



UFSM

Dissertação de Mestrado

**CARBONATAÇÃO NATURAL DE PROTÓTIPOS DE
CONCRETO COM CINZA DE CASCA DE ARROZ**

Luiz Adelar Martinelli Júnior

PPGEC

Santa Maria, RS, Brasil

2010

CARBONATAÇÃO NATURAL DE PROTÓTIPOS DE CONCRETO COM CINZA DE CASCA DE ARROZ

por

Luiz Adelar Martinelli Júnior

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

PPGEC

Santa Maria, RS, Brasil

2010

© 2010

Todos os direitos autorais reservados a Luiz Adelar Martinelli Júnior. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho somente com autorização por escrito do autor. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria - RS, CEP: 97105-900. Fone: (55)3220-8837 Fax: (55)3220-8030 e-mail: pgcivil@ct.ufsm.br.



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 NATURAL DE PROTÓTIPOS DE CONCRETO
COM CINZAS DE CASCA DE ARROZ**

Elaborada por
Luiz Adelar Martinelli Júnior

Como requisito parcial para a obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Civil

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Eng. Geraldo Cechella Isaia – UFSM
(Presidente/Orientador)

Prof. Dr. Arq. Antônio Luiz Guerra Gastaldini – UFSM

Prof. Dr. Eng. Claudio Kazmierczak - UNISINOS

Santa Maria, Fevereiro de 2010.

Aos meus pais, Luiz e Cleci.

AGRADECIMENTOS

Sinto-me infinitamente feliz por fazer parte deste pequeno grande universo acadêmico. Conhecer pessoas, adquirir parte do que elas trazem consigo e a cada instante viver a descoberta.

Conviver esses anos todos com pessoas como o Professor Dr. Geraldo Cechella Isaia, a quem agradeço infinitamente, e ao Professor Dr. Antônio Luiz Guerra Gastaldini, certamente me transformaram em uma pessoa melhor.

Agradeço em especial ao colega Bóris Casanova Sokolovicz, por trazer consigo sempre um sorriso de incentivo estampado no rosto.

Agradeço ao professor Dr. Claudio Kazmierczak pela participação na avaliação do trabalho e aos demais os professores e colegas do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, em especial aos colegas Luciano de Medeiros Delleinghausen e Willian Wildimar Cadore, pelas orientações.

Aos alunos bolsistas do Grupo de Estudos e Pesquisas em Concreto e aos funcionários do Laboratório de Materiais de Construção Civil, em especial ao “Seu João”, o meu muito obrigado.

Ao grande amigo Fernando Huhlmann Soares, por achar engraçado me incentivar a encarar esse desafio.

Aos meus colegas da Prefeitura Municipal de Vitória das Missões, pela compreensão e ajuda devido às minhas seguidas ausências.

E em especial, agradeço à minha família, Luiz, Cleci, Lisandra, a quem devo o que de bom sou, bem como a Lílian, pelo carinho e incentivo.

A todos, o meu muito obrigado!

Luiz

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	6
SUMÁRIO.....	7
LISTA DE FIGURAS.....	9
LISTA DE TABELA.....	11
LISTA DE QUADROS.....	12
ABREVIACÕES.....	13
RESUMO.....	15
CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO.....	19
1.1 Considerações iniciais.....	19
1.2 Importância da Pesquisa.....	23
1.3 Objetivos.....	27
1.4 Estrutura da dissertação.....	28
CAPITULO II – CARBONATAÇÃO.....	30
2.1 Considerações iniciais.....	30
2.2 Aspectos de durabilidade e desempenho das estruturas de concreto armado.....	30
2.3 Mecanismos de transporte de fluidos no concreto.....	33
2.4 Fenômeno de carbonatação.....	36
2.5 Principais fatores que afetam a carbonatação.....	39
2.6 Carbonatação natural e acelerada.....	45
CAPITULO III – ADIÇÕES MINERAIS.....	46
3.1 Considerações iniciais.....	46
3.2 Introdução.....	46
3.3 Casca de Arroz.....	49
3.4 Cinza de casca de arroz.....	52
3.5 Finura da CCA.....	55
3.6 Processo de queima.....	58
3.7 Influência das adições minerais na carbonatação.....	62
CAPITULO IV – MÉTODOS EXPERIMENTAIS.....	65
4.1 Considerações Iniciais.....	65
4.2 Introdução.....	65
4.3 Materiais empregados.....	66
4.3.1 Cimento CP II F – 32.....	66
4.3.2 Cinza de casca de arroz.....	68
4.3.3 Agregados.....	70
4.3.3.1 Agregado Miúdo.....	70
4.3.3.2 Agregado Graúdo.....	71
4.3.4 Aditivo químico.....	72
4.4 Métodos de dosagem.....	73
4.5 Moldagens dos protótipos.....	74
4.6 Ensaio de carbonatação natural.....	76
4.7 Determinações dos coeficientes de carbonatação.....	82
5 CAPITULO V - ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	83
5.1 Considerações Iniciais.....	83
5.2 Resistência à compressão axial.....	83
5.3 Profundidades de carbonatação natural.....	89
5.4 Finura da CCA versus coeficiente de carbonatação natural.....	93
5.5 Carbonatação natural versus acelerada.....	95
5.6 Coeficiente de carbonatação em igualdade de resistência.....	100
5.7 Coeficiente de carbonatação natural versus estrutura de poros.....	104

6 CAPITULO VI – CONCLUSÕES.....	110
6.1 Considerações iniciais.....	110
6.2 Resistência à compressão axial.....	110
6.3 Profundidade de carbonatação.....	111
6.4 Carbonatação natural versus acelerada.....	112
6.5 coeficiente de carbonatação natural versus a estrutura de poros.....	112
6.6 Conclusão geral.....	113
6.7 Sugestões para futuras pesquisas.....	113
7 - Referências Bibliográficas.....	115
8 – Anexos.....	124

Lista de Figura

Figura 1 – Museu de Arte Moderna de São Paulo, maior vão livre da América Latina, (dezembro de 2009).....	20
Figura 2 – Esquema efeito estufa, PUC Minas (2010 acesso 24/12/2009).....	21
Figura 3 – Arroz no Brasil, Atlas Socioeconômico do Rio Grande do Sul (2009).....	25
Figura 4 – Produção de Arroz no Rio grande do Sul, Atlas Socioeconômico do Rio Grande do Sul (2009).....	26
Figura 5 – Lavora de Arroz, estado do Rio Grande do Sul.....	27
Figura 6 – Roteiro durabilidade versus desempenho, www.altoqi.com.br, (acesso em 17 de dezembro 2009).....	32
Figura 7 – Mecanismos envolvidos nos fenômenos de transporte de fluidos no concreto COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON apud Isaia (1995).	34
Figura 8 – Microestrutura do concreto (1 - CSH, 2 - CH, 3 - Vazio capilar), Moraneville (1992).....	35
Figura 9 – Modelo de Tuutti (1982), para a corrosão do aço envolto ao concreto.....	37
Figura 10 – Representação esquemática da carbonatação Cascudo (1997).....	39
Figura 11 – Representação esquemática da carbonatação parcial do concreto saturado com água (Cascudo, 1997).....	40
Figura 12 – Poros sem presença de umidade (Cascudo, 1997).....	40
Figura 13 – Poros parcialmente saturados (Cascudo, 1997).....	41
Figura 14 – Relação entre umidade relativa e grau de carbonatação (VERBECK, 1950, apud VÉNUAT; ALEXANDRE, 969).....	41
Figura 15 – Profundidade carbonatação X A/C, Helene (1999).....	42
Figura 16 – Resistência a compressão axial versus coeficientes de carbonatação Venquiaruto (2002).....	44
Figura 17 – Casca de arroz, (São Borja, 2009).....	51
Figura 18 – Micrografia da cinza de casca de arroz, Mehta e Monteiro (1994).....	53
Figura 19 – Figura 19 (a): Epidermes internas e externas de CCA natural (DELLA et al., 2001) (b) e (c): Estruturas celulares remanescentes da lignina e celulose preenchidas com produtos de hidratação e/ou pozolânicos (ISAIA et al., 2010).....	54
Figura 20 – Índice de pozolanicidade versus tempo de moagem, Prudêncio Júnior et al., (2003)	56
Figura 21 – Finura de diversas adições minerais, Isaia (1995).....	56
Figura 22 – Resistência a compressão X relação a/ag, Frizzo (2001).....	57
Figura 23 – Estrutura cinza de casca de arroz, Daffico (2001), apud santos (2006).....	59
Figura 24 – Resistência à compressão a 28 dias de 6 pozolanas com finuras distintas (NEHDI et al., 2003).....	62
Figura 25 – Coeficientes de carbonatação versus relação a/ag Hoppe (2008).....	64
Figura 26 – Características físicas do agregado miúdo.....	71
Figura 27 – Características físicas do agregado graúdo.....	72
Figura 28 – Exposição ao ambiente natural dos protótipos.....	76
Figura 29 – Extração mecanizada dos cds.....	77
Figura 30 – Isométrico da extração do corpo de prova cilíndrico dos protótipos de concreto.....	77
Figura 31 – Cerra responsável pela corte dos CP's.....	78
Figura 32 – Preparação para o rompimento diametral.....	78
Figura 33 – Rompimento diametral dos Corpos de Prova.....	79
Figura 34 – Ponto de viragem de fenolftaleína, (Castro 2003).....	80
Figura 35 – Fotografia C.P. devidamente identificado.....	81
Figura 36 – Linhas verticais afastadas 1 mm.....	81

Figura 37 – Resistência à compressão axial (MPa).....	85
Figura 38 – Resistência à compressão, a/ag 0,45 (MPa).....	86
Figura 39 – Resistência à compressão relação $a/ag = 0,55$	87
Figura 40 – Resistência à compressão, $a/ag = 0,65$	87
Figura 41 – Profundidade de carbonatação em função do tempo ($a/ag = 0,45$).....	90
Figura 42 – Profundidade de carbonatação em função do tempo ($a/ag = 0,55$).....	91
Figura 43 – Profundidade de carbonatação em função do tempo ($a/ag = 0,65$).....	91
Figura 44 – profundidade de carbonatação (mm) para a idade de 2,5 anos.....	92
Figura 45 – Tipo de CCA versus coeficiente de carbonatação.....	93
Figura 46 – Teor de CCA versus coeficiente de carbonatação.....	94
Figura 47 – Câmara de carbonatação.....	96
Figura 48 – Coeficientes de carbonatação em igualdade de resistência a 30 MPa, a 91 dias (kC acelerado) e 37,5 MPa, a 900 dias (kC natural).....	103
Figura 49 - Distribuição do volume de Hg intrudido dos macro e microporos.....	107

Lista de Tabela

Tabela 1 - Veda e Takewaka apud Helene (2008), relação financeira entre novas construções - trabalhos de recuperação de construções existentes.....	31
Tabela 2 – Propriedade CCA, Mehta 1977, apud Pouey (2006).....	60

Lista de Quadro

Quadro 1 – Composição química do cimento - CP II F-3.....	67
Quadro 2 – Dimensões características do CP II F-32.....	67
Quadro 3 – Características físicas do cimento - CP II F-32.....	68
Quadro 4 – Resistência à compressão - CP II F-32.....	68
Quadro 5 – Composição Química da CCA residual.....	69
Quadro 6 – Dimensões características da CCA residual.....	70
Quadro 7 – Caracterização dos agregados utilizados.....	71
Quadro 8 – Traços de concreto investigados.....	73
Quadro 9 – Quantidade de materiais por m ³ de concreto.....	74
Quadro 10 – Ordem de colocação e tempo de mistura para os traços de concreto.....	75
Quadro 11 – Resistência à compressão axial.....	84
Quadro 12 – Acréscimos de resistência à compressão axial de 91 dias para 540 dias.....	88
Quadro 13 – Profundidade de carbonatação em função do tempo.....	90
Quadro 14 – Idades de ensaio em carbonatação acelerada.....	96
Quadro 15 – Coeficiente de carbonatação natural e acelerada.....	97
Quadro 16 – Coeficientes de carbonatação em igualdade de resistência a 91 e 540 dias.....	102
Quadro 17 – Resultados dos ensaios e porosimetria aos 540 dias.....	106
Quadro 18 – Médias das variáveis da porosimetria a 91 e 540 dias.....	108

ABREVIações

°C	- Graus centígrados
∅	- Diâmetro
#	- Abertura de malha de peneira
a/ag	- Relação água aglomerante em massa
a/mc	- Relação água materiais cimentícios em massa
Al₂O₃	- Óxido de alumínio
CAD	- Concreto de alto desempenho
ASTM	- American Standart for Testing Materials
CCA	- Cinza de Casca de Arroz
C₃S	- Silicato tricálcio
CaCO₃	- Carbonato de cálcio
CaO	- Óxido de cálcio
Ca(OH)₂	- Hidróxido de cálcio
CaSO₄	- Sulfato de cálcio
CCA	- Cinza de casca de arroz
CH	- Hidróxido de cálcio
CL-	- Ions de cloreto
Cm	- Centímetros
CO₂	- Anidrido carbônico ou dióxido de carbono
CP	- Cimento Portland
C-S-H	- Silicato de cálcio hidratado
CV	- Cinza Volante
E	- Escória de alto forno
Fe₂O₃	- Óxido de ferro
G	- Grama
g/cm³	- Grama por centímetro cúbico, medida de massa específica
g/m²	- Gramas por metro quadrado, medida de absorção capilar
GEPECON	- Grupo de Estudos e Pesquisa em Concreto
IRGA	- Instituto Rio-Grandense de Arroz
IPPC	- International Plant Protection Convention
H₂O	- Molécula da água
H₂S	- Gás sulfídrico
K⁺	- Íons potássio
Kc	- Coeficiente de carbonatação
Kg	- Quilograma
Kg/dm³	- Quilograma por decímetro cúbico, medida de massa específica
Kg/m³	- Quilograma por metro cúbico, medida de massa específica
KOH	- Hidróxido de potássio
KO₂	- Coeficiente de permeabilidade ao oxigênio
L.M.C.C	- Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal de Santa Maria
m³	- Metro cúbico
MgO	- Óxido de magnésio
Mg(OH)₂	- Hidróxido de magnésio
Mm	- Milímetro
mm/sem^{u,b}	- Milímetros por raiz de semana, medida de coeficiente de carbonatação
MPa	- Mega Pascal
Na⁺	- Íon sódio
NaOH	- Hidróxido de sódio
NBR	- Norma Brasileira

NM	- Norma do Mercosul
Nm	- Nanômetros
O₂	- Oxigênio
OH⁻	- Íon Hidroxila
PAC	- Programa de aceleração do Crescimento
pH	- Potencial hidrogeniônico
r²	- Coeficiente de correlação estatística
REF	- Mistura de referência, 100% de Cimento CP II F-32
RILEM	- Réunion Internationale des Laboratoires d' Essais et des Echerces sur lês Matériau et les Constructions
RS	- Rio Grande do Sul
SA, MS	- Sílica ativa, micro sílica
Sem	- Semanas
SiO₂	- Dióxido de silício
UFSM	- Universidade Federal de Santa Maria
U.R.	- Umidade relativa do ar em %

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil
Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil

CARBONATAÇÃO NATURAL DE PROTÓTIPOS DE CONCRETO COM CINZA DE CASCA DE ARROZ SEM MOAGEM

Autor: Luiz Adelar Martinelli Júnior
Orientador: Prof. Dr. Geraldo Cechella Isaía
Santa Maria, abril de 2010.

O cimento é o material de construção com maior responsabilidade pela emissão do dióxido de carbono de todas as atividades industriais humanas, além de ser um material consideravelmente mais caro do que as CCA's, in natura. Benefícios ambientais são gerados na sua utilização, pois as cinzas de casca de arroz são resíduos de processos industriais do beneficiamento do grão, que muitas vezes são descartados no meio ambiente, sem nenhuma preocupação ambiental. Usá-las em substituição parcial do cimento em concretos estruturais, além de benefícios econômicos e ambientais, proporciona, geralmente, uma maior vida útil às estruturas de concreto armado. Baseado nestes preceitos ambientais, esta pesquisa tem por objetivo o estudo da viabilidade técnica e econômica da utilização da cinza de casca de arroz (CCA), substituindo parcialmente o cimento nas misturas de concretos para uso em concreto convencional. Foram moldados protótipos de concreto de 20 x 20 x 70 cm, com CCA natural e moída, nos teores de 0, 15 e 25%, em substituição ao cimento, nas relações água/aglomerante 0,45, 0,55 e 0,65. Expostos em condições ambientais naturais (0,3 – 0,4% de dióxido de carbono), os protótipos de concreto foram analisados nas idades de 18, 24 e 30 meses, quanto à resistência, compressão axial e frente ao fenômeno de carbonatação natural, por meio da extração de testemunhos cortados perpendiculares à direção de moldagem, com dimensões 10 x 20 cm. A resistência à compressão axial a 18 meses dos traços com CCA moída foram superiores ao concreto de referência, enquanto que os de cinza

natural foram menores do que as misturas com CCA moída, com quedas maiores para o teor de 25% do que para 15%. Os coeficientes de carbonatação natural do traço referência foram os menores de todos, seguidos dos CCA moída, com 15 e 25% e, após, com a CCA natural, de 15% e 25%. Os resultados mostram que é possível substituir até 15% de cimento por cinza de casca de arroz natural, sem moagem, sem perdas acentuadas de resistência (ao redor de 20%) e com coeficientes de carbonatação entre 4 e 5 $\text{mm.ano}^{-0,5}$, valores que podem ser considerados adequados para concreto convencional.

Palavras chave: cinza de casca de arroz sem moagem, cinza de casca de arroz moída, carbonatação natural, resistência à compressão axial, carbonatação acelerada.

ABSTRACT

Dissertação de Mestrado
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil
Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil

CARBONATAÇÃO NATURAL DE PROTÓTIPOS DE CONCRETO COM CINZA DE CASCA DE ARROZ SEM MOAGEM

(NATURAL CARBONATION IN CONCRETE PROTOTYPES WITH NON-GROUND RICE HUSK ASH).

Cement is the construction building material with higher responsibility by carbon dioxide emission of all industrial human activities, besides be a considerably expensive material, more than the rice husk ash in nature. Environmental benefits are generated in its utilization, because rice husk ashes are industrial process residues of the grain processing, that are discarded in the environment without none care. The using of these ashes in partial cement substitution in structural concrete, beside of the economical and environmental benefits, proportionate, in general, a higher useful life to the reinforced concrete structures. Based in theses environmental principles, this work aims at to study the technical and economical viability of the RHA utilization, substituting the cement partially, in concrete mixtures for conventional concrete. concrete prototypes with 20 x 20 x 70 cm, with and without ground and non-ground RHA, in 0%, 15% and 25% contents of cement substitution, with water/binder ratios of 0,45, 0,55 and 0,65. Exposed in natural environmental conditions (0,3 – 0,4% of CO₂) the concrete prototypes were analyzed at 18, 24 and 30 months, to the axial compressive strength and carbonation by means of extraction of specimens perpendicularly cut to the casting direction, with 10 x 20 cm dimensions. The axial compressive strength at 18 months of the ground RHA mixtures were higher to the reference concrete, while the natural RHA ones were lower than the latter, with higher decreases for the 25% content than for 15%. The natural carbonation coefficients of reference concrete were the smallest ones, followed by the ground RHA with 15% and 25% and, after, with natural RHA, 15% and 25%. The results show that is possible substitute until 15% of cement by natural

rice husk ash without pronounced strength losses (around 20%) and with carbonation coefficients between 4 and 5 mm.ano^{-0,5}, values considered adjusted for conventional concrete.

Key words: non-ground rice husk ash, ground rice husk ash, natural carbonation, axial compressive strength, accelerated carbonation.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Ao longo da história, desde a chegada dos primeiros colonizadores europeus a economia do Brasil viveu diversos ciclos. Tais ciclos provocam mudanças sociais e culturais na sociedade brasileira. Especificamente o século XX foi regido pelo elevado crescimento populacional e o acelerado desenvolvimento industrial. Somado a isso, o êxodo rural e conseqüentemente a criação de grandes latifúndios agrícolas provocou o crescimento acelerado das cidades brasileiras.

Face ao exposto, o Brasil se vê em pleno desenvolvimento com grandes carências de infraestrutura. Pessoas vivem em condições subumanas aglomeradas de forma desordenada. Os transportes cada vez mais deficientes com nodais comprovadamente consagrados abandonados, como o ferroviário.

Nunca se discutiu tanto sobre o assunto de infraestrutura. O governo reconhece a importância de investimentos e cria projetos como o PAC, resgatando a cultura do planejamento, tentando tirar o país da crise instalada nos últimos anos. Aliadas a isso, as facilidades de crédito imobiliário acendeu a economia do setor habitacional, principalmente para a classe média, surgindo grandes oportunidades de trabalho e alavancando também outros setores da economia.

Frente a todos os avanços, surge a necessidade do desenvolvimento tecnológico da construção civil, seguindo os princípios da sustentabilidade abandonados no passado, devido à abundância de recursos naturais. Desenvolver técnicas otimizadas e sustentáveis, alcançando desempenho necessário, devido a novas tendências e necessidades, é prática constante de um país em plena expansão.

Especificamente o concreto, por sua vez, é material mais utilizado pela humanidade, perdendo apenas para a água. Estima-se que o consumo atual do concreto seja da ordem de 5,5 bilhões de toneladas por ano, segundo Mehta e

Monteiro (1994). Consagrado pela comunidade da construção civil de todo o mundo por ter uma utilização bastante eclética e facilidade de moldar-se em diferentes formas, o concreto, somado ao aço, tem sido utilizado nos mais variados tipos de ambiente, a exemplo da figura 1. Com isso, faz-se necessário a execução de obras duráveis de acordo com a agressividade do ambiente a qual elas estão inseridas, além de resistir adequadamente às solicitações provenientes da estrutura.



Figura 1 - Museu de Arte Moderna de São Paulo, maior vão livre da América Latina (dezembro de 2009).

Segundo Rodrigues e Freitas (2007), o concreto é, depois da pedra, da argila e da madeira, um dos materiais de construção mais antigos que a humanidade conhece. Os romanos produziam um tipo de concreto com cinza vulcânica e cal que permitia a moldagem e a aglutinação de peças formadas por grandes blocos de pedra. Até os anos 70 do século passado, o concreto era visto como o material de grande durabilidade, sem preocupar-se com o futuro. Mas, nas últimas décadas, são cada vez maiores os índices que indicam que esta durabilidade está sendo comprometida. Isto pode ser atribuído ao grande crescimento da aparição de manifestações patológicas. Segundo Mehta (1994), uma longa vida útil do concreto é considerada sinônimo de durabilidade.

Aliada às necessidades de durabilidade e desempenho, surge a preocupação ambiental e a necessidade de se elaborar técnicas de desenvolvimento sustentável, pois a indústria cimenteira é responsável por cerca de 7% das emissões de dióxido de carbono (CO_2) de toda atividade humana no mundo. Um dos principais gases do efeito estufa é o CO_2 que misturando-se à atmosfera, absorve a radiação solar

refletida pela superfície terrestre, aumentando assim a temperatura da Terra, descrita graficamente na figura 2.



Figura 2 - Esquema efeito estufa, PUC Minas (acesso em 24/12/2009).

Segundo dados utilizados pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, na sigla em inglês), na média mundial, para cada tonelada (t) de cimento produzido, é lançada à atmosfera aproximadamente 1 t de CO₂, no entanto existem empresas que emitem somente 655 toneladas de CO₂ para cada tonelada de cimento produzido.

Cada vez mais, a sociedade científica busca progressos tecnológicos do concreto, priorizando sua durabilidade e seu desempenho, ou seja, o aumento da sua vida útil. Esta durabilidade está diretamente ligada à sua microestrutura, bastante heterogênea e complexa.

Contudo, a fim de suprir deficiências frente a agentes agressivos presentes no ambiente, aliado à sustentabilidade, pesquisas referentes a adições de materiais finamente moídos ao concreto, chamados de adições minerais (pozolanas, escória de alto forno, filler), avançam buscando material de maior desempenho, substituindo parte do cimento e suas patologias ambientais. Pesquisadores têm se dedicado a trabalhar com o intuito de utilizar co-produtos de processos produtivos, reciclando-os, transformando-os em matéria-prima, produzindo novas constituições de materiais, transformando ameaças ambientais em produtos de alto valor tecnológico.

As adições minerais, entre as quais as pozolanas, são vantajosas em vários aspectos, principalmente nas características referentes à durabilidade. No que se refere ao aspecto econômico, salienta-se que as pozolanas são subprodutos de processos industriais que normalmente seriam descartados na natureza, muitas vezes de forma inadequada. Adicionando-as na produção do concreto, eliminamos o custo de descarte e diminuimos a produção mundial do cimento e as patologias que seu processo produtivo causa.

Segundo Gomes da Silva (2007), em países como França, Alemanha e inclusive o Brasil, há cimentos que já recebem algum tipo de adições já no seu processo industrial, inserindo assim a cultura sustentável no mercado da construção civil. Em outros, como os EUA, adições minerais no cimento são menos comuns, sendo prática mais corriqueira a incorporação de adições minerais na betoneira, o que gera resultados muito semelhantes.

Especificamente, uma das adições minerais estudada amplamente é a cinza de casca de arroz. É um resíduo agroindustrial ainda pouco explorado, oriundo da queima da casca de arroz para a geração de energia no processo de beneficiamento do grão. As pesquisas são motivadas cada vez mais em função do crescente consumo de alimentos pela humanidade. Essas demandas geram o aumento das necessidades de transformação de matérias-primas cada vez mais produzidas e conseqüentemente a produção de co-produtos em função de processos de beneficiamento destes alimentos.

Segundo Metha e Folliard (1995), à medida que a procura por um concreto durável aumenta, as nações estão percebendo, finalmente, o grande potencial da utilização da CCA como material pozolânico. Com a grande quantidade de arroz cultivada na maioria dos países do mundo, a CCA pode apresentar disponibilidade suficiente para garantir a demanda por um material pozolânico e assegurar seu emprego na indústria do concreto.

São as empresas beneficiadoras de arroz as principais consumidoras da casca do cereal como combustível para a secagem e parboilização do produto. Em geral, em empresas de pequeno porte, com dificuldade de produzir métodos e tecnologias de descartes adequados, a casca é descartada na natureza de forma inadequada.

Segundo Mehta, 1992 (apud Silvia Santos 2006), em alguns países o volume da cinza da casca de arroz já se tornou um problema ambiental e nenhum outro

resíduo agrícola gera tal quantidade quanto o arroz. Para minimizar o problema, órgãos ambientais têm buscado regulamentar o descarte dessas cinzas. Em alguns Estados, exige-se a instalação de um sistema constituído de silo separador e decantação, para reter a cinza junto às beneficiadoras, evitando que este resíduo seja lançado no meio ambiente. Como não há emprego pelas empresas beneficiadoras para a cinza recolhida, esse material estocado acaba sendo lançado de forma clandestina no meio ambiente, muitas vezes ao longo de estradas vicinais.

Estamos inseridos na região de maior produtividade do cereal no país e de seus co-produtos, conseqüentemente. No Rio Grande do Sul, o Grupo de Estudo e Pesquisa em Concreto (GEPECON), do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), tem por objetivo o estudo da durabilidade e eficiência do concreto, produzindo pesquisas científicas sobre este assunto.

1.2 IMPORTÂNCIA DA PESQUISA

Desde o princípio da humanidade, quando o homem começou a conviver em grandes grupos, ele vem intervindo de forma mais avassaladora no meio ambiente, a fim de suprir suas necessidades. Agricultura, pecuária e construções de metrópoles modificam diretamente a natureza.

Especificamente os processos industriais para beneficiamento de insumos para nossa subsistência provocam grandes intervenções nocivas não só para nós, seres humanos, mas também para toda forma de vida presente na Terra. A substituição de parte do cimento na fabricação do concreto por um subproduto como a casca de arroz, derivado do beneficiamento de um grão que amplamente é produzido no Rio Grande do Sul, é sem dúvida uma tentativa inteligente na busca do progresso tecnológico e ambiental.

A Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) está inserida dentro da maior região de produção de arroz do Brasil, o que justifica de maneira enfática as pesquisas relativas ao assunto.

Cerca de 150 milhões de hectares de arroz são cultivados anualmente no mundo, produzindo 590 milhões de toneladas, sendo que mais de 75% desta produção é oriunda do sistema de cultivo irrigado.

O arroz é um dos mais importantes grãos em termos de valor econômico. É considerado o cultivo alimentar de maior importância em muitos países em desenvolvimento, principalmente na Ásia e Oceânia, onde vivem 70% da população total dos países em desenvolvimento e cerca de dois terços da população subnutrida mundial. Segundo a Embrapa (2010), é alimento básico para cerca de 2,4 bilhões de pessoas e, segundo estimativas, até 2050, haverá uma demanda para atender ao dobro desta população.

Entre os países da América, o Brasil tem bastante tradição no cultivo do cereal. Segundo a Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias (Embrapa, 2010), o Brasil foi o primeiro país a cultivá-lo dentro do continente americano, sendo chamado de “milho d’água” e na língua dos tupis era “abati-uaupé”, isso muito antes de conhecerem nossos colonizadores em plantações perto de regiões alagadas nas proximidades do litoral. Registros de Américo Vespúcio fazem referências de amostras de arroz colhidas durante a peregrinação de Pedro Álvares Cabral pelo Brasil.

Em 1587, as lavouras arrozeiras já ocupavam terras na Bahia. No Maranhão, foi por volta de 1745. E em 1766, a Coroa Portuguesa autorizou a instalação da primeira descascadora de arroz no Brasil, na cidade do Rio de Janeiro. Mas foi em meados do século XVIII que a prática deu-se no Brasil de forma mais organizada, e daí até a metade do século XIX, o país foi um grande exportador de arroz. Atualmente, o Rio Grande do Sul é responsável por aproximadamente 55% do arroz produzido no país. Outros produtores são Mato Grosso (o segundo maior produtor), Santa Catarina, Maranhão, Pará e Tocantins.

Já no cenário mundial, segundo o Atlas Socioeconômico do Rio Grande do Sul (2009), a China é o principal produtor mundial de arroz, com 184.070 mil toneladas, ou seja, 29% do total produzido no mundo, seguida pela Índia, com 21,5%. A produção brasileira corresponde a apenas 1,8% da produção mundial e tem se mantido próxima a 10 milhões de toneladas, alcançando, em 2006, 11.526.685 toneladas.

O Rio Grande do Sul tem sua participação na produção nacional do cereal com um bom crescimento nos últimos quatro anos (figura 3), especificamente na safra 2008/2009, quando, segundo o Instituto Rio-Grandense de Arroz (IRGA), o total produzido chegou a 8.047.897 toneladas.

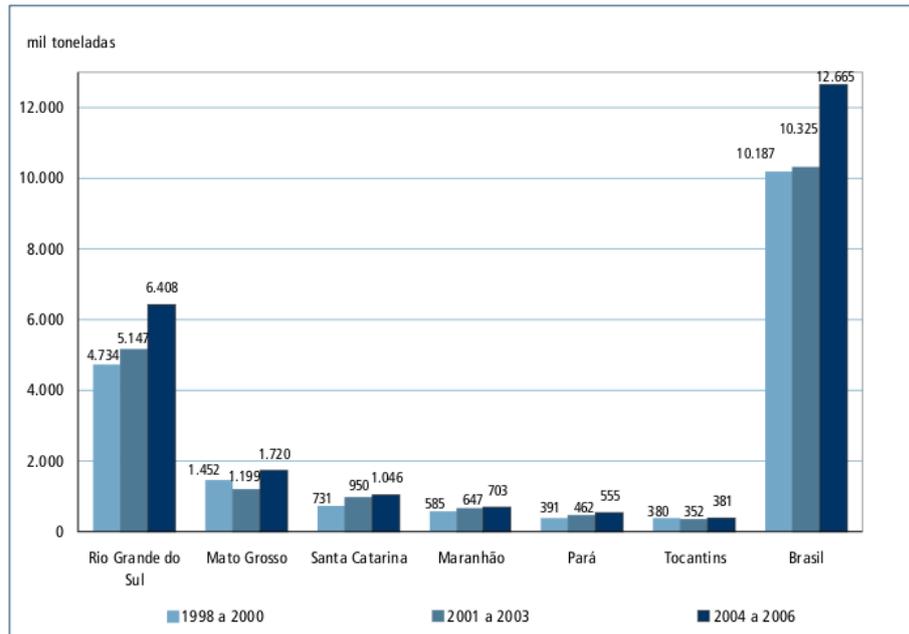


Figura 3 - Arroz no Brasil, Atlas Socioeconômico do Rio Grande do Sul, (2009).

A lavoura de arroz tem se destacado principalmente pela modernização por que passou nos últimos tempos, em aspectos como a introdução de novas variedades com maior potencial produtivo, manejo, sistemas produtivos e gerenciamento, que acrescentaram rentabilidade a esta lavoura. Segundo a Embrapa (2010), dentre os demais produtos da lavoura do Estado, a arrozeira representou 14,8% do Valor Bruto da Produção Agropecuária.

Segundo o Instituto Rio-Grandense de Arroz (IRGA), os municípios gaúchos que mais se destacam na produção de arroz localizam-se nas regiões da Fronteira Oeste e Sul do Estado (figura 4), principalmente junto ao Rio Uruguai e na região das lagoas. Na safra 2008/2009, a Fronteira Oeste destacou-se como a maior região produtora, com 2.471.865 toneladas, seguida da região da Campanha, com 1.304.046 toneladas, e com a zona Sul com 1.247.026 toneladas. A Depressão Central produziu 1.175.372 toneladas, o que justifica ainda mais a pesquisa, já que a universidade está localizada nessa região.

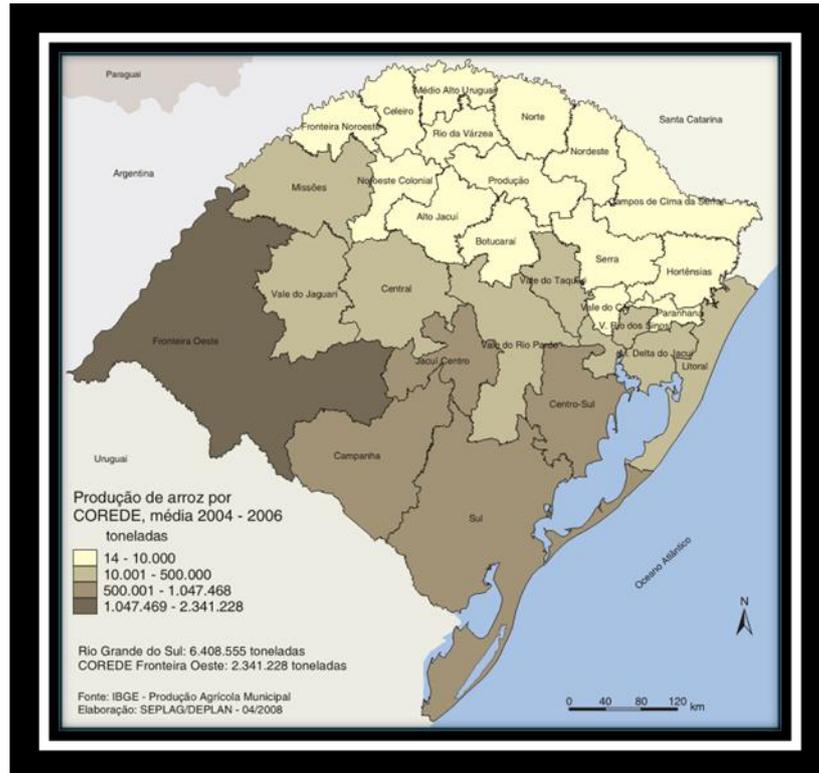


Figura 4 - Produção de arroz no Rio Grande do Sul, Atlas Socioeconômico do Rio Grande do Sul (2009).

Segundo a Embrapa (2010), apesar de o Brasil ter um perfil importador de arroz, o ano de 2008 ficou marcado pelo aumento das exportações do grão beneficiado, principalmente o Rio Grande do Sul para outros Estados da federação, alterando o perfil exportador brasileiro, que antes era caracterizado pela predominância das vendas externas de arroz quebrado. Tal aspecto nos faz pensar nos custos ambientais gerados pelos até então resíduos industriais oriundos do processo de beneficiamento dos grãos.

A safra 2009/2010 (figura 05) apresenta recuo em torno de 9 % na produção de arroz. Chuvas intensas marcaram as estações de crescimento e maturação do grão nas lavouras de arroz.



Figura 5 Lavoura de arroz no Rio Grande do Sul.

Tendo o Rio Grande do Sul Grande potencial técnico para produção e exportação de cinza de casca de arroz, a principal justificativa deste estudo é, sem dúvida, produzir material técnico-científico para a utilização de um subproduto do beneficiamento do arroz, buscando misturas com maior durabilidade e bom desempenho ao concreto. Assim, tentar reduzir o impacto ambiental gerado por esse resíduo e transformá-lo em material de qualidade tecnológica.

1.3 OBJETIVOS

Como objetivo geral, a principal meta deste trabalho é estudar a viabilidade do uso da cinza de casca de arroz natural, sem moagem, na produção do concreto. Protótipos de concreto com diferentes teores de substituição serão analisados frente ao fenômeno de carbonatação e resistência à compressão axial e correlacionado com concretos de referência produzidos de maneira convencional. Também objetiva-se correlacionar os resultados obtidos com outros estudos desenvolvidos pelo grupo de pesquisa GEPECON.

Os tópicos dos assuntos estudados serão:

- Analisar o comportamento dos concretos contendo cinzas de casca de arroz em substituição do cimento frente à resistência a compressão axial em diferentes idades e relações a/ag.
- Aferir e analisar as profundidades de carbonatação natural dos protótipos de concreto contendo CCA em substituição do cimento.
- Comparar e correlacionar coeficientes de carbonatação natural com os coeficientes de carbonatação acelerada, pesquisada por integrantes do GEPECON.
- Observar a influência da finura da cinza de casca de arroz frente o fenômeno de carbonatação e resistência à compressão axial.
- Relacionar os resultados dos coeficientes de carbonatação natural e acelerado, em igualdade de resistência à compressão axial.
- Comparar os valores dos coeficientes de carbonatação com os resultados dos ensaios de porosimetria.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação foi desenvolvida em seis capítulos com a seguinte composição:

- Primeiro capítulo: Nele é desenvolvida a introdução, apresentada a justificativa do projeto e os objetivos principais.
- Segundo capítulo: Nele é estudado o mecanismo de carbonatação e fatores que influenciam.
- Terceiro capítulo: São abordadas as adições minerais de forma geral, apresentadas sua classificação e obtenção, dando enfoque especial à CCA.
- Quarto capítulo: Será abordado o programa experimental desenvolvido, descrevendo os materiais e as técnicas utilizadas. Nele, serão demonstradas às técnicas utilizadas para obtenção dos resultados da pesquisa.

- Quinto capítulo: Serão apresentados, analisados e discutidos os resultados, comparando sempre que possível com resultados de outras pesquisas.
- Sexto capítulo: É dedicado à análise de resultados e conclusões.

CAPITULO 2

CARBONATAÇÃO

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo, será apresentada uma revisão sobre a durabilidade do concreto, destacando as causas de degradação relativas ao fenômeno de carbonatação e fatores que o regem e as relações entre os ensaios de carbonatação natural e acelerada.

2.2 ASPECTOS DE DURABILIDADE E DESEMPENHO DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO

A velocidade com que o setor da construção civil expandiu-se no século XX acabou incentivando a adoção de técnicas construtivas ainda não tão aprimoradas e reconhecidas, além de obrigar a contratação de mão-de-obra de baixa qualificação.

Segundo Helene (IBRACON, 2010), o concreto armado moderno teve início somente após a patente do cimento Portland, por John Aspdin, em 1824. Nesses primeiros anos, mesmo na França e Inglaterra, que eram as duas nações mais desenvolvidas da época, o concreto teve pouca aplicação significativa. No fim do século, pesquisadores como Louis Vicat e René Ferét trataram de tornar esse material mais conhecido e mais confiável, resultando no interesse de seu uso generalizado em estruturas.

Diversos autores enfatizam que até pouco tempo a única propriedade empregada como parâmetro da qualidade do concreto era a sua resistência mecânica. Porém, propriedades como a durabilidade são cada vez mais estudadas, motivada pela necessidade de construir estruturas de concreto com alto desempenho tecnológico, executadas nos mais diversos ambientes.

Segundo Mehta e Monteiro (1994), a durabilidade e a compacidade são as principais características que definem o concreto. Pesquisadores indicam que, no mundo, a preocupação com a durabilidade das estruturas de concreto já existe há bastante tempo, principalmente devido aos custos envolvidos para repará-las. No Brasil, a preocupação com a deterioração só veio a acontecer, de forma organizada, nos últimos anos. Existia até então a dificuldade de entender a importância de se desenvolverem elementos estruturais duráveis.

Segundo Ueda e Takewaka (2007), em 2004 somente a Alemanha gastou aproximadamente 90 bilhões de euros com manutenção e reparo de estruturas de concreto armado.

A tabela 1, a seguir, mostra a relação entre os investimentos em novas construções e os recursos utilizados para trabalhos e manutenção das edificações existentes em alguns países.

Tabela 1 Relação financeira entre novas construções e trabalhos de recuperação de construções existentes.

<i>País</i>	<i>Novas estruturas</i>	<i>Trabalhos de manutenção e reparo</i>	<i>Total de gastos com a construção civil</i>
<i>Japão</i>	<i>52,5 trilhões de ienes (83%)</i>	<i>10,7 trilhões de ienes (17%)</i>	<i>63,2 trilhões de ienes (100%)</i>
<i>Coréia</i>	<i>116,8 trilhões de wones (85%)</i>	<i>21,1 trilhões de wones (15%)</i>	<i>137,9 trilhões de wones (100%)</i>
<i>França</i>	<i>85,6 bilhões de euros (52%)</i>	<i>79,6 bilhões de euros (48%)</i>	<i>165,2 bilhões de euros (100%)</i>
<i>Alemanha</i>	<i>99,7 bilhões de euros (50%)</i>	<i>99,0 bilhões de euros (50%)</i>	<i>198,7 bilhões de euros (100%)</i>
<i>Itália</i>	<i>58,6 bilhões de euros (43%)</i>	<i>76,8 bilhões de euros (57%)</i>	<i>135,4 bilhões de euros (100%)</i>
<i>Reino Unido</i>	<i>60,7 bilhões de libras (50%)</i>	<i>61,2 bilhões de libras (50%)</i>	<i>121,9 bilhões de libras (100%)</i>

Ueda e Takewaka (2007),

Segundo Grochoski e Helene (2008), as estruturas de concreto têm potencial para apresentarem vida útil muito superior a 50 anos, porém observa-se que estão deteriorando-se precocemente até antes disso. Já aos 10, 15 anos, exigem intervenção corretiva significativa. Sendo as estruturas de concreto armado o mais freqüente e principal sistema utilizado na construção dos edifícios e da infraestrutura no mundo atual, deficiências no conhecimento dos materiais, na sua concepção,

projeto, construção e manutenção, podem resultar em grandes perdas diretas e indiretas para a sociedade.

A deterioração do concreto está ligada à ação da água em todas as suas fases de produção e utilização e muitas são as formas de atuação da mesma no material. Segundo Mehta e Monteiro (1994), a capacidade solvente da água é notável e esta propriedade é a responsável pelo grande número de íons e gases nela presentes. Isto a torna responsável pela deterioração química de muitos sólidos, entre eles o concreto. O concreto é um material de natureza básica, resultado da presença dos compostos alcalinos de cálcio dos produtos de hidratação do cimento Portland, o que torna as águas ácidas sempre um risco maior de deterioração do meio.

Produzir concretos com excelentes propriedades relacionadas com a trabalhabilidade, resistência e durabilidade, tem sido objetivo de muitos pesquisadores pelo mundo. A durabilidade relaciona-se diretamente com a baixa porosidade e uma microestrutura mais uniforme. Segundo Sousa e Ripper (1998), todos os conceitos de durabilidade, vida útil e desempenho estão interligados. A figura 6 resume desempenho e durabilidade da estrutura.

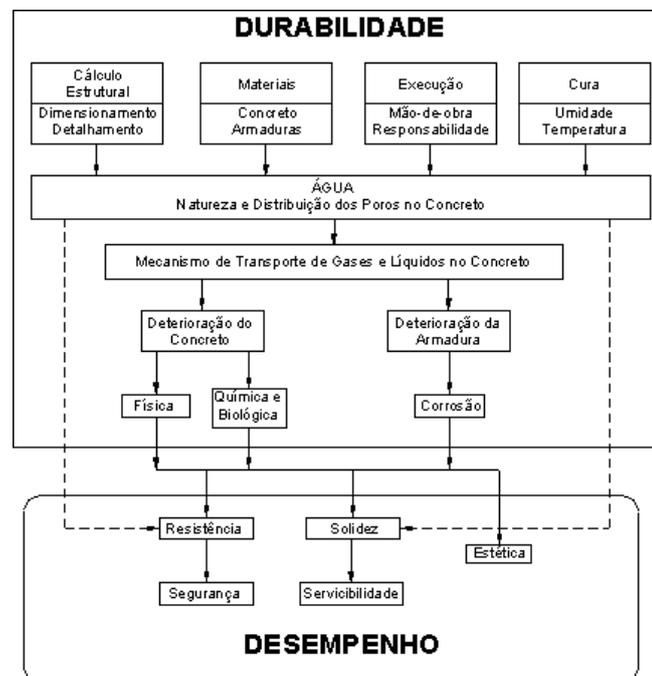


Figura 6 Roteiro durabilidade versus desempenho, www.altoqi.com.br, (acesso em 17 de dezembro 2009).

2.3 MECANISMOS DE TRANSPORTE DE FLUIDOS NO CONCRETO

Segundo HELENE (2001), o estudo da durabilidade das estruturas de concreto armado tem evoluído graças ao maior conhecimento dos mecanismos de transporte de líquidos e de gases agressivos nos meios porosos do concreto, que possibilitaram associar o tempo aos modelos matemáticos que expressam quantitativamente esses mecanismos. As taxas de penetração de agentes agressivos para o interior do concreto são controladas pelo ambiente no qual a estrutura está exposta e pela microestrutura da pasta de concreto.

Avanços tecnológicos referentes à constituição da dosagem do concreto, aliados às boas práticas construtivas, incluindo boa cura, são essenciais para produzir uma estrutura de concreto durável. Quanto maiores os cuidados com a cura do concreto, melhor é o seu desempenho mecânico e a sua resistência aos agentes agressivos ao meio ambiente.

A estrutura dos poros do concreto, as configurações das fissuras derivadas da deficiência do processo de cura e sobrecarga nas estruturas de concreto e os fluidos presentes nos ambientes são os principais fatores envolvidos no transporte de substâncias potencialmente nocivas ao concreto e à armadura nele envolto.

A figura 7, a seguir, resume os fatores e demonstram suas influências durante processo de transporte de fluidos pelo concreto

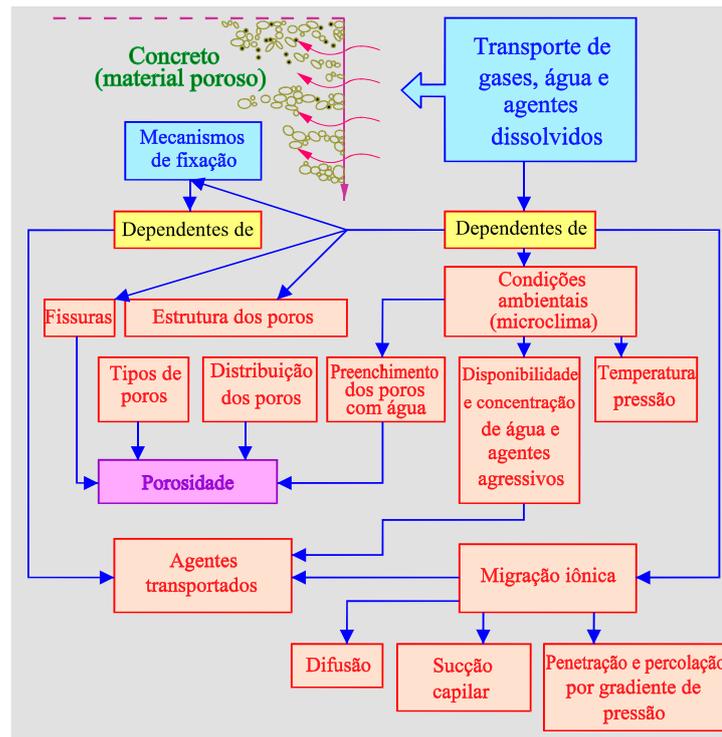


Figura 7 Mecanismos envolvidos nos fenômenos de transporte de fluidos no concreto COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON apud Isaia (1995).

Segundo Neville (1997), são três os principais fluidos importantes para a durabilidade que podem ingressar no concreto: água pura ou com íons agressivos, dióxido de carbono e oxigênio. Eles podem se deslocar através do concreto de modos diferentes, mas todo deslocamento depende basicamente da estrutura da pasta do cimento hidratado.

A permeabilidade, difusão e sorção são as três principais formas de transporte de massa por meio poroso do concreto, mecanismos que podem ocorrer de forma individual ou em conjunto. A permeabilidade constitui num deslocamento de fluidos sob um gradiente de pressão, a difusão sob um gradiente de concentração e a sorção devido ao conjunto de fenômenos de adsorção e dessorção.

Especificamente, o fenômeno de difusão responsável pelo fenômeno de carbonatação constitui-se pelo deslocamento de fluidos pelos poros interligados do concreto, através de um gradiente de concentração, processo que resulta no deslocamento de íons de regiões de alta concentração para baixa concentração. O processo de difusão independe do fluxo de líquido para o interior do concreto,

bastando apenas diferentes concentrações de íons e sua velocidade de penetração depende diretamente da concentração dos íons presentes no meio.

Existem poros de natureza diferente que podem contribuir para permeabilidade ou não, o que destingue a permeabilidade e a porosidade. Neville (1997) relata que a porosidade é a medida da proporção do volume total do concreto ocupado pelos poros, geralmente expressa em porcentagem. Se a porosidade for grande e estiverem interligados, os poros contribuem para o deslocamento de fluidos através do concreto, de modo que a permeabilidade passa a ser alta. Por outro lado, se os poros forem descontínuos ou de outro modo ineficazes para o deslocamento de fluidos, a permeabilidade do concreto será baixa, mesmo com porosidade alta.

No concreto, material poroso e permeável (figura 8), os processos de transporte de fluidos são definidos pela interconexão entre os vazios constituinte do material e, assim, está dentre os parâmetros para determinação da durabilidade das estruturas com grande relevância. O material mais ou menos suscetível aos processos de transporte é mais ou menos suscetível ao avanço de fluidos agressivos.

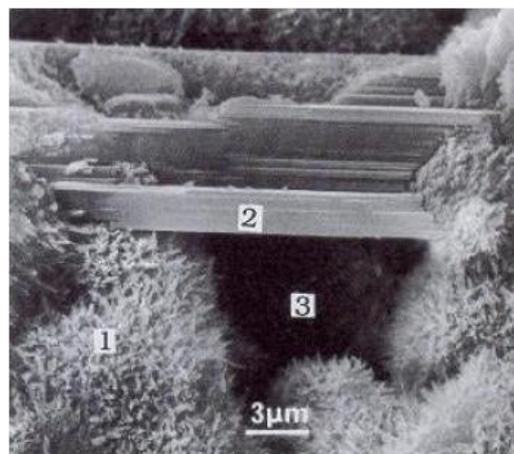


Figura 8 Microestrutura do concreto (1 - CSH, 2 - CH, 3 - Vazio capilar), Moraneville (1992).

Os poros importantes para o fluxo de fluidos são aqueles com diâmetros pelo menos de 120 nm a 160 nm, os quais que devem ser contínuos (Neville 1997). Um dos aspectos importante da microestrutura da pasta de cimento hidratado para este fluxo é a natureza do sistema de poros no interior da sua massa e também na região próxima da interface com o agregado.

2.4 FENÔMENO DE CARBONATAÇÃO

A presença de dióxido de carbono na atmosfera resultante da queima de combustíveis fósseis, principalmente pelos setores de transporte e industrial, incluindo a indústria cimenteira, além de efeitos maléficos frente ao efeito estufa, é um dos grandes agentes de degradação das estruturas de concreto, ocasionando a carbonatação da superfície das peças estruturais.

O CO_2 , um gás importante para o reino vegetal essencial para a vida, necessário na realização do processo de fotossíntese das plantas (processo pelo qual as plantas transformam a energia solar em energia química) é tão prejudicial na construção civil, especialmente pelo efeito da neutralização dos compostos alcalinos e não alcalinos. A despassivação da armadura por carbonatação ocorre pela ação do gás carbônico que penetra por difusão e reage com os hidróxidos alcalinos presentes nos poros do concreto, reduzindo seu pH e propiciando, assim, a possibilidade de corrosão da armadura.

Durante o processo de cura do concreto, uma rede de poros é formada e fica preenchida por uma solução formada por hidróxidos alcalinos constituídos principalmente de íons de HO^- , Ca^{++} , Na^+ , K^+ , SO_4^- , que promovem uma elevada alcalinidade quando a pasta de cimento do concreto vai se hidratando. Quando endurecido, o concreto possui uma alcalinidade (pH) entre 12 e 14. Somado à presença de oxigênio com a elevada alcalinidade, uma cobertura de óxidos aderente de forma compacta e invisível se forma, protegendo o aço da corrosão. Helene (1993) descreve o processo da seguinte forma:

A armadura dentro do concreto normalmente encontra-se protegida da corrosão devido à alta alcalinidade deste material (pH entre 12,7 e 13,8). Esse nível de pH favorece a formação de uma camada de óxidos submicroscópica passivante, compacta e aderente sobre a superfície da armadura. Essa camada protege a mesma de qualquer sinal de corrosão, desde que as condições de potencial e pH mantenham-se estáveis. No entanto, esta passividade pode ser destruída pela penetração de agentes agressivos (CO_2 , Cl^- , entre outros) que podem alterar as condições acima referidas, com a alteração do pH junto à armadura de forma generalizada ou pontual.

Especificamente à corrosão do aço, o desencadeamento do fenômeno de carbonatação pode ser representado através do modelo de Tuutti (1982). Ele dividiu a corrosão das armaduras em duas fases distintas (Figura 9).

- Na primeira, denominada período de iniciação, ocorre a penetração dos agentes agressivos até que estes atinjam a armadura, despassivando-a, sem a perda de funcionalidade da estrutura.
- Na segunda, denominada período de propagação, há uma aceleração do processo de degradação da estrutura, comprometendo tanto a estabilidade estrutural quanto o seu aspecto visual.

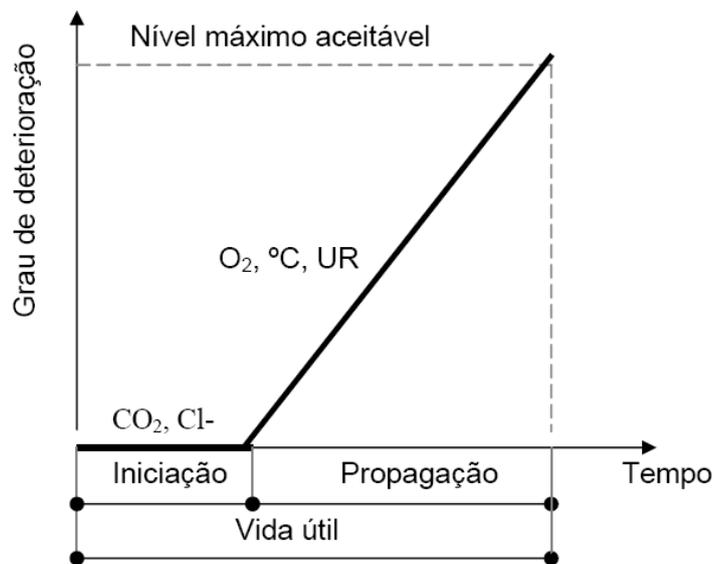


Figura 9 Modelo de Tuutti (1982), para a corrosão do aço envolto ao concreto.

Além da carbonatação, a ação dos íons cloretos é uma das principais formas de destruição desta cobertura, condições determinantes para o início da corrosão das armaduras. No momento em que a carbonatação atinge a profundidade correspondente ao aço e a cobertura de óxidos aderente a ele, começa a degradação da armadura e tem início o processo de corrosão. Estes agentes não são prejudiciais ao concreto, mas especificamente às armaduras nele envolta.

Segundo Bakker (1988) apud Isaia, Vaguetti e Gastaldini, (2003), a velocidade das reações de carbonatação está relacionada com a quantidade dos

produtos alcalinos carbonatáveis (tipo e quantidade de cimento) e com a quantidade de CO₂, que difundirá na unidade de tempo pelo concreto (permeabilidade).

Segundo Cascudo (1997), o processo de carbonatação também é dependente de como o concreto for lançado, adensado e curado, bem como o tipo de cimento, condições ambientais e umidade do ambiente, sendo maior a carbonatação quanto maior for o fator água/cimento. Estas condições determinam a microestrutura, principalmente no que se refere à distribuição dos poros.

A propagação da carbonatação inicia-se na superfície da peça estrutural no sentido do seu interior, de forma natural nas estruturas de concreto expostas no ambiente aonde exista certa concentração de CO₂ e variação de umidade. Quanto maior concentração de CO₂ no ambiente em que o elemento esteja exposto, maior é o incremento da taxa de carbonatação. Diversos autores relatam que em ambientes urbanos, com tráfego intenso, a concentração em volume de CO₂ no ar pode variar entre 0,1 e 1,2%, propiciando, na presença de umidade, uma maior difusão desse gás nos poros e capilares do concreto.

Segundo HELENE (1993),

A penetração do gás carbônico no concreto dá-se preponderantemente por um mecanismo de difusão. (...) Portanto, na maioria dos casos trata-se de gradientes de concentração de CO₂. Influirá a concentração de CO₂ no ambiente externo, junto à estrutura, comparativamente à concentração de CO₂ nos poros capilares do concreto de cobrimento das armaduras.

A principal reação que caracteriza o fenômeno da carbonatação é a seguinte, representada de forma simplificada:



O hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂), liberado das reações de hidratação do cimento, reage com o gás carbônico (CO₂) ou outros gases ácidos, como o gás sulfídrico (H₂S) ou dióxido de enxofre (SO₂), formando os carbonatos (CaCO₃) ou sulfatos (CaSO₄) e água. Outros compostos formados na hidratação do cimento também são suscetíveis ao processo, como o hidróxido de potássio (KOH) e o

hidróxido de sódio (NaOH). A figura 10, a seguir, mostra de forma esquemática o fenômeno de carbonatação.

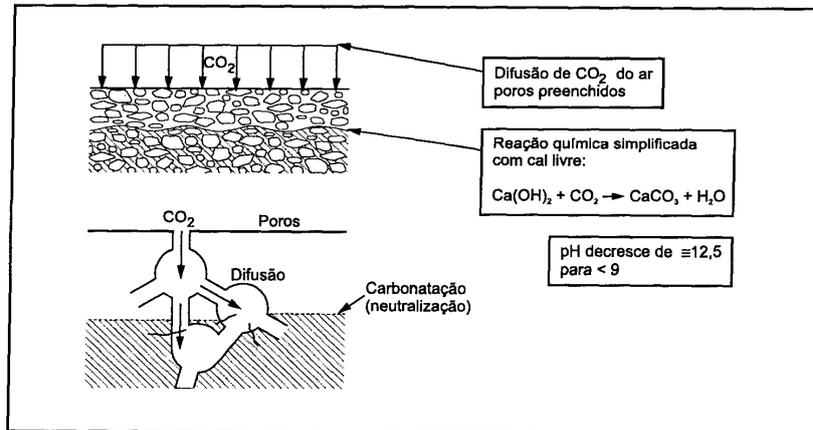


Figura 10 Representação esquemática da carbonatação Cascudo (1997).

Segundo HELENE (1993), o hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 é menos solúvel que outros álcalis do cimento, o hidróxido de sódio NaOH, e o hidróxido de potássio KOH. Dessa forma, o hidróxido de cálcio encontra-se, na solução presente nos poros do concreto, normalmente na forma de cristais, enquanto os outros estão dissolvidos na forma de íons. Como a solubilidade do Ca(OH)_2 depende da concentração de OH^- na solução intersticial, a reação de carbonatação começa através dos álcalis NaOH e KOH, passando a seguir ao Ca(OH)_2 .

2.5 PRINCIPAIS FATORES QUE AFETAM A CARBONATAÇÃO

Segundo Neville (1997), o fator fundamental que controla a carbonatação é a difusividade da pasta de cimento hidratada. A difusividade é função do sistema de poros da pasta de cimento durante o período em que ocorre a difusão do CO_2 . Com isso, conclui-se que são importantes o tipo de cimento, a relação água/cimento e o grau de hidratação, entre outros fatores que também influenciam diretamente na resistência à compressão do concreto. Quanto ao que se refere à quantificação da

umidade no meio, para que o processo de carbonatação ocorra de forma mais ou menos eficiente, pode-se fazer as seguintes afirmações:

- Em poros saturados de água, o processo de carbonatação quase não ocorre, devido à baixa difusão do CO_2 (figura 11).

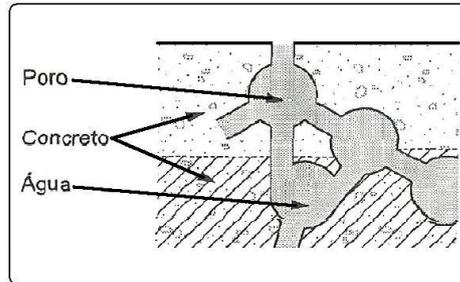


Figura 11 Representação esquemática da carbonatação parcial do concreto saturado com água (Cascardo,1997).

- Em poros excessivamente secos, o gás penetra facilmente, mas faltará água para que a reação ocorra, para a sua transformação prévia em ácido carbônico (figura 12).

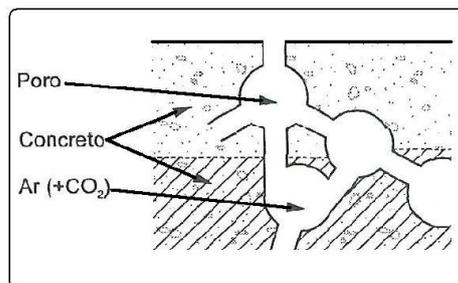


Figura 12 Poros sem presença de umidade (Cascardo,1997).

- Em ambientes sujeitos a intempéries frequentes, como chuva e o sol intenso, a carbonatação da superfície do concreto é lenta ou praticamente nula.
- Em locais protegidos, onde a umidade se mantém na faixa entre 50 e 80%, a velocidade de avanço da frente de carbonatação é alta, contribuindo para a deterioração do concreto num prazo mais curto.

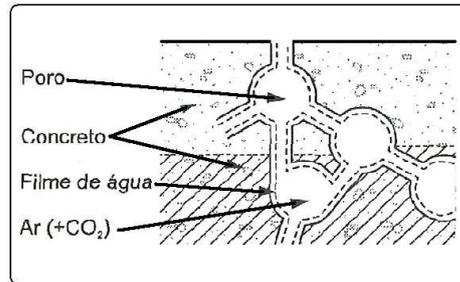


Figura 13 Poros parcialmente saturados (Cascardo, 1997).

A figura 14, a seguir, mostra a relação entre o grau de carbonatação e a umidade relativa. Podemos ver que o grau de carbonatação é maior quando a umidade relativa do ar situa-se em valores medianos, de 30 a 80%.

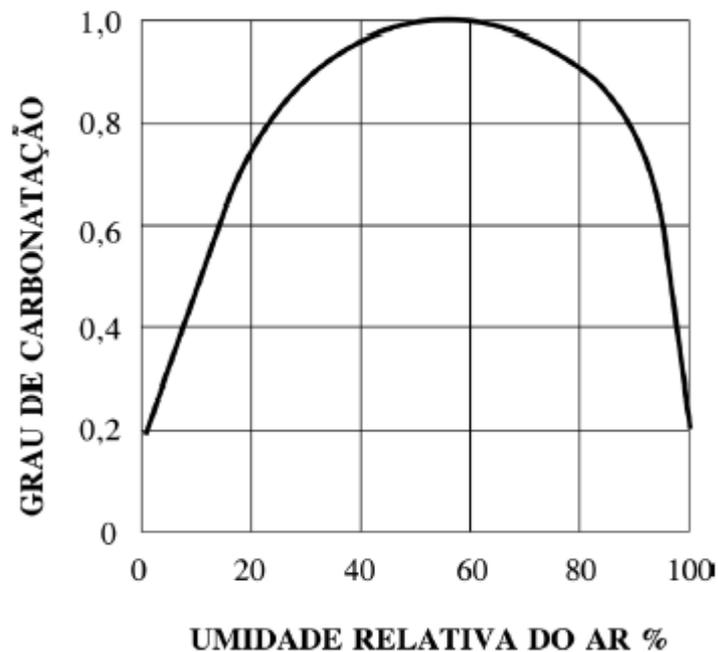


Figura 14 Relação entre umidade relativa e grau de carbonatação (VERBECK, 1950, apud VÉNUAT; ALEXANDRE, 1969).

O gás CO_2 está presente na atmosfera em aproximadamente 0.03% por volume de ar (NEVILLE et al., 1993). A velocidade da carbonatação está diretamente ligada com a concentração de CO_2 na atmosfera em torno do concreto. A velocidade aumenta quando o ambiente possui uma maior concentração de CO_2 , principalmente para concretos de elevadas relações a/ag. Para Helene (1993), a

atmosfera e o microclima que envolvem a estrutura influem conjuntamente na taxa de carbonatação. A concentração de CO_2 altera-se quando se compara ambientes fechados e abertos: nos primeiros, a taxa de carbonatação geralmente é superior que nos últimos, onde há uma constante renovação do ar.

Mehta et al. (1992), apud Kazmierczak (1996), relacionaram a exposição em laboratório com temperatura de 20°C e umidade relativa de 65%, em que a profundidade de carbonatação normalmente apresenta uma relação na ordem de 1 : 0.7 : 0.2, considerando exposição em laboratório, em ambiente externo protegido de chuva e em ambiente externo sujeito a intempéries, respectivamente.

Os concretos de cimento Portland apresentam crescimento dos valores de carbonatação com o aumento da relação água/cimento, como consequência do crescimento da quantidade de poros. Diversos autores revelam que à medida que esta relação diminui, as profundidades de carbonatação também regridem. Helene (1993) mostra que a espessura carbonatada apresenta uma curva ascendente de crescimento com a relação a/c (Figura 15), em concretos com cimento Portland CP II-F32 (NBR 11578). Assim, a resistência à compressão de concretos com o mesmo material cimentício torna-se uma medida indireta da carbonatação desde que, segundo a lei de Abrams, aquela é inversamente proporcional à relação água/cimento.

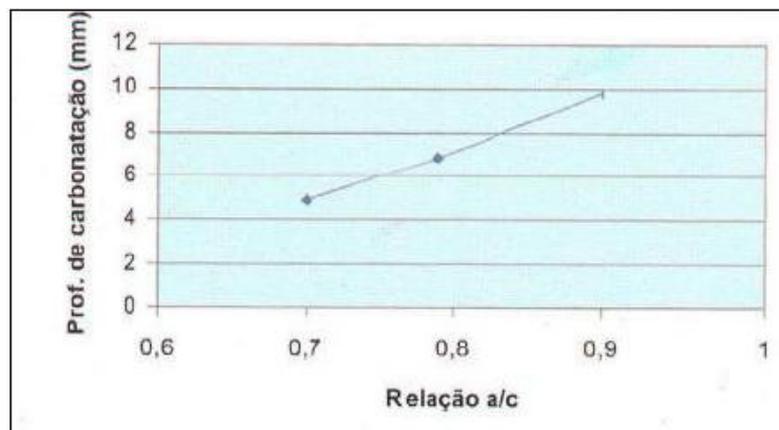


Figura 15 Profundidade carbonatação X A/C, Helene (1999).

Segundo Isaia, Furquim e Gastaldini (2008), quando parte do cimento é substituído por adições minerais, as reações de hidratação e/ou pozolânicas formam compostos hidratados mais homogêneos e induzem à diminuição de hidróxido de cálcio, originando pastas mais densas pelo refinamento dos poros, o que dificulta a percolação de fluidos agressivos.

Por outro lado, quando se trata especificamente de concretos produzidos com adições minerais frente ao fenômeno de carbonatação, Isaia, Vaguetti e Gastaldini, (2003) relatam,

A profundidade de carbonatação depende do tipo e da quantidade da adição empregada, sendo tão maior quanto mais reativa e maior o teor na mistura, fatores que estão diretamente ligados com o maior consumo de hidróxido de cálcio. Com efeito, a carbonatação de concreto com adições está relacionada ao teor efetivo de cimento do traço, sendo tão maior quanto menor este teor.

De acordo com Johannesson *et al.* (2001), o teor de CH formado pela hidratação do cimento representa cerca de 30% da massa do cimento completamente hidratado. Na substituição parcial de cimento por adições minerais, ocorre uma diminuição do teor de CH produzido em comparação com um concreto com cimento puro. Também ocorre o consumo deste CH pelas reações pozolânicas (reações secundárias) entre a sílica reativa das adições minerais para a formação do C-S-H secundário. Assim, concretos contendo adições minerais apresentam menor quantidade de CH produzida e remanescente em comparação àqueles sem adições minerais. Esse fato ocasiona uma diminuição da reserva alcalina, que é um dos fatores principais para o aumento da velocidade das reações de carbonatação.

A cura úmida para o concreto influencia de forma decisiva no seu desempenho ao longo de sua vida útil, especialmente na carbonatação. Esta é bastante reduzida quando o concreto for submetido a períodos de cura inicial prolongada, possibilitando melhor hidratação do cimento, diminuição da porosidade e aumento da compactação e, logo, maior proteção frente à penetração.

Quando se utiliza adições minerais ao concreto, sob o ponto de vista da carbonatação, uma cura bem executada e por período maior proporciona melhor desenvolvimento das reações pozolânicas e refinamento dos poros da estrutura, podendo reduzir a permeabilidade e, de certa forma, compensando o efeito negativo do consumo de CH.

Assim, o emprego de cura úmida prolongada torna-se importante para o concreto, principalmente quando ocorre a incorporação de CCA residual, contribuindo para incrementar as potencialidades de durabilidade deste material.

Partindo da premissa que um processo de cura eficiente do concreto diminui os números de vazios e ligações entre poros e também evita fissuras de retração, concluímos que um bom processo de cura é fundamental para reduzir o efeito da carbonatação. Diversas microfissuras surgem na superfície do concreto mal curado. A pré-existência de fissuras nas estruturas facilita a entrada do CO_2 e pode acelerar o processo de carbonatação.

A resistência à compressão é uma propriedade de grande importância para comparar misturas de mesmas idades, principalmente quando se comparam misturas com diferentes materiais cimentícios. Este fato decorre das diferentes estruturas de poros que as pastas apresentam para uma mesma relação água/materiais cimentícios

Para exemplificar, Venquiaruto (2002), em misturas com CV e CCA, em teores de 25% e 50%, com duas finuras (finura 1 = $3,5 \text{ m}^2/\text{g}$ e finura 2 = $4,6 \text{ m}^2/\text{g}$ para CV e finura 1 = $23,0 \text{ m}^2/\text{g}$ e finura 2 = $36,6 \text{ m}^2/\text{g}$ para CCA), mostra correlação entre as resistências à compressão axial e aos coeficientes de carbonatação acelerada, conforme figura 16. Houve tendência de diminuição dos coeficientes de carbonatação com o aumento da resistência mecânica dos concretos, para os diferentes traços e diferentes finuras empregadas.

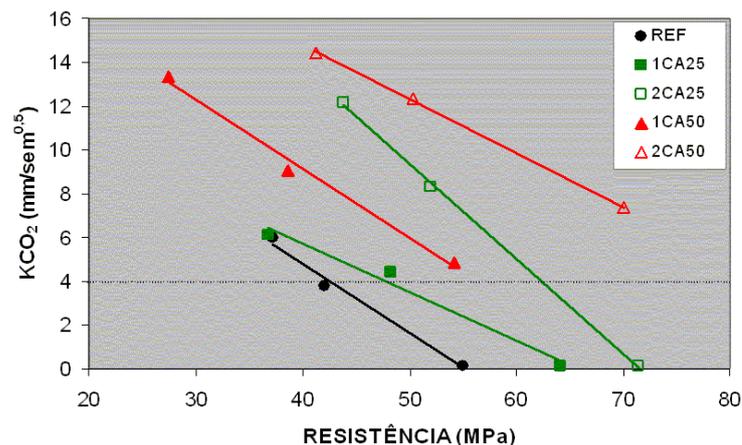


Figura 16 Resistência a compressão axial versus coeficientes de carbonatação Venquiaruto (2002).

2.6 CARBONATAÇÃO NATURAL E ACELERADA

As reações decorrentes da difusão do CO_2 nos poros com os compostos de alcalinos dos produtos de hidratação são relativamente lentas nas estruturas de concreto em dado ambiente, visto que a sua concentração no ar é baixa ($\approx 0,04\%$ em atmosferas normais), resultando num processo que torna muitas vezes inviável o tempo de espera para determinação da velocidade de carbonatação, que pode levar até 20 anos (KOBUKU, M., NAGATAKI, S., 1989).

Por essa razão, para efeito de estudo de laboratório entre tipos diferentes de concretos ou de fatores intervenientes, as pesquisas empregam ensaio acelerado em câmaras climatizadas, com atmosfera rica em gás carbônico, com o objetivo de acelerar as reações de carbonatação. A taxa de gás empregada varia desde valores baixos em torno de 5%, em volume (DHIR et al. 1989), até 50% (PAPADAKIS, V., VAYENAS, C., FARDIS, M), 1991), 80-90% [HOUST, Y. F, 1997] ou mesmo 100% (KAZMIERCZAK, C. S., LINDENMEYER, Z, 1996). Estes últimos autores consideram que taxas elevadas de CO_2 podem transformar o carbonato de cálcio insolúvel em bicarbonato de cálcio solúvel, gerando regiões carbonatadas com microestrutura diferente daquela em que a carbonatação ocorreu sob a ação de pequenas concentrações.

Em pesquisas mais atuais, alguns autores concordam com os autores acima e indicam que ensaios acelerados com teores do CO_2 acima de 5% podem trazer modificações substanciais na microestrutura das pastas, especialmente no C-S-H, fazendo com que as comparações com os ensaios de carbonatação natural não sejam realizadas em igualdade de condições.

A comparação entre os tempos de carbonatação acelerada, em dadas condições ambientais, é difícil devido ao grande número de fatores que interferem no resultado final. Ho e Lewis (1987) sugerem que, para ensaio acelerado com 4% de CO_2 , cura prévia de 7 dias a 23°C e 50% de umidade relativa, a relação de 1 semana em câmara condicionada equivale a 1 ano de ensaio natural nas mesmas condições ambientais. Dhir et al. (1989) estabelecem os tempos de 1 semana e 15 meses, respectivamente.

CAPÍTULO 3

ADIÇÕES MINERAIS

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo, será apresentada uma revisão sobre as adições minerais no concreto, revisando suas propriedades e seus benefícios. Serão destacadas adições de cinza de casca de arroz e suas características frente a agentes agressivos do concreto estrutural.

3.2 INTRODUÇÃO

Movidos pela preocupação do impacto ambiental que a construção civil causa ao longo de sua cadeia produtiva, pesquisadores buscam técnicas de aproveitamento dos co-produtos oriundos de processos industriais, que muitas vezes são descartados ao meio ambiente sem controle e de forma inadequada. Utilizar esses materiais de descarte, substituindo o cimento, o mais poluente da cadeia dos materiais de construção, em busca da obtenção de avanços tecnológicos nas misturas, às quais esse insumo se faz presente, tem sido o objetivo de pesquisadores de todo mundo. Hoje, tanto a indústria como a pesquisa têm novos enfoques tecnológicos no uso desses materiais. Diminuir custos, tanto na produção do concreto quanto no possível investimento em recuperação das estruturas, aliado aos preceitos ambientais, rege a direção da vida de pessoas que se dedicam à pesquisa.

Silva (2007) define adições minerais a todo material finamente moído adicionado ao concreto. Destaca que entre os principais benefícios possíveis de serem alcançados estão a trabalhabilidade e durabilidade frente aos agentes agressivos.

Isaia e Gastaldini (2004) relatam que o cimento Portland, constituído de silicatos, aluminatos e ferro-aluminatos de cálcio, possui composição similar às adições minerais constituídas de compostos sílico-cálcicoaluminosos, podendo substituir parte do cimento se apresentarem, preferencialmente, estrutura vítrea. São mais utilizadas as pozolanas, que reagem com a cal proveniente das reações de hidratação ou a escória básica granulada de alto forno, que, devido ao alto teor de cálcio, possui propriedades pozolânicas e cimentícias.

Mehta e Monteiro (1994) apontam que a substituição parcial de cimento por adições minerais melhora a microestrutura do concreto porque as pequenas partículas segmentam os canais de percolação de água, reduzem a exsudação e segregação e promovem o aumento de locais de nucleação para precipitação dos produtos de hidratação, tornando a pasta mais homogênea. Por efeito físico, os grãos menores propiciam empacotamento dos poros, diminuem o efeito parede na zona de transição e promovem o aumento da resistência.

Quanto à sua classificação, Silva (2007) define as adições minerais em três grupos: o primeiro, denominado materiais cimentícios, inclui as escórias de alto forno. O segundo, chamado de materiais pozolânicos, refere-se à cinza de casca de arroz, cinza volante, sílica ativa, entre outros. Geralmente com origem silicosa, são materiais que necessitam CH para terem propriedades cimentícias. O terceiro envolve materiais não-reativos, como filer calcário. Em qualquer caso, o resultado é muito semelhante, com a adição mineral interagindo quimicamente e fisicamente com os produtos de hidratação do clínquer ou do cimento Portland, modificando a microestrutura da pasta.

Já Mehta e Monteiro (2008) definem como materiais pozolânicos aqueles silicosos ou sílico-aluminosos que possuem pouca ou nenhuma propriedade cimentante, mas quando finamente dividido e na presença de umidade, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente, para formar compostos com propriedades cimentantes. Classificam as adições minerais em materiais naturais e subprodutos. Materiais naturais são aqueles encontrados na natureza e que são processados (moídos) para atuarem como pozolanas. Já os denominados subprodutos são aqueles oriundos de processos industriais de produção ou beneficiamento de outro produto.

Existem relatos históricos que citam a utilização de pozolanas na mistura de concretos e argamassas na Grécia e Roma antiga, em diferentes obras. Algumas

perduram até hoje. A cinza de casca de arroz especificamente estudada neste trabalho é um subproduto de processo industrial do beneficiamento do arroz, que se caracteriza como um material pozolânico e uma importante fonte renovável de sílica parcialmente amorfa.

Tanto a NBR 12653 (ABNT,1992), como a ASTM C 618 (ASTM,1978), definem as pozolanas como materiais que, por si só, possuem pouca ou nenhuma atividade cimentante, mas que, quando finamente divididos e em presença de água, são capazes de reagir com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente e formar compostos com propriedades cimentantes.

Existem pozolanas naturais, de origem vulcânica, que não requerem qualquer tratamento a não ser moagem e artificiais resultantes da calcinação de rochas sedimentares e subprodutos de processos agroindustriais, como a cinza de casca de arroz, ou industriais, como a cinza volante. As pozolanas contêm predominantemente sílica em forma ativa, vítrea, em sua constituição morfológica.

O cimento Portland comum, em determinados aspectos, apresenta deficiências ou insuficiências para atender necessidades específicas da indústria da construção civil, especialmente sob aspectos de durabilidade. O uso das pozolanas pode suprir estas necessidades, levando a certas vantagens, sendo os cimentos com adições pozolânicas recomendados por seu uso específico (Santos, 2006).

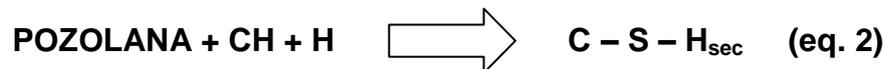
Isaia (1995) relata que o concreto de elevado desempenho com pozolanas tem sido utilizado para propiciar microestrutura mais uniforme e compacta, resultando em desempenho superior ao concreto normal sem adições, no concerne da durabilidade do concreto e armadura.

Mehta (1987) ressalta que, entre as vantagens da utilização de pozolanas em concretos com cimento Portland, estão o aumento da trabalhabilidade do material, aumento da resistência à fissuração devido à redução da reação álcali-agregado e maior impermeabilidade.

A substituição parcial do cimento por pozolanas implica ainda na economia de energia e na redução do custo de fabricação do cimento, porque são, na maioria dos casos, mais baratas que o clínquer. Isto aumenta o período de exploração das jazidas de calcário e argila e, conseqüentemente, o período de produção da fábrica de cimento. Além disso, há um aumento da capacidade de produção sem necessidade de novos investimentos. Contudo, a questão socioambiental se mostra de maior importância (Santos 2006).

Quando se substitui parte de cimento por adições minerais, cada tipo atua de modo distinto, de acordo com a finura, atividade química, física ou ainda quantidade na mistura, tendo em vista que esses fatores proporcionam diferentes interações com a pasta. Alterações do tipo ou teor da adição mineral e da relação água/aglomerante (a/ag) influem na microestrutura dessas pastas e resultam em comportamento mecânico e de durabilidade distintos (Isaia Furquim e Gastaldini (2009).

As reações pozolânicas consomem o CH (hidróxido de cálcio), formando C-S-H secundário (silicato de cálcio hidratado secundário), que é semelhante ao CSH convencional formado durante as reações de hidratação do cimento. A sílica amorfa, que é a principal fase ativa das pozolanas, em contato com água e à temperatura ambiente, solubiliza em meio alcalino e reage com íons Ca^{2+} para formar silicatos de cálcio hidratados.



Nesta equação, o CH representa o hidróxido de cálcio, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, o H a água, H_2O , e o S a sílica. O C-S-H formado é denominado de secundário, devido a uma menor densidade e menor relação C/S, contribuindo para o refinamento dos poros do concreto e transformando os vazios capilares grandes em menores (refinamento dos poros) e o concreto passa a ser um material mais denso e compacto.

Seguindo esses preceitos, pode-se chegar à conclusão que a atividade pozolânica de um material irá depender de sua capacidade de reagir com o hidróxido de cálcio, ou seja, da sua reatividade química. Entretanto, deve ser levado em conta também o efeito físico que as partículas exercem por meio das forças de atração promovidas pelo potencial zeta.

3.3 CASCA DE ARROZ

A maioria dos autores acredita que o arroz seja originário da Ásia Sul-Oriental, região que inclui a China, a Índia e a Indochina. Cultivado há pelo menos 7

mil anos, é ingrediente principal de vários pratos típicos de diferentes culturas mundiais.

O Rio Grande do Sul concentra a maior produção de arroz do Brasil. É no RS que várias indústrias utilizam o poder calorífico da casca de arroz como uma alternativa sustentável para gerar energia. Gilberto Wagek Amato do IRGA (2010) indica que, em termos de energia, 500 quilos de casca de arroz equivalem a um barril de petróleo.

A casca representa o maior volume entre os subprodutos obtidos durante o beneficiamento do arroz, chegando, em média, a 22%. Sua utilização é bastante variada, sendo a principal a produção de energia para o beneficiamento do grão. Como propicia temperaturas de até 1000°C, é usada na alimentação de fornalhas de secadores e das autoclaves da própria indústria arroseira. Como sua densidade é baixa, o transporte torna-se problemático. Por isso, ela pode ser transformada em "briquetes", que são aglomerados de casca, que reduzem consideravelmente seu volume. Durante a queima, a casca produz muita cinza, mas sua fumaça é pouco poluente, pois não possui quase enxofre.

Segundo Neville (1997), a palha de arroz tem alto teor de sílica e, com o tratamento a temperatura entre 500 e 700 graus, resulta em uma matéria de estrutura amorfa e porosa de baixa densidade. Assim, a área específica pode chegar a 50.000 m²/kg, mesmo com partículas relativamente grandes.

A casca do arroz (figura 17) é formada por uma capa lenhosa, dura e altamente silicosa. Composta por 50% de celulose, 30% de lignina e 20% de sílica em base anidra, que provém do solo. O resíduo inorgânico contém, em média, 95 a 98%, em peso, de sílica, na forma amorfa hidratada, perfazendo 13 a 29% do total. Esta variação do percentual de sílica na casca de arroz depende da safra, ou seja, da variedade plantada, do clima e das condições do solo, além da localização geográfica (AMICK, 1982; GOVINDARAO, 1980; HOUSTON, 1972; *apud* POUHEY, 2006). PATEL *ET al.* (1987) *apud* POUHEY (2006), estudando o efeito de tratamentos químicos e térmicos em material proveniente da Índia, encontraram percentuais de 22,12% de SiO₂, 73,8% de material orgânico e água e, em torno de 4% de outros elementos constituintes, como Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, MgO e MnO₂. A lignina e a celulose são removidas durante a queima da casca (Netto, 2006).



Figura 17 Casca de arroz (São Borja, 2009).

No Brasil, há centenas de usinas de beneficiamento de arroz, a maioria delas localizadas no Rio Grande do Sul. O beneficiamento de arroz não ocorre, necessariamente próximo ao local da produção, uma vez que o transporte do chamado arroz bruto ou arroz em casca, para seu beneficiamento próximo do mercado consumidor, é economicamente justificável. Assim, o Estado de São Paulo, que não é um grande produtor, tem razoável capacidade de beneficiamento, além dos Estados produtores, (EMBRAPA, 2010).

As usinas de beneficiamento de arroz são classificadas em três grupos: as exclusivamente produtoras de arroz branco, as exclusivamente produtoras de arroz parboilizado e as unidades produtoras de arroz branco e parboilizado.

A parboilização é o processo hidrotérmico no qual o arroz em casca é imerso em água potável a uma temperatura acima de 58°C, seguido de gelatinização parcial ou total do amido e secagem. A maior parte da produção brasileira é de arroz branco, concentrada no Rio Grande do Sul. Santa Catarina, o segundo maior Estado produtor, concentra a produção de arroz parboilizado. O arroz vem da lavoura com 25-30% de umidade, índice que varia com as condições de plantio e a época do ano. A umidade precisa ser reduzida para 12-15% para que o arroz seja beneficiado e, no máximo a 13%, para que seja armazenado. A secagem é feita com queima da casca e os gases de combustão são empregados como meio de aquecimento. Uma usina exclusivamente produtora de arroz branco não tem consumo de vapor de processo.

O poder calorífico superior, em base seca, da casca de arroz, é 15,84 GJ/t. O poder calorífico inferior, com umidade de 11%, é de 12,96 GJ/t, muito superior ao bagaço de cana.

Já uma usina produtora de arroz parboilizado tem demanda de vapor na produção industrial, para o encharcamento do arroz nas autoclaves, para a própria parboilização do grão e, em algumas indústrias, na secagem. Uma usina de beneficiamento de arroz recebe o produto colhido, que é transportado com casca para a usina. Segundo dados técnicos, ao longo de um ano, aproximadamente 15% da casca produzida são destinados à secagem do arroz, atividade que ocorre principalmente no período de colheita (janeiro a abril) Estima-se que, de toda a casca produzida ao longo de um ano, apenas 50% podem ser utilizados na produção de eletricidade, uma vez que, além dos 15% destinados à secagem, cerca de 35% estão disponíveis em pequenas indústrias, especialmente dispersas. A casca é um material de densidade muito baixa, sendo o transporte viabilizado apenas para frete de retorno.

Segundo Mehta e Monteiro (2008), cada tonelada de arroz produz cerca de 200 kg de casca, resultando em aproximadamente 40 kg de cinza, ou seja, 20% da casca, e quando sofre combustão é convertida em cinza. Pela projeção de produção de arroz do Rio Grande do Sul, aproximadamente 8.000.000 milhões de toneladas resultam em cerca de 1.600.000 milhões de toneladas de co-produtos (casca) oriundos somente da safra 2008/2009.

3.4 CINZA DE CASCA DE ARROZ

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

Queimada parcialmente, a casca de arroz gera uma cinza com certo teor de carbono (figura 18) e, por isso, possui cor preta. Quando inteiramente queimada,

resulta numa cinza de cor acinzentada, branca ou púrpura, dependendo das impurezas presentes e das condições de queima (Missau, 2004).

A cinza de casca de arroz (figura 18), constituída essencialmente de sílica pura, na forma não-cristalina, é uma pozolana altamente reativa. Sua utilização como adição, para a produção de concretos, influencia beneficemente tanto os aspectos relacionados à resistência mecânica como os relacionados à durabilidade, dependendo de sua qualidade e teor de adição.

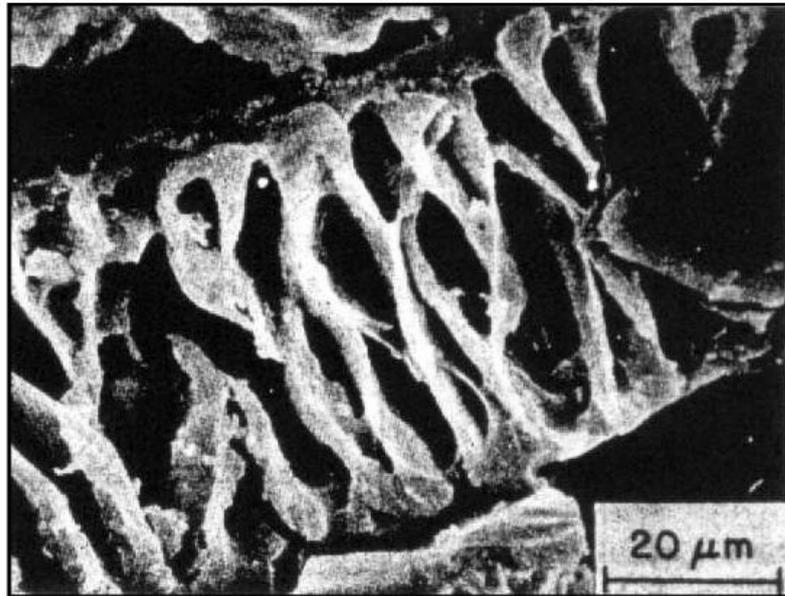


Figura 18 Micrografia da cinza de casca de arroz, Mehta e Monteiro (1994).

As alterações no concreto promovidas pela utilização da cinza de casca de arroz, seja como adição ou substituição de material cimentício, estão condicionadas a suas características físicas, químicas e história térmica. Sabe-se que o tempo de moagem e a temperatura de queima exercem influência significativa na melhoria do comportamento do concreto, tanto do ponto de vista de resistência mecânica quanto dos aspectos ligados à durabilidade.

Com efeito, a melhoria das propriedades do concreto depende da quebra da estrutura original da casca de arroz durante a queima, por meio de moagem adequada para aumentar a sua atividade química e física. A respeito deste tema, a seguinte citação e figura 19 são esclarecedoras:

Segundo Amick (1982) apud Della et al.(2001) a queima da casca de arroz produz cinzas de partículas alongadas e contorcidas, tipo espiga de milho com epidermes internas e externas (Figura 19 a), sendo sua estrutura celular e porosa proveniente da remoção da lignina e celulose na queima. Nas figuras 19 b e 19 c observam-se estas estruturas celulares preenchidas parcialmente com produtos de hidratação e/ou pozolânicos. A análise química por EDS da Figura 19c mostra que o constituinte da epiderme interna desta estrutura é oxigênio ($\approx 20\%$) e silício ($\approx 75\%$), coincidindo com os valores obtidos por Della et al. (2001). Esta micrografia ilustra a maior porosidade que estas estruturas celulares conferem à pasta, desde que não se desfazem totalmente se a cinza não é moída com a energia adequada (ISAIA et al., 2010).

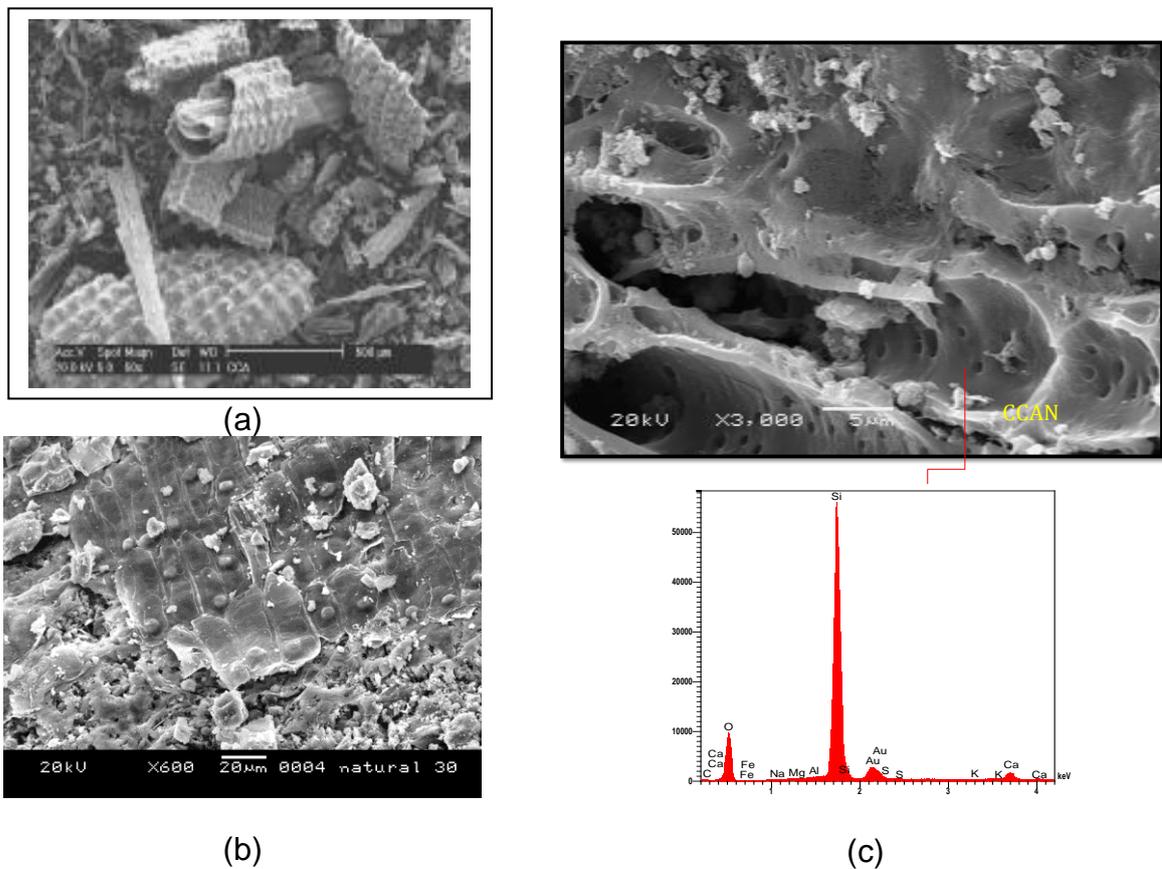


Figura 19 (a): Epidermes internas e externas de CCA natural (DELLA et. al., 2001) (b) e (c): Estruturas celulares remanescentes da lignina e celulose preenchidas com produtos de hidratação e/ou pozolânicos (ISAIA et al., 2010).

Segundo Mehta (1994), os efeitos e mecanismos com que a cinza de casca de arroz atua no concreto podem ser sumarizados em dois processos: refinamento do tamanho do poro e do tamanho do grão. São formados C-S-H secundários ao redor das partículas de pozolana, preenchendo os vazios capilares grandes com material microporoso de baixa densidade. A transformação de vazios maiores em

vários vazios pequenos denomina-se refinamento dos poros. A nucleação de CH ao redor dos grãos de pozolana transforma os grandes cristais orientados de hidróxido de cálcio por outros pequenos e menos orientados, além de produtos de reação pouco cristalinos. Esse processo de transformação de grãos grandes em produto com grãos menores denomina-se de refinamento do tamanho do grão. A junção desses dois processos aumenta a compacidade da pasta e a resistência da zona de transição pasta/agregado, reduzindo a microfissuração e permeabilidade do concreto.

3.5 FINURA DA CCA

O tamanho das partículas da CCA, juntamente com as condições de queima, é um dos fatores que influenciam nas características pozolânicas das CCAs. A moagem é uma operação necessária, capaz de modificar as propriedades físicas da cinza da casca de arroz, tais como a superfície específica e finura.

Segundo Cordeiro (2009), a moagem consiste na fragmentação de uma estrutura sólida quando submetida a esforços mecânicos, aplicados por elementos que provocam deformação das partículas, a ponto de conferir maior compacidade à mistura. Ela pode ser realizada a seco ou a úmido, dependendo do material a ser moído e do processo subsequente. Diferentes tipos de corpos moedores podem ser utilizados para cominuição das partículas de CCA, dentre os quais estão o moinho de bolas horizontal e vertical, o agitador, o planetário e o micronizador.

O grau de moagem da CCA influencia significativamente o seu desempenho pozolânico. Conforme mostra a figura 20, nota-se que, a partir de um certo tamanho da partícula, o índice de pozolanidade tende a cair, fato este que, provavelmente, é consequência da dificuldade de dispersar partículas muito finas (PRUDÊNCIO JÚNIOR *et al.*, 2003).

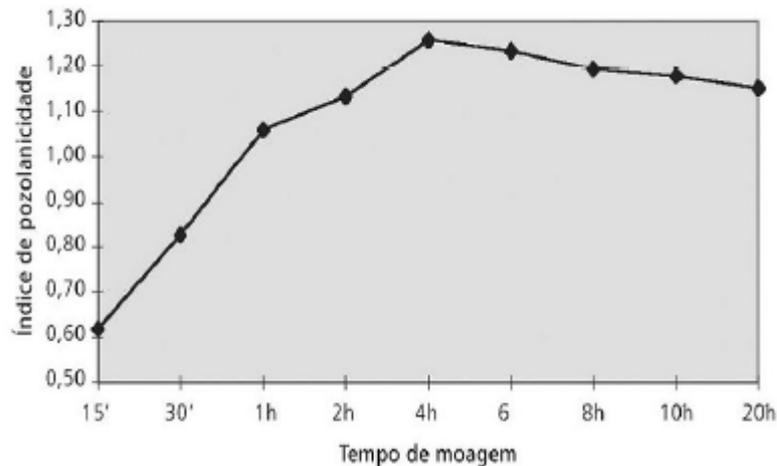


Figura 20 Índice de pozolanidade versus tempo de moagem, Prudêncio Júnior et al., (2003).

As misturas com cinza de casca de arroz demandam consumo de água, uma vez que a elevada área específica devido ao pequeno tamanho da partícula e porosidade interna, aliada à forma angular da cinza de casca de arroz, aumenta o atrito entre as partículas. Essa característica proporciona o uso de aditivo superplastificante como forma de atenuar a maior demanda de água.

Segundo Isaia (1995), a pozolanidade e a finura são as principais propriedades que influem no desempenho da cinza volante, da sílica ativa e da cinza de casca de arroz (figura 21). E a quantidade de pozolana e sua composição granulométrica também têm influência, porém em menor grau.

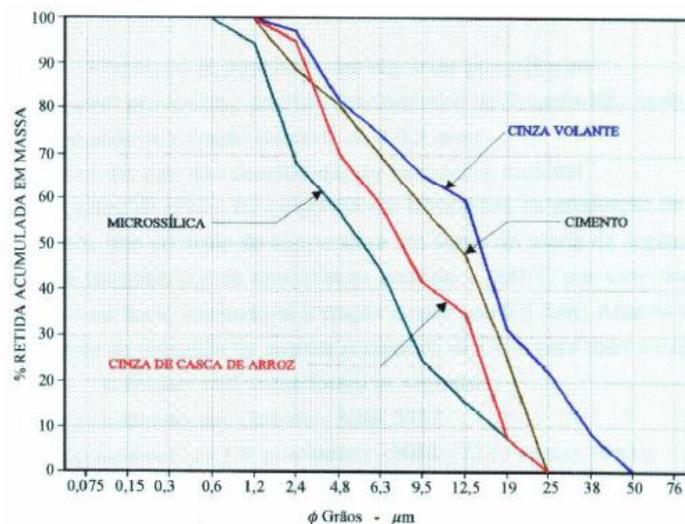


Figura 21 Finura de diversas adições minerais, Isaia (1995).

Frizzo , Cervo e Venquiaruto, (2001) analisaram a resistência à compressão axial aos 91 dias de concretos com 25 e 50% de CCA em diferentes finuras. A primeira, denominada finura 1, tem superfície específica menor que a primeira, o que representa um material de partículas maiores que o material denominado finura 2. Nota-se na figura 22 que o único traço que obteve resistência abaixo do concreto de referência é o concreto com 50 % de substituição do cimento por CCA e de maior tamanho do grão.

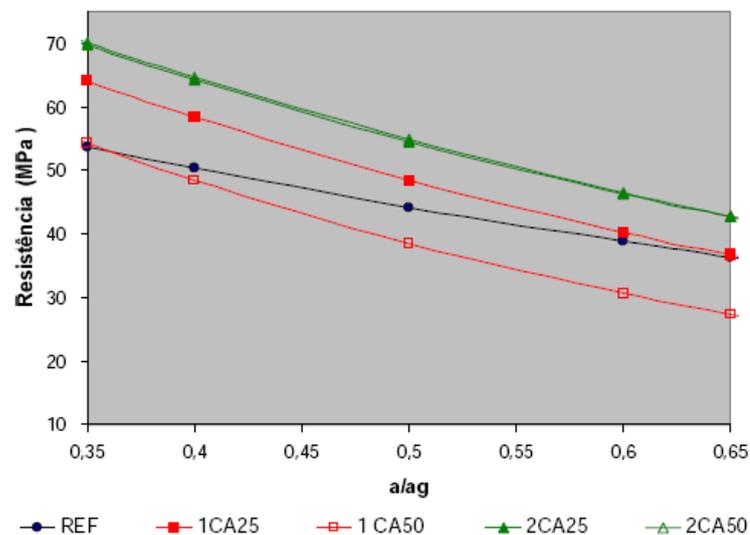


Figura 22 Resistência à compressão X relação a/ag, Frizzo (2001).

Fica evidente que a substituição de cimento, independente dos dois teores estudados, apresenta maior resistência à compressão quando as partículas de CCA são menores. Tal fato comprova a maior pozolanicidade de CCAs de menor tamanho e sua facilidade de reagir com o CH resultado do processo de hidratação do cimento.

Cordeiro (2009) relatou resultados obtidos por diferentes pesquisadores sobre os efeitos das condições de moagens das cinzas de casca de arroz:

- O crescimento da área superficial está diretamente ligado ao aumento do tempo de moagem; e este influencia no crescimento da resistência à compressão (GUEDERT, 1989);

- O aumento da finura da CCA melhora a trabalhabilidade, a retenção de água e a incorporação de areia na argamassa (FARIAS e RECENA, 1990);
- A finura da CCA cresce com o aumento do tempo de moagem e diminui com o aumento da temperatura de queima, sendo que os valores máximos das finuras foram em temperaturas de 450 e 500°C (AL-KHALAF e YOUSSEF, 1984).

3.6 PROCESSO DE QUEIMA

Segundo Santos (2006), a cinza da casca de arroz é o resultado do processo de combustão empregado, que depende da combinação de três variáveis: tipo de equipamento utilizado (a céu aberto, fornalha tipo grelha ou leito fluidizado); temperatura de queima e tempo de exposição durante o processo.

O processo de combustão quando controlado é um método eficiente para liberar a sílica da casca de arroz. Porém, as propriedades de SiO_2 e a quantidade de carbono resultante na cinza, considerado como um resíduo, dependem significativamente das condições que prevalecem durante a combustão. Santos (2006) ressalta que a temperatura de obtenção da cinza de casca de arroz e o tempo de exposição a essa temperatura, somados à variação de superfície específica, serão os principais fatores intervenientes na qualidade do material como pozolanas para concreto. As condições de queima ideais para obtenção de uma cinza de casca de arroz com alta reatividade, para produção de CAD, apontam para as seguintes conclusões:

- A reatividade da cinza é influenciada consideravelmente pela temperatura de queima da casca e pelo tempo de exposição a esta temperatura (tempo de retenção);
- Quanto maior for a superfície específica do material, maior será sua reatividade;
- Cinzas de boa qualidade podem ser obtidas com temperaturas abaixo de 800°C;
- O resfriamento brusco da cinza pode evitar a formação de fases cristalinas no material.

A cinza que se forma durante a queima não-controlada em fornos industriais geralmente contém uma grande proporção de minerais de sílica não reativos, como a cristobalita e a tridimita, e deve ser moída a tamanhos de partículas muito finas, para que desenvolva-se atividade pozolânica. Por outro lado, uma cinza altamente pozolânica é a produzida por combustão controlada quando a sílica é obtida na forma não-cristalina e em estrutura celular.

Os aspectos de qualidade de queima, assim como a moagem, têm grandes influências nas atividades pozolânicas. Quando ocorre uma sobre-queima da CCA, a sílica amorfa tende a cristalizar-se. Em baixas temperaturas ocorre um teor alto de carbono não-queimado. Ambos os casos diminuem a qualidade reativa da adição mineral.

A figura 23 mostra a formação de uma estrutura celular porosa com alta superfície específica (50 a 100m²/g), que ocorre durante a queima da casca pela remoção da lignina e da celulose (MEHTA, 1992 apud Silvia Santos, 2006).

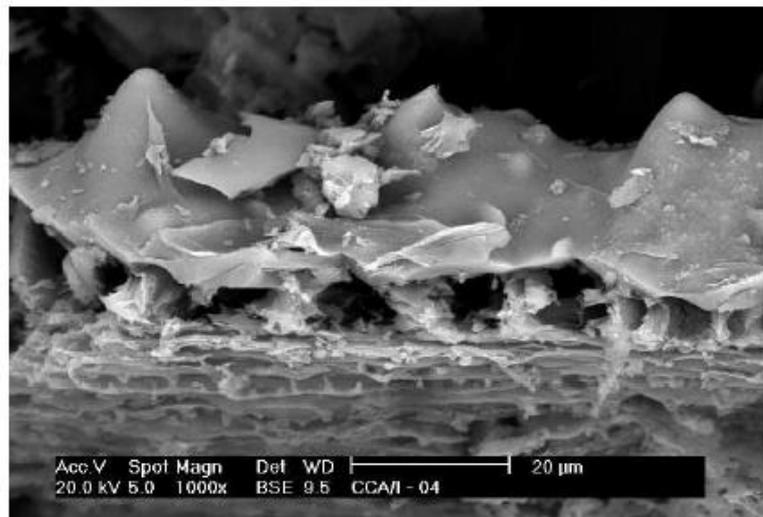


Figura 23 Estrutura cinza de casca de arroz, Dafico (2001), apud Santos (2006).

As mudanças de cor estão associadas à presença de impurezas, ao processo de combustão e às transformações estruturais ocorridas no material, decorrentes da variação da temperatura de queima. Quanto mais escura, maior o teor de carbono, indicando a presença de matéria orgânica não-queimada. A cor branca, por sua vez, indica a completa oxidação do material.

As cinzas obtidas durante a combustão da CCA apresentam formas estruturais variáveis (amorfa e/ou cristalina), dependendo do tipo de queima (grelha, leito fluidizado), tempo e temperatura de oxidação. A Tabela 2 apresenta de forma reduzida o efeito de condições de queima nas propriedades de algumas CCAs, segundo Metha (1977) apud Santos (2006).

Tabela 2 – Propriedade gerais das cinzas de casca de arroz.

Condições de queima (°C/ tempo)	Ambiente de combustão	Propriedades da CCA	
		Estrutura da sílica	Área superficial (m ² /g)
500 – 600 / 1 min.	Moderada oxidação	amorfa	122
500 – 600 / 30 min.	Moderada oxidação	amorfa	97
500 - 600 / 2 horas	Moderada oxidação	amorfa	76
700 – 800 / 15 min.	Moderada oxidação	amorfa	42
700 – 800 / 15 min	Alta oxidação	Cristalina parcial	10 – 6
> 800 / > 1h	Alta oxidação	Cristalina	< 5

Fonte: Mehta 1977, apud Pouey (2006).

Santos (2006) relata que a morfologia das cinzas obtidas em diferentes condições de queima são variadas. Há surgimento de diferentes formas estruturais que resultam da variação de temperatura de obtenção do material, indo influenciar na sua capacidade em se combinar com os produtos de hidratação do cimento.

Mehta e Pitt (1977) publicaram o primeiro trabalho com o intuito de produzir cinza altamente reativa por meio de incineração controlada da casca de arroz. E a partir daí iniciaram-se os testes para utilizar o material como adição em argamassas e concretos. CCAs com baixo teor de carbono é passo inicial para a comercialização consolidada do mineral como produto cimentício. No Brasil, o uso de pozolanas está restrito ao uso em pesquisas e em algumas obras experimentais.

Isaia (1995) cita autores que estudaram a influência das condições de temperatura e tempo de exposição no processo de combustão da CCA:

- Hwang e Wu (1989) apresentaram as propriedades físicas e mecânicas das pastas e argamassas de cimento com cinza de casca de arroz queimadas entre 400 e 1200 °C;
- Boateng e Skeete (1990) relatam que a temperatura de queima deve se manter entre 800 e 900°C para a cinza se apresentar amorfa e reativa;

- Sugita *et al.* (1993) obtiveram em seus estudos maior atividade pozolânica para temperaturas entre a 600 °C e 500 °C e por tempo não superior a 60 minutos. Para estes autores, a melhor temperatura de queima encontra-se na faixa de 400 a 660 °C.
- Sugita (1992) patenteou dois diferentes processos de queima de casca de arroz, visando obter cinzas com cor branca e altamente reativas. Um dos processos emprega duas fornalhas rotativas ligadas em série, onde a queima é realizada em duas etapas e o outro, um dispositivo onde a casca é disposta em uma pilha de forma cônica em torno de uma chaminé central e então queimada. A função da chaminé é propiciar a circulação do ar na massa de casca em processo de queima, garantindo oxigênio necessário às reações de combustão.

As citações anteriores mostram que a queima da cinza de casca de arroz é aspecto importante para o seu desempenho como pozolana. E ao que se refere, o emprego dessas cinzas de casca de arroz natural, sem moagem no concreto, não seria, em tese, recomendado porque não forneceria as condições necessárias para o desenvolvimento das reações pozolânicas. Raras são as menções da literatura sobre o uso de CCA nesta condição de finura.

Um dos poucos trabalhos encontrado que investiga o uso de CCA não-moída em concreto é de Nehdi et al. (2003), no qual são utilizados 6 tipos de pozolanas: três moídas do Egito, uma sílica ativa e duas dos Estados Unidos, uma moída e outra não. Os teores de substituição de cimento por CCA foram 7,5%, 10,0% e 12,5%. Todos concretos foram moldados com relação $a/ag = 0,40$ com emprego de aditivo superplastificante à base de naftaleno sulfonado, para atingir o abatimento de 150 ± 20 mm.

A figura 24 apresenta os resultados da resistência à compressão aos 28 dias, onde se observa que a CCA não-moída foi a que apresentou a menor resistência entre todas as pozolanas, entretanto, ainda acima do concreto referência. O aumento do teor de 7,5% para 10% de CCA não-moída ocasionou ligeira perda de resistência. O ensaio de penetração de cloretos, segundo a norma ASTM C1202, mostrou também que a quantidade de Coulomb passante das misturas com CCA não-moída foi a mais alta de todas, classificando-se como de penetração moderada, entretanto ainda abaixo do concreto referência. Houve queda de aproximadamente

1000C quando o teor de CCA subiu de 7,5% para 10%, comportamento contrário ao da resistência à compressão.

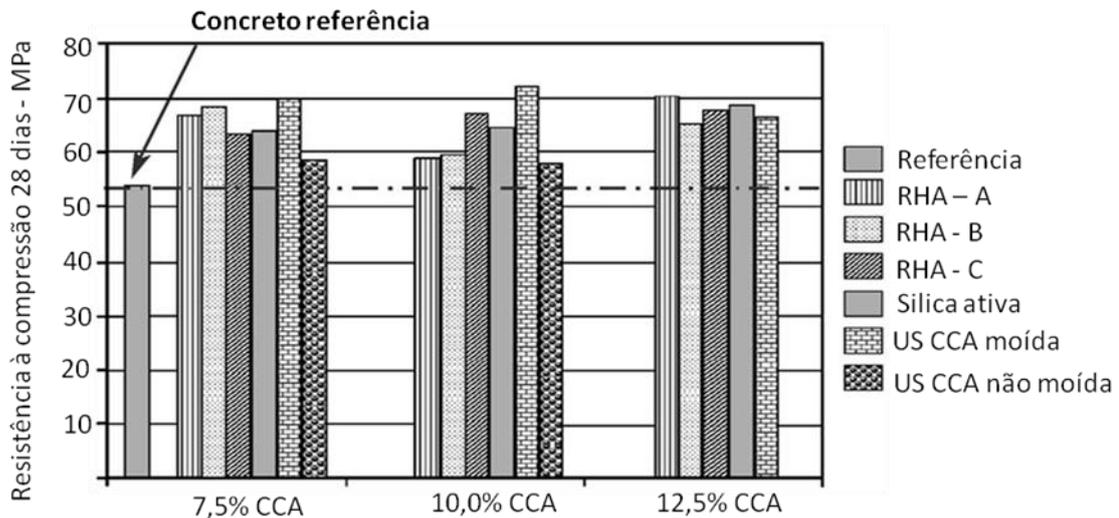


Figura 24 Resistência à compressão aos 28 dias de 6 pozolanas com finuras distintas (NEHDI et al. 2003).

3.7 INFLUÊNCIA DAS ADIÇÕES MINERAIS NA CARBONATAÇÃO

Isaia (2005) relata que, historicamente, a carbonatação tem sido considerada no projeto das estruturas de concreto armado ou protendido através da fixação da espessura da camada de cobrimento das armaduras e, em alguns casos, pela consideração de parâmetros limites para a dosagem do concreto, tais como relação água/aglomerante máxima, consumo mínimo de cimento, classe de resistência do concreto ou teores máximos de adições minerais. Tais considerações são maneiras indiretas de abordar o problema da durabilidade das estruturas de concreto frente à corrosão da armadura, pois tanto a espessura do cobrimento como a qualidade intrínseca do concreto são variáveis que influem decisivamente sobre a velocidade de carbonatação.

A alcalinidade do concreto deriva das reações de hidratação dos silicatos de cálcio (C_3S e C_2S), que liberam certa quantidade de CH. Segundo Metha e Monteiro (2008), a quantidade de CH presente na pasta pode chegar 25% do total dos compostos hidratados. Devido ao consumo de CH pelas reações pozolânicas, o CH dissolvido na água dos poros do concreto, conferindo-lhe pH em torno de 12,5, é

provocado em um menor intervalo de tempo reações de neutralização, diminuindo o pH do concreto, desencadeando o fenômeno de carbonatação.

Nas misturas de cimento Portland com adições de pozolana, ocorre decréscimo gradual, ao longo do tempo, do teor de hidróxido de cálcio livre, em função do progresso da reação pozolânica. Esse fato cresce à medida que o teor de substituição do cimento pela pozolana aumenta. Comparado à pasta de cimento Portland hidratada, com a pasta contendo adição de pozolana, existe menos hidróxido de cálcio e mais CSH.

Isaia, Vagueti e Gastaldini (2001) fazem algumas considerações sobre o avanço da carbonatação em concretos produzidos com cimentos comuns e com adições minerais pozolânicas.

O avanço da carbonatação é proporcional à alcalinidade total (reserva alcalina) disponível na matriz da pasta de cimento, sendo função da composição química do cimento (teor de cálcio) e dos compostos cálcicos hidratados. O cimento Portland comum possui maior reserva alcalina que cimento com adições minerais, porque a concentração de hidróxidos alcalinos na solução dos poros do primeiro é maior, propiciando difusão do CO_2 mais lenta porque necessita rebaixar o pH e reagir com o C-H presente, para então prosseguir penetrando e precipitando hidróxido de cálcio (MATSUTATO et al., 1992). No segundo tipo, apesar de as adições propiciarem refinamento dos poros e dos grãos aumentando a tortuosidade dos capilares e diminuindo a permeabilidade, geralmente prepondera o efeito da menor reserva alcalina resultando em frente de carbonatação mais veloz do que no cimento Portland (ISAIA et al., 2001).

Os mesmos autores acima realizaram estudo comparativo entre misturas de concreto com vários tipos e teores de adições minerais em carbonatação acelerada e natural. Concluíram que o aumento da velocidade do coeficiente de carbonatação dos ensaios acelerados em relação aos ambientais, para as misturas com alto teor de pozolana, podem ser explicados pela maior concentração de CO_2 na câmara condicionada, menor reserva alcalina às misturas pozolânicas e variações no teor de umidade do concreto exposto ao meio ambiente natural. Entretanto, os resultados obtidos nesta pesquisa não reproduzem valores obtidos por outros pesquisadores, no que concerne a concretos com adições pozolânicas.

Cadore (2008) verificou a camada de cobrimento estrutural do concreto com o uso da cal hidratada em substituição em massa da areia em mistura ternária de 70% de escória de alto forno, 20% cinza volante e 10% de cimento CPV-ARI (EVC) em comparação a traços de referência com 100% CPV-ARI (R) e outra mistura ternária de 70% de escória de alto forno, 20% cinza volante e 10% de cimento CPV-ARI sem adição da cal hidratada (EV) em ensaios naturais e acelerados.

Seus resultados demonstram que os coeficientes de carbonatação natural (K_{c_n}) seguiram as mesmas tendências verificadas nos ensaios acelerados: crescentes com a relação a/ag, maiores nas amostras com adições minerais e uma redução nos coeficientes nas amostras com cal hidratada, comparadas com as sem cal hidratada. Contudo, a adição da cal hidratada na escória e na cinza volante proporcionou menores coeficientes comparados com o concreto sem cal hidratada, justamente por apresentarem uma maior disponibilidade de CH nas pastas cimentícias.

Hoppe (2008) investigou os coeficientes de carbonatação para concretos com a adição de CCA residual com teores de 15% e 25% em substituição ao cimento CP II F-32 (valores em massa) moído em moinho de bolas e “in natura”, sendo esta sem moagem e comparados com o concreto de referência, com três relações a/ag 0,45, 0,55 e 0,65. Concluiu que, genericamente, os coeficientes de carbonatação apresentaram valores superiores para as amostras contendo CCA “in natura” em comparação às amostras contendo CCA moída (figura 25). E quando analisou a influência das adições minerais no que se refere à porosidade, concluiu que as mesmas não provocam acentuada melhora sobre esse parâmetro.

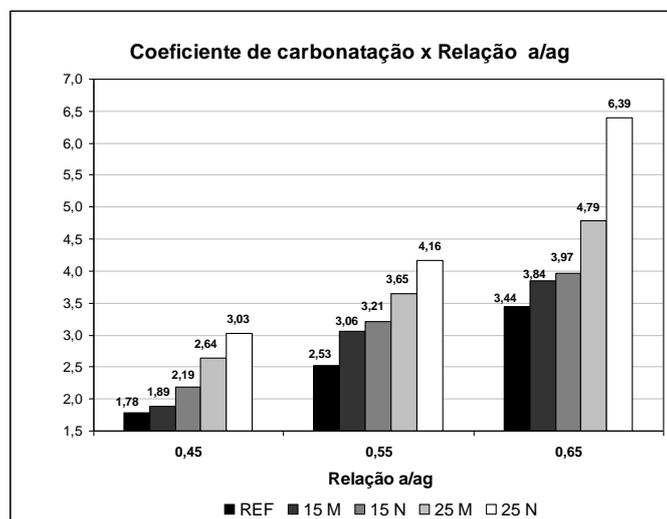


Figura 25 Coeficiente de carbonatação x relação a/ag.

CAPÍTULO 4

MÉTODOS EXPERIMENTAIS

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo será apresentada a metodologia para a produção dos protótipos de concreto com diferentes constituições, contendo cinzas de casca de arroz, bem como os métodos de execução dos ensaios para avaliar a adição mineral, comparando-a com os protótipos de referência.

4.2 INTRODUÇÃO

Uma pesquisa é um processo sistemático de construção do conhecimento que tem como metas principais gerar novos conhecimentos e/ou corroborar ou refutar algum conhecimento pré-existente. É basicamente um processo de aprendizagem tanto do indivíduo que a realiza quanto da sociedade na qual esta se desenvolve. A pesquisa como atividade regular também pode ser definida como o conjunto de atividades orientadas e planejadas pela busca de um conhecimento (Wikipédia, 2010).

A característica essencial da investigação experimental é o controle e a manipulação deliberada de condições que determinam os acontecimentos em que se está interessada. Observar o efeito que as mudanças provocadas causam e compará-las ao convencional é, sem dúvida, o primeiro passo para novas descobertas.

Esta pesquisa teve por objetivo de observar o desempenho das cinzas de casca de arroz “in natura” (não-moída) e moída frente ao fenômeno de carbonatação. Para isso, optou-se em moldar protótipos de concreto com diferentes teores de substituição do cimento por estes materiais. A estratégia empregada foi deixá-los expostos em ambiente natural com condições de concentração do CO₂ normais ao entorno das estruturas de concreto e, assim, observar o seu desempenho em condições reais.

Todo processo de busca de matéria-primas desde o seu beneficiamento e estudo de suas propriedades, além da produção dos protótipos de concreto foram feitos pelo grupo GEPECON, durante a primeira fase desta pesquisa, conforme mostrado por Hoppe (2008).

Na primeira etapa, o grupo GEPECON mobiliza-se na busca de amostras de CCA residual para a preparação dos protótipos de concreto. Foram escolhidas cinco empresas beneficiadoras de arroz da região de Santa Maria, para a coleta das amostras.

Baseado nos resultados de ensaios de compressão axial de argamassas produzidas com as CCAs coletadas, foi escolhida uma amostra de uma indústria da região na qual sua origem deu-se através de queima da casca de arroz sem nenhum controle de temperatura e tempo de exposição ao fogo.

Na fase seguinte do experimento, fase intermediária, o grupo GEPECON realizou ensaios de trabalhabilidade do concreto fresco, com o objetivo de pesquisar a ordem de colocação dos materiais no interior da betoneira, quanto ao tempo de mistura e o teor de aditivo dispersante necessário para a completa homogeneização das misturas aglomerantes.

4.3 MATERIAIS EMPREGADOS

4.3.1 CIMENTO CP II F- 32

O cimento Portland CP II F-32 com adição de material carbonático – fíler foi escolhido pela grande aplicabilidade nas obras das mais variadas espécies no país. Gera calor numa velocidade menor do que o gerado pelo cimento Portland comum. Seu uso, portanto, é mais indicado em lançamentos maciços de concreto, onde o grande volume da concretagem e a superfície relativamente pequena reduzem a capacidade de resfriamento da massa. Este cimento também apresenta melhor resistência ao ataque dos sulfatos contidos no solo. É recomendado para obras correntes de engenharia civil sob a forma de argamassa, concreto simples, armado e protendido, elementos pré-moldados e artefatos de cimento.

Os ensaios de caracterização química e física do cimento foram realizados de acordo com as seguintes normas:

- Finura # 0,075 mm – NBR 11579 (ABNT,1991d)
- Tempo de pega – NBR 11581 (NM 65) (ABNT,1991c)
- Análise química – NBR 5743, 5744, 5745, 5747, 7227 e 9203 - (NM 12, 13,14, 15, 16, 17, 18 e 19)
- Superfície específica Blaine – NBR 7224 - (NM 65)
- Massa específica – NBR 6474 (NM 23)
- Resistência à compressão da argamassa normal – NBR 7215

Nos quadros 1, 2, 3 e 4, a seguir, serão descritas as características físicas e químicas do cimento CP II F – 32, utilizado na produção dos protótipos.

Ensaio	% em massa
	Cimento CP II F –32
Perda ao fogo – PF	5,07
SiO ₂	18,84
Al ₂ O ₃	4,33
Fe ₂ O ₃	2,57
Cão	60,29
MgO	4,95
SO ₃	3,17
Na ₂ O	-
K ₂ O	-

Quadro 1 – Composição química do cimento - CP II F-32,

Amostra	Dimensão média (µm)	Diâmetro abaixo do qual encontram-se 10% das partículas (µm)	Diâmetro abaixo do qual encontram-se 90% das partículas (µm)
CP II F-32	11,50	1,28	41,57

Quadro 2 – Dimensões características do CP II F-32

Resíduo na # 0.075 (%)	2,56
Início de pega (hora:min)	2:41
Área específica Blaine (cm ² /g)	3341
Massa específica (kg/m ³)	3,06

Quadro 3 - Características físicas do cimento - CP II F-32.

Resistência à compressão MPa		
3 dias	7 dias	28 dias
27,8	34,2	42,0

Quadro 4 - Resistência à compressão - CP II F-32

4.3.2 CINZA DE CASCA DE ARROZ

A escolha da amostra foi baseada na resistência à compressão axial de argamassas produzidas com diferentes teores de substituição das CCAs colhidas. As argamassas foram produzidas com 0%, 15% e 30 % de teores de substituição das CCAs pelo cimento CII F - 32. A amostra que apresentou a melhor resistência à compressão aos 28 dias foi a das cinzas provenientes da indústria INDUBER, da região de Santa Maria/RS, devido aos melhores resultados verificados, coincidindo com a maior disponibilidade sazonal de CCA e o melhor acesso para a coleta de amostras.

Posteriormente, as amostras foram homogeneizadas pelo fato de não serem coletadas no mesmo período, apesar de serem amostras oriundas da mesma safra. Por fim, logo após transportadas para o LMCC, as amostras de cinzas foram colocadas em uma estufa a 105 °C, para secagem num tempo de 48 horas. E então estocadas no interior do LMCC, em local protegido da chuva e de umidade.

A fim de comparar as propriedades das cinzas de casca de arroz e relacionar suas características granulométricas com seu desempenho frente ao fenômeno de carbonatação, parte da amostra recolhida foi moída durante uma hora, em moinhos de bolas, produzindo assim a amostra denominada como CCAM. Compará-las com

as CCAs denominadas in natura (CCAN) frente ao fenômeno de carbonatação é um dos objetivos dessa dissertação.

A caracterização físico-química da CCA feita pelo GEPECON deu-se através dos seguintes ensaios:

- Finura # 0,075 mm – NBR 11579 (ABNT,1991d)
- Análise química – procedimento IPT
- Massa específica – NBR 6474 (NM 23) (ABNT,2001b)

A massa específica da CCAN, sem nenhum processo de beneficiamento foi de 1,41 g/cm³, e a CCAM com beneficiamento de 2,09 g/cm³. Ambas substituíram o cimento CP II F-32 na produção dos protótipos nos teores de 15% e 25%.

Os ensaios de composição química e a determinação das características físicas da CCA foram realizados na Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP/SP) e encontram-se nos quadros 5 e 6, a seguir.

Ensaio	% em massa	
	Cinza Casca de arroz CCA (Natural)	Cinza Casca de arroz CCA (Moída)
Perda ao fogo – PF	0,51	0,25
SiO ₂	95,04	94,84
Al ₂ O ₃	0,00	0,39
Fe ₂ O ₃	0,44	0,54
CaO	1,25	1,32
MgO	0,45	0,40
SO ₃	0,01	0,01
Na ₂ O	0,09	0,11
K ₂ O	1,40	1,45

Quadro 5 - Composição Química da CCA residual,

Amostras	Dimensão média (μm)	Diâmetro abaixo do qual se encontram 10% das partículas (μm)	Diâmetro abaixo do qual se encontram 90% das partículas (μm)
CP II F- 32	11,50	1,28	41,57
MOÍDA	15,54	2,38	54,14
15% NAT (MB)	33,19	5,19	80,51
25 % NAT (MB)	4,34	26,70	69,39

MB – Moída na betoneira

Quadro 6 - Dimensões características da CCA residual.

4.3.3 AGREGADOS

As características físicas dos agregados baseados nos ensaios normalizados citados abaixo são:

- Composição granulométrica – NBR 7217 – (NM 248).
- Massa específica do agregado miúdo – NBR 9776 – (NM 52).
- Massa específica do agregado graúdo – NBR 9937 – (NM 53).
- Massa unitária solta – NBR 7251.
- Abrasão Los Angeles – NBR 6465.
- Índice de forma pelo método do paquímetro – NBR 7809.

4.3.3.1 AGREGADO MIÚDO.

O agregado miúdo utilizado teve origem do município de Santa Maria – RS sendo uma areia natural de origem quartzosa. O agregado foi peneirado na peneira 4,75 mm, seco em estufa a 105 °C e, posteriormente, armazenado em baias com tampa. Para o desenvolvimento da pesquisa foram utilizados dois tipos de areia, uma amostra grossa e outra fina, com o intuito de se obter uma melhor composição granulométrica do agregado miúdo.

4.3.3.2 .AGREGADO GRAÚDO

O agregado graúdo utilizado para a produção dos protótipos foram rochas diabásicas britada oriundas do município de Itaara/RS. As amostras foram classificadas como brita 0 e brita 1. Com o objetivo de obter uma melhor composição granulométrica, foi procedida a mistura das duas amostras dos agregados.

As figuras 26 e 27 e tabela 7 mostram a representação das curvas granulométricas dos agregados miúdo e graúdo.

AGREGADOS	Brita 1 (100%) (%)	Brita 0 (100%) (%)	Areia G. (100%) (%)	Areia F. (100%) (%)
D.máx Característico (mm)	19,0	9,5	4,75	1,18
Módulo de Finura	6,91	5,42	2,81	1,85
Massa Específica (Kg/dm ³)	2,49	2,55	2,60	2,62
Massa Unitária Solta (Kg/dm ³)	1,39	1,40	1,57	1,51
Massa Unitária Compacta (Kg/dm ³)	2,02	2,01	-	-
Abrasão Los Angeles (%)	16,36	-	-	-
Índice de forma	2,31	-	-	-

Quadro 7 - Caracterização dos agregados utilizados.

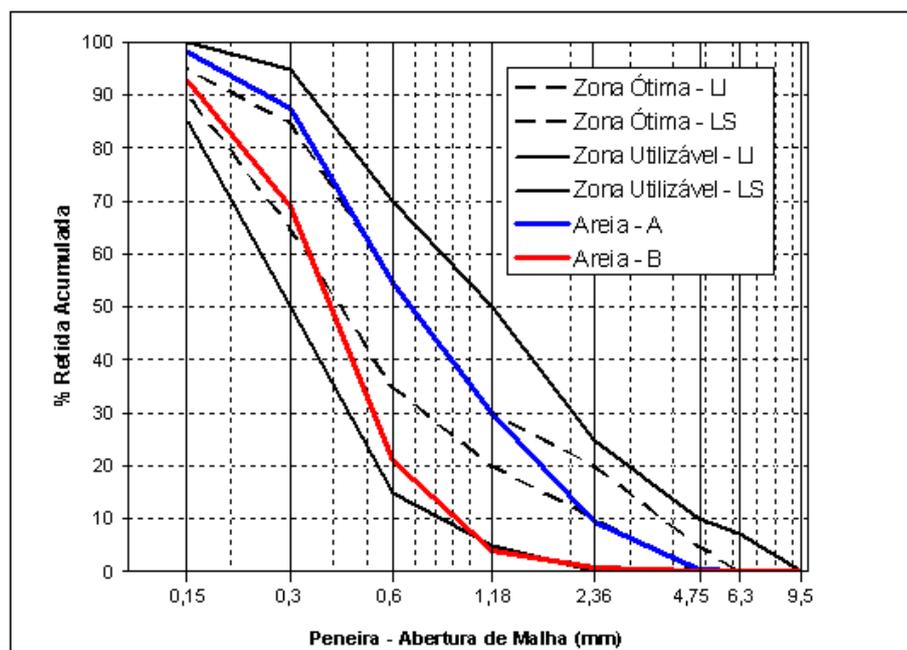


Figura 26 Características físicas do agregado miúdo.

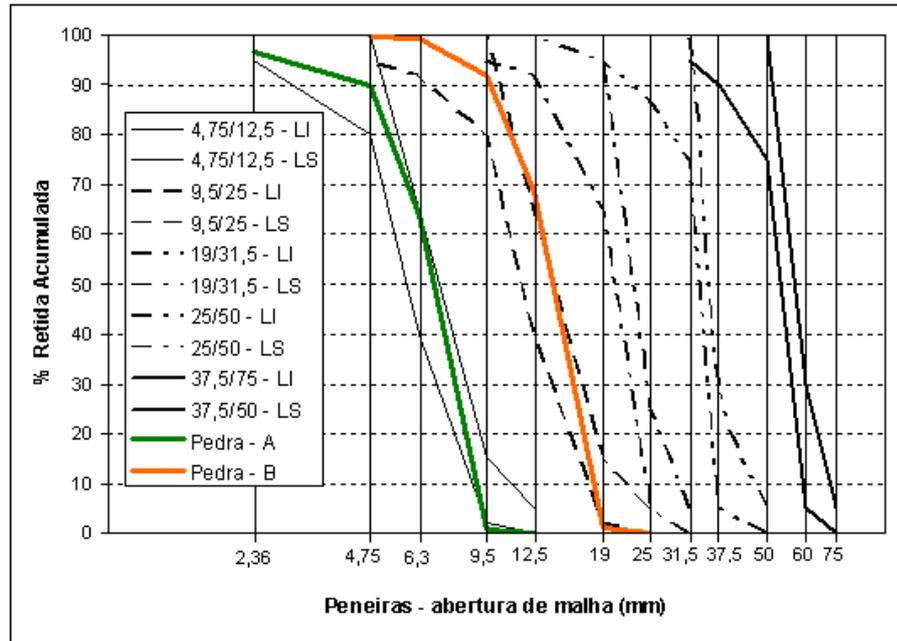


Figura 27 - Características físicas do agregado graúdo.

4.3.4 ADITIVO QUÍMICO

Com o objetivo de obter abatimentos sem variações, independente das relações água aglomerante, foi utilizado o aditivo superplastificante GLENIUM 51 da MBT. É um aditivo superplastificante de última geração, com base em uma cadeia de éter carboxílico modificado isento de cloretos, que melhora sensivelmente a dispersão das partículas de cimento. O seu pH de 5 a 7 e apresentando um teor de sólidos na composição entre 28,5% a 31,5% (valor adotado na pesquisa 30%), logo 70% da quantidade empregada deste no traço foi deduzida na água de amassamento.

A determinação da dosagem inicial de aditivo deu-se através de estudos exploratórios sobre a ordem de colocação dos materiais no interior da betoneira e de ensaios de trabalhabilidade para cada mistura aglomerante e relação a/ag empregada na pesquisa. O abatimento especificado para os concretos produzidos foi $80 \text{ mm} \pm 20 \text{ mm}$.

Os traços constituídos de diferentes tipos de materiais estão descritos no quadro 8 a baixo.

DEFINIÇÃO	Relação a/ag	COMPOSIÇÃO
<i>REFERÊNCIA</i>	0,45; 0,55; 0,65	100 % CP II F-32
15 % MOÍDA	0,45; 0,55; 0,65	85% CP II F-32 + 15 % CCA MOÍDA
25 % MOÍDA	0,45; 0,55; 0,65	75% CP II F-32 + 25 % CCA MOÍDA
15 % NATURAL	0,45; 0,55; 0,65	85% CP II F-32 + 15 % CCA NATURAL
25 % NATURAL	0,45; 0,55; 0,65	75% CP II F-32 + 25 % CCA NATURAL

Quadro 8 - Traços de concreto investigados.

4.4 MÉTODOS DE DOSAGEM

O método de dosagem empregado na pesquisa foi proposto por Helene & Terzian (1992). Os teores de substituição foram baseados em pesquisas anteriores desenvolvidas por membros do grupo GEPECON, o que demonstra que é viável a substituição do cimento nos teores inferior a 50 % de CCA.

Foram fixados inicialmente para todos os traços valores da proporção cimento materiais inertes de 1: 4,375 ; 1: 5,875 ; 1: 7,375 , para as respectivas relações a/ag 0,45, 0,55 e 0,65, proporcionando desta forma um valor do H (água/materiais secos) variável para as três relações a/ag, 8,37%, 8,00% e 7,76%, respectivamente.

O teor de argamassa foi especificado em 50% para todos os traços. O método de dosagem empregado corrigiu o aumento do volume de argamassa resultante da adição mineral (CCA), com a redução do volume de areia empregado ao traço de concreto. No quadro 9, podemos observar as devidas proporções de cada material.

Traço	a/ag	Aglomerante	Cimento	CCA	Ag. miúdo	Ag. graúdo	Água	Aditivo
		kg/m ³						
REF 45	0,45	406,6	406,6	-	686,1	1092,7	183,0	0,1
REF 55	0,55	318,8	318,8	-	777,2	1096,0	175,4	0,3
REF 65	0,65	262,2	262,2	-	835,9	1098,1	170,5	0,1
15 N 45	0,45	406,6	345,6	61,0	625,5	1092,7	183,0	2,0
15 N 55	0,55	318,8	271,0	47,8	729,6	1096,0	175,4	1,9
15 N 65	0,65	262,2	222,9	39,3	796,8	1098,1	170,5	2,1
25 N 45	0,45	406,6	304,9	101,6	585,1	1092,7	183,0	3,7
25 N 55	0,55	318,8	239,1	79,7	697,9	1096,0	175,4	3,0
25 N 65	0,65	262,2	196,7	65,6	770,7	1098,1	170,5	2,9
15 M 45	0,45	406,6	345,6	61,0	662,1	1092,7	183,0	1,3
15 M 55	0,55	318,8	271,0	47,8	758,3	1096,0	175,4	1,3
15 M 65	0,65	262,2	222,9	39,3	820,4	1098,1	170,5	1,0
25 M 45	0,45	406,6	304,9	101,6	646,0	1092,7	183,0	1,6
25 M 55	0,55	318,8	239,1	79,7	745,7	1096,0	175,4	1,4
25 M 65	0,65	262,2	196,7	65,6	810,0	1098,1	170,5	1,3

Quadro 9 – Quantidade de materiais por m³ de concreto

4.5 MOLDAGENS DOS PROTÓTIPOS

Foram moldados protótipos de concreto em duas camadas em uma mesa vibratória com tempo mínimo em cada camada de 30 segundos. Os protótipos são vigotas de 20 x 20 x 70 cm. A moldagem ocorreu durante um período onde as temperaturas foram muito baixas. Desta forma, convencionou-se uma temperatura mínima limite para o controle de temperatura da mistura do concreto de 18°C. Este controle deu-se por meio da temperatura da água de acordo com a equação proposta por Mehta & Monteiro (2008).

Realizou os seguintes ensaios com o concreto fresco:

- ✓ Consistência pelo abatimento do tronco de cone – NBR7223;
- ✓ Temperatura e umidade relativa do ambiente;
- ✓ Temperatura interna do concreto ao final da mistura;
- ✓ Massa específica do concreto;
- ✓ Moldagem de corpos de prova cilíndricos (10 x 20) cm – NBR 5738.

De acordo com os ensaios de trabalhabilidade, os concretos empregados na pesquisa foram produzidos com as seguintes ordens de colocação dos materiais no interior da betoneira, conforme pode ser visto no quadro 10, a seguir.

TRAÇO	MATERIAL/ TEMPO (min)	MATERIAL/ TEMPO (min)	MATERIAL/ TEMPO(min)	MATERIAL/ TEMPO (min)
<i>REFERÊNCIA</i>	Ag. Graúdo + Água - 2'	Aglomerante 2'	Aditivo 2'	Ag. Miúdo 4'
15 % MOÍDA	Ag. Graúdo + Água - 2'	Aglomerante 2'	Aditivo 2'	Ag. Miúdo 4'
25 % MOÍDA	Ag. Graúdo + Água - 2'	Aglomerante 2'	Aditivo 2'	Ag. Miúdo 4'
15 % NATURAL	Ag. Graúdo + CCA 2'	Água + Aditivo 2'	Cimento 2'	Ag. Miúdo 9'
25 % NATURAL	Ag. Graúdo + CCA 2'	Água + Aditivo 2'	Cimento 2'	Ag. Miúdo 9'

Quadro 10 Ordem de colocação e tempo de mistura para os traços de concreto.

Antes da moldagem dos protótipos, foram realizados ensaios do concreto fresco com cada traço, onde foi verificado o abatimento das misturas. As consistências de cada traço foram mantidas constantes dentro do intervalo de 60 a 100 mm, medidas pelo método do tronco do cone. As misturas para a moldagem dos protótipos foram executadas em uma betoneira de 420 litros, com as proporções respectivas para cada traço.

As formas foram recobertas com óleo, a fim de facilitar a retirada dos moldes. E após a colocação dos materiais no molde, foram colocados sacos de aniagem molhados, a fim de proporcionar uma cura úmida aos protótipos. Vinte e quatro horas depois, os protótipos foram desmoldados e identificados e colocados em uma câmara úmida, por um período de sete dias com U.R > 95%. Por fim, foram expostos ao ambiente natural fora do laboratório, em condições semelhantes aos que as estruturas de concreto geralmente se encontram (0,3 – 0,4% de dióxido de carbono), como mostra a figura 28, a seguir.



Figura 28 Exposição ao ambiente natural dos protótipos.

Os protótipos de concreto foram ensaiados nas idades de 18, 24 e 30 meses, quanto à resistência, compressão axial e frente ao fenômeno de carbonatação natural, por meio da extração de testemunhos cortados perpendiculares à direção de moldagem, com dimensões 10 x 20 cm.

4.6 ENSAIOS DE CARBONATAÇÃO NATURAL

Nas datas previstas, os protótipos foram recolhidos para dentro do laboratório, a fim de dar condições para o desenvolvimento da carbonatação natural. Testemunhos cilíndricos foram extraídos com diâmetro de 10 cm e altura de 20 cm, com auxílio do extrator motorizado, como mostram as figuras 29 e 30.



Figura 29 Extração mecanizada dos CPs.

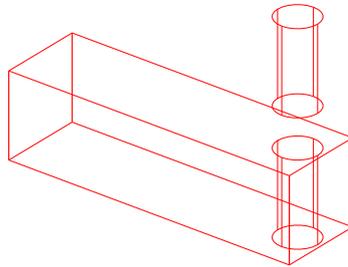


Figura 30 isométrico da extração do corpo de prova cilíndrico dos protótipos de concreto.

Os protótipos, após a extração a 18 meses, foram retirados do ambiente externo desabrigado e colocados no interior do laboratório, protegidos das intempéries, para simular carbonatação mais severa em ambiente abrigado. Em seguida, os testemunhos extraídos, foram serrados (figura 31) na forma de corpos de prova C.P. em três partes, sendo a parte do centro descartada.



Figura 31 Serra responsável pelo corte dos CPs.

Depois de serrados, os CPs foram rompidos diametralmente com auxílio de prensa hidráulica e perfis metálicos (figura 32).



Figura 32 Preparação para o rompimento diametral.

Logo após rompidos os CPs (figura 33), foram levados à sala de carbonatação dentro do LMCC.



Figura 33 Rompimento diametral dos Corpos de Prova.

Após a ruptura, cerca de 30 minutos após a extração, foi aspergida uma solução de fenolftaleína nos Corpos de Prova, que indica a profundidade do avanço da carbonatação de acordo com RILEM, sob a designação CPC-18 para ensaio de laboratório ou de concreto em obras.

Segundo Isaia (1995), este ensaio apresenta algumas deficiências, entre elas a de não separar definitivamente zonas totalmente não carbonatadas com pH elevado (≈ 12) e zonas totalmente carbonatadas com pH baixo ($\approx 8,5$). Assim, a profundidade média detectada pode não traduzir a verdadeira frente de carbonatação, pois na faixa de pH entre 8,3 e 10 existe zona de transição que não pode ser medida através deste ensaio visual.

A solução de fenolftaleína é composta dos seguintes materiais e respectivas proporções:

- 30 gramas de álcool etílico absoluto;
- 70 gramas de água destilada;
- 1 grama de fenolftaleína em pó.

Esta solução discrimina faixas de pH diferentes, indicando assim a faixa carbonatada, já que o processo de carbonatação diminui o pH do concreto. A aspersão da fenolftaleína transforma o concreto não carbonatado ($\text{pH} \geq 12$) vermelho carmim e permanece incolor no concreto carbonatado ($\text{pH} < 9$), (figura 34).

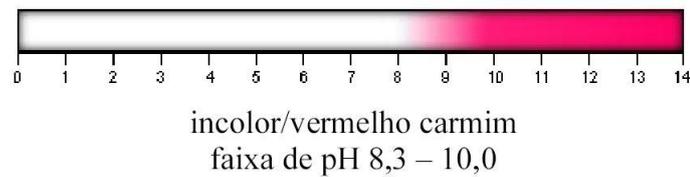


Figura 34 Ponto de viragem de fenolftaleína, (Castro 2003).

Em todas as amostras, foram realizadas medidas com auxílio de um paquímetro tanto do corpo de prova e da profundidade carbonatada. Estas medidas foram usadas somente para comparação com as medidas digitais procedida no programa AutoCAD. Este programa oferece a possibilidade de medir maiores números de pontos, se aproximado da realidade.



Figura 35 Fotografia C.P. devidamente identificado.

Inicialmente, inseriu-se a foto digitalizada (figura 35) no software AutoCAD da Autodesk. Colocou-se então a foto em escala com unidade em milímetros. Desenhou-se uma linha no limiar da troca de cores da amostra que representa o limite da área carbonatada e não carbonatada. Logo após, desenharam-se linhas verticais afastadas 1 mm (figura 36).

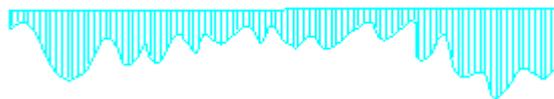


Figura 36 Linhas verticais afastadas 1 mm.

O comprimento das linhas foi obtido através da rotina denominada “COTA.LSP”, desenvolvida em Autolisp, que é uma linguagem de programação do AutoCAD. As medidas obtidas pela rotina “COTA.LSP” foram ordenadas em uma planilha do Excel, aonde foram tratados estatisticamente. Calculou-se então a média, desvio padrão e coeficiente de variação. Os valores limites, inferior e superior, de cada corpo-de-prova foram eliminados até que o coeficiente de variação atingisse valor inferior a 10%. Para a análise do carbonatação natural, o processo foi

semelhante em todas as idades com no mínimo 80 valores válidos para determinação da profundidade média.

4.7 DETERMINAÇÕES DOS COEFICIENTES DE CARBONATAÇÃO

Isaia (1995) relata que a velocidade com que a carbonatação se desenvolve depende, como visto anteriormente, da quantidade de produtos carbonatáveis (conteúdo e tipo de aglomerante), da permeabilidade do concreto (relação a/a_g , cura, umidade, porosidade) e do conteúdo de CO_2 no ar.

Em contato com o meio ambiente natural, o concreto está sujeito a molhagens e secagens sucessivas, e como a difusão do gás carbônico depende de condições ideais de umidade, a velocidade de avanço da carbonatação é mais lenta. Pode-se definir o coeficiente de carbonatação como coeficiente angular de uma reta teórica oriunda de medidas de carbonatação através do tempo.

Expressão a seguir pode definir a profundidade carbonatada através do tempo.

$$X = k.t^n \text{ (equação 03)}$$

Sendo x a profundidade carbonatada, n expoente variável decorrente das condições de umidade, em decorrência de ciclos de molhagem e secagem podendo variar de 0,25 em ambientes externos, e 0,50 para ambientes internos abrigados, sendo adotado este último para os cálculos dos coeficientes; e k uma constante que depende da difusão e concentração do CO_2 , das condições de exposição e das características do concreto, sendo expressa usualmente em $\text{mm.ano}^{-0,5}$.

CAPÍTULO 5

ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo, são mostrados, analisados e discutidos os resultados oriundos da pesquisa referente aos ensaios de resistência à compressão axial e carbonatação natural das misturas produzidas com diferentes teores de cinza de casca de arroz e relação a/ag. Serão mostradas resistências à compressão axial de corpos de provas nas idades definidas, acrescentando os resultados dos protótipos extraídos aos 540 dias. Será destacado o acréscimo de resistência do período de 91 a 540 dias.

Ao que se refere à carbonatação será analisada a evolução de sua profundidade em função do tempo de exposição ao ambiente natural, seguida de exposição abrigada. Serão relacionadas as profundidades de carbonatação com as diversas misturas de diferentes teores das CCA (moída e natural) e relações a/ag. Serão comparados os coeficientes de carbonatação natural dos protótipos extraídos com os coeficientes de carbonatação acelerada com corpos de prova moldados. Serão comparados os coeficientes de carbonatação natural com a resistência à compressão a 91 e 540 dias em igualdade de resistência de 30 MPa a 91 dias e, ainda com os respectivos coeficientes de carbonatação acelerada da dissertação de Hoppe (2008). E, por fim, são relacionados os coeficiente de carbonatação versus a estrutura dos poros por intermédio dos volumes de Hg intrudidos, comparados com os resultados obtidos por Duart (2008).

5.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

O ensaio resistência à compressão axial é um dos parâmetros mais importantes para avaliação das propriedades gerais das misturas. Através dos resultados, pode-se associar a resistência a propriedades da microestrutura do concreto e seu desempenho frente a agentes agressivos. O quadro 11, a seguir,

mostra os resultados das resistências à compressão axial nas idades de 7, 28, e 91 dias dos protótipos cilíndricos moldados e na idade de 540 dias de protótipos cilíndricos extraídos de vigas (70 x 20 x 20 cm) expostos ao ambiente natural.

TRAÇO	a/ag	Protótipos moldados			Protótipos Extraídos
		7 DIAS	28 DIAS	91 DIAS	540 DIAS
R	0,45	27,4	42,2	43,0	53,0
	0,55	22,6	30,6	33,6	39,8
	0,65	18,8	24,3	28,0	34,0
15M	0,45	29,2	43,6	53,1	62,5
	0,55	22,1	32,6	40,4	47,7
	0,65	18,9	27,2	33,4	42,9
25M	0,45	28,9	43,5	50,9	54,6
	0,55	19,5	30,3	36,9	40,0
	0,65	12,7	22,4	29,6	35,0
15N	0,45	29,8	37,7	50,5	53,0
	0,55	19,4	27,5	33,8	36,4
	0,65	16,1	23,6	31,9	34,2
25N	0,45	16,3	22,7	30,5	37,4
	0,55	12,5	17,5	24,2	30,1
	0,65	10,0	13,9	19,0	24,0

Quadro 11 - Resistência à compressão axial

Para a análise dos resultados em longo prazo, a figura 37, a seguir, representa as resistências à compressão axial aos 540 dias das diferentes misturas das CCA naturais e CCA moídas, relacionando-as com diferentes relações a/ag.

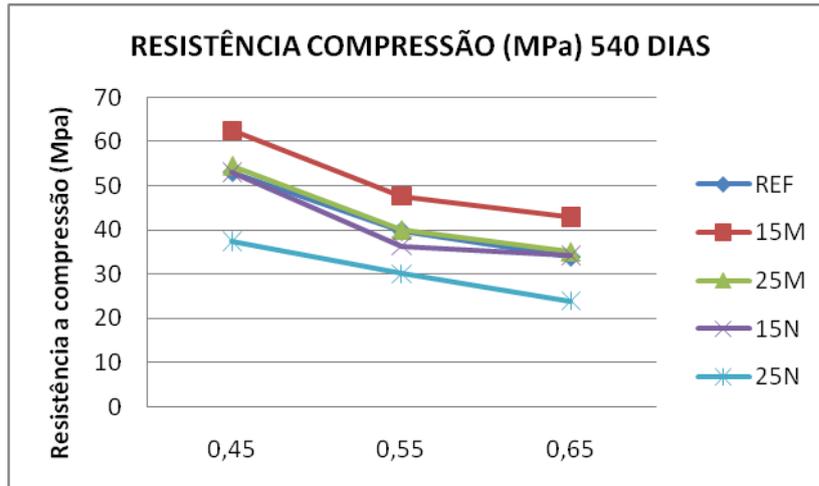


Figura 37 Resistência à compressão axial (MPa).

De acordo com os resultados, dentre as misturas com incorporação de 25 % CCAN (em todas as relações a/ag), e 15 % CCAN (na relação a/ag = 0,55), apresentaram valores de resistência à compressão axial aos 540 dias inferior ao concreto referência. Para 25% CCAN nas relações a/ag 0,45, 0,55 e 0,65 a resistência à compressão axial representou apenas 65%, 76% e 71%, respectivamente da resistência de compressão axial dos concretos de referência nas mesmas relações a/ag, ou seja, decréscimo ao redor de 1/3 em relação à REF. Nota-se uma similaridade nos resultados de compressão axial das misturas de 25% CCAM em todas as relações a/ag, com os concretos de referência produzidos com 100% de cimento.

A incorporação de 15% de CCAM teve um desempenho superior aos protótipos de REF. Suas resistências, para as relações a/ag 0,45, 0,55 e 0,65, respectivamente 18%, 20% e 26% mais elevadas do que as alcançadas pelas misturas de 100% de cimento.

No que se refere à comparação entre os teores de incorporação de CCA, as amostras com 15% de CCAM moída tiveram desempenho superior às amostras com adição de 15% de CCAN, sendo que essas últimas representaram valores 85%, 76% e 80% em relação às primeiras, para as 3 relações a/ag estudadas, respectivamente. Nos teores de 25% de CCAM e CCAN, as segundas apresentaram 69%, 72% e 69% das resistências obtidas para as primeiras, respectivamente para as três relações a/ag. Em resumo, apenas as misturas com 25% de adições de

CCAN tiveram suas resistências à compressão axial reduzidas quando comparadas ao concreto REF. Pode-se notar que as misturas contendo CCA da qual sofreram o processo de moagem, apresentaram resistências superiores ao concreto REF em todas as relações a/ag. Observou-se que o aumento de teor de 15% para 25% trouxe diminuição de resistência para as duas finuras de CCA, ou seja, há um limite no teor de adição das CCAs no concreto e também de finura, para otimização da resistência à compressão. À medida que aumenta o tamanho dos grãos, algumas partículas de CCAs, tornam-se inertes pela falta de possibilidade de reação com o CH, diminuindo assim sua resistência mecânica. Entretanto, alguma compensação de origem física pode acontecer, pelo preenchimento dos poros por esses grãos inertes maiores.

Nos gráficos 38, 39 e 40 e no quadro 12, a seguir, são mostrados os desempenhos os acréscimos da resistência à compressão axial dos corpos de prova moldados e rompidos após 91 dias, comparados com os protótipos extraídos das vigas moldadas em mesma data e rompidos na idade de 540 dias.

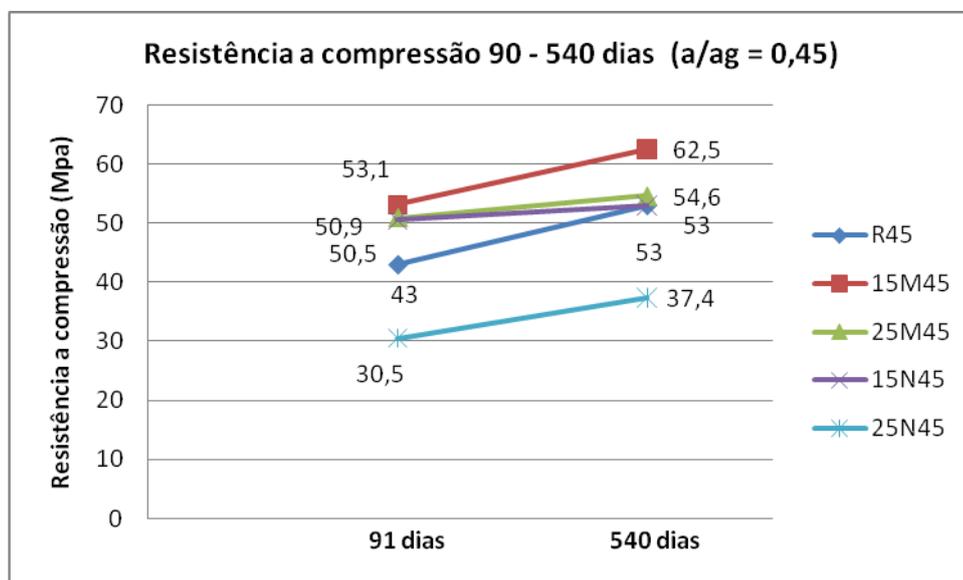


Figura 38 Acréscimo de resistência à compressão (MPa).

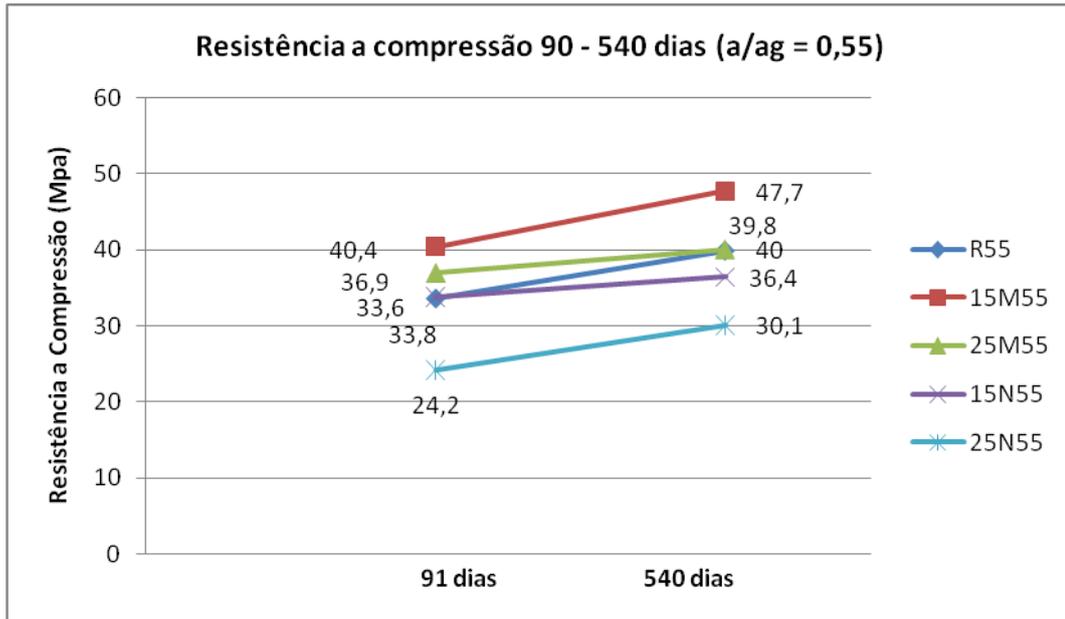


Figura 39 Acréscimo de resistência à compressão relação $a/ag = 0,55$

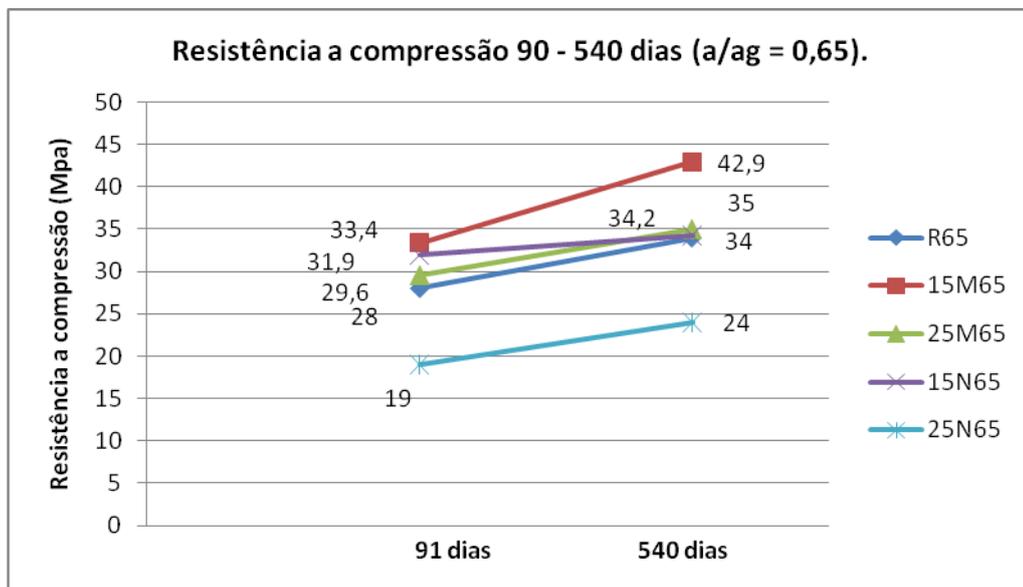


Figura 40 Acréscimo de resistência à compressão, $a/ag = 0,65$.

Mistura	a/ag	Resistência à compressão (MPa)		540/91 dias (%)
		Hoppe (2008) 91 dias c.p. moldados	Esta dissertação 540 dias testemunhos	
R	0,45	43,0	53,0	23,3
	0,55	33,6	39,8	18,5
	0,65	28,0	34,0	21,4
15 M	0,45	53,1	62,5	17,7
	0,55	40,4	47,7	18,1
	0,65	33,4	42,9	28,4
25 M	0,45	50,9	54,6	7,3
	0,55	36,9	40,0	8,4
	0,65	29,6	35,0	18,2
15 N	0,45	50,5	53,0	5,0
	0,55	33,8	36,2	7,1
	0,65	31,9	34,2	7,2
25 N	0,45	30,5	37,4	22,6
	0,55	24,2	30,1	24,4
	0,65	19,0	24,0	26,3

Quadro 12 – Acréscimos de resistência à compressão axial de 91 dias para 540 dias.

Nos gráficos e tabela 12 acima, se observa que os acréscimos de resistência à compressão entre 91 dias (c.p. moldados e curados em câmara úmida) e 540 dias (testemunhos extraídos com cura ambiental) foram para os SEGUINTEs: 25N ($\approx +24\%$), REF ($\approx +21\%$), 15M ($\approx +21\%$), 25M ($\approx +11\%$) e 15N ($\approx +6\%$). Os traços REF, 25M e 15N apresentaram resistências à compressão similares para as três relações a/ag, entretanto, com acréscimos bastante distintos entre 91 e 540 dias. Pode-se dizer que o traço REF, ao ser curado no ambiente, sujeito a molhagens e secagens periódicas e, ainda, por conter maior conteúdo de CH, apresentou progressão de resistência mais elevada, enquanto que o traço 25 M, por conter teor mais alto de CCA moída e mais reativa, e hipoteticamente com menor número de material inerte, consumiu com mais intensidade o CH, resultando em decréscimos menores. O traço 15M apresentou percentuais de acréscimos similares ao REF, entretanto em níveis de resistências mais altos, o que corresponderia ao teor ótimo de substituição de cimento por CCA com finura maior. Já os traços 15N foram os que apresentaram o menor percentual de crescimento, devido, certamente, à finura mais grossa dos seus grãos e menor atividade pozolânica do que os traços 15M e, também, por causa dos níveis de resistências aproximadamente 25% inferiores a estes últimos traços.

Observa-se que os traços 25N foram os que mais cresceram de 91 para 540 dias, apesar de apresentarem teores e finura mais elevados de CCA natural em relação aos demais. Provavelmente esse crescimento seja devido à sua menor compactação, que lhes conferiu níveis de resistências bastante inferiores aos demais, cerca de 1/3 inferior ao REF, 25M e 15N, o que representaria maior absorção de água a partir da superfície para o prosseguimento das reações de hidratação e pozolânicas,

5.3 PROFUNDIDADES DE CARBONATAÇÃO NATURAL

A análise da carbonatação natural deriva dos ensaios realizados com testemunhos extraídos de protótipos moldados e expostos ao ambiente natural. Depois de decorrido o tempo de exposição (1,5, 2 e 2,5 anos), da extração dos testemunhos e abertura dos CPs, foi aspergido fenolftaleína como indicador da profundidade carbonatada.

Após aferida as medidas na ordem da centésima parte de cada corpo de prova, realizou-se então o tratamento estatístico a fim de determinar a profundidade de carbonatação representativa de cada amostra em cada idade específica, conforme descrito no item 4.6.

Para a determinação dos coeficientes de carbonatação, utilizou-se procedimento analítico (regressão linear), sendo as profundidades de carbonatação (em milímetros) representadas no eixo y e no eixo x, a raiz quadrada da idade cronológica de exposição ao ambiente natural. Para o tempo zero, considerou-se carbonatação nula. Construíram-se os gráficos de cada uma das misturas aglomerantes. Os pontos obtidos foram alinhados em uma reta de tendência com função identidade do tipo $f(x) = ax + b$, onde o coeficiente angular “a” foi considerado o coeficiente de carbonatação.

O quadro 13 e as figuras 41, 42 e 43, a seguir, apresentam as profundidades de carbonatação e em mm, em função do tempo (\sqrt{t}) com seus respectivos coeficientes de carbonatação k_c , em $\text{mm}\cdot\text{ano}^{-0,5}$. Os coeficientes de determinação r^2 da regressão linear $e = a\cdot t^{0,5} + b$ foram muito fortes ($> 0,90$).

Mistura	a/ag	Profundidade carbonatada (mm)				k_c mm.ano ^{-0,5}	r^2
		0 ano	1,5 anos	2,0 anos	2,5 anos		
Referência	0,45	0	2,68	3,39	4,08	2,468	0,985
	0,55	0	4,06	5,04	5,85	3,604	0,993
	0,65	0	4,80	5,84	6,85	4,210	0,994
CCAM15	0,45	0	3,24	3,71	4,94	2,896	0,974
	0,55	0	4,95	6,19	6,66	4,243	0,997
	0,65	0	6,01	6,86	7,87	4,926	1,000
CCAM25	0,45	0	4,14	4,56	5,05	3,228	0,998
	0,55	0	6,15	6,74	7,27	4,710	0,995
	0,65	0	7,20	8,36	9,06	5,810	0,999
CCAN15	0,45	0	3,24	4,28	6,35	3,507	0,905
	0,55	0	5,92	6,45	7,57	4,719	0,998
	0,65	0	6,86	7,75	8,69	5,505	1,000
CCAN25	0,45	0	4,35	4,68	5,19	3,327	0,996
	0,55	0	7,30	8,00	8,70	5,614	0,996
	0,65	0	8,50	9,71	10,80	6,856	1,000

Quadro 13 – Profundidade de carbonatação em função do tempo.

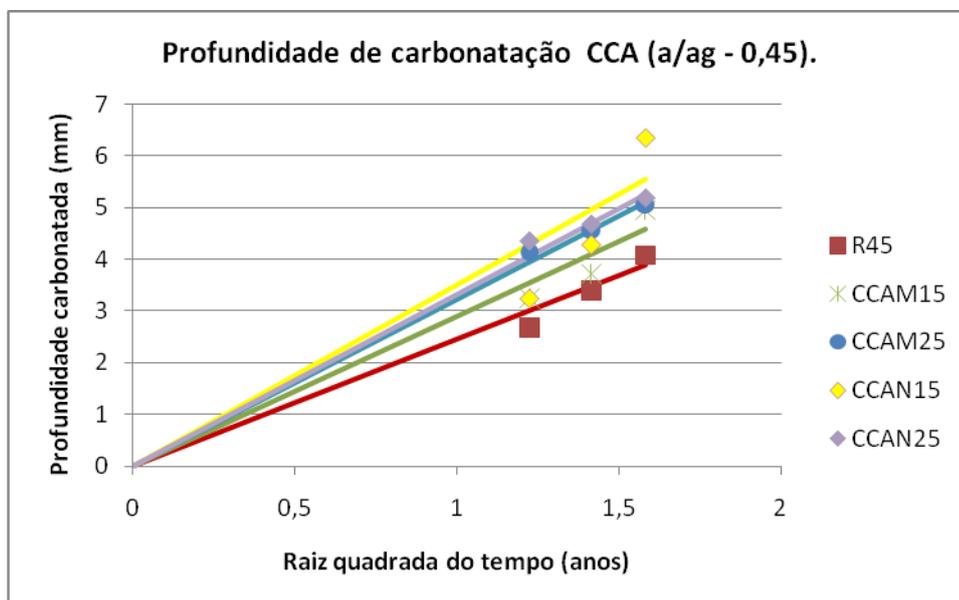


Figura 41 Profundidade de carbonatação em função do tempo (a/ag = 0,45).

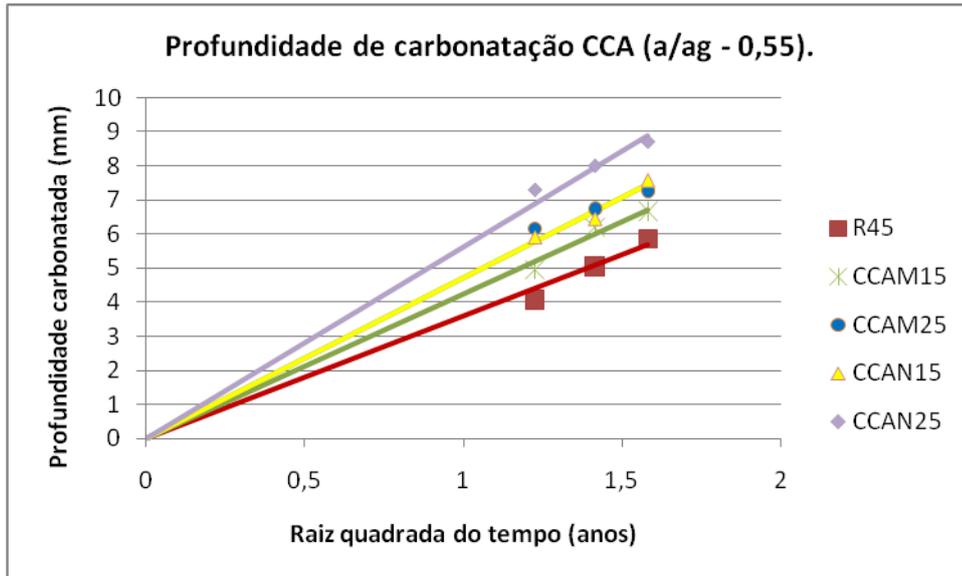


Figura 42 Profundidade de carbonatação em função do tempo (a/ag = 0,55).

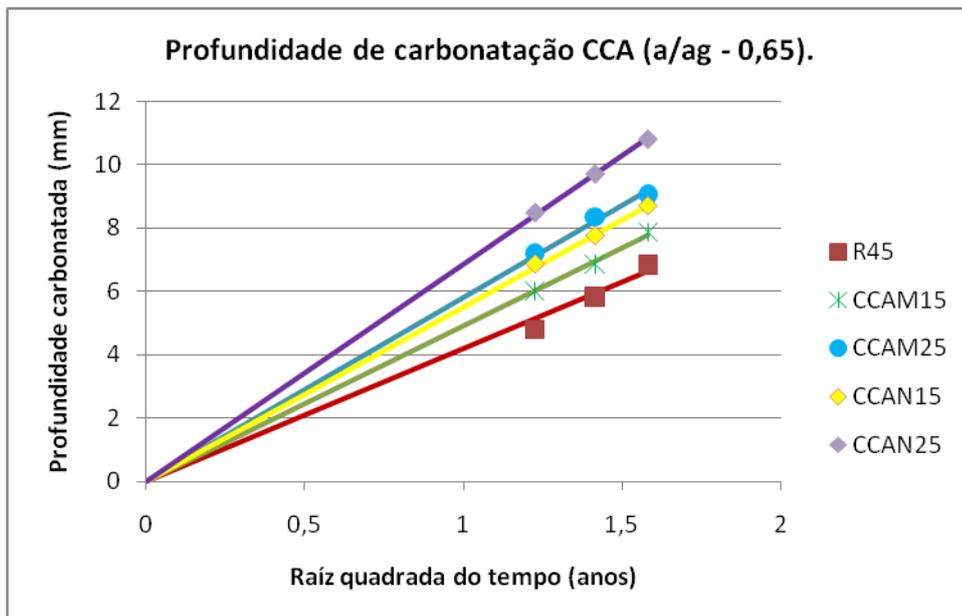


Figura 43 Profundidade de carbonatação em função do tempo (a/ag = 0,65).

Sabe-se que o avanço da carbonatação está diretamente ligado às condições ambientais e à microestrutura do concreto. Nota-se que à medida que a relação água aglomerante aumenta a profundidade de carbonatação e conseqüentemente os coeficientes de carbonatação crescem, conforme esperado.

Os traços de referência apresentaram menores profundidades de carbonatação devido à maior quantidade de CH resultante das reações de hidratação do cimento. Para os traços contendo CCA, genericamente, as profundidades de carbonatação cresceram à medida que o teor de substituição do cimento por CCA aumentou e também com a diminuição da finura, ou seja, na sequência M15, N15, M25 e N25 para as relações a/ag 0,55 e 0,65. Na relação a/ag 0,45, a ordem crescente foi M15, M25, N25 e N15, havendo assim uma discrepância em relação à ordenação anterior, não tendo sido encontrada explicação para o aumento da carbonatação no traço N15 em relação ao N25, nesta última sequência.

A figura 8 ilustra o comportamento anterior para as medidas da profundidade de carbonatação na idade final dos ensaios a 2,5 anos. Verifica-se a coerência do aumento das profundidades neutralizadas com as elevações das relações a/ag e o valor anômalo do traço 15 N apresentar profundidade de 6,35 mm e, para 25 N, 5,19 mm, para as relações a/ag = 0,45.

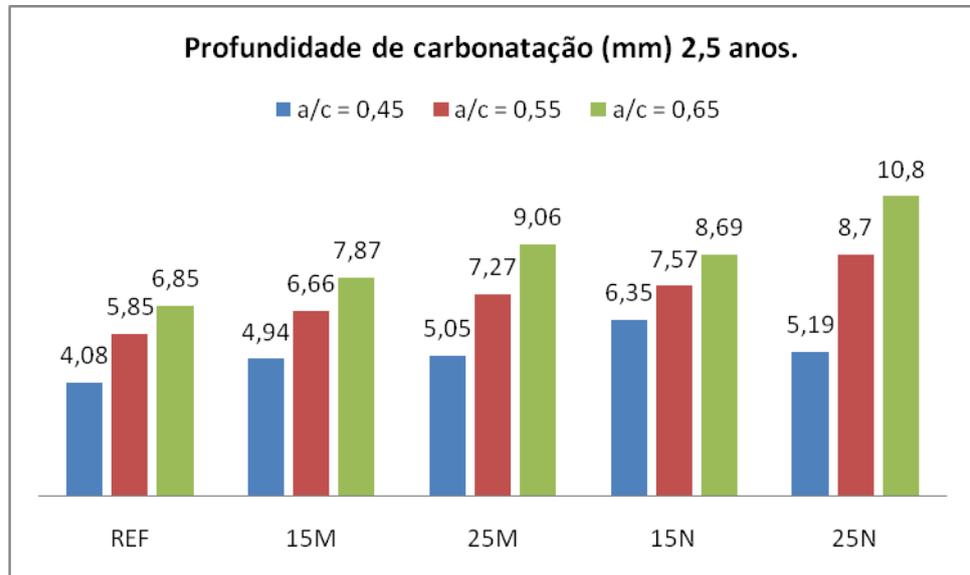


Figura 44 profundidade de carbonatação (mm) para a idade de 2,5 anos.

5.4 FINURA DE CCA VERSUS COEFICIENTE DE CARBONATAÇÃO NATURAL

Para analisar o desempenho do tipo de CCA a ser utilizado, as figuras 45 e 46, a seguir, que mostram e relacionam os tipos de CCA com seus respectivos coeficientes de carbonatação.

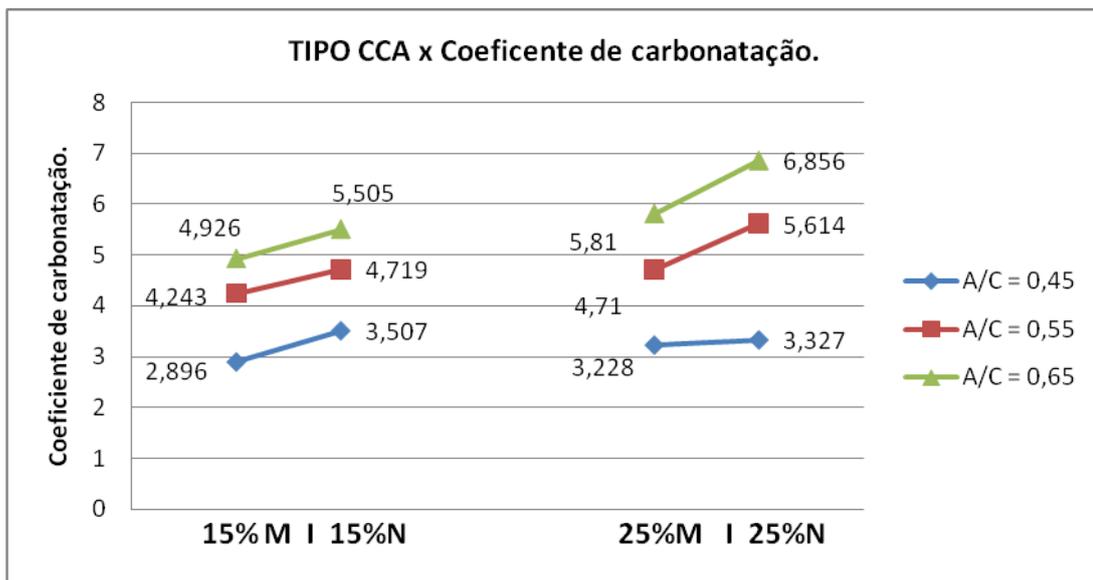


Figura 45 Tipo de CCA versus coeficiente de carbonatação.

Na figura 45, de maneira geral, nota-se que à medida que o teor de substituição aumenta, cresce também o coeficiente de carbonatação. Especificamente no teor de substituição de 15 % de CCA, a amostra com CCAN apresentou coeficientes de carbonatação maiores que a CCAM. Os corpos de provas contendo 15% de CCAM apresentaram 83%, 90% e 89%, nas respectivas relações a/ag e quando comparada com CPs com CCAN, nas mesmas relações, apresentam uma diferença ao redor de 13%, o que pode ser considerada como não muito significativa.

A mesma lógica pode ser notada nos teores de substituição de 25% de CCA. As amostras contendo 25% CCAM representaram 97%, 84% e 85% nas respectivas relações a/ag, quando comparadas com as misturas contendo 25% de CCAN. Para este teor, as diferenças se situaram entre 3% e 16%.

Um dos aspectos de importância nesta pesquisa é relacionar o desempenho das CCAs à medida que aumenta-se o teor de substituição. A figura 46 relaciona os coeficientes de carbonatação versus o incremento do teor de substituição. Nota-se aumento no coeficiente de carbonatação à medida que o teor de CCA se eleva, independente do tamanho da partícula. Nas misturas contendo 15% de CCAM, os CPs representam 90%, 90% e 85% nas relações a/ag respectivas, quando comparadas com os coeficientes de carbonatação das misturas contendo 25% de CCA.

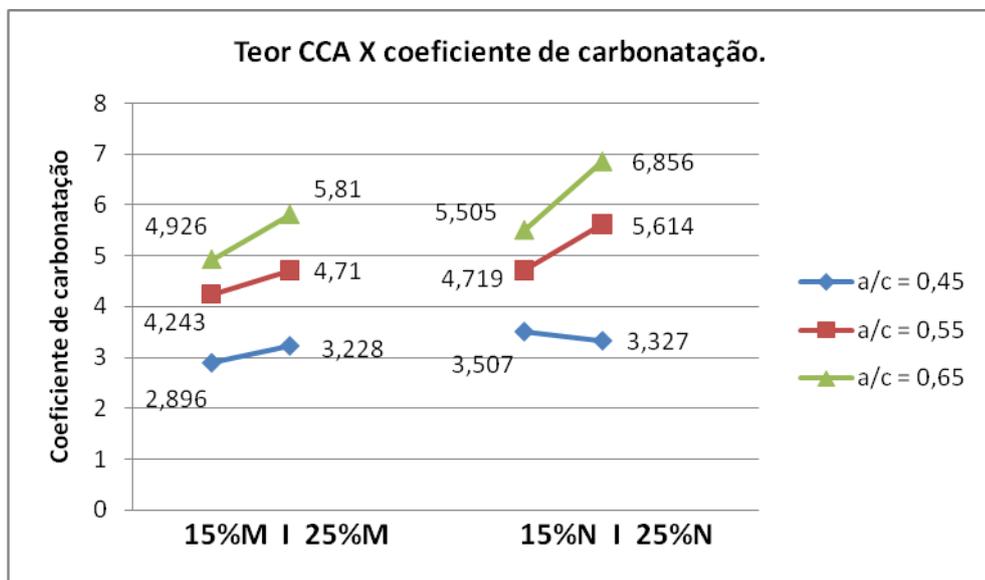


Figura 46 Teor de CCA versus coeficiente de carbonatação.

No que se refere às amostras contendo 15% de CCAN, representam 105%, 84% e 80% nas relações a/ag respectivas, quando comparadas com os coeficientes de carbonatação natural com 25%. Nota-se que só na relação $a/ag = 0,45$, a amostra contendo 25% de CCAN apresentou coeficiente de carbonatação menor que a amostra com 15%, de acordo com o comentário realizado acima.

Resumindo, as amostras contendo CCAM foram menos suscetíveis ao fenômeno de carbonatação, além de apresentar maiores resistências à compressão. O teor de 15% de CCAN apresentou acréscimos aproximados a 13% em relação à CCAM, com exceção da relação $a/ag = 0,45$ com aumento de 21%, valor que pode ser considerado anômalo em relação aos demais.

Em valores calculados, os coeficientes K_c situaram, aproximadamente entre 3,0 e 5,0 $\text{mm.ano}^{-0,5}$ para CCAM e entre 3,5 e 5,5 $\text{mm.ano}^{-0,5}$, o que representa profundidade carbonatada, aproximada, em 50 anos, entre 20 e 35 mm para a primeira e entre 25 e 40 mm para a segunda, considerando 1 semana igual a 1 anos, o que pode ser considerado adequado para concretos destinados a construções convencionais.

5.5 CARBONATAÇÃO NATURAL VERSUS ACELERADA

Um dos objetivos de pesquisadores nos últimos anos é relacionar os ensaios de carbonatação acelerada com os naturais. Devido à extensão do tempo de duração dos ensaios de exposição natural, achar parâmetros indicativos da carbonatação reais das estruturas de concretos, comparando com os resultados de ensaios acelerados em laboratórios, é um dos objetivos desta dissertação.

Assim, serão aproveitados os resultados dos ensaios de carbonatação acelerado realizados na dissertação de Hoppe (2008), cujos corpos de prova foram moldados com os mesmos traços, mesmos materiais e na mesma ocasião dos protótipos ensaiados na presente dissertação. Os corpos de prova moldados foram curados em câmara condicionada e os protótipos em cura ambiental externa desabrigada até 540 dias e, após, em laboratório.

Nos ensaios de carbonatação acelerada, os corpos de prova sofreram pré-condicionamento, conforme preconiza a norma RILEM TC 116-PCD (1999), visando dotá-los de uma concentração de umidade em equilíbrio em um ambiente aéreo e com temperatura constante e com distribuição uniforme de água evaporável. Simulou-se uma atmosfera com teor de CO_2 , $(75 \pm 2)\%$ de U.R e temperatura de $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ em câmara climática automatizada, modelo 345 da marca FANEM, figura 46. O quadro 14 apresenta as idades de ensaio dos corpos de prova curados em câmara climatizada.



Figura 47 Câmara de carbonatação.

Número da Amostra (CP)	Idade de Ensaio Carbonatação (Semanas)
Zero	0 Semanas (entrada na câmara)
1,2,3	3 Semanas
4,5,6	6 Semanas
7,8,9	9 Semanas
10,11,12	12 Semanas

Quadro 14 Idades de ensaio em carbonatação acelerada.

O Quadro 15 mostra os resultados dos coeficientes de carbonatação acelerada e relaciona com os coeficientes de carbonatação natural.

TRAÇO	Kc Acelerado mm.semana ^{-0,5}	Kc Natural mm.ano ^{-0,5}	Kc acel. / Kc nat R	Média R	Desvio Médio
R45	1,79	2,47	0,73	0,76	16%
R55	2,53	3,60	0,70		
R65	3,44	4,21	0,82		
15M45	2,19	2,90	0,76	0,78	6%
15M55	3,21	4,24	0,76		
15M65	3,97	4,93	0,81		
25M45	1,89	3,23	0,59	0,63	11%
25M55	3,06	4,71	0,65		
25M65	3,84	5,81	0,66		
15N45	3,03	3,51	0,86	0,97	21%
15N55	4,16	4,72	0,88		
15N65	6,39	5,51	1,16		
25N45	2,64	3,33	0,79	0,71	20%
25N55	3,65	5,61	0,65		
25N65	4,79	6,86	0,70		
MÉDIA Coef. Variação				0,77 16,4%	

Quadro 15 – Coeficiente de carbonatação natural e acelerada

Nota-se que as relações Kc acelerados / Kc natural são menores que 1,0, o que representa que a carbonatação nos ensaios naturais evoluiu de forma mais rápida, quando comparada com ensaios acelerados. Antes de prosseguir com a análise e discussão destes resultados, é conveniente rememorar resultados de alguns trabalhos da literatura sobre esse assunto.

Em primeiro lugar, deve-se considerar que ao comparar-se resultados de ensaios de carbonatação realizados em câmara climatizada e em condições naturais ambientais, existe a possibilidade de obter-se dispersões mais ou menos acentuadas, tendo em vista a quantidade de fatores que influem nos dois processos.

Ho e Lewis (1987) realizaram ensaio acelerado com 4% de CO₂, cura prévia de 7 dias a 23° C e 50% de umidade relativa, tendo obtido a relação de 1 semana em câmara condicionada equivalente a 1 ano de ensaio natural nas *mesmas condições ambientais*. Dhir et al. (1989) também estudaram carbonatação acelerada em câmara climatizada com 4% de CO₂, 50% de U.R. e 20°C de temperatura, por 20 semanas, comparada com carbonatação natural com corpos de prova expostos em ambiente de laboratório abrigado durante 4 anos. Os resultados obtidos indicaram

que a relação de 1 semana de exposição acelerada equivale a 15 meses de exposição natural.

Thomas et al. (2000) compararam resultados de carbonatação natural de concretos com até 50% de cinza volante, durante 2, 4 e 10 anos, em ambiente de laboratório a 20°C e 65% de U.R., com ensaios acelerados de laboratório em câmara condicionada com 10% de CO₂, 20°C e 65% de U.R. Concluem que a taxa de carbonatação é fortemente dependente do nível de resistência, do período de cura úmida e das condições de exposição, enquanto que o teor de cinza volante na faixa de 0 a 30% apresenta pouco impacto sobre a carbonatação. Os resultados dos ensaios acelerados não mostraram correlação confiável com os dados obtidos em longo prazo na condição de exposição natural.

Isaia et al (2001) realizaram estudo comparativo entre a carbonatação acelerada e natural em protótipos de concretos, com substituição de cimento por misturas binárias e ternárias de cinza volante, cinza de casca de arroz e sílica ativa, em teores entre 10 e 50%, em massa. Foram realizados ensaios acelerados com corpos de prova de concreto em câmara condicionada com 10% de CO₂, 23°C e introduzidos após cura ao ar por 28 dias, com leituras da profundidade de carbonatação após 4, 8, 12 e 16 semanas; e ensaios de carbonatação natural após 0,5, 1 e 2 anos de exposição ao ambiente do laboratório.

Os coeficientes de carbonatação calculados a partir dos ensaios acelerados e naturais mostraram que a relação entre ambos se aproxima da equivalência $1.\text{semana}^{0,5} = 1.\text{ano}^{0,5}$, em média, para teores de pozolanas iguais ou inferiores a 25%. Para teores elevados de pozolanas (50%), os coeficientes de carbonatação obtidos dos ensaios acelerados apresentam valores 3,6 vezes maiores, em média que os ensaios de carbonatação naturais. Para o teor de 10% de sílica ativa e relação $a/ag \approx 0,42$ as relações $Kc_{\text{acel}} / Kc_{\text{nat}}$ ficaram ao redor de 0,50; para 25% de cinza volante em 0,83 e para 25% de CCA em 0,63. Para relações a/ag próximas de 0,55, essas relações subiram para 1,5 a 2,0.

Os resultados dos ensaios obtidos por Isaia et al. (2001) mostram que a relação entre os ensaios acelerados e naturais depende da relação a/ag , crescendo a relação à medida que esta aumenta, isto é, que os concretos mais porosos apresentem tendência de maior carbonatação acelerada que os naturais e vice-versa.

A Tabela 15 mostra que todos os ensaios naturais apresentaram resultados superiores ao acelerado, com exceção do traço 15N para a relação $a/ag = 0,65$. As relações $R = K_{C_{acel}}/K_{C_{nat}}$ se situaram entre o mínimo de 0,59 e máximo de 1,16, com média de 0,77 (C.V. = 16,4%), ou seja, os coeficientes acelerados foram, em média, 23% menores do que os naturais, cresceram quase sempre com a relação a/ag , diminuíram com o aumento do teor de CCA e aumentaram com o decréscimo da finura.

Comparando-se os valores de R da Tabela 15 com os da literatura mencionada, observa-se que são mais elevados, isto é, os coeficientes de carbonatação acelerada foram mais altos do que os da presente pesquisa. Os valores citados do trabalho de Isaia et al (2001) foram próximos ou similares das relações encontradas por aqueles autores, no que se refere aos traços de cinza volante e CCA com 25% de substituição de cimento, nas relações a/ag próximas de 0,45 (0,53 a 0,63), enquanto que, na presente investigação, para todas relações a/ag , os valores de R permaneceram entre o mínimo de 0,59 e máximo de 1,16.

Nos trabalhos citados, especialmente os de Ho e Lewis (1987), os ensaios acelerados e naturais foram realizados nas mesmas condições ambientais, enquanto que, neste projeto, os protótipos foram curados por 540 dias (1,5 anos) em ambiente natural desabrigado, sujeitos às variações de umidade e temperatura sazonais, como também dos processos de molhagens e secagens sucessivos próprios desta condição. Após a primeira a obtenção dos dados a 1,5 ano, os protótipos foram levados para ambiente de laboratório abrigado, com o objetivo de acelerar o processo de carbonatação. Por isso acredita-se que este fato tenha contribuído para que as profundidades a 2,0 e 2,5 anos tenham sido majoradas, causando acréscimo nos coeficientes calculados, em relação aos corpos de prova moldados do ensaio acelerado, que tiveram condições padronizadas de cura.

As diferenças de padronização das condições de pré-condicionamento e de exposição ambiental, em especial esta última, acarreta modificações substanciais na microestrutura do concreto, principalmente para a estrutura dos poros, que, aliada às diferenças de concentrações de CO_2 , resulta em diferenças nas profundidades carbonatadas, quando se compara ensaios acelerados e naturais. A este respeito, é oportuna a seguinte citação:

“A representatividade dos ensaios de desempenho baseados no envelhecimento acelerado, em relação aos fenômenos que ocorrem em condições reais, são suscetíveis à evolução de microestrutura e de propriedades diferentes em comparação ao envelhecimento natural... A severidade de um ensaio não pode ser avaliada a não ser estudando-se a resposta do desempenho para traços de concreto para os quais se conheça o comportamento *in situ* em período suficientemente grande (pelo menos 10 anos). Isto implica em iniciar os ensaios mesmo antes de conhecer seu grau de severidade, devido à importância da existência de estudos prévios antes de incorporar ensaios de desempenho nos textos (normas)” (Baroghel-Bouny, V; Cussigh, F.; Rougeau, p. 287, 2008).

Em face do exposto, pode-se concluir que um maior tempo de exposição dos protótipos ao ambiente natural poderia amenizar, os coeficientes de carbonatação natural produzindo pontos mais estáveis em relação às possíveis variações dimensionais gerando assim uma reta teoria com menor inclinação.

5.6 COEFICIENTE DE CARBONATAÇÃO EM IGUALDADE DE RESISTÊNCIA

Para melhor comparação entre os coeficientes de carbonatação das misturas com teores e finuras distintas de CCA, a análise em igualdade de resistência (tabela 16) é necessária porque o refinamento dos poros e dos grãos dos traços com pozolanas é dependente da relação a/ag, da reatividade química e finura, a qual influi também por efeito físico.

A análise dos resultados dos ensaios de carbonatação acelerada realizados por Hoppe (2008), em igualdade de resistência, referiram-se a $f_{c91} = 30$ MPa. Na presente pesquisa, os ensaios à compressão axial foram efetuados a 540 dias e os coeficientes de carbonatação natural foram calculados com profundidades medidas até a idade de 2,5 anos (900 dias). Para efeito de igualdade na comparação dos ensaios acelerados e naturais em igualdade de resistência, é necessário determinar os valores f_{c91} dos ensaios acelerados com os respectivos f_{c900} dos naturais.

Como os ensaios de resistência à compressão foram realizados a 540 dias a partir dos protótipos e considerando-se que as resistências à compressão

determinadas entre corpos de prova moldados e curados em laboratório e testemunhos extraídos de protótipos curados ao meio ambiente, com os mesmos traços são próximas, com variações inferiores a 10%, (Brizola, 2007), com protótipos iguais e expostos a condições ambientais similares da presente pesquisa, pode-se utilizar o princípio da equação da maturidade (M) (Neville, 1997), juntando-se todas as idades, de 7 a 540 dias, na mesma expressão:

$$f_c = a + b \cdot \ln M \quad (\text{eq. 4})$$

Para calcular a resistência à compressão a 900 dias, a partir dos 540 dias, por extrapolação, considerando-se que as temperaturas fossem semelhantes, pode-se substituir M pelo tempo t. Esta simplificação pode ser assumida desde que, a partir de 1 ano de idade, a influência da temperatura de cura ambiental tem pouca influência na resistência média anual do concreto, porque os acréscimos de resistência a partir desta idade são pequenos, inferiores de 10%.

A análise em igualdade de resistência dos resultados de carbonatação acelerada foram realizados para $f_{c91} = 30$ MPa (HOPPE, 2008) e, para encontrar o valor correspondente desta resistência para f_{c900} dos ensaios de carbonatação natural, serão tomados os valores das idades 7, 28, 91 e 540 dias, e aplicados à eq. 03. A Tabela 16 e a figura 47 apresentam os resultados obtidos.

No quadro 16, as resistências a 900 dias de idade correspondentes a 30 MPa a 91 dias, tendo sido calculadas a partir das relações a/ag encontradas nessa idade (coluna 1), e aplicadas às respectivas resistências dos traços a 900 dias, por meio das equações de Abrams. Observa-se que os valores encontrados para as misturas ensaiadas tiveram variação pequena, entre 36,5 e 39,1 MPa, com média de 37,5 MPa e coeficiente de variação de apenas 3,0%. Adotou-se, portanto, este último valor para calcular os coeficientes de carbonatação natural a 900 dias em igualdade de resistência aos coeficientes acelerados a 91 dias.

Traços a/ag	a/ag p/ f_{c91} 30MPa	K_c mm.sem ^{-0,5}	f_{c900} ¹ MPa	f_{c900} p/ $a/ag =$ f_{c91} 30MPa	K_c p/ f_{c900} 37,5MPa mm.ano ^{-0,5}	K_{c91} acel. / K_{c900} nat.
R 0,45 R 0,55 R 0,65	0,61	3,06	54,0 40,4 34,9	37,0	3,91	0,78
15M 0,45 15M 0,55 15M 0,65	0,65 ²	3,84 ³	64,6 49,2 44,9	44,9 ³	4,93 ³	0,78 ³
25M 0,45 25M 0,55 25M 0,65	0,64	4,67	58,3 42,7 36,8	36,7	5,62	0,83
15N 0,45 15N 0,55 15N 0,65	0,65	3,99	57,5 38,5 36,5	36,5	5,11	0,78
25N 0,45 25N 0,55 25N 0,65	0,46	3,06	39,7 32,0 25,3	39,1	3,99	0,80
Média Coef. Var.		3,70 21,1%		37,5 3,2%	4,66 18,1%	0,80 3,0%

Quadro 16 Coeficientes de carbonatação em igualdade de resistência a 91 e 540 dias.

¹ resistências calculadas pela equação $f_c = a + b \cdot \ln t$, para $t = 7, 28, 91$ e 540 dias;

² para atender o disposto no item 7.4.2 da NBR 6118 foi tomado esse valor, como máximo, para a classe de agressividade I, porque pela equação de Abrams o valor seria $a/ag = 0,74$;

³ valores descartados para cálculo das médias e coeficientes de variação, por se tratarem de níveis de resistência diferentes.

As tendências dos K_c acelerados e naturais são similares: os menores valores foram para REF e 25N, seguidos de 15N e, após, 15M e 25M, com inversão destes dois últimos para K_c natural. Os valores de K_c para 25N praticamente se igualaram ao REF, que foi o menor de todos porque a relação a/ag para atingir 30 MPa a 91 dias ou 37,5 MPa a 900 dias foi baixa, apenas 0,46, muito inferior a 0,61 do traço REF. As relações a/ag dos demais traços tiveram menor variação para os mesmos níveis de resistência.

Nos ensaios acelerados e naturais, as misturas com CCAM apresentaram coeficientes mais elevados que CCAN, em igualdade de resistência, ao contrário do que aconteceu com a análise em igualdade de relação a/ag , o que confirma a necessidade de que as análises dos resultados sejam realizadas em função dos mesmos níveis de resistência. Para K_c natural, os teores de 15% foram mais elevados do que 25%, o que poderia ser creditado ao maior refinamento dos teores mais altos de substituição, entretanto ensaios complementares deveriam ser

realizados para averiguar esta hipótese (figura 48). Entretanto, o principal fator parece ser a menor relação a/ag do traço 25 N (0,46) em relação ao 15 N (0,65), para obtenção da mesma resistência em ambas idades.

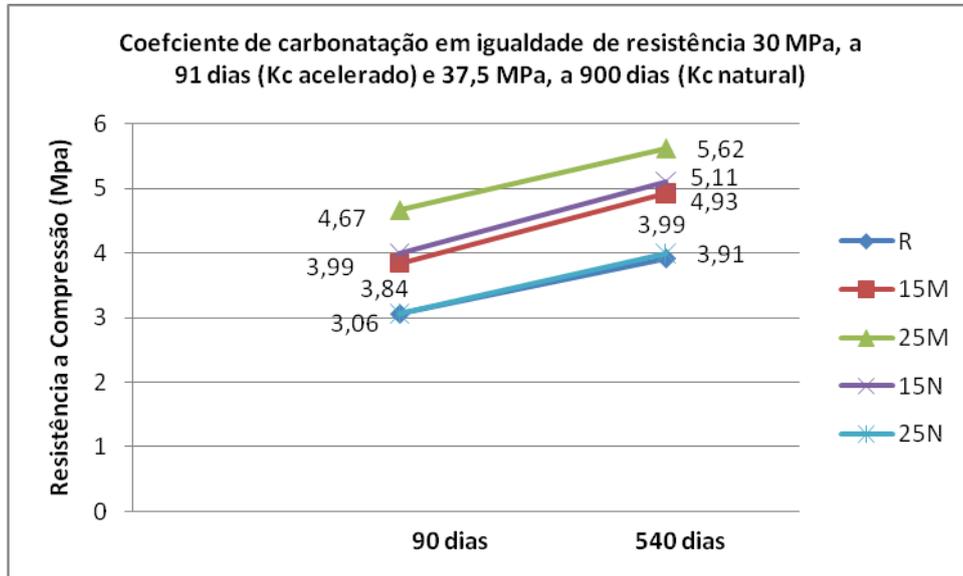


Figura 48 Coeficientes de carbonatação em igualdade de resistência a 30 MPa, a 91 dias (kC acelerado) e 37,5 MPa, a 900 dias (kC natural).

As relações $R = K_{c \text{ acel}}/K_{c \text{ nat}}$, em média geral foram muito semelhantes à análise em igualdade de relação a/ag , com a relação $1 \text{ semana}_{\text{acel}} = 0,8 \text{ ano}_{\text{nat}}$.

Os coeficientes naturais dos traços CCA variaram de 3,99 a 5,62 $\text{mm.ano}^{-0,5}$, correspondendo a profundidades carbonatadas de 30 a 40 mm em 50 anos. Considerando-se os cobrimentos nominais do item 7.4.7.6 da NBR 6118 (ABNT, 2005) para a classe de agressividade ambiental I: 20 mm para lajes e 25 mm para viga/pilar, observa-se que a carbonatação atingiria a armadura em prazo menor do que o da vida útil de uma estrutura convencional.

Nos ensaios acelerados, os valores limites dos traços CCA foram de 3,06 a 4,67 $\text{mm.semana}^{-0,5}$ e, conforme Ho e Lewis (1987), corresponderia a 22 e 33 mm em 50 anos, não cumprindo, ao menos para lajes, as condições da NBR 6118.

Os cálculos anteriores apresentam duas evidências:

- Os ensaios de carbonatação acelerada e natural apresentaram discrepâncias nos valores encontrados em relação ao que apresentada à literatura, provavelmente causada pelas variações das condições de cura com que os

protótipos, não só durante o tempo de exposição desabrigado/abrigado, como também em relação aos corpos de prova moldados;

- Para atingir os requisitos da classe I de agressividade ambiental da NBR 6118 para os cobrimentos nominais das armaduras, os níveis de resistência a serem considerados no projeto estrutural deveriam ser mais elevados que 30 MPa, para fechar mais os poros e reduzir a velocidade de carbonatação.

5.7 COEFICIENTE DE CARBONATAÇÃO NATURAL VERSUS ESTRUTURA DE POROS

Com o objetivo de verificar a influência que a porosidade do concreto exerce no fenômeno de carbonatação natural, realizaram-se ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio, com o objetivo de avaliar as possíveis relações entre essas variáveis. Estes ensaios foram realizados por Duart (2007) e encontram-se em sua dissertação de mestrado.

A fim de analisar a distribuição dos poros no concreto, distinguem-se três níveis de mercúrio intrudido que representam poros de tamanho distintos: poros de diâmetro inferiores a 10 nm, poros situados na faixa entre 10 nm a 50 nm e superiores a 50 nm, respectivamente denominados de microporos, mesoporos e macroporos. A Tabela 17 apresenta os resultados obtidos nos ensaios e os cálculos dos volumes de Hg para cada uma das 3 faixas de poros, com os respectivos percentuais calculados para cada uma delas. A figura 48 mostra as variações dos macro e microporos dos traços.

Nota-se, de maneira geral, que o volume total de mercúrio intrudido é menor para os traços com CCAM do que natural e, também, que a quantidade dos macroporos são maiores que os microporos em todas as misturas, inclusive nas amostras de referência contendo 100% de cimento. Pode-se notar que nos protótipos contendo CCA aumentou a quantidade de microporos em relação ao concreto de referência, comprovando refinamento dos poros, ou seja, diminuição no tamanho dos diâmetros médio dos poros da amostra nos concretos com CCA.

Apesar de as amostras contendo CCA apresentarem, quase sempre, um incremento na quantidade de volume total de mercúrio intrudido e de microporos e, também, diminuição da quantidade dos macroporos, fenômeno responsável pelo

refinamento dos vazios, aumentando a tortuosidade dos poros, as profundidades de carbonatação foram maiores que as amostras de referência. Esse fato pode ser creditado ao efeito dominante de diminuição da reserva alcalina, devido a menor quantidade de CH oriundo do processo de hidratação do cimento e consumido pelas reações pozolânicas provocada pela adição de CCA.

TRAÇO	a/ag	Porosidade %	Φ méd. nm	V. Intrudido (ml/g)	$\Phi > 50$ nm	$50 < \Phi > 10$ nm	$\Phi < 10$ nm
REF	0,45	14,5	0,0146	0,0669 100%	0,0302 45%	0,0187 28%	0,0180 27%
REF	0,55	16,0	0,0187	0,0748 100%	0,0397 53%	0,0202 27%	0,0149 20%
REF	0,65	18,7	0,0194	0,0803 100%	0,0396 49%	0,0233 29%	0,0174 22%
15M	0,45	14,2	0,0110	0,0649 100%	0,0172 27%	0,0244 38%	0,0233 35%
15M	0,55	15,8	0,0130	0,0754 100%	0,0245 32%	0,0276 37%	0,0213 31%
15M	0,65	18,3	0,0136	0,0875 100%	0,0244 28%	0,0418 48%	0,0213 24%
25M	0,45	13,6	0,0098	0,0635 100%	0,0157 25%	0,0213 34%	0,0265 41%
25M	0,55	16,6	0,0129	0,0790 100%	0,0263 33%	0,0287 36%	0,0240 31%
25M	0,65	16,4	0,0179	0,0745 100%	0,0202 27%	0,0438 59%	0,0105 14%
15N	0,45	17,1	0,0137	0,0815 100%	0,0305 37%	0,0232 29%	0,0238 34%
15N	0,55	19,9	0,0152	0,0975 100%	0,0570 58%	0,0253 26%	0,0152 16%
15N	0,65	22,0	0,0186	0,1105 100%	0,0523 47%	0,0378 34%	0,0204 19%
25N	0,45	14,1	0,0116	0,0650 100%	0,0282 43%	0,0233 36%	0,0135 21%
25N	0,55	15,4	0,0146	0,0710 100%	0,0229 32%	0,0303 43%	0,0178 25%
25N	0,65	20,1	0,0184	0,1029 100%	0,0336 33%	0,0356 35%	0,0337 32%

Quadro 17 – Resultados dos ensaios e porosimetria aos 540 dias.

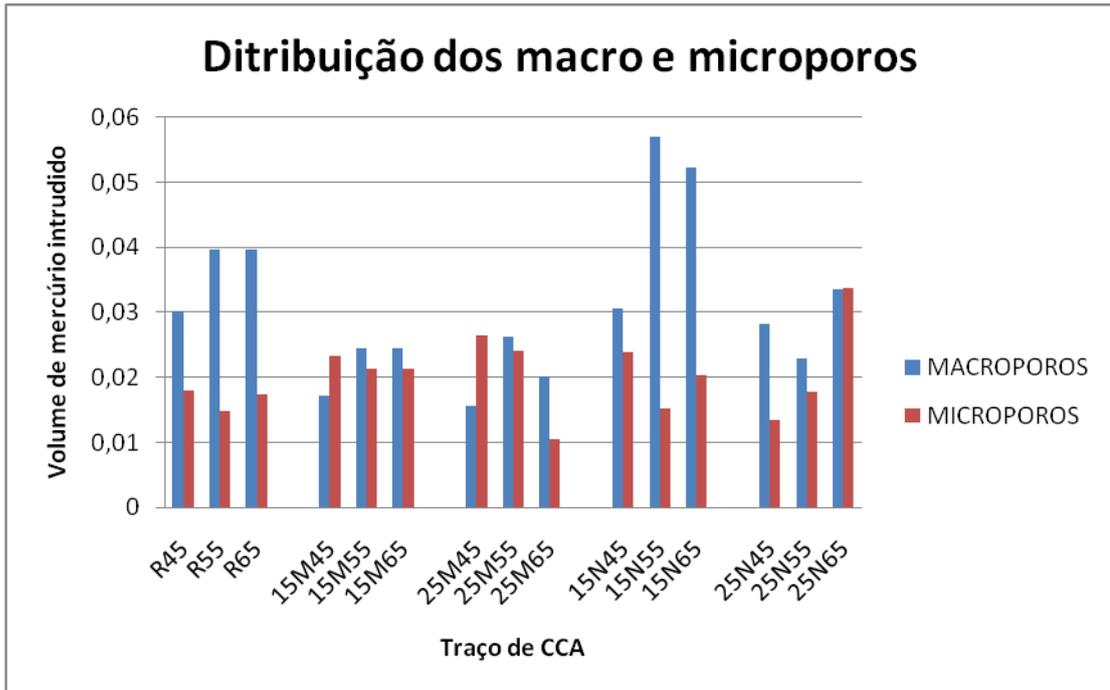


Figura 49 Distribuição do volume de Hg intrudido dos macro e microporos.

Com o objetivo de melhor visualização das tendências da distribuição dos tamanhos dos poros, a figura 49 apresenta as médias dos resultados no quadro 18 a 540 dias, comparados com os dados obtidos por Duarte (2008) a 91 dias de idade, relacionados ao mesmo projeto de pesquisa e traços da presente dissertação. Foram acrescentados os resultados obtidos para os coeficientes de carbonatação nas duas modalidades de ensaio. O objetivo desta análise é verificar os aspectos qualitativos do comportamento das variáveis do que os quantitativos, para que se possa ter ideia da origem das eventuais causas das diferenças entre ensaios de carbonatação acelerada e natural.

Traço	Porosidade %		Φ médio Nm		Vol. Hg total ml/g x 10 ⁻⁴		Vol. Hg Φ>50 nm ml/g – x 10 ⁻⁴		Vol. Hg Φ<10 nm ml/g		Coef. Carbonat. ¹	
	91 dias	540 dias	91 dias	540 dias	91 dias	540 dias	91 dias	540 dias	91 dias	540 dias	91 dias	540 dias
REF	17,4	15,4	212	176	838	740	470	365	141	168	2,59	3,43
M15	18,8	16,1	126	125	786	749	314	220	186	220	2,93	4,02
M25	18,0	15,5	190	135	862	723	360	207	188	203	3,69	4,58
N15	17,1	19,4	93	158	812	965	399	466	158	198	3,12	4,58
N25	18,0	16,5	147	149	873	796	367	282	197	217	4,53	5,27

¹ 91 dias: mm. semana^{-0,5}; 540 dias: mm.ano^{-0,5}

Quadro 18 Médias das variáveis da porosimetria a 91 e 540 dias

As médias das variáveis da porosimetria mostram que os resultados a 91 dias de idade, em relação a 540 dias, são maiores para a porosidade, diâmetro médio, volume total de Hg intrudido e poros superiores a 50 nm, com exceção para os traços N15; e inferiores para poros menores que 10 nm. Estes resultados eram esperados devido ao crescimento da idade, com o qual as reações de hidratação e pozolânicas aumentam, incrementando o refinamento dos poros.

Em princípio, os dados resultantes da microestrutura dos poros contrariam os obtidos pelo coeficiente de carbonatação acelerada a 91 dias, os quais foram inferiores aos de 540 dias da carbonatação natural, pois estes últimos apresentaram valores maiores que os primeiros. Com efeito, quanto mais compacta a microestrutura, menor a possibilidade de transporte de CO₂ através dos poros.

Assim, observa-se que, provavelmente, os coeficientes de carbonatação natural foram maiores do que os acelerados, devido a outros fatores, especialmente as condições de exposição diferentes entre os protótipos e corpos de prova moldados, conforme já abordado anteriormente.

Para melhor compreender o comportamento entre ensaios de carbonatação acelerada e natural, deveriam ser realizados estudos comparativos em condições

padronizadas para os últimos, com cura em ambiente interno abrigado e, se possível, com controle de umidades e temperaturas, em longo prazo, para dirimir as dúvidas levantadas pelos resultados obtidos nesta dissertação.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

6.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

Este capítulo tem por objetivo apresentar respostas baseadas nas análises dos resultados encontrados e na bibliografia consultada sobre o tema. Chega-se então a conclusão aos questionamentos levantados nos objetivos específicos desta pesquisa.

6.2 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Com o objetivo de analisar o comportamento dos concretos com diferentes teores de substituição do cimento pela CCA, moída e natural, ao que se refere à resistência à compressão, chega-se às seguintes conclusões:

- A resistência à compressão axial a 18 meses dos traços com CCAM foi superior ao concreto referência, enquanto que a de cinza natural foi menor do que as misturas com CCA moída, com quedas maiores para o teor de 25% do que para 15%.
- Especificamente, a incorporação contendo 25 % CCAN em todas as relações a/ag, e 15 % CCAN na relação a/ag = 0,55, apresentaram valores de resistência à compressão axial aos 540 dias, inferior ao concreto de referência e há similaridade nos resultados de compressão axial das misturas de 25% CCAM em todas as relações a/ag, com os concretos de referência produzidos com 100% de cimento.
- Observou-se, de maneira geral, que o aumento de teor de 15% para 25% trouxe diminuição de resistência para as duas finuras de CCA, ou seja, há um limite no teor de adição e do tamanho dos grãos das CCAs no concreto, para uma otimização da resistência à compressão. À medida que aumenta o tamanho dos grãos, algumas partículas de CCAs tornam-se inertes pela

impossibilidade de reação com o CH, diminuindo, assim, sua resistência. Entretanto, alguma compensação de origem física pode acontecer, pelo preenchimento dos poros por esses grãos maiores inertes. Esta compensação pode-se atribuir ao refinamento dos poros e à diminuição das interconexões dos vazios das amostras, comprovadas pelos ensaios de porosimetria das mesmas.

- Esta otimização do tamanho das partículas de CCA versus teor de substituição de cimento, na produção dos concretos, mostrou-se mais eficaz na mistura contendo 15% de CCA, tanto natural quanto moída. Em todas as relações a/ag, dentro das misturas estudadas, obteve-se as maiores resistências à compressão.

6.3 PROFUNDIDADES DE CARBONATAÇÃO NATURAL

Ao que se refere à profundidade de carbonatação, conclui-se que para os traços de referência, as profundidades de carbonatação são menores. Essa condição baseia-se na maior quantidade de CH oriundo das reações de hidratação do cimento e não consumida pelas reações pozolânicas, que porventura as adições de CCA consumiriam, caso estivesse presente na mistura.

Conclui-se que o aumento das profundidades de carbonatação cresceu, aliado a duas variáveis: o aumento do teor de substituição e a diminuição do tamanho das partículas das CCA. A sequência lógica encontrada de maneira geral em todas as relações a/ag, excluindo-se as discrepâncias anômalas, é crescente na ordem de, M15, N15, M25 E N25.

É possível produzir concreto de resistência convencional com profundidades carbonatadas entre 25 e 40 mm para estruturas correntes.

6.4 CARBONATAÇÃO NATURAL VERSUS ACELERADA

Quando relaciona-se os coeficientes de carbonatação acelerada com os naturais, concluí-se que os ensaios naturais evoluíram de forma mais rápida que os ensaios acelerados.

Todos os ensaios naturais apresentaram resultados superiores ao acelerado, com exceção do traço 15N para a relação $a/ag = 0,65$. As relações $R = K_{C_{acel}}/K_{C_{nat}}$ se situaram entre o mínimo de 0,59 e máximo de 1,16, com média de 0,77 (C.V. = 16,4%), ou seja, os coeficientes acelerados foram, em média, 23% menores do que os naturais, cresceram quase sempre com a relação a/ag , diminuíram com o aumento do teor de CCA e aumentaram com o decréscimo da finura.

Os prováveis motivos desta evolução é que, após a primeira leitura, os protótipos foram abrigados dentro do laboratório, acelerando assim o processo de carbonatação natural, já que as leituras posteriores ocorreram 6 e 12 meses após, respectivamente.

Que as possíveis diferenças de padronização dos ensaios, principalmente a que se refere às condições de pré-condicionamento e fatores ambientais, tenham contribuído para tal evolução dos coeficientes de carbonatação natural. Deve-se ressaltar também o pouco tempo das realizações dos ensaios naturais e estima-se que pelo menos 10 anos de tempo de ensaio seria necessário.

6.5 COEFICIENTE DE CARBONATAÇÃO NATURAL VERSUS A ESTRUTURA DE POROS

As amostras contendo CCAs, quando comparadas com as amostras de referência, apresentaram um aumento na quantidade de microporos, acarretando assim o refinamento e a tortuosidade dos vazios dos protótipos. Mesmo assim, as profundidades de carbonatação foram maiores que as amostras de referência. Em análise a esse fato, conclui-se que, apesar desta diminuição nos tamanhos dos poros, dificultando a penetrabilidade dos protótipos de concreto, o efeito dominante é a de diminuição da reserva alcalina, devido à menor quantidade de CH oriundo do

processo de hidratação do cimento e consumido pelas reações pozolânicas provocada pela adição de CCA.

Quando compara-se os resultados a 91 dias de idade, em relação a 540 dias, conclui-se que eles são maiores no que se refere à porosidade. Estes resultados eram esperados, devido ao crescimento da idade, com o qual as reações de hidratação e pozolânicas aumentam, incrementando o refinamento dos poros.

Os dados resultantes da microestrutura dos poros contrariam os obtidos pelo coeficiente de carbonatação acelerada a 91 dias, os quais foram inferiores aos de 540 dias da carbonatação natural, pois estes últimos apresentaram valores maiores que os primeiros. Com efeito, quanto mais compacta a microestrutura, menor a possibilidade de transporte de CO_2 , através dos poros.

Constata-se que provavelmente os coeficientes de carbonatação natural foram maiores do que os acelerados, devido a outros fatores, especialmente às condições de exposição diferentes entre os protótipos e corpos de prova moldados, principalmente pelo fato de que, depois da primeira leitura, os protótipos foram armazenados em ambientes que favoreciam o desenvolvimento da carbonatação.

6.6 CONCLUSÃO GERAL.

Em conclusão geral, para elaboração de estudos comparativos, deveria ser realizada a produção de ensaios em condições padronizadas, seguindo as mesmas metodologias, com cura em ambiente interno abrigado e, se possível, controle de umidades e temperaturas, em longo prazo, para dirimir as dúvidas levantadas pelos resultados obtidos nesta dissertação.

Conclui-se, de maneira geral, que é possível a substituição de 15% do cimento por CCA na produção de concreto, e algumas misturas como 25% CCA nas relações a/ag 0,45 e 0,55, não acarretando profundidades de carbonatação prejudiciais e melhorando quesitos como a resistência e durabilidade.

6.7 SUGESTÃO PARA FUTURAS PESQUISAS

Para prosseguimento dos trabalhos, sugere-se a determinação das profundidades de carbonatação para o ensaio natural e acelerado, com os mesmos

materiais empregados nesta pesquisa, nas idades estabelecidas na metodologia do experimento com a padronização dos ensaios, principalmente a que se refere às condições de pré-condicionamento e fatores ambientais.

Outros trabalhos na área poderão abordar demais teores de incorporação de CCA residual, tais como: 10%, 20% e 25%, para que se determine um percentual ideal para esta adição, além do seu tempo de moagem ótimo. Verificar a influência destes teores sobre propriedades, como a resistência mecânica, carbonatação acelerada e natural e porosidade, seria algo significativo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Coletânea Estruturas de Concreto: NBR 6118, NBR 14931, NBR 12655, NBR 8953, NBR 8681, NBR 7187. Rio de Janeiro, 2004.

. ___Agregado em estado solto – determinação da massa unitária: NBR 7251. Rio de Janeiro, 1982.

. ___Agregado graúdo – determinação do índice de forma pelo método do paquímetro: NBR 7809. Rio de Janeiro, 1983.

. ___Agregado graúdo – determinação da abrasão Los Angeles: NBR 6465. Rio de Janeiro. 1984.

. ___Agregados – determinação da composição granulométrica: NBR 7217 – NM 248. Rio de Janeiro, 2001.

. ___Agregados – determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco chapman: NBR 9776 – NM 52. Rio de Janeiro. 2003.

. ___Agregados – determinação da absorção e da massa específica do agregado graúdo: NBR 9937 – NM 53. Rio de Janeiro. 2003.

. ___Agregados para concreto: NBR 7211. Rio de Janeiro. 1982.

. ___Análise química de cimento Portland – determinação da perda ao fogo: NBR 5743 – NM 12. Rio de Janeiro. 1991.

. ___Análise química de cimento Portland – determinação do resíduo insolúvel: NBR 5744 – NM 13. Rio de Janeiro. 1989.

. ___Cimento Portland – determinação da resistência à compressão: NBR 7215. Rio de Janeiro. 1991.

. ___Cimento Portland - determinação do tempo de pega: NBR 11581 – NM 65. Rio de Janeiro. 1991.

. ___Cimento Portland e outros materiais em pó, determinação da massa específica: NBR 6474 – NM 23. Rio de Janeiro. 2001.

. ___Cimento Portland e outros materiais em pó, determinação da área específica: NBR 7224 – NM 76. Rio de Janeiro. 1984.

. ___Cimento Portland - determinação da finura por meio da peneira 200: NBR 11579. Rio de Janeiro. 1991.

. ___Cimento Portland de alta resistência inicial: NBR 5733. Rio de Janeiro. 1991.

. ___Cimento Portland – determinação da água da pasta de consistência normal: NBR 11580. Rio de Janeiro. 1991.

. ___Determinação da consistência do concreto pelo abatimento tronco de cone: NBR 7223. Rio de Janeiro. 1982.

. ___Ensaio de compressão em corpos de prova cilíndricos de concreto: NBR 5739. Rio de Janeiro. 1984.

. ___Moldagem e cura de corpos de prova de concreto, cilíndricos ou prismáticos – método de ensaio: NBR 5738. Rio de Janeiro. 1984.

. ___ Materiais pozolânicos – especificação: NBR 12653. Rio de Janeiro. 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto de estruturas de concreto – Procedimento: NBR 6118. Rio de Janeiro, 2005.

BAROGHEL-BOUNY, V; CUSSIGH, F.; ROUGEAU, P. L'approche performantielle de la durabilité des bétons. In: OLLIVIER, J., P.; VICHOT, A. (Eds.) La durabilité des bétons. Paris: Presses Ponts et Chaussées, 2008, p. 281-302.

BRIZOLA, R. M. Microestrutura do revestimento de concretos com altos teores de escória e cinza volante ativadas por cimento Portland e cal hidratada. Santa Maria, 2007. 179p.. Universidade Federal de Santa Maria. Dissertação de Mestrado, UFSM, 2007.

CADORE, W. W. Estudo da carbonatação da camada de revestimento de protótipos de concreto com altos teores de adições minerais e cal hidratada. Santa Maria, 2008. 149 p.. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, 2008.

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

CASTRO, A. Influência das adições minerais na durabilidade do concreto sujeito à carbonatação. Goiânia, 2003. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Goiás, UFG, 2008.

CORDEIRO, L. N. P. Análise da Variação do Índice de Amorfismo da Cinza de Casca de Arroz Sobre a Atividade Pozolânica. Porto Alegre, 2009. 98 p.. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.

DALLA LANA, E. F. Carbonatação da camada de revestimento de protótipos de concreto com cinza volante e cal. Santa Maria, 2005. 138 p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, 2005.

DELLA, V. P., INGEBORG, K., HOTZA, D. Caracterização da cinza de casca de arroz para uso como matéria prima na fabricação de refratários de sílica. Química Nova, v. 24, n.6, p. 778-782, 2001.

DHIR, R., HEWLETT, P., CHAN, Y. Near-surface characteristics of concrete: intrinsic permeability. Magazine of Concrete Research. v. 41, n. 147, p. 87-97, 1989.

DUART, A. M. Estudo da microestrutura do concreto com adição de cinza de casca de arroz residual sem beneficiamento. Santa Maria, 2008. 134 p.. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, 2008.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Disponível em: www.embrapa.br, Acessado em 24 de fevereiro de 2010.

FRIZZO, B. T. Influência do teor e da finura de pozolanas na permeabilidade ao oxigênio e na absorção capilar do concreto. Santa Maria, 2001. 135 p.. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, 2001.

GOMES DA SILVA, M. Cimentos Portlan com adições minerais. Artigo do livro, Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia dos materiais. Vol. 1°. São Paulo, 2007. IBRACON.

GROCHOSKI, M; HELENE, P. Sistemas de reparo para estruturas de concreto com corrosão de armaduras. São Paulo, 2008. Boletim técnico. USP.

HELENE, P. R. L. Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado. Tese de Livre Docência, EPUSP, São Paulo, 1993.

HELENE, P. Introdução da vida útil no projeto das estruturas de concreto NB/2001. WORKSHOP SOBRE DURABILIDADE DAS CONSTRUÇÕES. Novembro. São José dos Campos (2001).

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

HO, D. W. S., LEWIS, R. K. Carbonation of concrete and its prediction. *Cement and Concrete Research*, v. 17, n. 3, p. 489-504, 1987.

HOPPE, A. E. Carbonatação em Concreto com Cinza de Casca de Arroz sem Moagem. Santa Maria, 2008. 147 p.. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, 2008.

HOUST, Y. F. Microstructural changes of hydrated cement paste due to carbonization. In: SCRIVENER, K. L., YOUNG, J. F. (eds) Mechanisms of chemical degradation of cement based systems. Materials Research Society's Symposium on mechanisms of chemical degradation of cement-based systems. Boston, 1995. *Proceedings*. London: E & F N Spon, 1997, p. 90-97.

IBRACON. Instituto Brasileiro do Concreto. Artigo técnico. Paulo Helene. Disponível em: www.ibracon.org.br Acesso em 12/01/2010.

IPCC, Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas. Disponível em: www.ipcc.ch . Acessado em 28 de dezembro de 2009.

IRGA. Instituto Rio-Grandense do Arroz. Dados de Safra, 2008/2009. Disponível em: [http:// www.irga.rs.gov.br](http://www.irga.rs.gov.br). Acesso em 10/02/2010.

ISAIA, G.C. Carbonatação do concreto: uma revisão. Santa Maria, março 1999. Polígrafo.

ISAIA, G. C. Efeitos de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concreto de elevado desempenho: um estudo de durabilidade com vistas à corrosão da armadura. São Paulo, 1995. 280p. Tese (Doutorado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1995.

ISAIA, G. C.; FURQUIM, P. R. V.; GASTALDINI, A. L. Análise estatística de variáveis influentes na microestrutura e durabilidade de concretos com adições minerais. Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, 2008.

ISAIA, G.C.; GASTALDINI, A.L. Concreto “verde” com teores muito elevados de adições minerais: um estudo de sustentabilidade. I Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável e X Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído 18-21 Julho de 2004, São Paulo.

ISAIA, G. C.; VAGHETTI, M. A. O. ; GASTALDINI, A. L. Carbonatação acelerada e natural de concreto com alto teor de pozolana: um estudo preliminar. In: 43º Congresso Brasileiro do Instituto Brasileiro do Concreto, 2001, Foz do Iguaçu. Anais do 43º Congresso do IBRACON - Trabalho III-023. São Paulo : Instituto Brasileiro do Concreto, 2001.

ISAIA, G. C. ; Vaghetti, M. A. ; Gastaldini, A. L. Carbonatação acelerada e natural de concreto com alto teor de pozolanas: um estudo preliminar. Santa Maria 2001.

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

JOHANNESSON, B., UTGENAMMT, P., Microstructural changes caused by carbonation of cement mortar, *Cement and Concrete Reserch*,31, 925-931, 2001.

KAZMIERCZAK, C. S., LINDENMEYER, Z. Comparação entre metodologias utilizadas para determinação da profundidade de carbonatação em argamassas. In: International Congress on high-performance concrete and performance and quality of concrete structures. Florianópolis, 1996. *Proceedings*. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 1996, p. 402-413.

KOBUKU, M., NAGATAKI, S. Carbonation of concrete with fly ash and corrosion of reinforcement in 20 years test. In: MALHOTRA, V. M (ed.) International Conference on fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete, 3rd, Trondheim, 1989. *Proceedings*. Detroit: American Concrete Institute, 1989, 2 v., v. 1, p. 315-329 (SP-114).

MEHTA, P.; MONTEIRO, P. Concreto: estrutura, propriedades e materiais. São Paulo: Pini, 1994. 573 p.

MEHTA, P.K. Natural Pozzolan. In: Supplementary Cementing Materials. Ottawa: V. M. Malhotra. 1987. 427p.

MEHTA, P. K. Rice Husk Ash: A Unique Supplementary Cementing Material. *Advances in Concrete Technology*, Ottawa: Canmet, p. 407-431, 1992.

MEHTA, P.K. & PITT, N. A new process of rice utilization. In: International conference on the utilization of rice by-products. Valencia, Spain, 1974. *Proceedings*.Valencia: IATA, published in 1977, p. 45-58.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, J. P. M. Concreto: microestrutura, propriedades e materiais. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2008.

MEHTA, P. K.; K.J. FOLLIARD. Rice husk ash – A unique supplementary cementing material: durability aspects. II International ACI/Canmet Conference on Quality of Concrete Structures and Recent Advances in Concrete Materials Las Vegas /Nevada/USA p. 531/554, 1995 .

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. Concreto: estrutura, propriedades e materiais. São Paulo: PINI, 1994.

MISSAU, F. Penetração de cloretos em concretos contendo diferentes teores de cinza de casca de arroz. Santa Maria, 2004, 129p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, 2004.

MISSAU, F. Penetração de cloretos de concretos contendo diferentes teores de cinza de casca de arroz. Dissertação de Mestrado. Universidade federal de Santa Maria, UFSM, 2004.

MORAES, R. C. Efeito físico e pozolânico das adições minerais sobre a resistência mecânica do concreto. PPGEC, santa Maria, RS, Brasil, 2001.

MORANVILLE-REGOURD, M. Microstructure of high performance concrete. In: MALIER, Y. High performance concrete - from material to structure. London, E & FN Spon, 1992. p.3-13.

NEHDI, M., DUQUETTE, J., DAMATTY, A. Performance of rice husk ash produced using a new technology as a mineral admixture in concrete. *Cemen and Concrete Research*, v. 22, 2003, p. 1203,1210.

NEVILLE, A. M. Propriedades do concreto. Tradução Salvador E. Giamusso. 2 ed ver. São Paulo: Pini, 1997.

NETTO, R. M. Materiais pozolânicos. Belo Horizonte, 2006, 149p. Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Construção Civil da Escola de Engenharia da UFMG, 2006.

PAPADAKIS, V., VAYENAS, C., FARDIS, M. Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation. *ACI Materials Journal*, v. 88, n. 4, 1991.

POUYEI, M. T. F. Beneficiamento da Cinza de Casca de Arroz residual com vistas à produção de cimento Portland e/ou pozolânico. Porto Alegre, 345 p.. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, 2006.

PUC MINAS, Esquema gráfico do efeito estufa. Disponível em: www.pucminas.br. Acessado em 24 de dezembro de 2009.

PRUDÊNCIO JÚNIOR, L.R., SANTOS, S., DAFICO, D. de A. Cinza de Casca de Arroz. Coletânea Habitare. V. 4 – Utilização de Resíduos na Construção Habitacional, p. 240 261, Porto Alegre, 2003.

RILEM. Measurement of hardened concrete carbonation depth CPC-18. Revista Materials and Structures. V. 17, nº 102.

RILEM. Recommendations of TC 116-PCD. Tests for gas permeability of concrete. Revista Materials and Structures. V. 32, nº 217, abril 1999.

RILEM. Measurement of hardened concrete carbonation depth CPC-18. Revista Materials and Structures. V. 17, nº 102.

RODRIGUES E FREITAS, Materiais de construção civil: uma revisão. Rio de Janeiro, 2007. Polígrafo, UFRJ.

SANTOS, S. Produção e Avaliação do uso de pozolana com baixo teor de carbono obtida da cinza de casca de arroz residual para concreto de alto desempenho. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006, 267p.

SANTOS, S. Estudo da viabilidade de utilização de cinza de casca de arroz residual em argamassas e concretos. 1997. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997.

SEPLAG. Secretaria de Planejamento do Estado do Rio Grande Do Sul. Atlas Socioeconômico do Rio Grande do Sul. Disponível em: www.scp.rs.gov.br. Acessado em 20 de Dezembro de 2010.

SOUZA, V. C. M. DE; RIPPER, T. Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto. São Paulo, Editora Pini. 1998.

THOMAS, M., MATTHEWS, J., HAYNES, C. Carbonation of fly ash concrete. In: MALHOTRA, V. M. (ed) CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, 5th, Barcelona, 2000. *Proceedings*. American C. Institute, 2 v., v. 1, p. 539-556 (SP-192).

TUUTI, K. Corrosion steel in concrete, Swedish Cement and Concrete, Stockholm, 1982. 469 p.

UEDA, T.; TAKEWAKA, K. Performance-based standard Specifications for Maintenance and Repair of Concrete structures in Japan. StructuraJ Engineering International, v. 4, p. 359-366, 2007.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA. Estrutura e apresentação de monografias, dissertações e teses: MDT. 5a ed. Santa Maria, 2000.

VENQUIARUTO, S. D. A influência da finura e do teor de adições minerais na carbonatação do concreto. Santa Maria, 122 pp.. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, 2002.

VÉNUAT, M.; ALEXANDRE, J. De la carbonation du béton. França, CERILM, Publicação n.195, 1969, 30 p.

