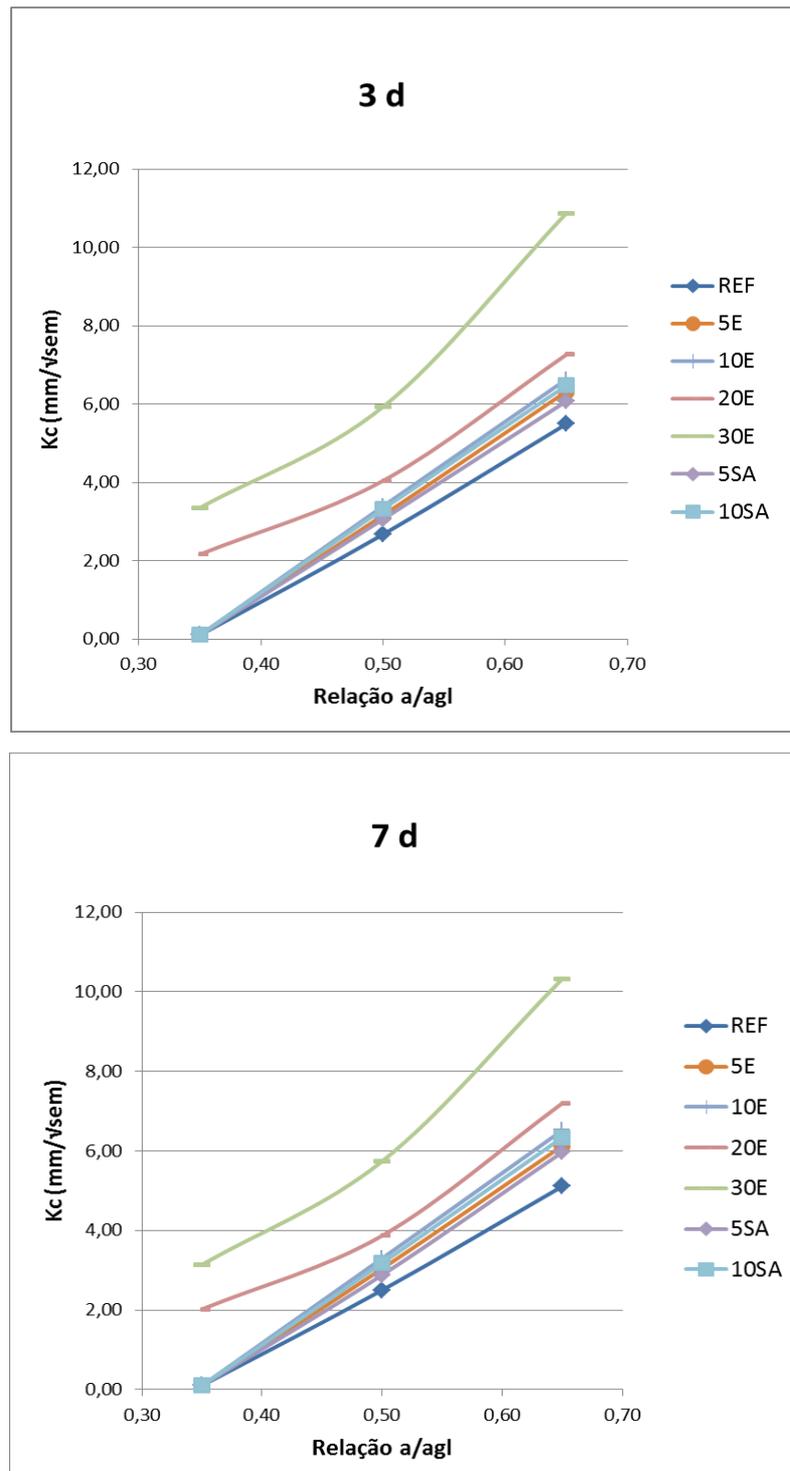


Figura 34 - Coeficiente de carbonatação x relação a/agl. Três e sete dias de cura. Misturas de REF, SA e Cinza Escura.

Constata-se que, para a mistura de referência (REF) e para as misturas 5C, 10C, 5E, 10E, 5SA e 10SA, com relação a/agl 0,35, não foi detectada carbonatação

pelo método adotado. Para esta mesma mistura, quando a relação a/agl 0,50 passou para 0,65, o coeficiente de carbonatação aumentou mais de 93%.

No período de cura úmida de três dias, a redução da relação a/agl de 0,65 para 0,50 resultou em uma diminuição de 94% do coeficiente de carbonatação K_c para as misturas 10C, 95% para mistura 10SA e 83% para a mistura 30E. Quando a relação diminuiu de 0,50 para 0,35, as reduções mais expressivas foram de 87% para a mistura 20E e 83% para as misturas 20C e 30C.

Para os concretos curados por sete dias, a redução da relação a/agl de 0,65 para 0,50 resultou na diminuição de 97% do coeficiente de carbonatação K_c para as misturas 10C, 99% para mistura 10SA e 85% para a mistura 30C. Quando a relação passou de 0,50 para 0,35, as maiores reduções do coeficiente K_c foram de 92%, 84% e 83% para as misturas 20E, 20C e 30E, respectivamente.

A relação a/agl é um dos fatores que influencia a carbonatação no concreto e é um assunto que vem sendo bastante estudado no meio acadêmico por diversos autores. Stumpp (2003) verificou um aumento nos coeficientes de carbonatação de misturas com 70% de adição de escória de alto-forno (EAF), em relação aos obtidos para a REF. Esse aumento foi mais pronunciado nas menores relações a/agl.

Colleparidi et al. (2004) pesquisaram concretos com teores de EAF, variando entre 15% e 50% com relações a/agl 0,40, 0,50, 0,60 e 0,70. Os autores constataram que, para dada relação a/agl, há um aumento na taxa de carbonatação dos concretos com adições minerais, exceto quando o teor de escória é relativamente baixo (15%). Contudo, quando a comparação da taxa de carbonatação é realizada em igualdade de resistência à compressão, aos 28 dias, em média de 42,5 MPa, não existe diferença significativa entre concretos com cimento Portland (CP) e aqueles com teor de adição de escória de até 50%.

Sagawa et al. (2004) pesquisaram concretos de alta resistência, produzidos com cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI) e com EAF, nos teores de 0% e 50%, com relações a/agl 0,35 e 0,40, respectivamente, curadas por 0, 3, 7 e 28 dias. Os autores verificaram que, para a mesma mistura e relação a/agl, as profundidades de carbonatação diminuíram com o aumento do tempo de cura úmida. Para as amostras que não foram curadas em água, após 45 semanas de ensaio acelerado, a mistura com 50% de escória e relação a/agl 0,35 apresentou o dobro da profundidade carbonatada, atingida pela REF, com relação a/agl 0,40.

Comparando as mesmas misturas e relações a/agl, porém curadas em água por três dias, os autores verificaram que, apesar da maior profundidade carbonatada ter sido apresentada pela mistura com adição, o valor aproximou-se, neste caso, daquele obtido pela REF. Além disso, quando as mesmas misturas e relações a/agl, curadas em água por 28 dias, foram comparadas entre si, a carbonatação dificilmente foi detectada.

Os concretos compostos com cinza de casca de arroz clara (CCAC) e cinza de casca de arroz escura (CCAÉ) e aqueles com sílica ativa apresentaram uma menor resistência à carbonatação acelerada, quando comparado à REF.

Ao se comparar as CCAC e as CCAÉ, mantendo fixa a relação a/agl, observou-se que, apesar da pequena diferença entre os valores dos coeficientes de carbonatação K_c , de modo geral, a CCAC apresenta melhor desempenho na maior parte dos resultados obtidos. Para o período de cura de três dias, a CCAÉ obteve melhor desempenho apenas no teor de substituição de 30% na relação a/agl 0,50 com K_c 1% inferior ao da CCAC. Já, no período de cura de sete dias, não foi constatado nenhum resultado no qual a CCAÉ apresentou menor coeficiente de carbonatação que a CCAC.

O melhor resultado da CCAC, na comparação das duas cinzas, pode ser creditado ao maior efeito químico do que físico (efeito fíler), devido ao menor teor de carbono gráfico apresentado por essa cinza, que é nove vezes inferior àquele da CCAÉ, conforme tabela 6.

O aumento do período de cura de três para sete dias promoveu uma diminuição no coeficiente de carbonatação de todas as misturas analisadas, sendo a mistura de 30C com relação a/agl 0,50 a que apresentou a maior redução, 8,4%.

Como pode ser observado, os decréscimos do K_c , com o aumento do período de cura de três para sete dias, não variaram linearmente com o aumento das relações a/agl e com o aumento do teor de substituição, ou seja, não apresentaram uma tendência geral. Constatou-se, no entanto, que este aumento do período de cura úmida exerceu influência positiva sobre todos os concretos analisados, pois favorece a formação de uma microestrutura menos porosa e permeável, aumentando, assim, a resistência à penetração de agentes agressivos no concreto e, conseqüentemente, resultando em uma estrutura com maior qualidade e durabilidade.

Nas figuras 35 e 36, estão apresentados os coeficientes de carbonatação, em função do teor de adição, para as três relações a/agl adotadas. Nela é possível observar que, para a mesma relação a/agl, a carbonatação aumenta à medida que se aumenta o teor de adição. Observa-se também o menor coeficiente de carbonatação, na mistura com sílica ativa (SA), em relação àquela com mesmo teor de cinza de casca de arroz (CCA).

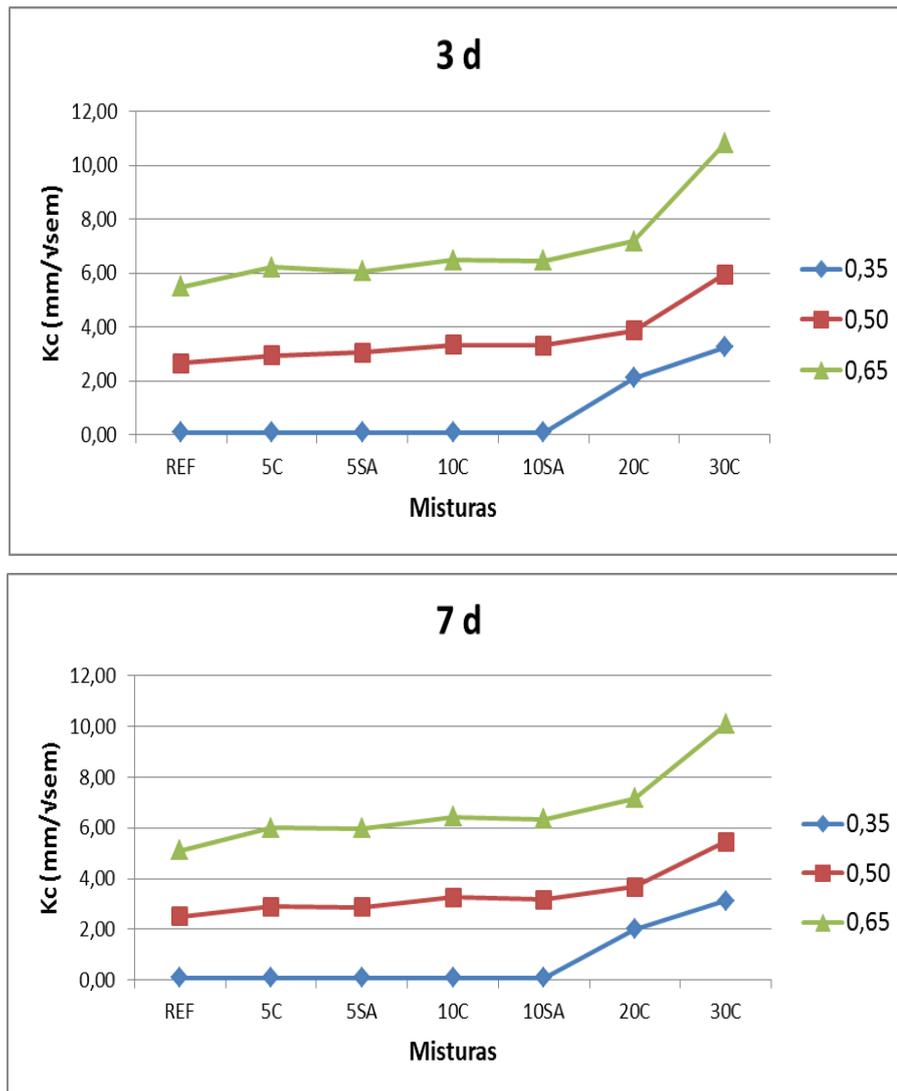


Figura 35 - Coeficiente de carbonatação x teor de adição. Três e sete dias de cura. Misturas de REF, SA e Cinza Clara.

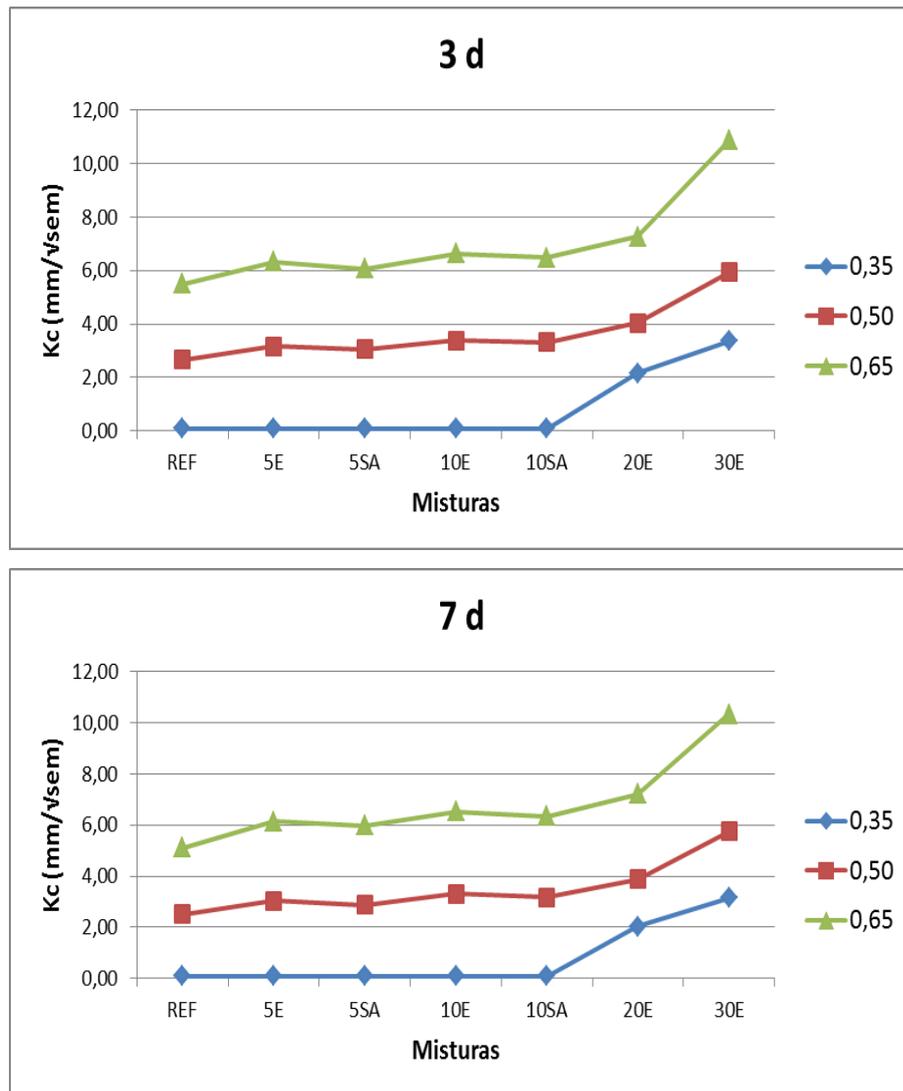


Figura 36 - Coeficiente de carbonatação x teor de adição. Três e sete dias de cura. Misturas de REF, SA e Cinza Escura.

Os resultados mostraram que à medida que o teor de adição foi adicionado e aumentado, houve um aumento nos coeficientes de carbonatação. Isto mostra que, apesar de promover melhorias na estrutura dos poros, tornando-a mais densa e compacta, o uso de adições minerais consome o hidróxido de cálcio nas reações pozolânicas, e, com isto, o pH do concreto é rebaixado a níveis que permitem a ocorrência do mecanismo da carbonatação.

A mistura 5C com relação a/ag de 0,50 e período de cura úmida de três dias foi a que obteve a menor aumento em relação à REF, com um aumento de 10%, indicando melhor desempenho dessa adição mineral, com esse teor de substituição,

frente à carbonatação acelerada. Já a mistura 30E com relação a/ag de 0,50 apresentou o maior aumento percentual do coeficiente K_c para todas as misturas estudadas, pois, com um índice de carbonatação de 130%, em relação à mistura sem adição mineral. Com esses resultados, pode-se analisar a influência do teor de substituição das adições minerais no concreto e verificar o não benefício que o aumento desse teor proporciona à carbonatação acelerada, independentemente da relação a/agl e do período de cura úmida.

Vagheti (1999) investigou a incorporação de CCA nos teores de 25% e 50% em substituição ao CP, e verificou que o coeficiente de carbonatação apresentou um acréscimo com o aumento do teor de substituição de cimento por CCA.

Hoppe (2008), investigando amostras submetidas a uma concentração de 5% de dióxido de carbono (CO_2), com relações a/agl 0,45, 0,55 e 0,65, obteve coeficiente de carbonatação, em média, 43% maior em misturas contendo 25% de adição CCA moída do que na REF. O autor verificou que, com o aumento no teor de CCA, a profundidade de carbonatação aumenta. Para a mistura com 25% de CCA moída, a profundidade de carbonatação, após 12 semanas, foi de 24,20 mm para relação a/agl 0,65 e 12,63mm para a REF, isto é, aumentando-se em 25% o teor de adição, a profundidade carbonatada aumenta cerca de 92%.

Kulakowski, Pereira e Dal Molin (2009) relatam a existência de um “limite crítico” no comportamento da carbonatação do concreto composto com SA, que é determinada por um intervalo de relação a/agl (0,45 e 0,50). Abaixo de 0,45, a carbonatação é determinada principalmente pela porosidade da matriz cimentícia, ao passo que a concentração de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e o pH tem pouca influência na profundidade de carbonatação para esta relação. Para valores acima de 0,50, as características químicas desempenham um papel mais significativo na profundidade de carbonatação, e o consumo de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, devido às reações pozolânicas causadas pela SA, passa a exercer um efeito sobre a carbonatação. Segundo esses autores, o efeito da SA, na prática, é apenas prejudicial para relações a/agl acima do limite crítico de carbonatação. Isso parece ser válido, na relação a/agl 0,35, para as misturas investigadas neste trabalho.

Martinelli (2010) pesquisou concreto com adição de CCA com teores de 15% e 25%, além de uma REF, nas relações a/agl 0,45, 0,55 e 0,65. O autor verificou que os traços de referência apresentaram menores profundidades de carbonatação,

devido à maior quantidade de hidróxido de cálcio (CH) resultante das reações de hidratação do cimento. Para os traços que continham CCA, as profundidades de carbonatação cresceram à medida que ocorreu o aumento do teor de substituição do cimento por CCA (de 15% para 25%) e a diminuição da finura (CCA moída x natural).

Isaia (1995) investigou o comportamento de misturas binárias de cinza volante (CV) (25% e 50%), microssílica (MS) (10% e 20%), CCA (10%, 20% e 30%) e de misturas ternárias de CV acrescida de MS (15+10% e 30+20%) e CV acrescida de CCA (15+10% e 30+20%), mistura na qual constatou que, com o aumento da carbonatação, houve uma diminuição dos teores de hidróxido de cálcio. Contudo, a ocorrência da reação pozolânica contribuiu para a diminuição dos teores de CH e para as misturas com adições pozolânicas, quando comparadas ao concreto de referência.

Isaia, Vagheti e Gastaldini (1998) pesquisaram a carbonatação em concretos de CP sem e com adições minerais. De forma semelhante, os autores concluíram que, em concretos com a incorporação de adições minerais, apesar de estas propiciarem maior refinamento dos poros, aumentando a tortuosidade dos capilares e diminuindo sua permeabilidade, prepondera o efeito da menor reserva alcalina, resultando em frente de carbonatação mais rápida do que no CP comum.

Gastaldini et al. (2007) investigaram a influência dos ativadores químicos K_2SO_4 , Na_2SO_4 , Na_2SiO_3 na carbonatação de concretos compostos com 20% de CCA obtida por queima controlada. Os autores constataram que a mistura composta com 20% de CCA e 1% de K_2SO_4 como ativador químico apresentou menores valores de coeficiente de carbonatação – menores, inclusive, do que os valores obtidos para a mesma mistura sem ativador e para a REF.

4.3 Análise dos resultados em igualdade de resistência

A resistência mecânica é a propriedade do concreto mais utilizada para especificar estruturas de concreto armado, pois, além de estar diretamente ligada ao dimensionamento dessas estruturas, sua medição é de fácil determinação.

Desse modo, neste tópico, serão analisadas as variações dos coeficientes de carbonatação para as diversas misturas investigadas, em dois níveis de resistência à compressão: 40MPa e 50MPa¹.

A tabela 12 apresenta as equações de correlação linear e o coeficiente de determinação (r^2) de cada mistura investigada, obtidas a partir dos valores de resistência à compressão e dos coeficientes de carbonatação, referentes às relações a/agl 0,35, 0,50 e 0,65. Dessa forma, com os níveis de resistência à compressão adotados, de 40 MPa e 50 MPa, foram calculados os coeficientes de carbonatação, para os referidos níveis de resistência, apresentados na tabela 13.

Os resultados de resistência à compressão (f_c) foram apresentados e discutidos na dissertação de Da Silva (2012) (Anexo C e D), assim como as equações exponenciais (Abrams) que possibilitaram determinar a relação a/agl de cada mistura para a obtenção dos níveis de resistência à compressão de 40MPa e 50 MPa

Nas figuras 37 e 39, apresenta-se a correlação entre o coeficiente de carbonatação e a resistência à compressão, e nas figuras 38 e 40, a correlação entre o coeficiente de carbonatação e as relações a/agl , para os níveis de resistência especificados.

¹ Os níveis de resistência à compressão, na idade de 28 dias, $f_{cj} = 40,0$ MPa e $50,0$ MPa, foram determinados a partir da definição do $f_{ck}=35,0$ MPa e $45,0$ Mpa, respectivamente, através da equação $f_{cj}= f_{ck} + 1,65sd$ (desvio padrão), considerando um $sd = 3,5$ MPa.

Tabela 12 - Coeficientes C, D e r^2 das equações exponenciais que relacionam o coeficiente de carbonatação e a relação a/agl x, dada pela expressão $k = C/D^x$ para cada mistura testada.

Mistura	Período de cura (dias)	Coeficiente de carbonatação (Kc)					
		a/agl			Coeficientes		
		0,35	0,50	0,65	C	D	r^2
REF	3	0,10	2,67	5,49	0,0014324	0,0000016	0,9996
	7	0,10	2,50	5,11	0,0015420	0,0000020	0,9997
5C	3	0,10	2,95	6,23	0,0012511	0,0000010	0,9992
	7	0,10	2,89	5,99	0,0013094	0,0000012	0,9995
10C	3	0,10	3,35	6,49	0,0012360	0,0000009	1,0000
	7	0,10	3,27	6,44	0,0012388	0,0000009	1,0000
20C	3	2,12	3,88	7,19	0,5089133	0,0170617	0,9848
	7	2,00	3,67	7,17	0,3326242	0,0045408	0,9999
30C	3	3,25	5,96	10,82	0,8002256	0,0181490	0,9868
	7	3,13	5,46	10,09	0,7912214	0,0202074	0,9823
5E	3	0,10	3,16	6,32	0,0012559	0,0000010	1,0000
	7	0,10	3,04	6,13	0,0012913	0,0000011	0,9999
10E	3	0,10	3,39	6,63	0,0012061	0,0000008	1,0000
	7	0,10	3,30	6,52	0,0012223	0,0000009	1,0000
20E	3	2,16	4,04	7,26	0,5285902	0,0175815	0,9887
	7	2,02	3,87	7,20	0,4607829	0,0144565	0,9867
30E	3	3,35	5,93	10,87	0,8435972	0,0197720	0,9840
	7	3,14	5,74	10,33	0,7846865	0,0188842	0,9875
5SA	3	0,10	3,06	6,07	0,0013112	0,0000011	1,0000
	7	0,10	2,88	5,97	0,0013137	0,0000012	0,9995
10SA	3	0,10	3,32	6,47	0,0012374	0,0000009	1,0000
	7	0,10	3,18	6,34	0,0012532	0,0000010	1,0000

Tabela 13 - Valores dos coeficientes de carbonatação em igualdade de resistência e suas respectivas relações a/agl.

(continua)

Nível de resistência	Misturas	Periodo de cura (dias)	a/agl	Coefficiente de carbonatação (Kc)
40 Mpa	REF	3	0,49	0,99
		7	0,53	1,61
	5C	3	0,55	2,44
		7	0,59	4,10
	10C	3	0,51	1,49
		7	0,57	3,39
	20C	3	0,52	4,23
		7	0,55	6,46
	30C	3	0,55	7,26
		7	0,57	7,31
	5E	3	0,54	2,19
		7	0,57	3,22
	10E	3	0,51	1,51
		7	0,57	3,42
	20E	3	0,51	4,15
		7	0,55	4,74
	30E	3	0,53	6,75
		7	0,56	7,25
	5SA	3	0,58	3,67
		7	0,63	7,05
10SA	3	0,59	4,51	
	7	0,65	10,06	
50 Mpa	REF	3	0,38	0,22
		7	0,41	0,35
	5C	3	0,42	0,40
		7	0,46	0,73
	10C	3	0,42	0,42
		7	0,46	0,72
	20C	3	0,43	2,89
		7	0,47	4,23
	30C	3	0,46	5,15
		7	0,49	5,23
	5E	3	0,39	0,28
		7	0,45	0,66
	10E	3	0,42	0,40
		7	0,45	0,67

(conclusão)			
20E	3	0,42	2,88
	7	0,45	3,15
30E	3	0,44	4,77
	7	0,48	5,22
5SA	3	0,41	0,34
	7	0,48	0,90
10SA	3	0,40	0,32
	7	0,45	0,64

Da análise da tabela 13, constata-se que, para um mesmo nível de resistência, existem variações nas relações a/agl , de acordo com o tipo de mistura e período de cura investigados, que correspondem a diferentes classes de agressividade, segundo a NBR 12655 (2006b). Para a resistência de 40MPa, o menor valor de a/agl foi 0,49 para a REF (três dias) e o maior foi 0,65 para a mistura 10SA (sete dias). Para o nível de resistência de 50MPa, o menor valor da relação a/agl foi de 0,38, também para a REF (três dias), e o maior foi de 0,49 para a mistura 30C (sete dias). Portanto, constata-se que concretos com mesma resistência podem apresentar durabilidades distintas, pois a relação a/agl é um dos principais fatores que influencia na porosidade do concreto.

Na tabela 13 e nas figuras 37 e 39, pode-se observar que, na resistência de 40MPa, a mistura REF é a que apresenta os menores valores de coeficientes K_c para ambos os períodos de cura. Já os maiores valores pertencem às misturas com maiores teores de adições, ou seja, 30C, 30E e 10SA, que apresentam aumentos médios de 492%, 465% e 440%, respectivamente, em relação à REF. Esses valores apontam para o bom desempenho da sílica ativa quando comparada com as CCAs, pois, com teor de 10%, consegue resultados equivalentes aos das CCAs com 30% de substituição.

Outra tendência observada foi o aumento dos coeficientes K_c conforme o aumento do teor de substituição de cimento por adições minerais.

O prolongamento do período de cura de três para sete dias resultou em aumento nas relações a/agl e, conseqüentemente, nos coeficientes de carbonatação, para todas as misturas analisadas. Os aumentos do K_c variaram de 1% para a mistura 30C a 127% para as misturas 10C e 10E.

Para o nível de resistência de 50 MPa, os concretos apresentaram uma tendência similar ao nível de 40 MPa, embora com valores menores de K_c . A mistura REF apresentou os menores coeficientes K_c para os dois períodos de cura úmida e, novamente, os maiores valores de K_c pertencem às misturas 30C, 30E e 10SA com aumentos, em média, de 1767% para as misturas com CCA e 63% para a mistura 10SA, em relação à REF.

Para o nível de resistência de 50 MPa, também foram constatadas aumentos da relação a/agl e dos coeficientes de carbonatação com o aumento do período de cura, para todas as mistura, conforme tabela 13 e figura 37. Os valores variaram de 1%, para a mistura 30C, a 161%, para a mistura 5SA.

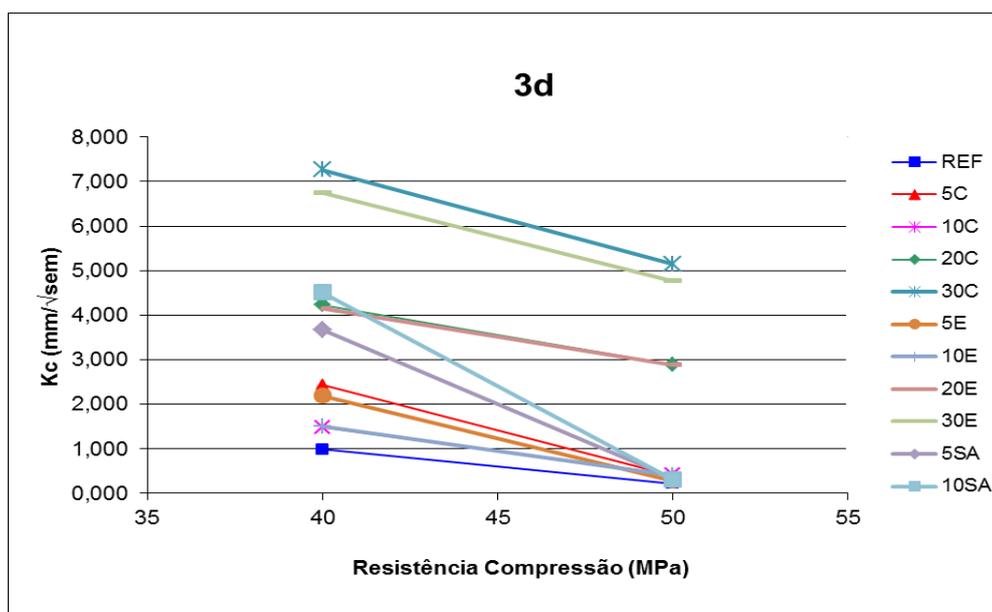


Figura 37 - Coeficiente de carbonatação x resistência à compressão. Níveis de resistência adotados de 40 MPa, 50 MPa – três dias de cura.

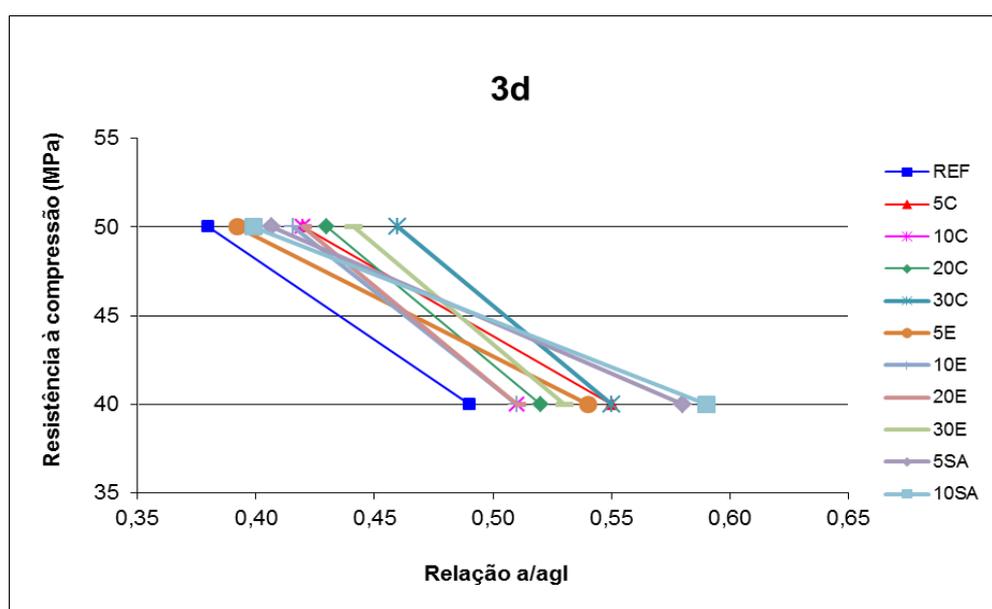


Figura 38 - Coeficiente de carbonatação x relação a/agl. Níveis de resistência adotados de 40 MPa, 50 MPa - três dias de cura.

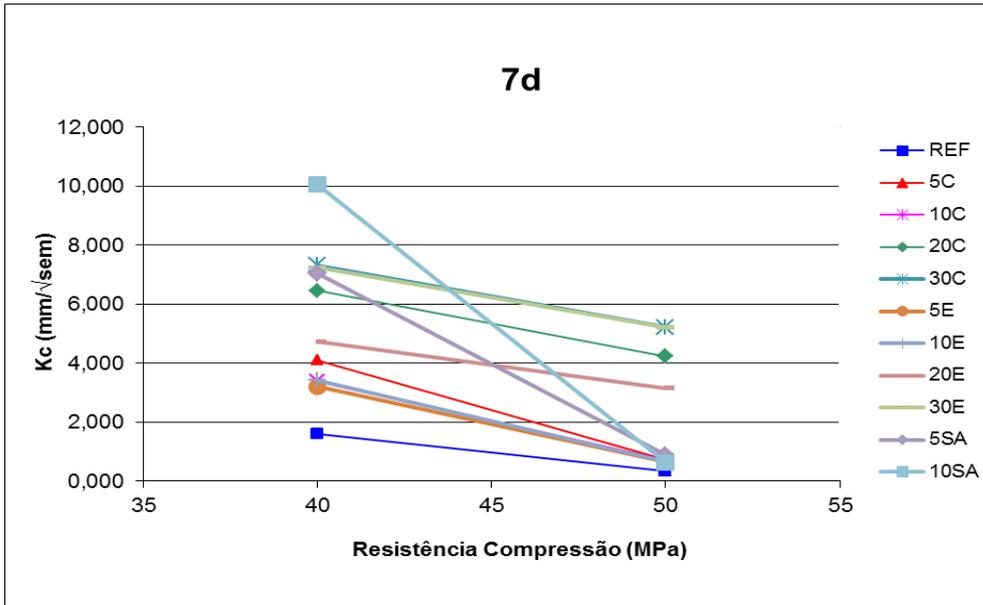


Figura 39 - Coeficiente de carbonatação x resistência à compressão. Níveis de resistência adotados de 40 MPa, 50 Mpa - sete dias de cura.

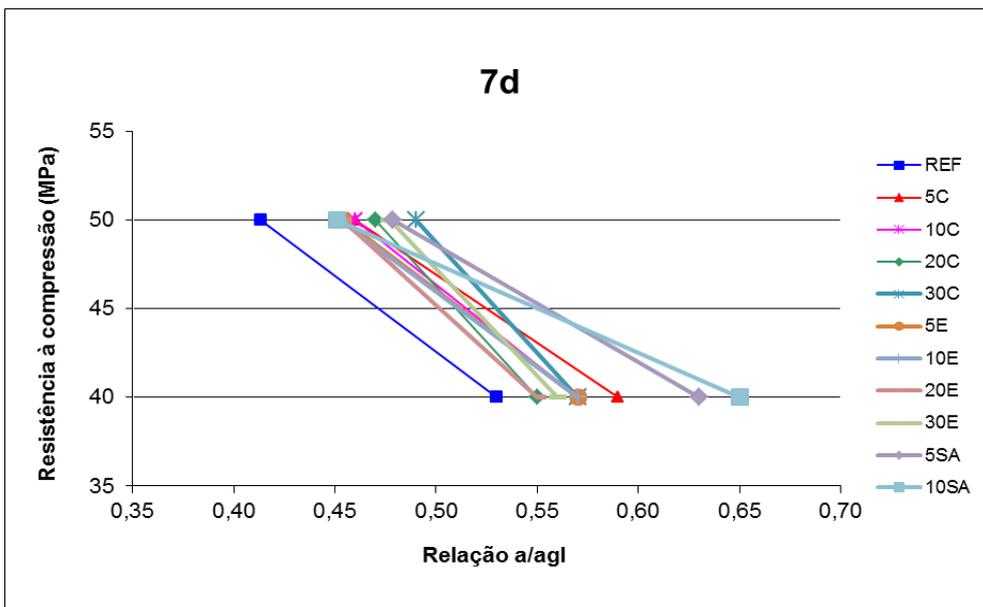


Figura 40 - Coeficiente de carbonatação x relação a/agl. Níveis de resistência adotados de 40 MPa, 50 MPa - sete dias de cura.

4.4 Porosimetria por intrusão de mercúrio

As determinações de porosimetria por intrusão de mercúrio foram realizadas no equipamento AutoPore IV – Micromeritics, de acordo com o procedimento descrito pela norma ISO 15901-1/2005. O volume de mercúrio que penetra na amostra é função da pressão hidrostática aplicada, a qual é relacionada ao diâmetro dos poros por meio da equação de Washburn ($d_p = -4 \cdot \gamma \cdot \cos\Phi / P$).

As medidas foram efetuadas com leitura gradual para cada pressão aplicada (modo *stepwise*), na amostra previamente seca em estufa a 60° por 24 horas.

Os dados do mercúrio, as características do penetrômetro utilizado (porta-amostra) e os parâmetros do ensaio são apresentados na tabela 14.

Tabela 14 - Parâmetros do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio.

Dados do mercúrio		Penetrômetro			Parâmetros do ensaio		
Densidade	Tensão superficial (γ)	Ângulo de contato	Volume do bulbo	Volume da haste	Pressão de enchimento	Pressão máxima	Tempo de equilíbrio
13,54 g/cm ³	0,485 N/m	130°	5 ml	1,057 ml	1,0 psi	40.000 psi	10 s

Os resultados dos ensaios de porosimetria de mercúrio são apresentados na tabela 15 e correspondem à média de duas determinações. A partir desses resultados, foi possível determinar o diâmetro crítico, que é definido como a menor dimensão de poro acima da qual se estabelece uma trajetória de poros conectados de uma extremidade a outra da amostra (SATO, 1998). Além disso, foi possível detectar a quantidade de mercúrio intrudido em poros acima e abaixo de 50nm. Capilares maiores do que 50nm, denominados macroporos, são considerados os mais nocivos quanto ao transporte de massa, ao passo que poros menores do que 50nm, denominados mesoporos, interferem mais na retração por secagem e na fluência, como declarou Mehta (1994 apud SATO, 1998).

Tabela 15 - Resultados dos ensaios de porosimetria de mercúrio - 91 dias.

Mistura	a/ag	Vol. intr. mL/g	Ø crítico µm	Ø médio poro µm	Porosidade %	Área Total Poro	Ø < 50nm	Ø >50nm
REF	0,35	0,0755	0,0796	0,0345	14,61	14,47	0,0596	0,0159
	0,50	0,1523	0,1217	0,0493	23,52	22,66	0,1037	0,0486
	0,65	0,2236	0,2301	0,0727	31,29	26,69	0,0751	0,1485
5C	0,35	0,0749	0,0644	0,0323	14,04	15,50	0,0554	0,0195
	0,50	0,1571	0,0984	0,0457	24,95	27,08	0,0871	0,0700
	0,65	0,2616	0,2301	0,0644	34,31	33,73	0,1073	0,1543
10C	0,35	0,0722	0,0521	0,0168	12,58	21,65	0,0643	0,0079
	0,50	0,1408	0,0796	0,0349	21,72	30,81	0,1012	0,0396
	0,65	0,2325	0,0984	0,0511	31,98	37,73	0,1174	0,1151
20C	0,35	0,0866	0,0422	0,0126	14,77	30,32	0,0800	0,0066
	0,50	0,1642	0,0797	0,0309	24,99	36,88	0,1280	0,0362
	0,65	0,2619	0,0984	0,0406	29,74	50,85	0,1383	0,1236
30C	0,35	0,0981	0,0342	0,0113	15,98	37,44	0,0935	0,0046
	0,50	0,1615	0,0521	0,0174	24,38	47,52	0,1535	0,0080
	0,65	0,2712	0,0796	0,0245	35,06	59,79	0,1916	0,0796
5SA	0,35	0,0818	0,0422	0,0274	14,92	17,16	0,0719	0,0099
	0,50	0,1462	0,0984	0,0442	23,19	23,85	0,0743	0,0719
	0,65	0,2471	0,1859	0,0609	33,56	30,93	0,0847	0,1624
10SA	0,35	0,0776	0,0521	0,0287	14,92	18,36	0,0699	0,0077
	0,50	0,1566	0,0796	0,0363	23,6	32,31	0,0866	0,0700
	0,65	0,2310	0,0984	0,0454	30,45	41,70	0,1062	0,1248

Na figura 41, são apresentadas as distribuições de volume de poros em função de seus diâmetros. Assim, constata-se, que ao aumentar a relação a/agl e, portanto, a porosidade total, o valor máximo de volume de poros intrudidos ocorreu em diâmetros maiores, comportamento semelhante ao obtido por Sato (1998) em concretos com escória e por Missau (2004) em concretos compostos com CCA. Observa-se aumento no valor do diâmetro crítico e no volume total de intrusão de mercúrio, decorrentes da alteração na distribuição de tamanho de poros e de sua interconexão. Há um deslocamento da curva de distribuição de tamanho de poros no sentido dos poros menores, evidenciando o refinamento desses.

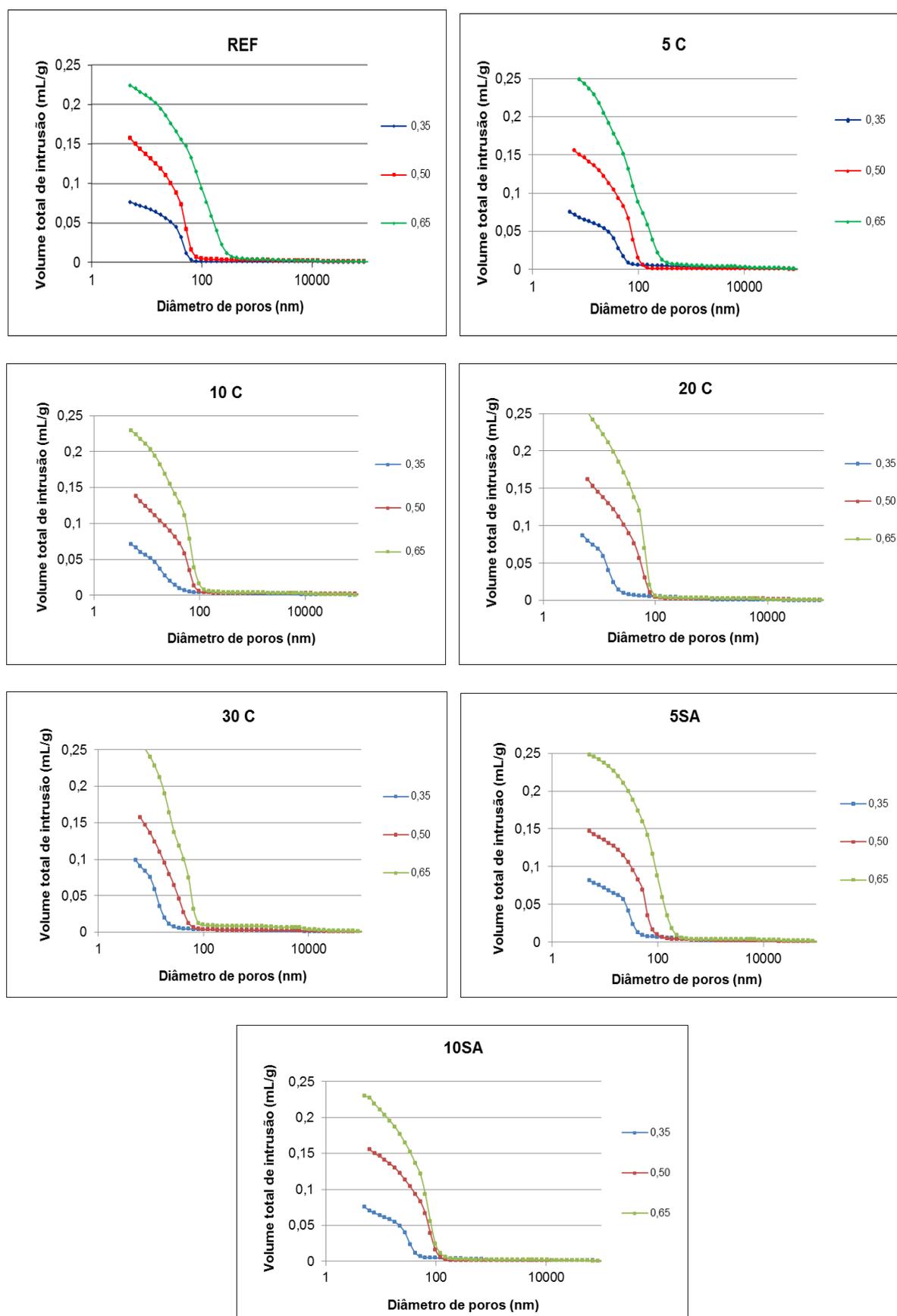


Figura 41 - Volume acumulado de intrusão x Diâmetro de poros.

Quando comparada à REF e à mesma relação a/agl, observa-se alteração no volume total de intrusão, para mais ou para menos, conforme o teor de substituição de cimento pela CCA. No entanto, observa-se também que o aumento do teor de CCA resulta na diminuição do diâmetro médio dos poros e, no geral, do diâmetro crítico.

O aumento do teor de substituição de CCA de 5% para 10% resulta em diminuição no volume total de intrusão de mercúrio e na área total de poro para as três relações a/agl. Entretanto, há um aumento na proporção de poros menores do que 50nm. Quando o teor de substituição de CCA passa para 20% ou 30%, o volume total de intrusão de mercúrio aumenta (a porosidade total também aumenta), quando comparado ao teor de substituição de 5% e 10%. Esse comportamento vai de encontro àquele obtido por Saraswathy e Song (2007), que analisaram misturas compostas com 0%, 5%, 10%, 15%, 20% e 30% de CCA e constataram diminuição na porosidade conforme o aumento no teor de substituição. Contudo, nas misturas investigadas, observa-se que há uma maior proporção de poros menores do que 50nm, ou seja, a maior parte do mercúrio intrudido nessas misturas encontra-se em poros menores do que 50nm, e isso fica evidente pelo aumento na área total de poro. A mistura composta com 30% de CCA apresenta uma área total de poro, para as três relações a/agl, maior do que o dobro da REF e 98%, em média, superior à da mistura composta com 5% de CCA, embora o volume total de intrusão de mercúrio seja, em média, para as três relações a/agl, apenas 12,5% superior ao da REF.

Nas misturas compostas com SA, observa-se, no geral, redução do volume total de intrusão de mercúrio e do diâmetro crítico conforme o aumento do teor de substituição. Esse resultado é contrário ao relatado por Mangat e El-Khatib (1992), que observaram maiores valores de intrusão de mercúrio nas amostras compostas com SA, embora tenham constatado, também, os maiores valores de resistência à compressão.

Observa-se também um aumento na proporção de poros menores do que 50nm, o que justifica o aumento na área total de poro. Quando comparada à REF, a mistura composta com 10% de CCA apresenta volume total de intrusão de mercúrio semelhante, mas diferentes valores de diâmetro crítico e área total de poros.

4.5 Integração dos resultados

O trabalho apresentado é parte de um projeto maior no qual se investigou, além da carbonatação, a absorção capilar, a resistência à compressão, a resistividade elétrica aparente, a retração total e a penetração de cloretos por diferentes métodos. A análise individual de cada ensaio permite verificar o comportamento de cada mistura individualmente e em comparação com as demais misturas investigadas. Com a integração dos resultados, pode-se entender melhor o comportamento das propriedades investigadas, analisando-se o inter-relacionamento existente entre elas. A seguir, serão apresentados o inter-relacionamento entre a carbonatação, a absorção capilar, o volume total de intrusão de mercúrio, o diâmetro crítico e a resistência à compressão.

4.5.1 Comparação entre carbonatação acelerada e absorção capilar

Basheer et al. (2001) comentam que a carbonatação do concreto tem sido correlacionada, por muitos pesquisadores, com a permeabilidade a gases e a absorção de água. Os autores justificam isso pelo fato de o comportamento do concreto estar subordinado à estrutura de poros da camada superficial e, portanto, de sua porosidade e continuidade dos poros capilares. Nessa mesma linha de pensamento, Rabehi et al. (2013) apresentam uma expressão para determinação da profundidade de carbonatação a partir da absorção inicial do concreto.

As figuras 42 e 43 ilustram o inter-relacionamento entre o coeficiente de carbonatação e a absorção capilar da REF e das misturas 10C, 20C, 30C, 10E, 20E, 30E e 10SA, para as relações a/agl de 0,35, 0,50 e 0,65 e para os períodos de cura úmida de três e sete dias. Esses resultados de absorção capilar foram apresentados e discutidos na dissertação de Mostardeiro Neto (2011) (Anexos A e B), o qual utilizou as mesmas misturas e estudou, além da absorção capilar, a resistividade elétrica aparente.

Da análise destes, verifica-se, em todas as misturas, uma evolução do coeficiente de carbonatação devido ao aumento da absorção capilar. Entretanto,

observa-se que, para a REF e as misturas compostas com 10% de CCA ou SA e 20% CCAC, o coeficiente de carbonatação cresce à medida que aumenta a absorção capilar. Para as misturas compostas com maiores teores de CCA (30%) e para aquela com 20% CCAE (maior teor de carbono grafítico), observa-se que o aumento na relação a/agl tem maior influência no coeficiente de carbonatação do que na absorção capilar.

Constata-se, também, que, para um mesmo valor de coeficiente de carbonatação, diferentes valores de absorção capilar podem ser obtidos, em função do tipo de mistura empregada e da relação a/agl adotada.

Stumpp (2003), ao estudar a carbonatação em misturas binárias de CV (50%), CCA (50%), escória de alto-forno (EAF) (70%) e em misturas ternárias de CV+CAL (50+15%), CCA+CAL (50+18%), EAF+CAL (70+15%), CV+CCA (50+20%), CV+E (20+70%), observou uma correlação entre os coeficientes de carbonatação e a absorção capilar. O autor verificou que o ensaio de absorção capilar fornece uma medida da porosidade aberta do concreto, ou seja, a medida dos poros mais superficiais do concreto. Quanto maior for a porosidade aberta das misturas, maior será a difusão inicial de CO_2 e maiores as profundidades carbonatadas e os coeficientes de carbonatação. No caso do uso da adição de cal, foi observada uma redução dos coeficientes de carbonatação e dos coeficientes de absorção das misturas com adições minerais.

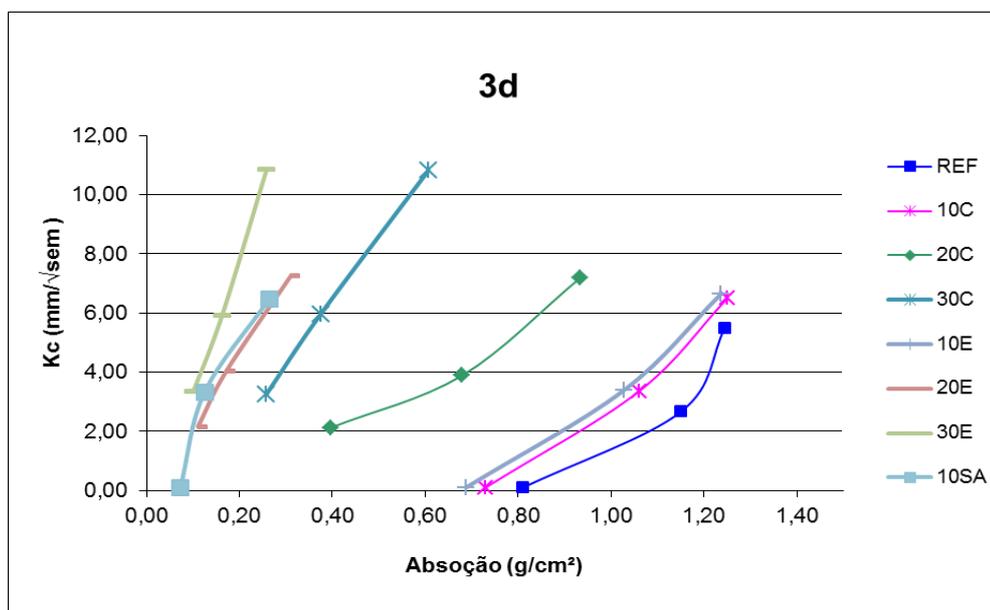


Figura 42 - Coeficiente de carbonatação x absorção capilar - três dias de cura.

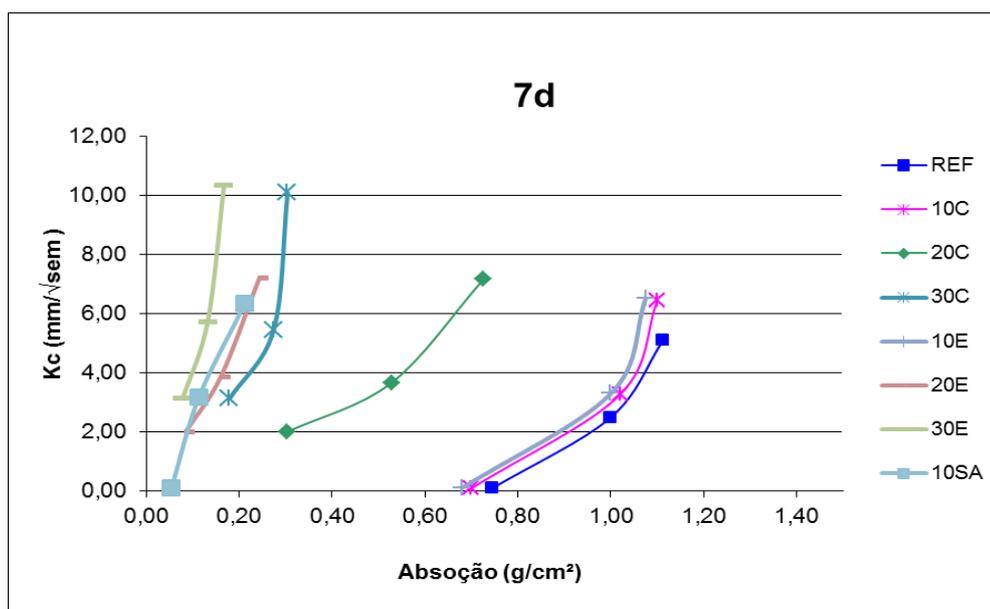


Figura 43 - Coeficiente de carbonatação x absorção capilar - sete dias de cura.

4.5.2 Comparação entre carbonatação acelerada, volume total de intrusão de mercúrio e diâmetro crítico.

As figuras 44 e 45 apresentam uma correlação entre o volume total de intrusão de mercúrio e o coeficiente de carbonatação, para todas as misturas estudadas. Observou-se aumento no coeficiente de carbonatação à medida que se aumentou o volume total de intrusão de mercúrio. Contudo, verificou-se, para um mesmo volume de intrusão de mercúrio, diferentes valores de coeficientes de carbonatação, o que mostra que este fenômeno, além de estar relacionado à estrutura dos poros, depende também da composição química dos aglomerantes, pois, de acordo com seu teor de cálcio, haverá formação de maior ou menor quantidade de hidróxido de cálcio, o qual influenciará diretamente o pH do concreto.

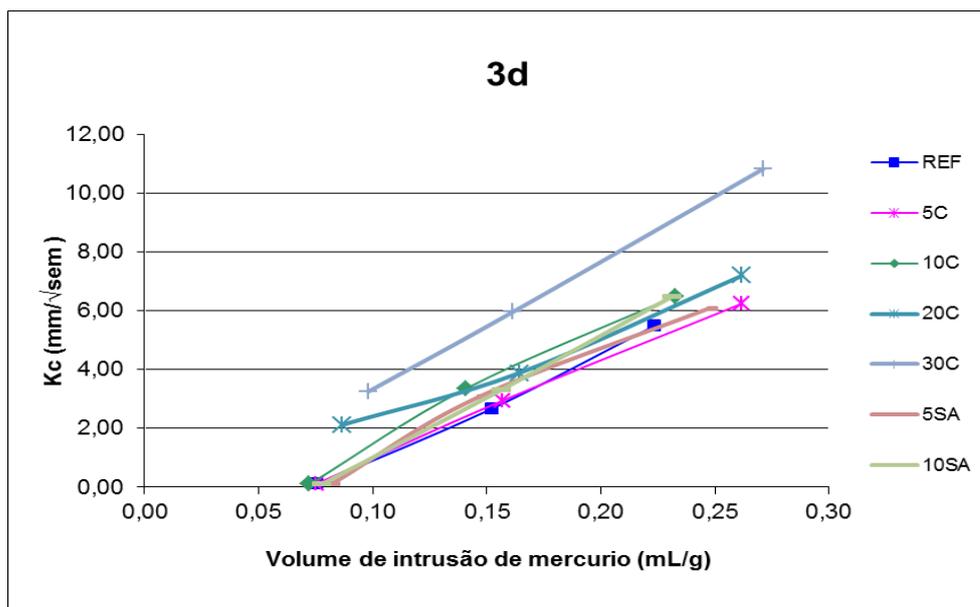


Figura 44 - Coeficiente de carbonatação x volume de intrusão de mercúrio - três dias de cura.

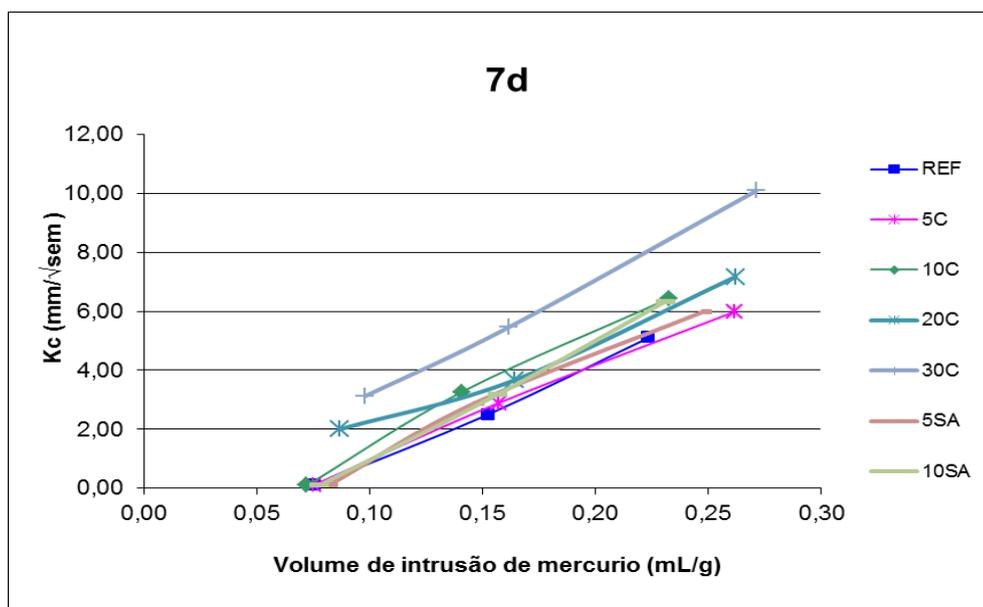


Figura 45 - Coeficiente de carbonatação x volume de intrusão de mercúrio - sete dias de cura.

As figuras 46 e 47 ilustram o inter-relacionamento entre o coeficiente de carbonatação e o diâmetro crítico dos poros das misturas investigadas aos 91 dias. Com base na análise dessas figuras, verifica-se, em todas as misturas, uma redução do coeficiente de carbonatação com a redução do diâmetro crítico. Isso ocorre devido ao diâmetro crítico e ao coeficiente de carbonatação diminuírem com a diminuição da relação a/agl . Essa redução apresenta-se de maneira semelhante tanto para o concreto de referência como para os concretos compostos com CCA e SA.

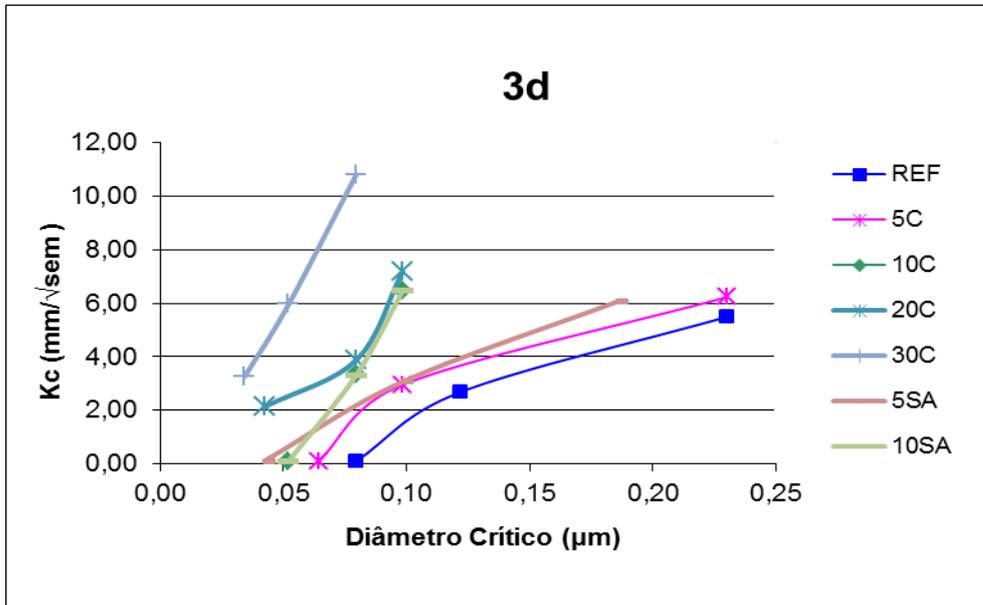


Figura 46 - Coeficiente de carbonatação x diâmetro crítico – três dias de cura.

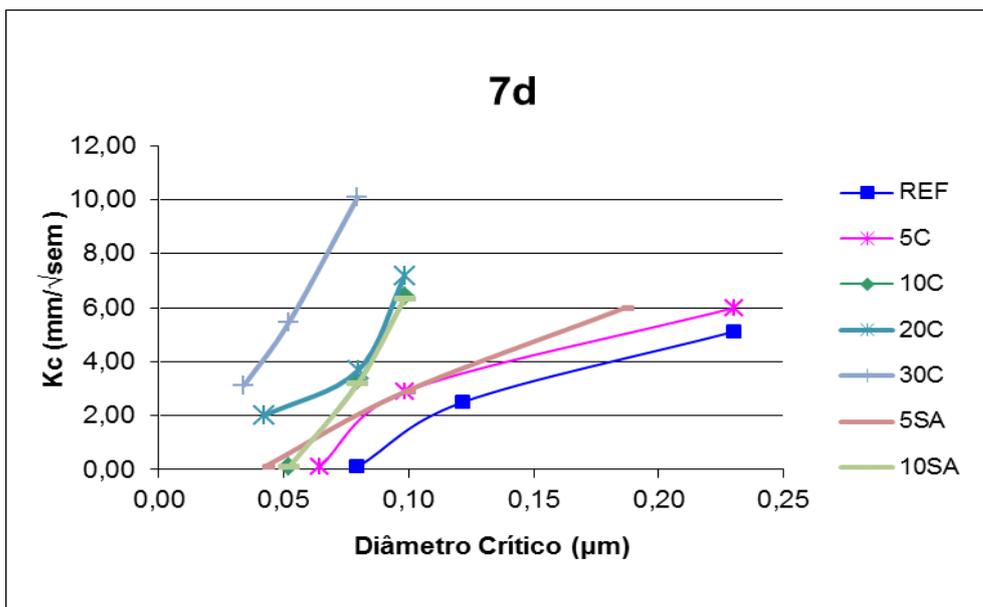


Figura 47 - Coeficiente de carbonatação x diâmetro crítico - sete dias de cura.

Dessa forma, constata-se que, para um mesmo valor de coeficiente de carbonatação, diferentes valores de volume de intrusão de mercúrio e diâmetro crítico podem ser observados, evidenciando diferentes microestruturas de cada mistura empregada.

4.5.3 Comparação entre carbonatação acelerada e resistência à compressão

As figuras 48 e 49 ilustram o inter-relacionamento entre o coeficiente de carbonatação e a resistência à compressão axial das misturas investigadas, para os dois prazos de cura, aos 91 dias. Da análise dessas figuras, é possível verificar, em todas as misturas, uma evolução do coeficiente de carbonatação devido à diminuição da resistência à compressão com uma relação entre as duas propriedades. Isso se deve à forte influência da relação a/a_{gl} e da estrutura dos poros comum às duas propriedades.

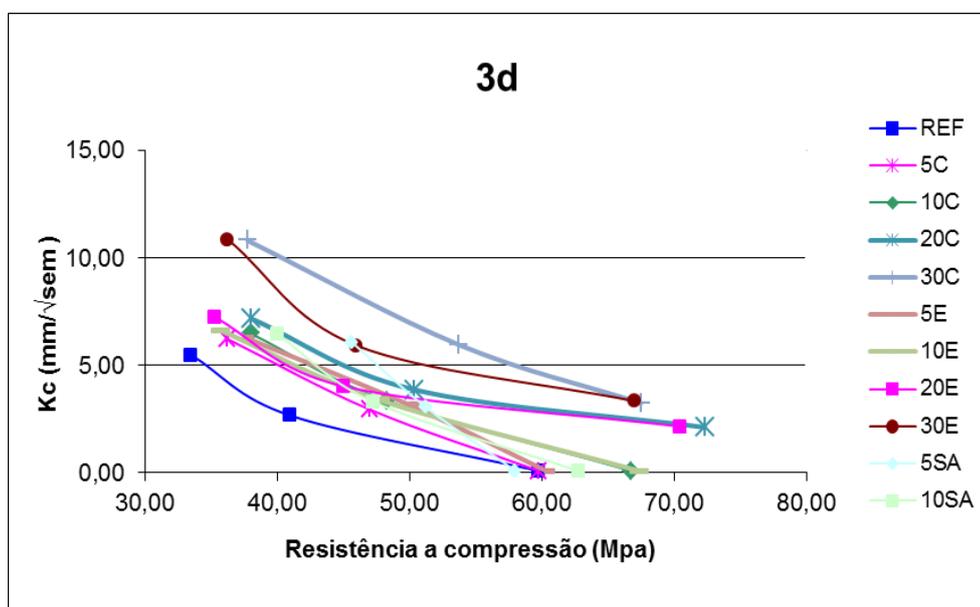


Figura 48 - Coeficiente de carbonatação x resistência à compressão - três dias de cura.

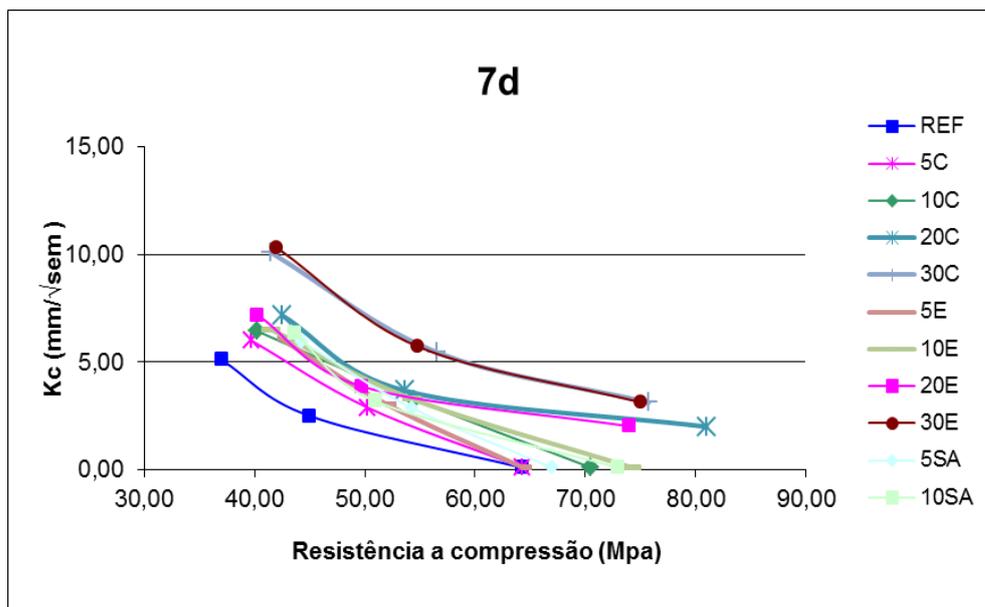


Figura 49 - Coeficiente de carbonatação x resistência à compressão - sete dias de cura.

A partir da análise das figuras 48 e 49, pode-se constatar que, para uma determinada resistência à compressão, diferentes valores de coeficiente de carbonatação podem ser obtidos a partir dos concretos analisados. Isso demonstra que, quando se trata da durabilidade da estrutura de concreto, não se pode considerar apenas a sua resistência mecânica, mas também todas as demais propriedades que, de alguma maneira, influenciam a durabilidade do concreto.

4.5.4 Comparação entre resistência à compressão e volume total de intrusão de mercúrio

Com o objetivo de verificar a relação existente entre a resistência à compressão e o volume de intrusão de mercúrio, foram elaborados os gráficos apresentados nas figuras 50 e 51, a partir dos quais é possível constatar que há uma boa correlação entre eles, indicando que os resultados de resistência à compressão podem ser relacionados com o volume de mercúrio intrudido.

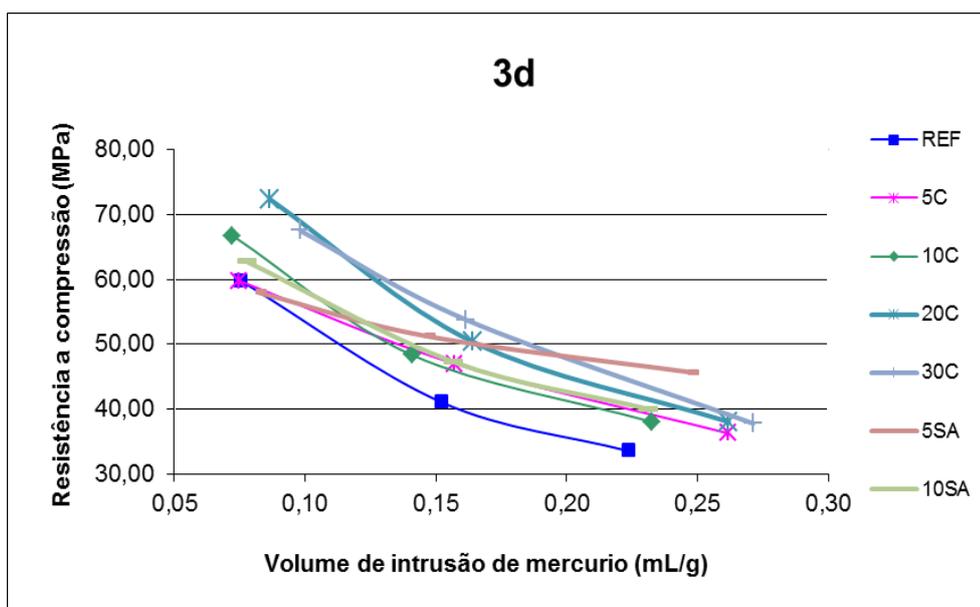


Figura 50 - Resistência à compressão x volume de intrusão de mercúrio das misturas investigadas - três dias de cura.

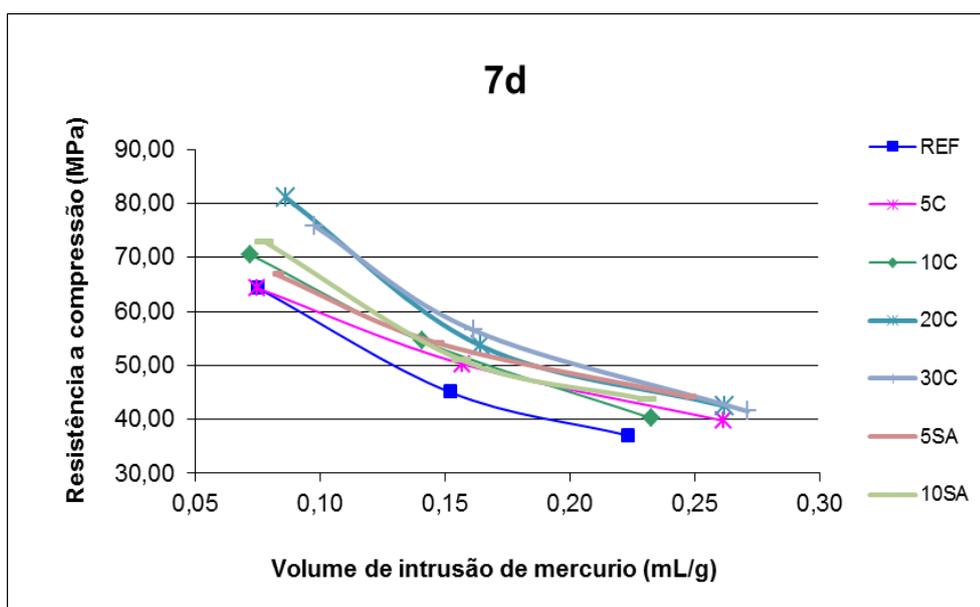


Figura 51 - Resistência à compressão x volume de intrusão de mercúrio das misturas investigadas - sete dias de cura.

Com base na análise das figuras 50 e 51, verifica-se, também, que para um mesmo volume de mercúrio intrudido são obtidos diferentes valores de resistência à

compressão, fato que pode ser explicado por diferenças na distribuição de tamanho de poros das misturas aglomerantes investigadas.

Jambor (1990) relata que, para um mesmo volume de produtos de hidratação e para a mesma porosidade total, os valores absolutos de resistência de várias pastas de cimento podem ser diferentes devido aos vários tipos e às várias propriedades dos produtos de hidratação, suas proporções na pasta e suas diferentes capacidades de ligação.

Takemoto e Uchikawa (1980) verificaram que, para determinado cimento pozolânico, a resistência à compressão tem boa correlação com a porosidade total. Entretanto, para pozolanas distintas, o desenvolvimento da resistência é diferente mesmo que a porosidade total seja a mesma. A resistência é influenciada não só pela porosidade total mas também pela distribuição de tamanho de poros e pela forma dos poros.

Segundo Mehta (1986), do ponto de vista da modelagem resistência x porosidade, parece haver várias dificuldades insuperáveis. A primeira delas seria a natureza intrínseca das forças de ligação, tanto entre os vários produtos de hidratação quanto entre as fases não hidratadas, permanecendo indeterminado. A segunda dificuldade seria o fato de que, embora do ponto de vista da resistência pareça razoável subdividir a distribuição de poros em duas categorias (os poros que afetam negativamente a resistência e os poros que não a afetam), essa tarefa não é fácil porque não há consenso sobre uma linha divisória bem delimitada entre as duas classes de poros.

5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa teve como objetivo avaliar o desempenho de concretos de cimento Portland (CPV-ARI) com adição de cinza de casca de arroz (CCA) com diferentes teores de carbono gráfico, frente à carbonatação acelerada. Os concretos foram produzidos com teores de substituição parcial de 5%, 10%, 20% e 30%, em relação à massa de cimento, e comparados com misturas de sílica ativa (SA), em teores de substituição de 5% e 10%, e também com a mistura de referência (REF) (sem adições minerais). Para todas as misturas, foram utilizadas relações a/agl de 0,35, 0,50 e 0,65 e períodos de cura em câmara úmida de três e sete dias. Analisou-se, comparativamente, o desempenho entre as adições minerais e seus respectivos teores de substituição, a relação a/agl e o período de cura úmida em relação à carbonatação acelerada.

Em todas as misturas foi verificado o mesmo comportamento: quanto maior a relação a/agl , mais rápida a propagação da carbonatação. Essa variável está relacionada à compactidade do concreto, ou seja, quanto maior a porosidade, mais rápido será o ingresso do dióxido de carbono (CO_2) na matriz cimentícia.

A REF foi a mistura que apresentou os menores valores do coeficiente K_c , dentre todas as misturas, independentemente da relação a/agl e do período de cura, ou seja, apresentou o melhor desempenho frente à carbonatação. Além disso, constatou-se que o maior valor de K_c foi o da mistura 30E com relação a/agl 0,65 e período de cura de três dias ($10,87 \text{ mm}/\sqrt{\text{semana}}$).

De acordo com os resultados, pode-se perceber a grande influência da relação a/agl sobre o coeficiente de carbonatação K_c , chegando a uma redução de 95% no valor de K_c na mistura 20C (7d) quando a relação a/agl diminuiu de 0,65 para 0,50, indicando que relações a/agl mais baixas proporcionam concretos com menor penetrabilidade.

Ao comparar a cinza de casca de arroz clara (CCAC) com a cinza de casca de arroz (CCA), mantendo fixa a relação a/agl , o teor de substituição e o período de cura, observou-se que, apesar da pequena diferença entre os valores dos coeficientes de carbonatação K_c , há, de modo geral, melhor desempenho da CCAC na maior parte dos resultados obtidos. O melhor resultado da CCAC pode ser creditado a um maior efeito químico do que físico devido ao maior teor de sílica e ao

menor teor de carbono grafítico apresentado por essa cinza, que é nove vezes inferior ao da CCAE. Já os concretos com sílica ativa apresentaram os menores valores de K_c nos dois teores de substituição, 5% e 10%, quando comparados aos compostos com CCAC e CCAE e quando se aumenta o teor de sílica ativa de 5% para 10%, há um aumento médio no valor de K_c de 7% para os períodos de cura de três e sete dias.

O aumento do período de cura de três para sete dias reduziu os valores dos coeficientes de carbonatação K_c para todas as misturas. Porém, essas não variaram linearmente, ou seja, não apresentaram uma tendência geral.

Na comparação entre as misturas com e sem adição, percebeu-se que à medida que o teor de adição foi adicionado e aumentado houve um aumento nos coeficientes de carbonatação, demonstrando que, apesar de promover melhorias na estrutura dos poros, tornando-a mais densa e compacta, o uso de adições minerais consome o hidróxido de cálcio nas reações pozolânicas, e, com isso, o pH do concreto é rebaixado a níveis que permitem a instalação do mecanismo da carbonatação.

Para as misturas estudadas nesta pesquisa, concluiu-se que o efeito predominante é o teor de hidróxido de cálcio (CH), o qual ao ser rebaixado, reduziu o pH do concreto, permitindo que o mecanismo da carbonatação fosse instalado. A partir disso, o avanço da frente de carbonatação foi definido pelo teor de adição, relação a/agl .

A análise dos coeficientes de carbonatação em igualdade de resistência aos 40MPa e 50MPa permitiu constatar que existem variações na relação a/agl para um mesmo nível de resistência, de acordo com o tipo de mistura e o período de cura investigados. Portanto, concretos com a mesma resistência podem apresentar durabilidades distintas, uma vez que a relação a/agl é um dos principais fatores que influência a microestrutura do concreto

Dentre as misturas, observou-se que, para os dois níveis de resistência analisados, a REF (três dias) obteve o melhor desempenho. Isso se deu, possivelmente, devido à sua baixa relação a/agl , 0,49 e 0,38, para 40MPa e 50MPa, respectivamente. Para o nível de 40MPa, a mistura 10SA apresentou as maiores relação a/agl 0,59 e 0,65, para três e sete dias de cura. Já para o nível de 50MPa, a

mistura 5SA apresentou as maiores relações a/agl 0,41 e 0,48, para três e sete dias de cura.

Verificou-se, ainda, que as misturas com pozolanas, para um mesmo nível de resistência à compressão, apresentaram coeficientes de carbonatação superiores ao concreto de referência, estando essa ocorrência associada à maior reserva alcalina proporcionada somente pelo cimento Portland (CP).

Em igualdade de resistência, para ambos os níveis, a REF apresentou os menores valores de coeficientes K_c . Já as misturas com maiores teores de substituição (30CCAC, 30CCAE e 10SA) obtiveram os maiores valores de K_c , dentre todas as misturas analisadas.

Por meio da análise do volume total intrudido, foi constatado que, à medida que aumentou a relação a/agl 0,35 para 0,50 e 0,65, cresceu a porosidade total. Assim, constatou-se que, ao aumentar a relação a/agl e, portanto, a porosidade total, o valor máximo de volume de poros intrudidos ocorreu em diâmetros maiores.

Verificou-se o aumento do valor do diâmetro crítico e do volume total de intrusão de mercúrio, decorrentes da alteração na distribuição de tamanho de poros e de sua interconexão. Houve um deslocamento da curva de distribuição de tamanho de poros no sentido dos poros menores, evidenciando o seu refinamento.

Na comparação entre a REF e a mesma relação a/agl, percebe-se que a alteração no volume total de intrusão, para mais ou para menos, conforme o teor de substituição de cimento pela CCA. Contudo, verificou-se que o aumento no teor de CCA resulta na diminuição do diâmetro médio dos poros e, no geral, do diâmetro crítico.

No que se refere ao teor de substituição de CCA, foi observado que, quando o teor de substituição passa para 20% ou 30%, o volume total de intrusão de mercúrio aumenta, se comparado ao teor de substituição de 5% e 10%. Esse comportamento permitiu constatar que há diminuição na porosidade com o aumento do teor de substituição.

Verificou-se, também, que, no geral, houve um aumento na proporção de poros menores do que 50nm, o que justifica o aumento na área total do poro. Quando comparado à REF, a mistura composta com 10% de CCA apresenta volume total de intrusão de mercúrio semelhante, mas apresenta diferentes valores de diâmetro crítico e área total de poros.

Na comparação entre a absorção capilar e o coeficiente de carbonatação, percebeu-se, em todas as misturas, uma evolução do coeficiente de carbonatação devido ao aumento da absorção capilar. Contudo, verificou-se que, para a REF e para as misturas compostas com 10% de CCA ou SA e 20% de cinza de casca de arroz clara (CCAC), o coeficiente de carbonatação cresce mais acentuadamente à medida que aumenta a absorção capilar. Para as misturas compostas com maiores teores de CCA (30%) e para aquela com 20% cinza de casca de arroz escura (CCAЕ), o aumento na relação a/agl tem uma influência maior no coeficiente de carbonatação do que na absorção capilar.

Na comparação entre o volume total de intrusão de mercúrio e o coeficiente de carbonatação, percebeu-se o aumento do coeficiente de carbonatação à medida que aumentou o volume total de intrusão de mercúrio. Porém, verificou-se, para um mesmo volume de intrusão de mercúrio, diferentes valores de coeficientes de carbonatação, o que demonstra que este fenômeno, além de estar relacionado à estrutura dos poros, depende também da composição química dos aglomerantes, pois, de acordo com seu teor de cálcio, haverá formação de maior ou menor quantidade de hidróxido de cálcio, que influenciará diretamente o pH do concreto.

Quanto à comparação entre coeficiente de carbonatação e o diâmetro crítico dos poros das misturas investigadas aos 91 dias, percebeu-se redução do coeficiente de carbonatação com a redução do diâmetro crítico em todas as misturas. Isso ocorreu devido ao diâmetro crítico e ao coeficiente de carbonatação diminuírem com a diminuição da relação a/agl . Essa redução apresenta-se de maneira semelhante, tanto para o concreto de referência como para os concretos compostos com CCA e SA.

Dessa forma, constatou-se que, para um mesmo valor de coeficiente de carbonatação, diferentes valores de volume de intrusão de mercúrio e diâmetro crítico podem ser observados, evidenciando diferentes microestruturas de cada mistura empregada.

Em relação à comparação entre coeficiente de carbonatação e a resistência à compressão, percebeu-se que, em todas as misturas, houve uma evolução do coeficiente de carbonatação devido à diminuição da resistência à compressão com uma relação entre as duas propriedades. Verificou-se, também, que, para determinada resistência à compressão, diferentes valores de coeficiente de

carbonatação podem ser obtidos a partir dos concretos analisados. Isso indica que, quando se trata da durabilidade da estrutura de concreto, não se pode considerar apenas a sua resistência mecânica, é preciso também considerar as demais propriedades que, de alguma maneira, influenciam a durabilidade do concreto.

5.1 Sugestões para pesquisas futuras

Com ênfase no uso de CCA no concreto, em substituição parcial ao cimento, sugere-se uma continuidade no estudo de propriedades relacionadas à durabilidade do concreto como: ensaios de resistência à sulfatos, inibição da reação álcali-agregado, calorimetria de condução.

REFERÊNCIAS

AÏTCIN, P. C. **High-Performance Concrete**. New York: E & FN Spon, 1998.

ANJOS, R. D., ISMAEL M.R., RAMAL JR, F.T, PANDOLFELLI, V.C. Adição de SA e a secagem de concretos refratários. **Cerâmica**, v. 50, p.331-335, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733**. Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991a.

_____. **NBR 5738**. Moldagem e cura de corpos-de-prova de concreto cilíndricos ou prismáticos. Rio de Janeiro, 2003e.

_____. **NBR 6118**. Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. ABNT. Rio de Janeiro. 2007.

_____. **NBR 7809**. Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2006a.

_____. **NBR 10004**. Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2004a.

_____. **NBR 11579**. Cimento Portland - Determinação da finura por meio da peneira 75 micrômetros (número 200). Rio de Janeiro, 1991b.

_____. **NBR 12655**. Concreto de cimento Portland: Preparo, controle e recebimento - Procedimento. Rio de Janeiro, 2006b.

_____. **NBR 13956**. Sílica ativa para uso em cimento Portland, concreto, argamassa e pasta de cimento Portland - Especificação. Rio de Janeiro, 1997a.

_____. **NBR 13957**. Sílica ativa para uso em cimento Portland, concreto, argamassa e pasta de cimento Portland - Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 1997b.

_____. **NBR NM 10**. Cimento Portland - Análise química – Disposições gerais. Rio de Janeiro, 2004b.

_____. **NBR NM 11-1.** Cimento Portland - Análise química - Método optativo para determinação de óxidos principais por complexometria - Parte 1: Método ISO. Rio de Janeiro, 2004c.

_____. **NBR NM 12.** Cimento Portland - Análise química - Determinação de óxido de cálcio livre. Rio de Janeiro, 2004c.

_____. **NBR NM 13.** Cimento Portland - Análise química - Determinação de óxido de cálcio livre pelo etileno glicol. Rio de Janeiro, 2004d.

_____. **NBR NM 14.** Cimento Portland - Análise química - Método de arbitragem para determinação de dióxido de silício, óxido férrico, óxido de alumínio, óxido de cálcio e óxido de magnésio. Rio de Janeiro, 2004d.

_____. **NBR NM 15.** Cimento Portland - Análise química - Determinação de resíduo insolúvel. Rio de Janeiro, 2004e.

_____. **NBR NM 16.** Cimento Portland - Análise química - Determinação de anidrido sulfúrico. Rio de Janeiro, 2004f.

_____. **NBR NM 17.** Cimento Portland - Análise química - Método de arbitragem para a determinação de óxido de sódio e óxido de potássio por fotometria de chama. Rio de Janeiro, 2004g.

_____. **NBR NM 18.** Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2004h.

_____. **NBR NM 19.** Cimento Portland - Análise química - Determinação de enxofre na forma de sulfeto. Rio de Janeiro, 2004i.

_____. **NBR NM 21.** Cimento Portland - Análise química - Método optativo para a determinação de dióxido de silício, óxido de alumínio, óxido férrico, óxido de cálcio e óxido de magnésio. Rio de Janeiro, 2004j.

_____. **NBR NM 23.** Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação de massa específica. Rio de Janeiro, 2004k.

_____. **NBR NM 26.** Agregados - Amostragem. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 43.** Cimento Portland - Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2002.

_____. **NBR NM 45.** Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006b.

_____. **NBR NM 52.** Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2003b.

_____. **NBR NM 53.** Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2003c.

_____. **NBR NM 65.** Cimento Portland - Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2003a.

_____. **NBR NM 76.** Cimento Portland - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine). Rio de Janeiro, 1998.

_____. **NBR NM 248.** Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003d.

BASHER.L, KROPP.J, CLELAND.D.J. **Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: a review.** Construction and Building Materials, 15.p.93-103. 2001

CARMO, J. B. M. **Análise comparativa do desempenho de concretos compostos com SA e Metacaulins face à resistência mecânica e à viabilidade econômica.** 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas.** Goiânia. UFG; São Paulo: Pini, 1997.

CASCUDO, O. Inspeção e diagnóstico de estrutura de concreto com problemas de corrosão da armadura. In: ISAIA, G. C (Org.). **Concreto: ensino, pesquisa e realizações.** 2v. ed. São Paulo: IBRACON, 2005.

CASTRO, A. **Influência das adições minerais na durabilidade do concreto sujeito à carbonatação**. 2003. 237 f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Goiás, Goiás, 2003.

CEUKELAIRE, L. D.; NIEUWENBURG, D.V. Accelerate carbonation of blastfurnace cement concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 23, p. 442 – 452, 1993.

CHANDRASEKHAR, S. et al. Processing, properties and applications of reactive silica from rice husk – an overview. **Journal of Materials Science**, v. 38, pp. 3159 – 3168, 2003.

COLLEPARDI, M., COLLEPARDI, S., OGOUMAH OLAGOT, J., J., SIMONELLI, F. **The Influence of Slag and Fly Ash on the Carbonation of Concretes**. Proceedings of Eighth CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Las Vegas, USA, 23-29 May, pp.483-494. SP221-29. 2004.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução Conama Nº 005, de 05 de agosto de 1993**. Disponível em: <<http://www.areaseg.com/conama/1993/005-1993.pdf>>. Acesso em: 4 ago. 2010.

CONAB. **Companhia Nacional do Abastecimento**. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/14_01_10_10_12_36_boletim_portugues_dezembro_2013.pdf>. Acesso em: 13 jan. 2014.

CORDEIRO, L. N. P. **Análise da variação do índice de amorfismo da cinza de casca de arroz sobre a atividade pozolânica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

COSTA, A. **Anomalias e Mecanismos de deterioração**. Módulo 2. Apontamentos da Cadeira de Reabilitação e Reforço Estrutural. Instituto Superior Técnico, 1999.

DA SILVA, M. P. **Retração total e penetração de cloretos de concretos compostos com cinza de CCA de diferentes teores de carbono**. 2012. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)– Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

DAFICO, D. A. **Estudo da dosagem do concreto de alto desempenho utilizando pozolanas provenientes da casca de arroz**. 2001. 191p. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2001.

DAFICO, D. A., PRUDÊNCIO JUNIOR, L. R. Um estudo visando a identificação das condições de queima da casca de arroz para produção de pozolana branca. In: IX ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA NO AMBIENTE CONSTRUÍDO

ARTIGO TÉCNICO, 9., 2002, Foz de Iguaçu, **Anais...** Foz do Iguaçu: 2002. p. 1671-1680.

DAL MOLIN, D. C. C. **Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com adição de microssílica.** 1995. Tese (Doutorado em engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

FATTUHI, N.F. Carbonation of concrete as affected by mix constituents and initial water curing period. **Matériaux et Constructions**, v.19, n.110, p.131 – 136, 2002.

FRIZZO, B. T. **Influência do teor e da finura de pozolanas na permeabilidade ao oxigênio e na absorção capilar do concreto.** 2001. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2001.

GASTALDINI, A. L. G. Influência das adições minerais na porosidade de pastas de cimento Portland. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIMENTO, 4., 1996, São Paulo. **Anais...** Porto Alegre: ABCP, 1996. p. 119-136.

GASTALDINI A. L. G., ISAIA GC, GOMES NS, SPERB, JEK. Chloride penetration and carbonation in concrete with rice husk ash and chemical activators. **Cement Concrete Composites**, v. 29, n. 3, p. 176-180, 2007.

GOÑI, A., ALONSO, C., MENENDEZ, E., HIDALGO, A., ANDRADE, C. **Microstructural characterization of the carbonation of mortar made with fly ashes.** In: JUSTNES, H. (ed.) International Congress on the Chemistry of Cement, 10th, Gothenburg, Sweden, 1997. Proceedings. Göteborg: Amarkai AB, 1997 4 v., v. 4, 4iv004.

GRID ARENDAL. **Past and future CO2 concentrations.** Disponível em: <http://www.grida.no/graphicslib/detail/past-and-future-co2-concentrations_a92d#>. Acesso em: 15 Jan. 2013.

GUEDERT, L. O. **Estudo da Viabilidade Técnica e Econômica do Aproveitamento da Cinza de Casca de Arroz como Material Pozolânico.** 1989.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1989.

HELENE, P. R. L. e TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto.** São Paulo, 1992.

HELENE, P.R.L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado.** 1993. 271f. Tese (Livre Docência em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – EPUSP, São Paulo, 1993.

HELENE, Paulo R.L. **Corrosão em Armaduras para Concreto Armado.** São Paulo, PINI, IPT, 1986.

HELENE, P. R. L.; MITIDIARI, C. V.; THOMAZ, E. **Influência do tipo de cimento e da relação a/c na carbonatação do concreto: estimativa da vida útil de projeto.** São Paulo: IBRACON, 1995.

HOFFMANN, A. T. **Influência da adição de SA, relação água aglomerante, temperatura e tempo de cura no coeficiente de difusão de cloretos em concretos.** 2001. 143f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

HOPPE, A. E. **Carbonatação em Concreto com Cinza de Casca de Arroz sem Moagem.** 2008, 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

HOPPE, T. F. **Resistividade Elétrica de Concretos Contendo Diferentes Teores de Cinza de Casca de Arroz.** 2005, 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

HOUSTON, D. F. Rice: Chemistry and Technology. **American Association of Cereals Chemistry**, Minnesota, p. 301-352, 1972.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Levantamento sistemático da produção agrícola.** Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/lspa/lspa_201312_9.shtm>. Acesso em: 11 jan. 2014.

ISAIA, G. C. **Efeitos das Misturas Binárias e Ternárias de Pozolanas em Concreto de Elevado Desempenho: um estudo de Durabilidade com vistas à Corrosão da Armadura**. 1995, 280 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

ISAIA, G.C.; GASTALDINI, A. L. Concreto “verde” com teores muito elevados de adições minerais: um estudo de sustentabilidade. In: Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável e Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 1., 10., 2004, São Paulo. **Anais...** São Paulo, 2004.

ISAIA, G. C.; VAGHETTI, M. A.; GASTALDINI, A. L. Efeito de misturas pozolânicas sobre a carbonatação do concreto de cimento Portland. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 40., 1998, Rio de Janeiro. **Anais...** São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 1998.

ISAIA, G. C.; VAGHETTI, M.; GASTALDINI, A. Carbonatação acelerada e natural de concreto com alto teor de pozolanas: um estudo preliminar. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 43. 2001, Foz de Iguaçu. **Anais...** São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2001.

JAMBOR, J. Pore structure and strength development of cement composites. **Cement and Concrete Research**, v.20, p.948-954, 1990.

KAZMIERCZAK, C. S.; HELENE, P. R. L. **Análise e fatores que influenciam a velocidade de carbonatação em estruturas de concreto armado**. Controle de Qualidade do concreto. Processos construtivos em obras de Concreto. Brasília: IBRACON, 1993.

KAZMIERCZAK, C. S. **Contribuição para a análise da eficiência de películas aplicadas sobre estruturas de concreto armado com o objetivo de proteção contra a carbonatação**. 1995. 68 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

KULAKOWSKI M, PEREIRA F, DAL MOLIN D. Carbonation-induced reinforcement corrosion in silica fume concrete. **Construction and Building Materials**, v. 23, p. 1189–1195, 2009.

MANGAT, P. S.; EL-KHATIB, J. M. Influence of initial curing on pore structure and porosity of blended cement concretes. In: MALHOTRA, V. M. (Ed.) FLY ASH, SILICA FUME, SLAG AND NATURAL POZZOLANS IN CONCRETE. ACI INTERNATIONAL CONFERENCE, 4., Istanbul, 1992. **Proceedings**. Detroit: American Concrete Institute, 1992.

MARTINELLI, L. A. **Carbonatação Natural de Protótipos de Concreto com Cinza de Casca de Arroz**. 124 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

MATALA, S. **Carbonation mechanisms in the granulated blast furnace slag concrete**. In: JUSTNES, H. (Ed.) INTERNATIONAL CONGRESS ON THE CHEMISTRY OF CEMENT, 10., Gothenburg, 1997. **Proceedings**. Gothenburg: Amarkai AB, 1997.

MEHTA, P. K. **Hardened Cement Paste – Microstructure and its Relationship to Properties**. INTERNATIONAL CONGRESS ON THE CHEMISTRY OF CEMENT, 8., 1986, Rio de Janeiro, 1989.

MEHTA, P.K. **Pozzolanic and cementitious by-products in concrete**. Another look. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLY ASH, SILICA FUME, SLAG, AND NATURAL POZOLANS IN CONCRETE, 3., 1989, Trondheim, Norway. **Proceedings**. Detroit: American Concrete Institute, 1989. v.1, p. 1-44 (ACI Special Publication, 114)

MEHTA, P. K. **Hardened Cement Paste – Microstructure and its Relationship to Properties**. International Congress on the Chemistry of cement, 8 th, 1986, Rio de Janeiro, Brazil

MEHTA, P. K. **Rice husk ash: a unique supplementary cementing material**. In: MALHOTRA, V. M. (Ed.). **Advances in concrete technology**. Ottawa: Canmet, 1992. p. 403- 431.

MEHTA, P. K; MALHOTRA, L V. M. **Pozzolanic and cementitious materials - advances in concrete technology**. Amsterdam: Gordon and Breach, 1996.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 2008.

MITCHELL, D. R. G.; HINCKZAK, I.; DAY, R. A. Interaction of silica fume with calcium hydroxide solutions and hydrated cement pastes. **Cement and Concrete Research**, v. 28, n. 11, p. 1571–1584, 1998.

MISSAU, F. **Penetração de cloretos em concretos contendo diferentes teores de cinza de casca de arroz**. 2004, 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

MOSTARDEIRO NETO, C. Z. **Absorção capilar e resistividade elétrica de concretos compostos com cinza de casca de arroz de diferentes teores de carbono grafítico**. 2011, 167 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

NEVILLE, A. M; BROOKS, J. J. **Concrete technology**. Longman Group UK Ltd, 1993.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2. Ed. São Paulo: Pini, 1997.

NITZKE, J. A.; BIEDRZYCKI, A. **Terra de arroz: grão de arroz**, 2004. Disponível em: <http://www8.ufrgs.br/alimentus/terradearroz/grao/gr_divisao.htm>. Acesso em: 5 out. 2013.

PAPADAKIS, V. G.; VAYENAS, C. G.; FARDIS, M.N. Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation. **ACI Materials Journal**, p. 363 – 373, Jul./Aug., 1991.

PAPADAKIS, V. G.; VAYENAS, C. G.; FARDIS, M. N. Effect of composition, enviromantal factors and cement-lime mortar coating on concrete carbonation. **Materials and Structures**, v. 25, p. 293 - 304, 1992.

PARROT, L.J. **Carbonation of concrete: a review**. Cement and Concrete Association, 1987.

PARROT, L.J. Damage caused by carbonation of reinforced concrete. **Materials and Structures / Matériaux et Constructions**, v. 23, p. 230 - 234, 1990.

PARROT, L.J. Moisture conditioning and transport properties of concrete test specimens. **Materials and Structures**, v. 24, p. 460 - 468, 1994.

PAULETTI.,C. **Análise comparativa de procedimentos para ensaios de carbonatação**. Porto Alegre, 178p.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul ,UFRGS, 2004.

POUEY, M. T. F. **Beneficiamento da cinza de casca de arroz residual com vistas à produção de cimento composto e/ou pozolânico**. 2006. 345f. Tese Doutorado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

PRUDÊNCIO JUNIOR, L. R.; SANTOS, S.; DAFICO, D. A. Utilização de Resíduos na Construção Habitacional. **Coletânea Habitare**, v. 4, Porto Alegre, 2003.

RABEHI.M, MEZGHICHE.B, GUETTALA.S. **Correlation between initial absorption of the cover concrete, the compressive strength and carbonation depth**. *Construction and Building Materials* 45.p.123-129.2013

REAL, C.; ALCALÁ, M. D.; CRIADO, J. M. Preparation of silica from rice husks. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 79, n. 8, p. 2012-2016, 1996.

RÊGO, J. H. S. **As cinzas de casca de arroz (CCAs) amorfa e cristalina como adição mineral ao cimento** – aspectos de microestrutura das pastas. 2004. 274f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade de Brasília, Brasília, 2004.

RILEM. Recommendations of TC 116-PCD. Tests for gas permeability of concrete. **Materials and Structures**. v. 32, n. 217, Apr. 1999.

SAGAWA, Y., MATSUSHITA, H., MAEDA, Y., CHIKADA, T., KANEYASU, S. **Influence of Blast Furnace Slag on Durability of High-Strength Concrete**. ACI. Special Publication. V. 221. p.703-720. USA. 2004.

SARASWATHY, V.; SONG, H. W. Corrosion performance of rice husk ash blended concrete. **Construction and Building Materials**, v. 21, p. 1779-1784, 2007.

SATO, N.M.N. **Análise da porosidade e de propriedades de transporte de massa em concretos**. São Paulo. 163p. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 1998.

SCHUTTER, G. D.; AUDENAERT, K. Evaluation of water absorption of concrete as a measure for resistance against carbonation and chloride migration. **Materials and Structures**, v. 37, p. 591-596, Nov. 2004.

SENSALE, G. R.; DAL MOLIN, D. C. C. Estudio sobre la influencia de la incorporacion de puzolanas altamente reactivas em las propiedades del hormigon. In: CONGRESO IBEROAMERICANO DE PATOLOGIA DE LAS CONSTRUCCIONES/ CONGRESO DE CONTROL DE CALIDAD, 5., 7., 1999, Montevideo. **Anais...** Montevideo, 1999. p. 433 - 441

SILVA, F. G; LIBORIO, J. B. L. Durabilidade do concreto de alto desempenho com sílica de Fe-Si ou silício metálico em ambientes marinhos. **Vetor**, Rio Grande, v. 15, n. 2, p. 35-47, 2005.

SNIC. **Sindicato Nacional da Indústria do Cimento**. Disponível em: <<http://www.snic.org.br>>. Acesso em: 20 jan. 2014.

SOUSA, S. P. B; **Betões eco-eficientes com cinza de casca de arroz**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Porto. Portugal, 2005.

STUMPP, M. J. **Carbontação de Concretos com Altos Teores de Adições Mineraiis e Cal Hidratada**. Santa Maria, 2003. 162 p.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, 2003.

TAKEMOTO, K.; UCHIKAWA, H. Hydration of pozzolanic cement. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON THE CHEMISTRY OF CEMENT, 7., Paris, 1980. **Proceedings**, 1980. p. 1-29.

TECNOSIL. **Sílica Ativa**. Disponível em: <<http://www.tecnosilbr.com.br/produtos/silica-ativa/>>. Acesso em: 15 jan. 2013

UNEP. **UNITED NATIONS ENVIRONNEMENTE PROGRAMME**. Disponível: <http://www.grida.no/graphicslib/detail/past-and-future-co2-concentrations_a92d#>. Acesso em: 15 jan. 2013.

VAGHETTI, M. A. O. **Efeitos da cinza volante com cinza de casca de arroz ou sílica ativa sobre a carbonatação do concreto de cimento Portland**. 1999. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1999.

VAN GERVEN,T.; BAELEN, D.V.; DUTRÉ, V. ; VANDECAST EELE, C. **Influence of carbonation and carbonation methods on leaching of metals form mortars**. Cement and Concrete Research, 2003 In Press.

VIEIRA, F. M. P. **Contribuição ao estudo da corrosão de armaduras em concretos com adição de sílica ativa**. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

WALTER, J. P; ROSSATO, M. V; Destino do resíduo casca de arroz na microrregião de Restinga Seca - RS: Um enfoque à responsabilidade sócio ambiental. In: CONGRESSO NACIONAL DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO. ENERGIA, INOVAÇÃO, TECNOLOGIA E COMPLEXIDADE PARA A GESTÃO SUSTENTÁVEL, 6., 2010, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro,2010.

ZAMBERLAN, F. B. **Penetração de Cloretos em Concretos Compostos com Cinza de Casca de Arroz Clara e Escura.** Santa Maria, 2013. 161 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.

ANEXOS

Anexo A - Resultados de absorção capilar obtidos por Mostardeiro Neto (2011) –
Tabela 4.5

Tabela 4.5 – Resultados de absorção capilar aos 91 dias, cura de 3 dias

Mistura	Relação a/ag	Absorção de água por capilaridade (g/cm ²)					h (cm)
		3 h	6 h	24 h	48 h	72 h	
REF	0,35	0,170	0,264	0,453	0,585	0,660	12,80
	0,50	0,189	0,264	0,528	0,726	0,830	10,40
	0,65	0,226	0,302	0,604	0,811	0,953	10,97
10 CCAC	0,35	0,170	0,212	0,354	0,410	0,439	7,00
	0,50	0,269	0,368	0,637	0,806	0,934	8,75
	0,65	0,314	0,410	0,750	0,948	1,089	9,90
20 CCAC	0,35	0,132	0,141	0,226	0,264	0,292	11,93
	0,50	0,113	0,207	0,349	0,443	0,472	6,67
	0,65	0,236	0,284	0,425	0,512	0,573	8,00
30 CCAC	0,35	0,094	0,132	0,151	0,189	0,198	11,90
	0,50	0,104	0,151	0,217	0,255	0,283	11,47
	0,65	0,132	0,189	0,311	0,396	0,424	9,83
10 CCAE	0,35	0,160	0,198	0,283	0,311	0,349	11,83
	0,50	0,160	0,207	0,340	0,424	0,481	11,37
	0,65	0,236	0,292	0,434	0,528	0,585	10,60
20 CCAE	0,35	0,038	0,050	0,068	0,078	0,083	12,00
	0,50	0,054	0,066	0,104	0,127	0,141	11,17
	0,65	0,073	0,101	0,179	0,233	0,264	9,97
30 CCAE	0,35	0,035	0,040	0,059	0,059	0,066	11,73
	0,50	0,050	0,064	0,099	0,113	0,123	11,07
	0,65	0,059	0,073	0,113	0,141	0,158	11,03
10 SA	0,35	0,021	0,031	0,040	0,047	0,052	12,53
	0,50	0,045	0,061	0,090	0,111	0,120	12,03
	0,65	0,068	0,087	0,139	0,170	0,193	11,87

Anexo B - Resultados de absorção capilar obtidos por Mostardeiro Neto (2011) – Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Resultados de absorção capilar aos 91 dias, cura de 7 dias

Mistura	Relação a/ag	Absorção de água por capilaridade (g/cm ²)					h (cm)
		3 h	6 h	24 h	48 h	72 h	
REF	0,35	0,151	0,217	0,387	0,500	0,547	11,47
	0,50	0,170	0,255	0,462	0,622	0,698	11,40
	0,65	0,189	0,283	0,604	0,830	0,943	11,07
10 CCAC	0,35	0,170	0,212	0,325	0,396	0,424	8,00
	0,50	0,241	0,297	0,509	0,651	0,707	6,60
	0,65	0,269	0,368	0,679	0,877	0,976	10,25
20 CCAC	0,35	0,113	0,151	0,217	0,264	0,283	12,53
	0,50	0,132	0,170	0,264	0,340	0,368	7,50
	0,65	0,198	0,245	0,396	0,509	0,566	6,90
30 CCAC	0,35	0,094	0,123	0,123	0,141	0,151	12,20
	0,50	0,075	0,113	0,132	0,160	0,189	10,97
	0,65	0,104	0,151	0,198	0,226	0,255	12,57
10 CCAE	0,35	0,141	0,170	0,236	0,292	0,311	11,67
	0,50	0,179	0,226	0,349	0,434	0,472	11,10
	0,65	0,207	0,264	0,415	0,509	0,575	10,80
20 CCAE	0,35	0,031	0,040	0,054	0,061	0,068	12,50
	0,50	0,050	0,059	0,087	0,106	0,118	11,77
	0,65	0,068	0,092	0,144	0,184	0,203	10,43
30 CCAE	0,35	0,026	0,031	0,047	0,047	0,054	12,17
	0,50	0,042	0,050	0,075	0,087	0,099	12,17
	0,65	0,045	0,057	0,090	0,106	0,120	11,30
10 SA	0,35	0,024	0,026	0,033	0,035	0,042	13,00
	0,50	0,042	0,052	0,075	0,087	0,097	11,67
	0,65	0,059	0,078	0,120	0,144	0,167	11,43

Anexo C - Resultados de resistência à compressão obtidos por Da Silva (2012) – Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Resistência médias obtidas no ensaio de compressão axial e índices de resistência das misturas em relação ao concreto de referência com cura de 3 dias.

Mistura	a/ag	Resistência à compressão(Mpa) fc mistura / fc referência (%)			
		Idade (dias)			
		28	91	28	91
REF	0,35	54,00	59,75	100,00	100,00
	0,50	37,33	41,00	100,00	100,00
	0,65	29,00	33,50	100,00	100,00
5C	0,35	56,00	59,75	103,70	100,00
	0,50	43,67	47,00	117,00	114,60
	0,65	33,75	36,25	116,40	108,20
10C	0,35	59,33	66,75	109,90	111,70
	0,50	40,50	48,33	108,50	117,90
	0,65	29,00	38,00	100,00	113,40
20C	0,35	61,00	72,33	113,00	121,10
	0,50	40,67	50,33	108,90	122,80
	0,65	30,00	38,00	103,40	113,40
30C	0,35	65,67	67,50	121,60	113,00
	0,50	47,00	53,75	125,90	131,10
	0,65	31,00	37,75	106,90	112,70
5E	0,35	52,33	60,33	96,90	101,00
	0,50	44,00	50,00	117,90	121,90
	0,65	33,00	37,50	113,80	111,90
10E	0,35	59,00	67,33	109,30	112,70
	0,50	40,25	47,75	107,80	116,50
	0,65	28,67	35,75	98,90	106,70
20E	0,35	59,50	70,50	110,20	118,00
	0,50	40,75	45,00	109,20	109,80
	0,65	29,00	35,25	100,00	105,20
30E	0,35	64,00	67,00	118,50	112,10
	0,50	41,75	46,00	111,80	112,20
	0,65	30,00	36,25	103,40	108,20
5SA	0,35	54,00	58,00	100,00	97,10
	0,50	44,00	51,25	117,90	125,00
	0,65	36,75	45,67	126,70	136,30
10SA	0,35	53,50	62,75	99,10	105,00
	0,50	43,50	47,25	116,50	115,20
	0,65	37,75	40,00	130,20	119,40

Anexo D - Resultados de resistência à compressão obtidos por Da Silva (2012) – Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Resistência médias obtidas no ensaio de compressão axial e índices de resistência das misturas em relação ao concreto de referência com cura de 7 dias.

Mistura	a/ag	Resistência à compressão(Mpa)		fc mistura / fc referência (%)	
		Idade (dias)			
		28	91	28	91
REF	0,35	58,00	64,25	100,00	100,00
	0,50	40,00	45,00	100,00	100,00
	0,65	33,25	37,00	100,00	100,00
5C	0,35	60,25	64,33	103,90	100,10
	0,50	47,67	50,25	119,20	111,70
	0,65	36,00	39,75	108,30	107,40
10C	0,35	65,00	70,50	112,10	109,70
	0,50	42,00	54,50	105,00	121,10
	0,65	35,67	40,25	107,30	108,80
20C	0,35	72,00	81,00	124,10	126,10
	0,50	43,00	53,67	107,50	119,30
	0,65	32,00	42,50	96,20	114,90
30C	0,35	72,67	75,75	125,30	117,90
	0,50	49,25	56,50	123,10	125,60
	0,65	31,67	41,50	95,20	112,20
5E	0,35	61,00	64,33	105,20	100,10
	0,50	45,67	52,00	114,20	115,50
	0,65	34,67	42,25	104,30	114,20
10E	0,35	63,67	74,25	109,80	115,60
	0,50	42,00	54,25	105,00	120,60
	0,65	35,33	41,50	106,30	112,20
20E	0,35	65,67	74,00	113,20	115,20
	0,50	42,67	49,75	106,70	110,60
	0,65	32,00	40,25	96,20	108,80
30E	0,35	69,50	75,00	119,80	116,70
	0,50	48,25	54,75	120,60	121,70
	0,65	31,00	42,00	93,20	113,50
5SA	0,35	59,75	67,00	103,00	104,30
	0,50	50,00	54,25	125,00	120,50
	0,65	38,00	44,25	114,30	119,60
10SA	0,35	55,50	73,00	95,70	113,60
	0,50	48,25	51,00	120,60	113,30
	0,65	39,50	43,67	118,80	118,00