

**CARBONATAÇÃO EM CONCRETO COM CINZA DE CASCA
DE ARROZ SEM MOAGEM**

por

Alessandro Eduardo Hoppe

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**

Orientador: Geraldo Cechella Isaia

Santa Maria, RS, Brasil

2008

© 2008

Todos os direitos autorais reservados a Alessandro Eduardo Hoppe.

A reprodução parcial ou global deste trabalho somente com autorização por escrita 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



<http://www.ufsm.br/gepecon>

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Tecnologia
Curso de Pós-Graduação – Mestrado em Engenharia Civil**

A comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**CARBONATAÇÃO EM CONCRETO COM CINZA DE CASCA
DE ARROZ SEM MOAGEM**

elaborada por
Alessandro Eduardo Hoppe

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

COMISSÃO EXAMINADORA:

Geraldo Cechella Isaia, Dr.
(Presidente/Orientador)

Antônio Luiz Guerra Gastaldini, Dr.(UFSM)

Enio Pazini Figueiredo Dr.(UFG)

Santa Maria, 28 de Abril de 2008.

Aos meus pais Nadir Hoppe e Terezinha Hoppe, pelo carinho, compreensão e incentivo ao longo dessa dura e árdua tarefa.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos dar-se-ão:

- Ao professor Dr. Geraldo Cechella Isaia pela amizade, orientação, dedicação e incentivo na realização deste trabalho;
- Ao professor Dr. Antônio Luiz Guerra Gastaldini pelas importantes colaborações durante a etapa laboratorial;
- Aos colegas do curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil;
- Aos alunos bolsistas do Grupo de Estudos e Pesquisas em Concreto (GEPECON/ UFSM);
- Ao Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC / UFSM), pela cessão de suas instalações e pela atenção de seus funcionários, Paulo Obregon, especialmente pelo apoio do “Seu” João, Vítor, Marialva e Mauro.
- À Universidade Federal de Santa Maria, instituição que viabilizou a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil;
- À Fundação de Apoio à Pesquisa do Rio Grande do Sul (FAPERGS), pelos recursos financeiros destinados a esta pesquisa;
- À FINE, CNPq e CAPES, pelos recursos e bolsas concedidos;
- **Um agradecimento especial aos meus pais, Nadir e Terezinha Hoppe, pois se torna difícil expressar em palavras minha eterna gratidão pelo grande e incondicional afeto, apoio e compreensão nos momentos de ausência durante esta árdua jornada.**
- À família Hoppe, e à família Costa, da cidade de Santa Maria/RS, um imenso agradecimento pela amizade, carinho, confiança. Um agradecimento especial ao inesquecível Tio Juarez Martins Hoppe, “*in memoriam*”.
- A todos que colaboraram de alguma forma para a realização desta pesquisa.
- E finalmente a Deus, que além de guiar-me e dar-me saúde, me privilegiou com algumas amizades especiais.

Muito obrigado!!!

É ousando-se, excedendo-se limites, testando-se diferentes materiais, especulando-se novas composições e processos, ultrapassando-se, enfim, o *status quo* das regras e regulamentos, que se conquistam horizontes mais amplos para o conhecimento científico, em busca da solução dos problemas e satisfação das necessidades requeridas pela sociedade.

(Geraldo Cechella Isaia)

RESUMO

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

CARBONATAÇÃO EM CONCRETO COM CINZA DE CASCA DE ARROZ SEM MOAGEM

AUTOR: ALESSANDRO EDUARDO HOPPE

ORIENTADOR: PROF. DR. GERALDO CECHELLA ISAIA

Local da Defesa e Data: Santa Maria, 28 de abril de 2008.

A pesquisa realizada faz parte de um projeto que tem por objetivo a avaliação da viabilidade técnica do emprego de CCA residual "IN NATURA", sem moagem, em concretos para fins estruturais. A presente investigação trata da avaliação da profundidade e a determinação dos 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) moída 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. Objetiva, mais especificamente, analisar a influência do tipo e do teor de CCA residual incorporado ao concreto, sobre o processo de carbonatação. Foram realizados ensaios de carbonatação acelerada, porosimetria por intrusão de mercúrio e teor de hidróxido de cálcio remanescente. Para efeito de comparação, também foram realizados ensaios de resistência à compressão axial. Os ensaios de carbonatação acelerada foram realizados após um período de 3, 6, 9 e 12 semanas de exposição ao CO₂ em câmara climática. Os ensaios de porosimetria, hidróxido de cálcio remanescente e resistência à compressão foram realizados aos 91 dias.

Os resultados indicam que os coeficientes de carbonatação da amostra com a adição de CCA residual moída foram inferiores aos valores apresentados pela amostra de CCA residual "IN NATURA", em ambos os teores de substituição e em todas as relações a/ag. Os menores valores de coeficiente de carbonatação apresentados reportam-se ao concreto de referência. Analisando-se os resultados de porosimetria por intrusão de mercúrio, percebe-se que a incorporação de CCA acarreta um refinamento dos poros do concreto quando comparado ao referência, nas três relações a/ag empregadas. Por outro lado, nesta pesquisa, prepondera o efeito da menor reserva alcalina dos concretos contendo a incorporação de CCA residual sobre o efeito de redução da permeabilidade dos concretos ocasionada pela adição de CCA. Além disso, vislumbra-se a possibilidade do emprego de CCA residual ao concreto estrutural nos teores de 15% de incorporação de CCA residual tanto a amostra moída quanto "in natura" nas relações a/ag 0,45, 0,55 e 0,65 e para o teor de 25% de substituição para a amostra "in natura" de relação a/ag de 0,45 bem como a amostra moída com relação a/ag de 0,45 e 0,55, quando a principal variável de durabilidade do concreto é a carbonatação.

Palavras chave: Carbonatação; durabilidade; cinza de casca de arroz natural; concreto estrutural.

ABSTRACT

Master Dissertation

Post-Graduation Program in Civil Engineering

Federal University of Santa Maria, RS, Brazil

CONCRETE CARBONATION WITH UNGROUND RICE HUSK ASH

AUTHOR: ALESSANDRO EDUARDO HOPPE

ADVISOR: PROF. DR. GERALDO CECHELLA ISAIA

Place of defense and date: Santa Maria, April 28, 2008.

This research is part of a project that aimed to evaluate the technical viability of the use of unground (in natura) residual Rice Husk Ash (RHA), without grinding, for structural concrete. The present work investigated the evaluation of the depth and the determination of the carbonation coefficients for concrete with the addition of 15% and 25% residual RHA in replacement of cement CP II F-32 (values in mass) ground in mill of balls and unground, and compared with the reference concrete with three water/cimentitious materials ratios: 0.45, 0.55 and 0.65. This work aimed more specifically to analyze the influence of the type and the level of residual RHA incorporated to the concrete on the carbonation process. Accelerated carbonation, mercury intrusion porosimetry and remaining calcium hydroxide level were investigated. For comparison, axial compression strength tests were carried out. The accelerated carbonation tests were performed after a period of 3, 6, 9 and 12 weeks of exhibition to CO₂ in climatic chamber. Porosimetry, remaining calcium hydroxide, and axial compression strength tests were performed on 91 days.

The results showed that the carbonation coefficients of the ground residual RHA sample were lower than the values presented by the unground (in natura) residual RHA, in both replacement levels and in all water/cimentitious materials ratios. The lowest carbonation coefficient values were related to the reference concrete. Concerning mercury intrusion porosimetry, the incorporation of RHA caused a refinement of the concrete pores when compared to the reference in the three water/cimentitious materials ratios used. On the other hand, the effect of the lowest alkaline reservation of the concretes containing the incorporation of residual RHA prevailed on the effect of the permeability reduction of the concretes caused by the addition of RHA. Therefore, the use of residual RHA to the structural concrete in levels of 15% of incorporation to ground and in natura samples in the water/cimentitious materials ratios 0.45, 0.55 and 0.65; in levels of 25% of replacement for the in natura sample of water/cimentitious material ratios 0.45, as well as the ground sample with water/materials cimentitious ratios 0.45 and 0.55, is an option when carbonation is the main variable of concrete durability.

Key words: Carbonation, durability, rice husk ash unground, structural concrete.

LISTA DE TABELAS

TABELA 1.1 –	Projeção da produção de arroz no Mercosul (mil toneladas): safra 2006/2007 - Fonte: IRGA (2006)	..... 20
TABELA 1.2 –	Área (ha), produção (t) e produtividade (kg/ha) safra 2006/2007 – Projeção - Fonte: IRGA (2006)	..... 21
TABELA 2.1 –	Variação umidade, temperatura e concentração de CO ₂ entre pesquisas	..... 43
TABELA 4.1 –	Composição Química do cimento CP II F-32	..... 77
TABELA 4.2 –	Dimensões características do CP II F-32	..... 77
TABELA 4.3 –	Características físicas do cimento CP II F-32	..... 78
TABELA 4.4 –	Resistência à compressão do cimento CP II F-32	..... 78
TABELA 4.5 –	Composição Química da CCA residual	..... 80
TABELA 4.6 –	Dimensões características da CCA residual	..... 80
TABELA 4.7 –	Caracterização dos agregados utilizados	..... 81
TABELA 4.8 –	Nomenclatura dos traços de concreto investigados	..... 83
TABELA 4.9 –	Quantidade de materiais por m ³ de concreto	..... 84
TABELA 4.10 –	Ordem de colocação e tempo de mistura para os traços de concreto	..... 86
TABELA 4.11 –	Tempo de exposição ao CO ₂ dos corpos-de-prova	..... 88
TABELA 5.1 –	Valores de Resistência à compressão axial aos 7, 28 e 91 dias	..... 101
TABELA 5.2 –	Equações de correlação e valor r ² - Resistência(fc) x rel. a/ag	..... 103
TABELA 5.3 –	Variação (%) entre as partes dos corpos-de-prova (T, I, B)	..... 105
TABELA 5.4 –	Profundidade de carbonatação dos traços analisados	..... 106
TABELA 5.5 –	Coeficientes de carbonatação dos traços analisados	..... 109
TABELA 5.6 –	Equações e valor de r ² - Kc x relação a/ag	..... 110
TABELA 5.7 –	Teor de CH remanescente aos 91 dias e Kc	..... 116
TABELA 5.8 –	Equações e valor de r ² - Teor de CH x relação a/ag	..... 117
TABELA 5.9 –	Equações de regressão Kc x fc aos 91 dias	..... 121
TABELA 5.10 –	Volume de mercúrio intrudido aos 91 dias	..... 125
TABELA 5.11 –	Kc x Porosidade Total (%)	..... 126

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1	– Porosidade das pastas carbonatadas (HOUST,1994)	..... 31
FIGURA 2.2	– Profundidade de carbonatação versus relação ag/mc (HELENE <i>et al.</i> 1999)	..... 34
FIGURA 2.3	– Regressões entre coeficientes de carbonatação, as resistências à compressão a 7 dias e as relações a/mc (ISAIA,1995)	..... 35
FIGURA 2.4	– Profundidade de Carbonatação após 6 anos de exposição a 20°C e 50% UR (SKOJOSVOLD, 1986)	..... 36
FIGURA 2.5	– Coeficiente de carbonatação versus teor de substituição (CV e CCA) (VENQUIARUTO, 2002)	..... 38
FIGURA 2.6	– Regressão entre profundidade de carbonatação, tempo de exposição e teor de CO ₂ , segundo vários autores (ISAIA, 1995)	..... 45
FIGURA 2.7	– Profundidade carbonatada como função da umidade relativa (VENUAT <i>apud</i> ROSENBERG, 1989)	..... 47
FIGURA 2.8	– Correlação entre a resistência a compressão axial e o coeficiente de carbonatação para CCA (VENQUIARUTTO, 2002)	..... 48
FIGURA 2.9	– Evolução do coeficiente de carbonatação acelerada com a resistência à compressão de 11 misturas de concreto com e sem pozolana, em igualdade de resistência de 60 MPa (ISAIA, VAGUETTI & GASTALDINI, 1998)	..... 49
FIGURA 2.10	– Correlação entre o coeficiente de carbonatação natural e o teor de hidróxido de cálcio remanescente para nível de resistência de 70 Mpa (ISAIA, VAGUETTI & GASTALDINI, 1998)	..... 50
FIGURA 3.1	– Micrografia de cinza de casca de arroz (METHA & MONTEIRO, 1994, p. 300)	..... 59
FIGURA 4.1	– Características físicas do agregado miúdo	..... 82
FIGURA 4.2	– Características físicas do agregado graúdo	..... 82
FIGURA 4.3	– Identificação dos corpos-de-prova	..... 87
FIGURA 4.4	– Corte dos corpos-de-prova	..... 87
FIGURA 4.5	– Câmara climática FEUTRON MODELO KPK 200	..... 89
FIGURA 4.6	– Câmara climática FEUTRON – detalhe do interior	..... 89
FIGURA 4.7	– Pintura com verniz poliuretânico	..... 90
FIGURA 4.8	– Colocação do filme de polietileno	..... 90
FIGURA 4.9	– Corpos-de-prova com filme de polietileno	..... 91
FIGURA 4.10	– Detalhe das embalagens de polipropileno	..... 91
FIGURA 4.11	– Detalhe das embalagens de polietileno	..... 91
FIGURA 4.12	– Estufa para a redistribuição da umidade (50°C)	..... 92
FIGURA 4.13	– Detalhe da câmara de carbonatação FANEM – 345	..... 93
FIGURA 4.14	– Detalhe da colocação dos perfis	..... 94
FIGURA 4.15	– Detalhe do cp depois da ruptura	..... 94
FIGURA 4.16	– Detalhe do cp após a aspersão de fenolftaleína	..... 95

FIGURA 4.17 – Detalhe da obtenção das medidas do corpo-de-prova	.....	95
FIGURA 4.18 – Detalhe das medidas das profundidades de carbonatação	.....	96
FIGURA 4.19 – Exemplo de determinação do K_c	.....	97
FIGURA 4.20 – Pó peneirado na peneira de malha #200	.....	98
FIGURA 4.21 – Secagem das amostras em estufa a 60°C	.....	98
FIGURA 5.1 – Resistência à compressão x a/ag	.....	102
FIGURA 5.2 – Profundidade de carbonatação a 12 semanas para os concretos investigados	.....	107
FIGURA 5.3 – Coeficiente de carbonatação (K_c) x a/ag	.....	110
FIGURA 5.4 – K_c x Tipo de CCA residual empregado	.....	112
FIGURA 5.5 – Gráfico K_c x Teor de CCA (%)	.....	114
FIGURA 5.6 – Relação teor de CH remanescente (%) x a/ag	.....	116
FIGURA 5.7 – Relação teor de CH remanescente (%) x K_c	.....	118
FIGURA 5.8 – K_c em função da resistência à compressão axial aos 91 dias	.....	120
FIGURA 5.9 – Relação entre o teor e tipo de CCA com o K_c para $f_c = 30$ MPa. Os valores entre parênteses () são as relações a/ag.	.....	122
FIGURA 5.10 – Redistribuição dos Poros ocasionada pela CCA	.....	127

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

$^{\circ}\text{C}$	- Graus centígrados
\varnothing	- Diâmetro
#	- Abertura de malha de peneira
a/ag	- Relação água aglomerante em massa
a/mc	- Relação água materiais cimentícios em massa
Al_2O_3	- Óxido de alumínio
ABCP	- Associação Brasileira de Cimento Portland
ASTM	- American Standart for Testing Materials
CCA	- Cinza de Casca de Arroz
C_3S	- Silicato tricálcio
CaCO_3	- Carbonato de cálcio
CaO	- Óxido de cálcio
Ca(OH)_2	- Hidróxido de cálcio
CaSO_4	- Sulfato de cálcio
CCA	- Cinza de casca de arroz
CH	- Hidróxido de cálcio
cm	- Centímetros
CO_2	- Anidrido carbônico ou dióxido de carbono
CP	- Cimento Portland
C-S-H	- Silicato de cálcio hidratado
CV	- Cinza Volante
E	- Escória de alto forno
Fe_2O_3	- Óxido de ferro
g	- Grama
g/cm^3	- Grama por centímetro cúbico, medida de massa específica
g/m^2	- Gramas por metro quadrado, medida de absorção capilar
GEPECON	- Grupo de Estudos e Pesquisa em Concreto
H_2O	- Molécula da água
H_2S	- Gás sulfídrico
K^+	- Íons potássio
Kc	- Coeficiente de carbonatação
Kg	- Quilograma
Kg/dm^3	- Quilograma por decímetro cúbico, medida de massa específica
Kg/m^3	- Quilograma por metro cúbico, medida de massa específica
KOH	- Hidróxido de potássio
KO_2	- Coeficiente de permeabilidade ao oxigênio
L.M.C.C	- Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal de Santa Maria
m^3	- Metro cúbico
MgO	- Óxido de magnésio
Mg(OH)_2	- Hidróxido de magnésio
mm	- Milímetro
$\text{mm/sem}^{0.5}$	- 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
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 Recherches sur les Matériaux 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 %

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A - Rotina Cota.Lsp 147

SUMÁRIO

RESUMO	6
ABSTRACT	7
LISTA DE TABELAS	8
LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	11
LISTA DE ANEXOS	13
CAPÍTULO I	
1.1 Introdução	16
1.2 Justificativa	20
1.3 Objetivos	25
1.4 Estrutura da Dissertação	26
CAPÍTULO II	
CARBONATAÇÃO	28
2.1 Carbonatação do concreto	28
2.2 Variáveis que influenciam na carbonatação	33
2.2.1 Relação água/aglomerante	34
2.2.2 Dosagem do cimento e adições minerais	37
2.2.3 Processo de cura	39
2.2.4 Concentração de CO ₂	42
2.2.5 Saturação dos Poros	45
2.2.6 Resistência à Compressão	47
2.2.7 Teor de hidróxido de cálcio remanescente	49
2.2.8 Temperatura	51
CAPÍTULO III	
ADIÇÕES MINERAIS	52
3.1 Adições minerais no concreto	52
3.2 Cinza de casca de arroz	57
3.2.1 Temperatura de queima	59
3.2.2 Tempo de moagem	62
3.3 Efeitos da CCA no concreto	65
3.3.1 Resistência à compressão axial	67
3.3.2 Densificação da zona de transição e redução da porosidade	69
3.3.3 Carbonatação acelerada	70
3.3.4 Teor de hidróxido de cálcio remanescente	72
CAPÍTULO IV	
INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL	74
4.1 Introdução	74
4.2 Variáveis estudadas	76

4.3 Materiais empregados	76
4.3.1 Materiais Cimentícios	76
4.3.1.1 Cimento CP II F-32	76
4.3.1.2 Cinza de casca de arroz (CCA)	78
4.3.2 Agregados	80
4.3.2.1 Agregado miúdo	81
4.3.2.2 Agregado graúdo	81
4.3.3 Aditivo químico	83
4.4 Nomenclatura utilizada	83
4.5 Método de Dosagem	84
4.6 Moldagem dos corpos de prova	85
4.7 Ensaio de carbonatação acelerada	86
4.7.1 Câmara de carbonatação	93
4.7.2 Determinação das profundidades de carbonatação	94
4.7.3 Determinação dos coeficientes de carbonatação	97
4.8 Ensaio de teor de hidróxido de cálcio remanescente	98

CAPÍTULO V

ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	100
5.1 Introdução	100
5.2 Análise dos resultados de resistência à compressão axial	101
5.3 Profundidades carbonatadas em função do tempo	104
5.4 Profundidades carbonatadas para a idade de doze semanas	106
5.5 Coeficiente de carbonatação acelerada (Kc)	108
5.6 Coeficiente de carbonatação (Kc) versus relação a/ag	109
5.7 Coeficiente de carbonatação (Kc) versus tipo de CCA empregado	111
5.8 Coeficiente de carbonatação versus teor de CCA	113
5.9 Hidróxido de cálcio remanescente	115
5.10 Coeficiente de carbonatação em função da resistência à compressão axial	119
5.11 Coeficiente de carbonatação em igualdade de resistência	121
5.12 Coeficiente de carbonatação em relação à porosidade	124

CAPÍTULO VI

CONCLUSÃO	129
6.1 Conclusão Geral	129
6.2 Coeficientes de carbonatação (Kc)	129
6.3 Teor de CH versus coeficiente de carbonatação	130
6.4 Relação a/ag versus coeficiente de carbonatação	131
6.5 Influência do tipo de CCA residual empregado	132
6.6 Influência do teor de CCA residual empregado	133
6.7 Influência da CCA sobre a porosidade e sobre os coeficientes de carbonatação	134
6.8 Sugestões para futuras pesquisas	134

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	136
-----------------------------------	-----

1 INTRODUÇÃO

1.1 Introdução

O mercado da indústria da construção civil apresenta grande importância no cenário nacional e representa hoje, cerca de 7,3% do PIB nacional. A construção civil gera milhões de empregos diretos e indiretos, sendo que no ano de 2005 apresentou um crescimento de 1,3% em relação ao ano de 2004, de acordo com a Confederação Brasileira da Indústria da Construção (CBIC,2007). Embora a construção civil tenha como um dos principais objetivos fornecer respostas às necessidades da sociedade sobre assuntos ligados à infra-estrutura, um dos grandes obstáculos enfrentados por este segmento da indústria, refere-se ao equacionamento do problema do déficit de moradias, saneamento, transporte, devido à crescente demanda apresentada pelo aumento da urbanização acarretado pelo incremento populacional.

Com o objetivo de atingir patamares satisfatórios de desenvolvimento e de progresso, há que se construir estradas, aeroportos, usinas hidroelétricas, portos, pontes, habitações, obras de saneamento e demais obras de infra-estrutura. Em toda essa gama de construções existe o uso de tecnologia, há o emprego da tecnologia do concreto, há o comprometimento de Engenheiros, Arquitetos e técnicos em garantir uma adequada durabilidade às estruturas de concreto, além de proporcionar o bom funcionamento de tais construções ao longo de toda a sua vida útil de projeto.

O concreto, depois da água, é o material mais consumido pelo homem e também o mais amplamente utilizado em construções, em virtude da sua capacidade de fornecer excelente durabilidade, quando bem dosado e executado, e propriedades mecânicas a um relativo baixo custo, sendo um material imprescindível para o progresso da civilização segundo Metha & Monteiro (1994).

Devido a sua composição heterogênea, o concreto necessita de estudos e pesquisas avançadas que façam melhorar seu desempenho, principalmente frente às necessidades de um mercado cada vez mais exigente quanto à capacidade de melhor resistir à ambientes agressivos, ou seja, maximizar a sua durabilidade. Outro

fator que atua sinergicamente com a durabilidade no que diz respeito à pesquisa em concreto é a importância de se obter resistências mecânicas elevadas, contribuindo para o desenvolvimento de estruturas de maior porte.

É tomado de forma consensual na literatura, que a indústria da construção civil tem uma influência direta sobre a manutenção das reservas naturais do planeta, especialmente reportando-se à indústria cimenteira. Para Zhang & Malhotra (1996) depois de materiais como o alumínio e o aço, o cimento é o bem que consome maior quantidade de energia durante o seu processo de produção.

De acordo com Isaia & Gastaldini (2004) e Pentalla (1997) o cimento consome 5,5 GJ de energia e libera, aproximadamente, 1,0 tonelada de CO₂ por tonelada de clínquer produzido correspondendo entre 5,0% a 8,0% do total emitido anualmente para atmosfera. Considerando que cada tonelada de cimento requer 1,65 tonelada de matéria prima, ou seja, a prospecção anual de 2,9 Gton, somada à mineração de 12,5 Gton de agregados para a confecção do concreto, mostra a magnitude do consumo de materiais para sua produção. Soma-se a isso, a grande quantidade de água necessária para a produção do concreto, cerca de 1,0 bilhão de m³ ao ano, segundo Mehta (2001).

Dessa forma, tem-se uma noção da relevância que a indústria do cimento apresenta tanto no consumo dos recursos naturais não renováveis como no potencial de emissão de dióxido de carbono para a atmosfera, sendo considerada como a principal fonte geradora de CO₂ entre as indústrias de materiais de construção. Em território brasileiro, o consumo anual de cimento é de aproximadamente 38 milhões de toneladas.

Para Mehta (2002) o crescimento populacional, a urbanização e os seus respectivos impactos ambientais estão entre as principais preocupações na atualidade. O crescimento da população mundial, de acordo com projeção, passará dos atuais 6,0 bilhões para 9,0 bilhões em 2050 e 11,0 bilhões até o final do século. É de se esperar conseqüentemente, também um crescimento no consumo de concreto, devido às crescentes taxas de urbanização apresentadas. Como conseqüência, pode-se citar o consumo de cimento para o ano de 2010, que é esperado atingir o patamar de 2,0 bilhões de toneladas segundo Mehta (2001). Este fato pode gerar acréscimo do lançamento para a atmosfera de uma grande quantidade de CO₂, decorrente da fabricação do cimento, o principal constituinte do concreto.

Segundo o European Renewable Energy Council (EREC,2007) no ano de 2003, a emissão de dióxido de carbono para a atmosfera foi de aproximadamente 23,20 bilhões de toneladas, enquanto a população mundial situava-se em um patamar de 6,3 bilhões de pessoas, gerando uma emissão per capita aproximada de 3,7 toneladas de CO₂. Para o ano de 2010, a previsão de emissão de CO₂ ficará na faixa de 26,60 bilhões de toneladas e para 2050 a previsão apresentará um crescimento para 45,50 bilhões de toneladas, com um prognóstico de aproximadamente 9,0 bilhões de pessoas, gerando uma emissão per capita de 5,10 toneladas de CO₂. Somente o Brasil é responsável por aproximadamente 4,0% da emissão global de gás carbônico para a atmosfera, desse percentual, cerca de 75% do volume lançado é proveniente do desmatamento ocorrido no país, principalmente na região amazônica. O país chega a emitir 6,0 milhões de toneladas de gases causadores do efeito estufa a cada dia, segundo a WorldWide Found for Nature (WWF Brasil, 2007).

Para Mehta & Manmohan (2006) as ameaças oriundas de mudanças climáticas previstas para um futuro próximo, ocasionadas pelo aquecimento global e efeito estufa, são resultantes dos elevados níveis de emissão de gás carbônico para a atmosfera. Para tentar minimizar seus efeitos, surgiu o Protocolo de Quioto, um acordo internacional que estabelece metas para controlar a emissão de gases causadores do efeito estufa, responsáveis pelo aquecimento do planeta, que entrou em vigor em 2005. O Protocolo orienta 39 países desenvolvidos a reduzir, no período de 2008 a 2012, a emissão de seis gases poluentes em 5,2% frente ao índice global registrado em 1990. Os gases são: CO₂ (dióxido de carbono), CH₄ (metano), N₂O (óxido de nitrogênio) e três gases de flúor (HFC, PFC e SF₆).

Para tal, determina, entre outras orientações, a diminuição do uso de energias fósseis, como carvão, petróleo e gás natural, que representam 80% destas emissões. Como a indústria do cimento é responsável por 5,0% a 8,0% da emissão total de dióxido de carbono (gás causador do efeito estufa), segundo Malhotra (2006), uma das formas para se reduzirem os níveis de emissão de CO₂ para a atmosfera devido à produção de cimento, se embasa no emprego cada vez maior de adições minerais ao concreto, em substituição ao cimento Portland.

Isaia & Gastaldini (2004) investigaram concretos com baixo consumo de cimento e elevado conteúdo de adições minerais (substituição de cimento por 70% de escória e 20% de cinza volante), com o propósito de diminuir o impacto ambiental

dos seguintes fatores que atuam sinergicamente durante a produção do concreto: emissão de CO₂, custo total de produção e energia incorporada. Em sua pesquisa, os autores mostraram que é possível reduzir cerca de 55% do consumo de energia, 88% da emissão de CO₂, e 5% o custo no metro cúbico de concreto, e ao mesmo tempo, aumentar o índice médio de durabilidade em 40%, em comparação ao concreto de referência. Eles argumentam ainda que, se apenas 3,5% da produção mundial de concreto fosse produzida com esse traço (90% de adições minerais), não seria necessário aumentar a produção de clínquer além dos níveis atuais, tornando a indústria do cimento e do concreto sustentáveis.

Os crescentes sinais de conscientização por parte da sociedade e órgãos governamentais sobre o limite dos recursos naturais disponíveis, além dos riscos que a poluição ambiental oferece para a manutenção da vida e ao planeta têm proporcionado, por parte dos mercados, a busca por materiais que possuam vantagens competitivas. Dentre essas, enquadram-se os benefícios técnicos, econômicos e principalmente benefícios ambientais, tais como a reciclagem de materiais e a incorporação de resíduos provenientes de outros processos industriais.

Para Isaia (1995), além dos aspectos técnicos e funcionais, a sociedade exige bom desempenho dos materiais ou da construção como um todo e também das interações com o meio ambiente, em busca daqueles, cuja obtenção ou realização, se materializa com menor impacto ecológico e menor ônus energético.

Com vistas à diminuição do impacto ambiental causado pela indústria cimenteira, como a redução da emissão de CO₂ devido ao processo de fabricação do cimento, à manutenção das reservas de recursos naturais (calcário e argila) para a fabricação deste, além da diminuição da energia gasta no processo, vislumbra-se como alternativa o emprego de CCA residual como substituição ao cimento Portland em concretos estruturais. Soma-se a isso, o fato da possibilidade de incorporar subprodutos agrícolas ao concreto é que, cada vez mais, deve-se estudar o comportamento destes com a incorporação de CCA, principalmente sob a forma residual sem beneficiamento, tendo em vista a grande disponibilidade sazonal deste material no estado do RS.

1.2 Justificativa

O arroz é uma das plantas que contém grande quantidade de silicatos, principalmente na casca. Essa, considerada um resíduo, não serve para alimentação de animais, pois tem poucas propriedades nutricionais. Somado a isto, possui uma superfície irregular e abrasiva, sendo muito resistente à degradação natural, fato que gera sérios problemas de acúmulo de material. O cereal arroz é um dos componentes principais da alimentação, sendo responsável por 20% da fonte da energia alimentar da população mundial, enquanto o trigo fornece 19% e o milho 5% (FAO, 2005).

Segundo o Instituto Rio-Grandense do Arroz (IRGA,2006), a estimativa para a safra 2006/2007 no Mercosul apresenta uma diminuição da área plantada, um decréscimo na produtividade e um consumo de arroz praticamente constante quando comparados aos dados da safra 2005/2006, conforme a tabela 1.1 .

Tabela 1.1 - Projeção produção de arroz no Mercosul (mil toneladas): safra 06/07

Safra	Área (mil ha)	Est. inicial (mil t)	Produção (mil t)	Importação (mil t)	Exportação (mil t)	Consumo (mil t)	Est. Final (mil t)
2006/2007	3.348,0	2.682,2	13.669,0	1.280,3	1.819,5	13.884,3	1.927,6

Fonte: IRGA, Tendências e projeções para a safra 2006/200. Est : Estoque.

Na produção mundial de arroz, o Brasil se destaca como o principal produtor entre os países ocidentais. Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB,2006) a área cultivada de arroz no Brasil na safra 2006/2007 é de aproximadamente 3,0 milhões de hectares, inferior à da safra anterior em 0,6%. A produção nacional está estimada em 11,20 milhões de toneladas, sendo inferior em 3,2% à da safra anterior, que foi de 11,60 milhões de toneladas. Segundo dados disponibilizados pela CONAB, a produção brasileira de arroz apresentou aumento de aproximadamente 31% nos últimos quinze anos.

Entre os maiores produtores de arroz em território brasileiro, destacam-se os estados da região sul do país, com uma produção estimada em 7,30 milhões de toneladas para a safra 2006/2007, sendo o estado do RS responsável por aproximadamente 54% da produção nacional deste cereal. Neste sentido, o estado

do RS, insere-se como potencial fornecedor de casca de arroz tendo em vista a disponibilidade sazonal da mesma para a produção da CCA. Considerando que, de acordo com Metha (1977), a porcentagem de casca de arroz gerada da produção do cereal é de 20%, tem-se que apenas na região central do estado do RS a geração de casca fica próxima ao valor de 185 mil toneladas. De acordo com Metha & Monteiro (1994), a CCA obtida pela combustão da casca atinge um percentual de 4% da massa do arroz. Desta forma, geraria para a região centro do estado do RS, aproximadamente 37 mil toneladas de resíduo na forma de casca de arroz.

Com o objetivo de se verificar a relevância da cultura orizícola nas diferentes regiões do estado do RS, têm-se exposta na tabela 1.2 a produção (t) e a produtividade (kg/ha) de arroz. A cidade de Santa Maria localiza-se na região conhecida por depressão central do estado do RS, sendo esta a terceira maior região em produtividade de arroz no estado. Salieta-se, assim, a potencialidade de poluição deste tipo de resíduo tanto para o ar, como ao solo e aos mananciais aquíferos.

Tabela 1.2 - Área (ha), produção (t) e produtividade (kg/ha)

Regionais	Número de Lavouras	Área (ha)	Produção (t)	Produtividade (kg/ha)
Fronteira	1.088	274.181,2	1.856.812,2	6.772,2
Campanha	1.129	173.452,0	1.085.767,5	6.259,8
Depressão Central	3.497	162.434,4	924.032,4	5.688,7
Planície Costeira Int.	1.379	130.304,5	729.831,1	5.601,0
Planície Costeira Ext.	1.461	126.410,6	705.844,4	5.583,7
Zona Sul	605	172.639,0	981.118,0	5.683,3
Total	9.159	1.039.421,7	6.283.405,5	6.045,1

Fonte: IRGA, Tendências e projeções para a safra 2006/2007.

A maneira mais usual de reduzir o volume deste resíduo é com a queima a céu aberto, cujo resultado são cinzas residuais que agridem o ambiente através da poluição do ar, do solo ou de mananciais hídricos, de acordo com Sensale & Dal Molin (2001).

Um dos maiores desafios que a tecnologia contemporânea se depara é definir um destino para esse subproduto, tendo em vista a quantidade produzida, principalmente no estado do RS e as possibilidades do seu emprego em escala industrial. Assim, a utilização da CCA residual "in natura" para a produção de

concreto estrutural, apresenta-se como uma resposta positiva ao questionamento a respeito de qual destinação se empregar para esse resíduo agrícola potencialmente poluente.

Para Mehta & Folliard (1995), à medida que a demanda 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 satisfazer a demanda por um material pozolânico e garantir seu emprego na indústria do concreto.

Para Mehta (1999) a indústria do concreto tem um papel fundamental na infraestrutura e como representa ser a maior consumidora de reservas naturais, a mesma possui a obrigação de incorporar tecnologias adequadas que procurem minimizar os agentes potenciais de problemas ambientais. Portanto, além de fornecer um material de construção de menor custo, a indústria do cimento deve assumir o seu papel social como, por exemplo, conservar as reservas naturais através da manutenção dos níveis atuais de produção de cimento incorporando resíduos de outras indústrias. Como parte da economia mundial, a indústria do concreto tem um papel decisivo para o desenvolvimento sustentável.

Segundo Santos (1997) *apud* Sensale (2000) a utilização da CCA como material pozolânico é justificado por contribuir para a despoluição do meio ambiente, por melhorar as características dos concretos e argamassas com ela confeccionados e por gerar uma economia de energia necessária à produção do clínquer de cimento Portland.

No Brasil, a maior parte da CCA não é utilizada tendo em vista a falta de interesse e investimento num produto de baixo custo que, segundo os conhecimentos atuais, necessita de moagem e peneiramento prévios para uso em concreto estrutural. Em casos isolados, quando a casca de arroz é utilizada para produzir energia elétrica em caldeiras de leito fluidizado, é produzida cinza de qualidade superior (alta reatividade) devido ao controle da temperatura da queima.

De uma maneira geral, as pesquisas realizadas no Brasil para uso da CCA em concreto têm utilizado cinza com a maior reatividade possível para possibilitar maiores ganhos de resistência e de durabilidade. Poucas pesquisas têm sido realizadas para possibilitar uso de CCA residual, sem controle sob as condições de queima da casca do arroz. Apesar de terem sido realizadas pesquisas e publicados

trabalhos sobre o uso de CCA residual ou não em concreto estrutural, este produto ainda não está disponível no mercado brasileiro pela falta de investimento no seu beneficiamento e, ainda, por questões estéticas, pois o carbono residual da CCA confere ao concreto coloração mais escura, se comparado ao concreto composto de cimento Portland, dificultando sua aceitação no mercado nacional.

Entretanto, um estudo exploratório realizado pelo GEPECON com uso de CCA residual, "in natura", sem nenhum beneficiamento (pré-moagem ou peneiramento) colocada diretamente na betoneira com os demais materiais do concreto, revelou resultados bastante satisfatórios para aproveitamento deste resíduo. De acordo com estes resultados preliminares, vislumbrou-se possibilidade de emprego de CCA residual, "in natura", em concreto estrutural, com pouca perda de resistência à compressão em igualdade de substituição de cimento, em massa, em comparação com a CCA residual beneficiada.

Dessa forma, o uso de CCA residual "in natura" empregada nesta pesquisa, traz como benefícios, a redução da quantidade de matéria-prima necessária para a fabricação do cimento Portland, a diminuição da energia consumida e o decréscimo da quantidade de emissão de gases nocivos causadores do efeito estufa pelo uso de materiais menos poluentes. Soma-se a isso o fato de se combater o acúmulo deste resíduo, minimizando problemas ambientais ocasionados pela deposição inadequada do mesmo.

Por fim, outro ganho possibilitado pelo emprego da CCA residual como substituição parcial ao cimento para a produção de concretos estruturais embasa-se sobre ganhos oriundos dessa incorporação através dos Créditos de Emissão de Carbono. Esses créditos são emitidos por agências de proteção ambiental, em função das emissões gases poluentes ou gases do efeito estufa (GEE), entre eles o CO₂.

Acordos internacionais como o Protocolo de Quioto determinam uma cota máxima de CO₂ que as nações desenvolvidas podem emitir. Os países por sua vez criam leis que regulamentam as emissões de GEE. Cada bônus, cotado em dólares, equivale a uma tonelada de poluentes. Assim, determinados países que não conseguem atingir as metas de reduções de emissões tornam-se potenciais compradores de créditos de carbono. Por outro lado, aquelas nações que conseguiram reduzir suas emissões abaixo das cotas pré-estabelecidas, podem vender o excedente de "redução de emissão" ou "permissão de emissão" no

mercado nacional ou internacional. Atualmente cada tonelada de CO₂ está sendo negociada a um valor aproximado de US\$ 5,00. Esse mercado está sendo fortemente explorado e apresenta grande expansibilidade, e a incorporação de CCA residual ao concreto constitui-se em um nicho de mercado ainda pouco vislumbrado atualmente.

Por outro lado, o emprego de CCA em concretos, além de benefícios técnicos e ambientais, pode trazer também alguns efeitos colaterais conectados à sua utilização, tal como o aumento do coeficiente de carbonatação, como salienta Isaia *et al.* (2001). A carbonatação é um fenômeno físico-químico decorrente da reação entre os constituintes ácidos do meio ambiente com o líquido intersticial existente nos poros do concreto. Esse mecanismo resulta na diminuição da alcalinidade da solução dos poros do concreto, propiciando a despassivação do aço e a possibilidade de desenvolvimento da corrosão. A carbonatação é um fator preponderante no desencadeamento da corrosão de armaduras em estruturas de concreto armado. John & Tudisco (1993), mostram que no Brasil a principal forma de degradação é a corrosão das armaduras, associada principalmente à carbonatação de concreto.

A carbonatação por ser um fenômeno complexo que depende de muitas variáveis, como a finura, a natureza e a dosagem de cimento ou adições minerais, a relação a/ag, a duração e as condições de cura, a umidade e a concentração de CO₂ no ar, a porosidade, a permeabilidade e a compacidade da pasta de cimento endurecida, a resistência à compressão e também a presença de fissuras, é de grande importância para controlar a durabilidade das estruturas de concreto armado.

Então, devido à complexidade que envolve, esse mecanismo demonstra grande influência para regular a durabilidade das estruturas de concreto armado, o que torna relevante seu estudo nesta pesquisa. Além disso, o fato de se adicionar CCA residual “in natura” ao concreto estrutural traz um novo patamar de investigação, objetivando buscar respostas aos questionamentos sobre quais as misturas binárias e teores de incorporação representam serem adequados, com vistas a proporcionar um melhor desempenho do material residual frente à carbonatação do concreto.

O GEPECON/UFSM através de seus coordenadores desenvolveu várias pesquisas promovendo a substituição de CCA residual beneficiada em substituição parcial ao cimento Portland, com o objetivo de verificar a influência da mesma sobre

a carbonatação do concreto, como (SPERB,2003; STUMP,2003; VAGUETTI,1999; VENQUIARUTO,2002). Por outro lado, depara-se com uma lacuna ocasionada pela falta de estudos e pesquisas laboratoriais que confirmem a possibilidade do emprego de CCA residual “in natura”, em concretos para fins estruturais, quando a variável de durabilidade é a carbonatação.

Com vistas a fornecer subsídios técnicos para tal, o GEPECON/UFSM está inserido no projeto denominado “Produção de concreto estrutural com cinza de casca de arroz in natura, sem beneficiamento”. Fazem parte do projeto: a Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) através de seu Grupo de Estudos e Pesquisas em Concreto (GEPECON/UFSM), a Universidad de la Republica (UDELAR/Uruguay) e o Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica (LEMIT/Argentina), no qual, está sendo investigada a influência da CCA nas propriedades do concreto fresco e endurecido. Para isso, está sendo realizada uma ampla análise das propriedades: mecânicas, de durabilidade e de microestrutura, dos concretos produzidos. Entre outros, estão sendo executados os ensaios de resistência à compressão axial, resistência à compressão diametral, resistência à tração, módulo de elasticidade, retração, carbonatação, penetração de cloretos, resistividade elétrica, difusão de fluidos, resistência a ácidos, ataque por sulfatos, aderência matriz-agregado, reação álcali-agregado, resistência às altas temperaturas, difração de raios-X, microscopia eletrônica de varredura e porosimetria por intrusão de mercúrio. Na presente dissertação, que é parte integrante da pesquisa anteriormente citada, a investigação da viabilidade da utilização da CCA natural em concreto, como substituição parcial ao cimento Portland, é estudada frente à carbonatação do concreto.

1.3 Objetivos

Como objetivo geral, o estudo pretende estudar a viabilidade técnica do uso de CCA residual, sem beneficiamento (pré-moagem e peneiramento) em concreto de cimento Portland destinado a fins estruturais.

A presente investigação abordou o processo de carbonatação em concretos produzidos com CCA residual com e sem beneficiamento. Posteriormente,

relacionou os resultados obtidos com o concreto de referência elaborado sem a incorporação de CCA, com o objetivo de se verificar a viabilidade técnica do emprego desta adição mineral ao concreto frente ao ataque do CO₂. Ainda foram realizadas comparações com a resistência mecânica, teor de CH remanescente e resultados de porosimetria por intrusão de mercúrio, com a finalidade de busca pelo melhor entendimento do processo de neutralização em concretos produzidos com CCA residual “in natura”.

Os objetivos específicos da pesquisa foram os seguintes:

- Calcular e analisar os coeficientes de carbonatação;
- Comparar os resultados dos ensaios de carbonatação acelerada dos concretos com e sem CCA residual;
- Observar a influência do teor de CH remanescente sobre os coeficientes de carbonatação;
- Estudar a influência da relação a/ag sobre os coeficientes de carbonatação;
- Observar a influência do tipo de CCA residual empregada (moída e sem beneficiamento / moagem);
- Avaliar o teor de incorporação de CCA residual adotado;
- Verificar a influência da distribuição dos poros sobre os coeficientes de carbonatação dos concretos com e sem CCA residual.

1.4 Estrutura da Dissertação

Essa dissertação encontra-se dividida em seis capítulos, sendo que o primeiro trata sobre a introdução e justificativa para emprego de CCA residual sem beneficiamento, além da apresentação dos objetivos a serem perseguidos nesta pesquisa.

O segundo capítulo trata os mecanismos da carbonatação do concreto e as principais variáveis que influenciam no processo de neutralização. O terceiro capítulo enfoca as adições minerais, especificamente a CCA, abordando uma revisão teórica sobre o tema.

O quarto capítulo aborda o programa experimental da pesquisa com a apresentação da caracterização dos materiais, a dosagem dos concretos empregados e o detalhamento dos procedimentos de ensaios realizados, além de suas particularidades. Os dados obtidos e as análises dos resultados, inclusive comparando-os com outros provenientes de pesquisas diversas estão no capítulo cinco desta dissertação.

Por fim, tem-se o capítulo seis, onde através das conclusões obtidas com o trabalho busca-se a melhor compreensão do processo de neutralização em concretos com a incorporação de CCA residual "in natura", responde-se aos questionamentos propostos nos objetivos e traçam-se sugestões para pesquisas futuras.

2 CARBONATAÇÃO

2.1 Carbonatação do concreto

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

Entre as vantagens de optar por estruturas de concreto armado encontram-se as funções de proteção em torno da armadura. O material pode exercer tanto a proteção física (resistência mecânica a choques) quanto a proteção química às barras de aço. O concreto protege as armaduras contra a corrosão devido à sua elevada alcalinidade apresentada pela solução dos poros, promovendo o processo de passivação das barras de aço contidas em seu interior, conforme Steffens *et al.* (2002).

A carbonatação do concreto é um fenômeno físico-químico decorrente da reação entre os constituintes ácidos do meio externo com o líquido intersticial existente na fase aquosa da solução dos poros do concreto, que se encontra saturado por CH proveniente do processo de hidratação do cimento, e também com os outros compostos hidratados do cimento em equilíbrio com o meio intersticial. Os principais constituintes ácidos são o dióxido de carbono (CO_2), o dióxido de enxofre (SO_2) e o gás sulfídrico (H_2S). Torna-se bem conhecido que a carbonatação depende basicamente de dois processos: o processo físico governado pela estrutura da rede de poros (tamanho, distribuição, interconectividade e tortuosidade) que controla o processo de difusão do CO_2 e o processo químico que é consequência da reação entre o CO_2 e o CH e, posteriormente, o C-S-H na fase aquosa da solução dos poros.

O fenômeno da carbonatação acontece naturalmente em estruturas de concreto, exigindo apenas certa concentração de CO_2 no ambiente e determinado teor de umidade. Apesar da carbonatação progredir lentamente da superfície para o

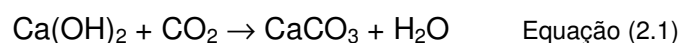
interior da estrutura, a mesma contribui decisivamente para o rebaixamento do pH (potencial hidrogeniônico) e a despassivação da armadura, podendo ocasionar o processo de corrosão da mesma, de acordo com Cascudo (1997).

Para Romer (2005), a interação do concreto com o ambiente em que a estrutura estará exposta será influenciada pela microestrutura de poros e conseqüentemente pelos vários mecanismos de transporte de gases e líquidos através da rede de poros do concreto. Dependendo das condições que atuam sobre o meio no qual a estrutura estará inserida, o movimento de agentes agressivos para o interior do concreto armado ocorre pelos seguintes processos: absorção, permeabilidade e difusão. Estas três propriedades definem as propriedades de permeabilidade do material, conforme Dhir *et al.* (1994).

A principal reação de carbonatação do concreto é resultante da reação entre o CH e o gás carbônico (CO₂), conforme Kazmierczak & Helene (1993). O processo ocorre por difusão gasosa do CO₂ existente na atmosfera na fase aquosa da solução dos poros e pela posterior reação química do CO₂ dissolvido com o CH, e outros constituintes sólidos carbonatáveis, como os álcalis do cimento (NaOH e KOH), e em longo prazo os silicatos de cálcio hidratados (C-S-H).

Para Kazmierczak & Helene (1993), a penetração do gás carbônico no concreto dá-se preponderantemente por um mecanismo de difusão através da diferença de concentração entre o meio externo e o interior do concreto. Sabe-se que a maior concentração de CO₂ no ar pode favorecer o incremento da taxa de carbonatação. Em ambientes urbanos, com tráfego intenso, a concentração em volume de CO₂ no ar pode variar entre 0,1 e 1,2%. Por se tratar de gradientes de concentração de CO₂, o processo de difusão depende da fortemente da distribuição, interconectividade, tortuosidade e o grau de saturação e da rede de poros do concreto, de acordo com Abbas *et al.*(1999).

Genericamente, todos os compostos alcalinos provenientes da reação de hidratação do cimento e presentes na solução dos poros são susceptíveis à carbonatação, entre eles pode-se citar o hidróxido de potássio (KOH) e o hidróxido de sódio (NaOH), mas a principal reação que caracteriza o processo de carbonatação do concreto é a seguinte:



O processo físico-químico que envolve a reação de carbonatação pode ser representado pelas seguintes etapas, conforme Papadakis *et al.* (1991):

- O hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) é liberado através das reações de hidratação do cimento;
- Ocorre a difusão do CO_2 atmosférico através da fase gasosa dos poros do concreto;
- Ocorre o processo de dissolução do CH na água dos poros e a sua difusão na fase aquosa da solução dos poros para ambientes com menores valores de pH;
- Dissolução do CO_2 na água dos poros e posteriormente a sua reação com o CH;
- Reação do CO_2 com os outros constituintes carbonatáveis produzidos pela reação de hidratação do cimento.

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

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

Em concretos de cimento Portland puros, ocorre um decréscimo da porosidade do material, tendo em vista que o volume dos compostos formados pela reação de carbonatação é maior que o volume apresentado pelos reagentes. Houst *et al.* (1994) analisaram a carbonatação em concretos compostos de cimento suíço, de composição química bastante semelhante ao tipo ASTM I, onde verificaram que a

reação de neutralização reduziu a porosidade dos concretos analisados. Este fato também foi observado na pesquisa realizada por Enculscu *apud* Steffens (2002) que verificou um aumento em volume de 11% para a calcita e de 3% para a formação da aragonita.

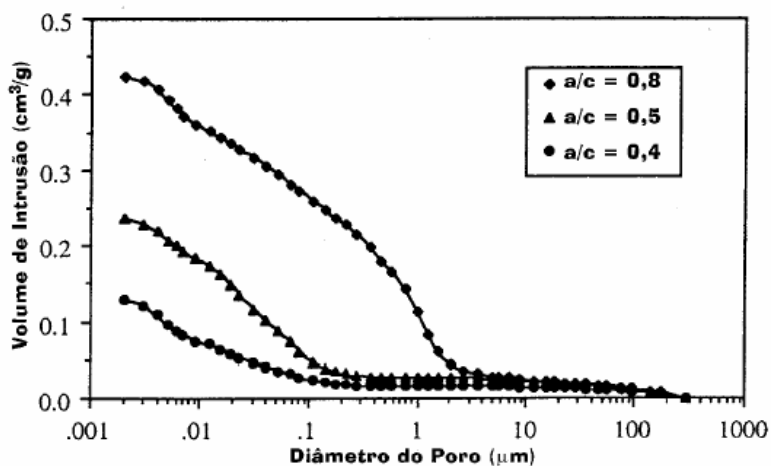


Figura 2.1 – Porosidade das pastas carbonatadas (HOUST,1994)

A interpretação dos resultados de HOUST *et al.* (1994) através da figura 2.1 indica que a porosidade é significativamente reduzida. Esta redução é maior para relações a/ag mais baixas. Todos os poros da pasta com relação a/ag 0,4 são afetados pela carbonatação, mas em particular aqueles com diâmetros abaixo de 0,1 µm. A carbonatação acelerada das pastas, conduz a grandes modificações no sistema de poros. Todos os tamanhos de poros são afetados pela carbonatação nas pastas de relações $a/c \leq 0,5$, mas é particularmente os poros com diâmetros menores que 0,1µm que são reduzidos.

Ceukelaire (1993) verificou que para concretos de cimento Portland comum, ocorreu um aumento do volume de sólidos de cerca de 11%, além de seu peso molecular aumentar em 35% para a formação do carbonato de cálcio a partir do hidróxido de cálcio. Lea (1998) menciona um aumento de cerca de 11% a 12% quando a portlandita é convertida em carbonato de cálcio. Da mesma forma, Van Gerven *et al.* (2003) relatam aumento ainda superior, cerca de 17% na conversão da portlandita em calcita. Devido a sua baixa solubilidade, os cristais de CaCO_3 formados a partir da portlandita se precipitam e promovem uma colmatação e posterior obstrução da rede de poros do concreto. Esse processo promove

alterações na microestrutura dos concretos com cimento Portland puros e conseqüentemente reduz a permeabilidade dos mesmos.

Por outro lado Shutter *et al.* (2004) mencionam que a carbonatação em concretos com a incorporação de adições minerais (E) aumenta a porosidade do concreto. Para explicar esse fato o autor argumenta que em concretos com a incorporação de adições minerais, uma segunda reação torna-se mais pronunciada: a carbonatação do silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Quando o CH se esgota devido à sua menor liberação em função do menor teor de clínquer do material cimentício e às reações secundárias com as pozolanas, ocorre carbonatação do C-S-H e a formação de sílica gel, com poros grandes, maiores que 100 nm, segundo Neville(1997). Esse fato ocasiona um acréscimo na porosidade e conseqüentemente na permeabilidade do material, facilitando a difusão do CO₂ através da rede de poros do concreto, promovendo assim a carbonatação subsequente.

Segundo Kazmierczak & Helene (1993), o hidróxido de cálcio é menos solúvel que outros álcalis do cimento, o hidróxido de sódio (NaOH), e o hidróxido de potássio (KOH). Dessa forma o CH 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 CH depende da concentração de OH⁻ na solução intersticial, a reação de carbonatação começa através dos álcalis NaOH e KOH passando a seguir ao CH.

O concreto, quando endurecido, oferece uma proteção química às barras de aço presentes em seu interior fornecida pela sua elevada alcalinidade (pH entre 12 e 14), devida principalmente aos íons OH⁻, Ca⁺⁺, K⁺, Na⁺ e SO₄⁻ presentes na solução intersticial dos poros do material. Segundo Mehta & Monteiro (1994) quando o valor do pH encontrar-se nessa faixa e na presença de oxigênio, as barras de aço presentes no interior do concreto se recobrem de uma capa de óxidos muito aderente (γ - Fe₂O₃), que lhe protege de qualquer sinal de corrosão, desde que o concreto mantenha seu valor de pH alto. Entretanto o filme de óxidos pode ser destruído se o concreto possuir a sua alcalinidade reduzida devido à ação do processo de carbonatação ou pela presença de íons cloreto, conforme salienta Parrot (1990).

Enquanto a armadura não for despassivada pela remoção desta camada de óxidos, o processo de corrosão não se inicia. Entretanto, pela ação de íons cloreto ou da carbonatação, os dois principais agentes desencadeantes da corrosão, esse

ambiente de estabilidade química do concreto é modificado, alterando o pH de 12,5 para 8,3, segundo Papadakis *et al.* (1991). Com esse pH baixo, na presença de oxigênio e certa umidade (eletrólito), pode ocorrer a deflagração do processo da corrosão do aço no interior do concreto.

A reação de carbonatação forma no interior do concreto três zonas distintas de pH, mas através do ensaio calorimétrico apenas duas podem se identificadas, a saber: formação de uma zona completamente carbonatada, uma parcialmente carbonatada e uma zona não carbonatada. Na zona completamente carbonatada, a região onde o indicador químico fenolftaleína permanece incolor, o grau de carbonatação é cerca de 50% e o valor do pH na solução dos poros do concreto é inferior a 9,0. Na zona parcialmente carbonatada, o grau de carbonatação está na faixa entre 0% e 50% e o valor do pH na solução dos poros do concreto se concentra na faixa entre 9,0 a 11,5. Esta zona não é detectada com o ensaio calorimétrico. Por fim na zona não carbonatada o valor do pH do concreto é superior a 11,5 segundo Chang (2005).

2.2 Variáveis que influenciam na carbonatação

O processo de neutralização não é nocivo ao concreto em si, mas é muito prejudicial à armadura do concreto armado, reduzindo consideravelmente a vida útil das estruturas, representando um dos grandes desafios para os pesquisadores e tecnólogos da área tecnológica do concreto. O fenômeno da carbonatação é bastante complexo, pois muitas variáveis físico-químicas se inter-relacionam e determinam um processo de maior ou menor intensidade do avanço da frente carbonatada.

O estudo dessas variáveis vem sendo pesquisado há várias décadas, contribuindo para melhorar a interpretação do fenômeno da carbonatação na microestrutura do concreto e auxiliando na descoberta de novos traços, novos materiais, com o intuito de promover maior durabilidade ao concreto frente à ação do CO₂. A velocidade de penetração da frente de neutralização é determinada por fatores que estão diretamente vinculados às condições de exposição, às características do concreto empregado na pesquisa, como a relação a/ag, dosagem

de cimento ou adições minerais, condições de cura, concentração de CO_2 no ar, saturação dos poros, resistência à compressão, teor de CH e temperatura. Estes fatores são abordados na seqüência.

2.2.1 Relação água/aglomerante

A variável a/ag apresenta uma relação diretamente proporcional à profundidade de carbonatação, ou seja, quanto maior for a relação a/ag empregada ao traço de concreto, maior será a profundidade de neutralização do mesmo, em uma mesma idade de ensaio acelerado.

Cadore *et al.* (2006) pesquisaram a incorporação de 70% de E, 20% de CV e 10% de cimento CP V - ARI como mistura ternária, além de concreto de cimento Portland puro, avaliando as profundidades de carbonatação aos 91 e 360 dias de exposição ao CO_2 , com relações a/ag de 0,3, 0,4 e 0,5. Segundo os autores, que analisaram os concretos em camadas, para todas as misturas verificadas, a redução da relação a/ag provoca um decréscimo nas profundidades carbonatadas para todos os traços de concreto e em todas as camadas analisadas na pesquisa. Com um aumento da relação a/ag ocorre um acréscimo da profundidade carbonatada. Helene *et al.* (1999) mostraram, através da figura 2.2 que a espessura carbonatada apresenta uma curva ascendente de crescimento com a relação a/ag , em concretos com cimento Portland CP II-F 32. Os autores mostram também que para diferentes concretos com mesmo valor de abatimento a espessura carbonatada cresceu com o aumento do fator a/ag .

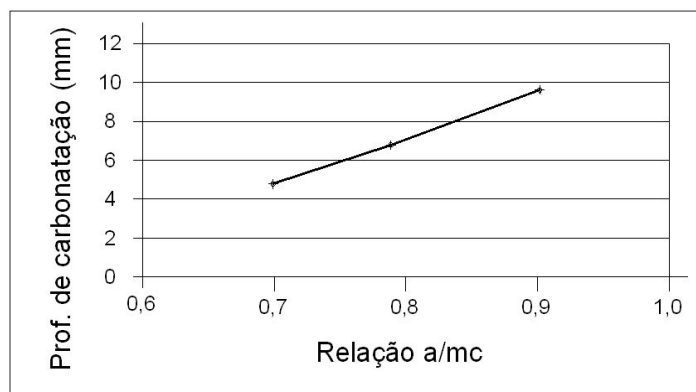


Figura 2.2 – Profundidade de carbonatação versus relação a/mc (HELENE *et al.* 1999)

Isaia (1995) estudou concretos com adições de CV, MS e CCA, em misturas binárias e ternárias com substituições variando de 10% a 50%, relacionando os valores dos coeficientes de carbonatação com as relações a/ag, obtendo duas equações, uma para os teores normais de pozolanas e outro para todas as misturas, conforme observado na figura 2.3.

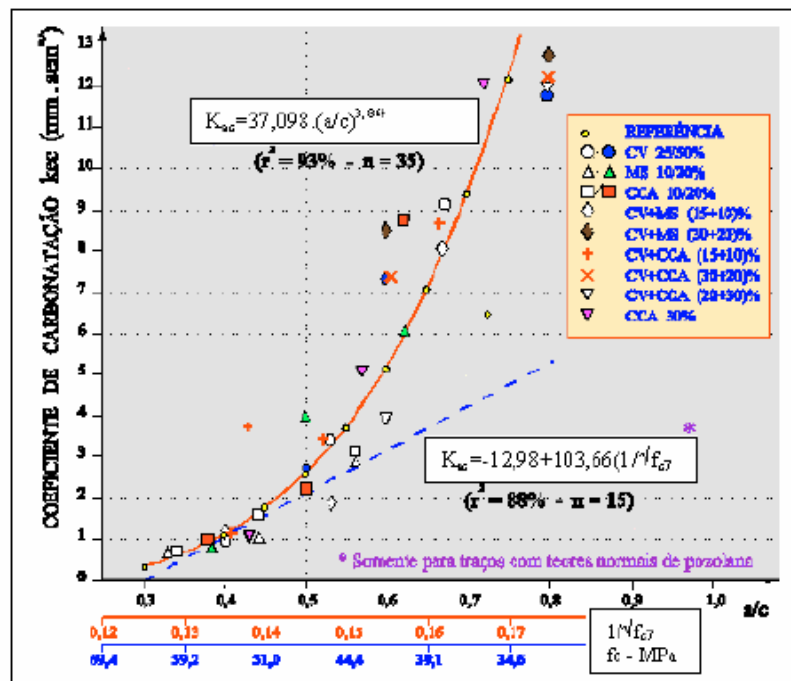


Figura 2.3 – Regressões entre coeficientes de carbonatação, as resistências à compressão a 7 dias e as relações a/mc (ISAIA,1995)

Observa-se que aumento na relação a/ag leva a acréscimos nas profundidades carbonatadas. O fato deve-se ao aumento da porosidade e da permeabilidade do concreto, que fica mais susceptível à difusão do CO_2 atmosférico.

Skojsovold (1986) estudou 24 diferentes misturas de concreto com cimento e sílica ativa, e mostra que a profundidade de carbonatação cresce com o aumento do fator a/ag, conforme figura 2.4. Os concretos foram curados por um dia na forma e 27 dias em cura úmida, e foram expostos durante 6 anos em ambiente de 20° C e 50% de U.R.

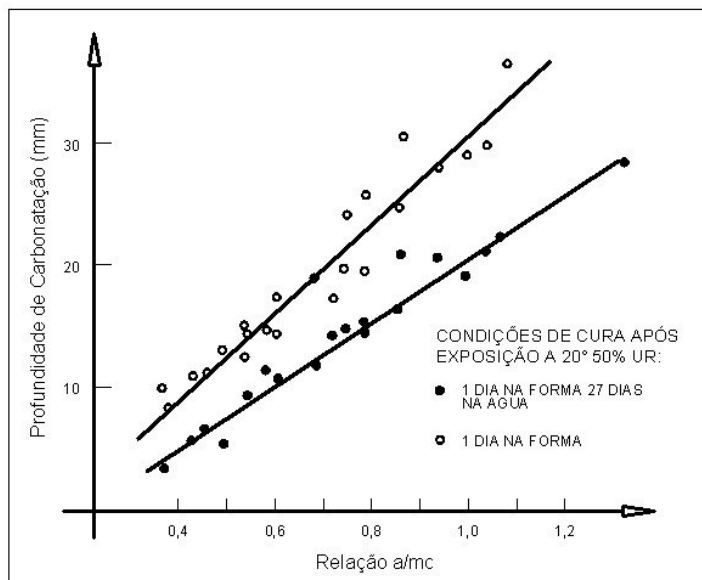


Figura 2.4 – Profundidade de Carbonatação após 6 anos de exposição a 20°C e 50% UR (SKOJOSVOLD, 1986).

Observa-se que o aumento na relação a/ag leva a acréscimos nas profundidades carbonatadas. O fato deve-se ao aumento da porosidade, diminuição da tortuosidade, aumento da interconectividade da rede de poros do concreto, e conseqüentemente da permeabilidade do material, que fica mais susceptível à difusão do CO_2 atmosférico.

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

2.2.2 Dosagem do cimento e adições minerais

Helene *et al.* (1995) concluem que o tipo de cimento influi na profundidade de carbonatação do concreto. Em seu estudo, os autores pesquisaram diferentes tipos de cimento, sendo que os índices de profundidade carbonatada do cimento CP V (cimento Portland ARI) foram inferiores aos dos cimentos CP II E (cimento Portland composto) e CP III (cimento Portland de alto forno). O cimento CP II E, apresentava teor de escória de alto forno de 13,7%, o CP III 67,8% e o CP V não tinha qualquer tipo de adição mineral incorporada ao cimento.

Com relação à influência da composição do aglomerante, sabe-se que esse fator influencia na rede dos poros do concreto, através de modificações na microestrutura do mesmo (tamanho, distribuição, interconectividade e tortuosidade).

Gastaldini (1996), estudou a influência da CV, CCA, E e SA na porosidade total e no diâmetro médio dos poros em misturas binárias e ternárias de cimento CP V (ARI). Os resultados encontrados permitiram concluir que as adições minerais provocaram um efeito benéfico na microestrutura das pastas, através do refinamento dos poros e da redução da porosidade total, o que resultou em uma pasta com menor permeabilidade a agentes agressivos.

Por outro lado, sabe-se que a alcalinidade da solução aquosa dos poros é determinada basicamente pelo teor e pela composição química do cimento além da quantidade de produtos passíveis de carbonatação produzidos pelo processo de hidratação do cimento Portland. De acordo com Johannesson *et al.* (2001), a quantidade de CH formado pelo processo de hidratação do cimento Portland representa cerca de 30% do peso do cimento completamente hidratado. Quando ocorre a substituição parcial de cimento por adições minerais, ocorre uma diminuição da quantidade de CH produzido pelo processo de hidratação do cimento, em comparação com um concreto com cimento Portland puro. Além disso, também ocorre o consumo de CH pelas reações pozolânicas (reações secundárias) entre a sílica ativa presente nas adições minerais e o CH proveniente do processo de hidratação do cimento Portland, para a formação do C-S-H secundário. Dessa forma, pode-se verificar que concretos contendo adições minerais incorporadas como substituição parcial ao cimento Portland, apresentam menor quantidade de CH produzido e remanescente em comparação àqueles sem adições minerais. Esse fato

ocasiona uma diminuição da reserva alcalina que é um dos fatores condicionantes e primordiais para o desenvolvimento da reação de carbonatação.

Isaia (1995) estudou misturas binárias e ternárias de CCA, CV, SA e E, e verificou um aumento da velocidade de carbonatação para teores crescentes de adições minerais, devido ao fato de as mesmas apresentarem menor reserva alcalina do que o concreto sem a incorporação de adições minerais.

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

Venquiaruto (2002) em misturas binárias de CV e CCA com teores de substituição de 25% e 50% e verificou um aumento dos coeficientes de carbonatação com o aumento do teor de substituição, independentemente da relação a/ag, conforme pode ser visualizado através da figura 2.5.

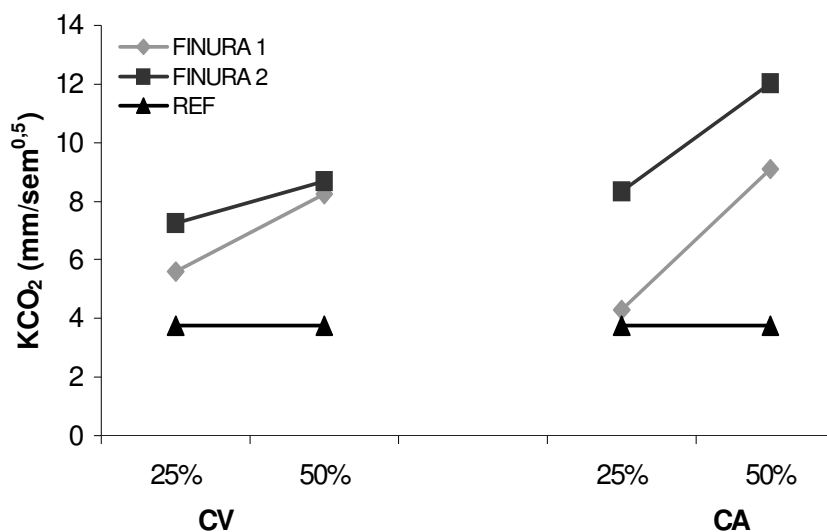


Figura 2.5 – Coeficiente de carbonatação versus teor de substituição (CV e CCA) (VENQUIARUTO, 2002).

Segundo Parrot (1996) os concretos com adições minerais possuem predisposição para apresentarem profundidades de carbonatação superiores aos concretos de referência (sem adição mineral), devido a uma diminuição da quantidade de CH remanescente ocasionado pela reação pozolânica.

Sulapha *et al.* (2003) estudaram concretos com a incorporação de E, CV e SA e concluíram que embora as adições minerais proporcionassem um refinamento dos poros, os concretos produzidos com adições minerais apresentaram maiores profundidades de carbonatação. O autor credenciou esse fato ao efeito dominante da diminuição da reserva alcalina ocasionado pela menor produção de CH oriundo do processo de hidratação do cimento, além do consumo de CH pelas reações pozolânicas, sobre o efeito de refinamento dos poros proporcionados pela incorporação de adições minerais ao concreto.

Isaia, Vaguetti & Gastaldini (1998), pesquisaram a carbonatação em concretos de cimento Portland puros e com a presença de adições minerais. De forma semelhante, os autores concluíram que em cimentos com adições minerais, apesar de as mesmas propiciarem um maior refinamento dos poros e dos grãos aumentando a tortuosidade dos capilares e diminuindo a permeabilidade, prepondera o efeito da menor reserva alcalina resultando em frente de carbonatação mais veloz do que no cimento Portland comum.

Portanto, no contexto de uma revisão da literatura sobre o tema, pode-se dizer, genericamente, que as adições minerais quando incorporadas ao concreto em substituição parcial ao cimento Portland ocasionam uma predisposição ao aumento da profundidade de carbonatação do concreto.

Porém, Helene (1993) salienta que, a aparente desvantagem apresentada por concretos com a incorporação de adições minerais de apresentarem menor reserva alcalina pode ser minimizada com uma cura úmida adequada, de forma a reduzir a porosidade e a permeabilidade do concreto, dificultado por sua vez a penetração do CO₂.

2.2.3 Processo de cura

Segundo Pauletti (2004) a profundidade de carbonatação do concreto depende do processo de cura empregado ao mesmo, pois esse afeta as propriedades de hidratação do cimento Portland. Devido ao fato de influenciar a microestrutura do concreto, que por sua vez afeta a difusão do CO₂ através da rede de poros interconectada, o processo de cura do concreto tem um papel decisivo no

desenvolvimento da reação de carbonatação, principalmente em concretos elaborados com CCA em substituição ao cimento Portland.

Segundo Figueiredo *et al.* (1993), quanto maior for o tempo de exposição à cura úmida, maior será o grau de hidratação do cimento, menor será a sua porosidade e a permeabilidade e, por conseqüência, mais compacta será a sua microestrutura e menor será a sua profundidade de carbonatação.

Romer (2005) ainda menciona que elevados percentuais de umidade relativa conduzem a curas mais bem feitas, ocasionando um acréscimo na resistência mecânica do concreto. Além disso, proporciona também densificação da microestrutura de poros conduzindo a redução da conectividade da rede de poros e dessa forma, afetando de forma benéfica a permeabilidade do concreto.

Dhir *et al.* (1989) pesquisaram a influência do tipo de cura em concreto de cimento Portland, onde os mesmos foram expostos a quatro tipos de cura distintos: 28 dias em água a 20°C; 6 dias em água a 20°C e 22 dias ao ar (20°C; 55% U.R.); 3 dias em água a 20°C e 25 dias ao ar (20°C; 55% U.R.), 28 dias ao ar (20°C; 55% U.R.). Segundo os autores, a taxa de carbonatação é fortemente influenciada pelo período de cura úmida ao qual os concretos serão expostos, fato que pode ser comprovado pelos resultados obtidos, que mostram profundidades de carbonatação crescentes com a redução do tempo de cura úmida dos concretos investigados.

Kokubu & Nagataki (1989), relacionam o período de cura com o ambiente de exposição, e mostram que para concretos em ambientes externos, o período de cura úmida de 7 dias é adequado, mas para concretos internos, este período é insuficiente. Os autores ainda concluíram que quando a cura é adequada (7 dias), para ambos os casos, a profundidade de carbonatação dos concretos internos é de 2 a 4 vezes maior do que para os concretos externos.

Thomas *et al.* (1992) pesquisaram a influência do tipo de cura em diversos traços de concreto com a incorporação de CV e através de seus resultados concluíram que corpos-de-prova armazenados externamente e protegidos da chuva apresentaram uma profundidade de carbonatação cerca de 40% menor que o mesmo concreto armazenado em condições internas de laboratório (20°C e 65% U.R.). Além disso, os autores verificaram que, para concretos submetidos à cura úmida por período de um dia, a profundidade de carbonatação foi aproximadamente duas vezes superior aos concretos curados por sete dias e três vezes superior aos concretos curados por vinte e oito dias.

Fattuhi (2002) pesquisou a carbonatação em concretos de cimento Portland puros, com relação a/ag de 0,6 com períodos de cura úmida de 1, 3, 7, 21 e 28 dias.

De acordo com seus resultados, quando o período de cura úmida foi aumentado de um dia para 3, 7, 21 e 28 dias, as profundidades de carbonatação do concreto apresentaram valores em média de 61%, 43%, 25%, e 17% inferiores, respectivamente.

Outra pesquisa que trata sobre o efeito da cura sobre a carbonatação é a de Parrott (1996). Nesse trabalho, foi verificada a influência dos tipos de cimento e da cura na profundidade de carbonatação e na corrosão do aço dentro do concreto. Foram testados três períodos de cura úmida 1, 3 e 28 dias, e usados 17 tipos de cimento. As leituras da profundidade carbonatada foram feitas aos 6 e 18 meses, sendo constatado que aos 18 meses a espessura de carbonatação foi 64% maior do que aos 6 meses. A influência da cura no experimento foi significativa, ocorrendo em média 38% de redução na profundidade de carbonatação quando a comparação é feita entre as idades de 1 e 28 dias de cura úmida para os 17 tipos de cimento testados. Fazendo ainda a comparação da espessura carbonatada para a idade de cura por 3 dias, verifica-se que, em média, ela aumenta 33% em relação à cura por 28 dias e reduz 20% em relação à cura por 1 dia.

Castro (2003) pesquisou a carbonatação acelerada em concretos com a incorporação de diferentes tipos de adições minerais com o teor de substituição de 10%, entre elas a CCA. De acordo com os resultados obtidos, o autor menciona que para os concretos curados em cura ao ar apresentaram coeficientes de carbonatação superiores aos concretos em que a cura procedeu-se em câmara úmida. Como exemplo, para os concretos produzidos com CCA, para a relação a/ag de 0,4, o coeficiente de carbonatação para concreto curado ao ar foi de 5,3 mm/sem^{0,5}, enquanto que para a cura úmida, o coeficiente verificado foi de 1,3 mm/sem^{0,5}. Para a relação a/ag de 0,5, os valores foram de 4,6 mm/ sem^{0,5} e 7,7 mm/sem^{0,5}, para a cura úmida e ao ar respectivamente. Da mesma maneira, para a relação a/ag de 0,70, onde o coeficiente de carbonatação apresentado pelo concreto curado ao ar foi 100% superior ao concreto curado por via úmida, sendo os valores, 5,3 mm/sem^{0,5} e 10,6 mm/sem^{0,5} respectivamente.

A cura úmida para o concreto, portanto, influencia de forma incisiva o comportamento deste material ao longo de sua vida útil, especialmente relacionado à carbonatação. Esta é substancialmente reduzida quando o concreto for submetido

a períodos iniciais com uma cura prolongada, possibilitando melhor hidratação do cimento, diminuição da porosidade e, conseqüentemente, aumento da sua capacidade de proteção frente à penetração do CO₂.

Para o emprego de adições minerais ao concreto, com vistas à minimização da reação de carbonatação, uma cura bem executada e por um período de tempo maior, proporcionando o pleno desenvolvimento das reações pozolânicas e refinamento dos poros da estrutura, poderia reduzir a permeabilidade, e de certa forma, compensar o efeito negativo do consumo de CH.

Neste contexto, entende-se que o emprego de uma cura úmida prolongada torna-se mandatória para o concreto, principalmente quando ocorre a incorporação de CCA residual contribuindo para incrementar as potencialidades de durabilidade deste material.

2.2.4 Concentração de CO₂

A penetração de CO₂ proveniente da atmosfera para o interior do concreto depende basicamente da primeira Lei de Fick para a difusão, onde o processo de difusão deste gás é regido pela diferença de concentração entre os dois meios.

Dessa forma, quanto maior for o gradiente de concentração apresentado pelos dois ambientes, maior será a penetração deste gás para o interior do concreto.

Ensaio acelerados realizados em laboratório, geralmente possuem teores de CO₂ elevados, acima dos normais atmosféricos, com o objetivo de acelerar a reação obtendo resultados em um menor intervalo de tempo. De acordo com Houst (1995), a velocidade de carbonatação pode não ser linear à concentração de CO₂, pois altas concentrações podem acarretar a produção de água como sub-produto das reações de neutralização podendo bloquear os poros e, dessa forma, limitar a difusão do gás carbônico através da rede de poros do concreto.

Saetta *et al.* (2005) complementa que essa liberação de água em elevadas concentrações de CO₂, pode ser maior que a quantidade de água que os poros da matriz pasta de cimento são capazes de expelir, no mesmo período de tempo, promovendo uma maior saturação dos poros e retardando conseqüentemente o prosseguimento da reação.

Devido à falta de padronização e à inexistência de uma norma para a realização deste ensaio no que diz respeito a diversas variáveis relacionadas, como o tipo de cura, tempo de cura, tempo de sazonalidade e teor de CO₂, cada pesquisador adota um determinado procedimento específico, inviabilizando, dessa forma, a comparação fidedigna dos resultados obtidos. Assim enquanto em uma situação de ambiente natural, as concentrações de CO₂ variam até o valor de 1,0% em pesquisas aceleradas de laboratório, os teores de CO₂ muitas vezes chegam a 100%. Como pode ser visto pela tabela 2.1, o teor de CO₂ adotado pelos pesquisadores nela citados apresenta uma grande faixa de variação, chegando a percentuais de 100%.

Tabela 2.1 – Variação umidade, temperatura e concentração de CO₂ entre pesquisas

PESQUISADOR	ANO	U.R. (%)	T (°C)	CO₂ (%)
Johannesson <i>et al.</i>	2001	65	20	1
Fukushima <i>et al.</i>	1998	60	30	5
Chang <i>et al.</i>	2006	70	23	20
Kulakowski <i>et al.</i>	2006	70 ± 2	25 ± 1	5
Chang <i>et al.</i>	2005	70	23	20
Houst <i>et al.</i>	1994	76	-	80-90
Ceukelaire <i>et al.</i>	1993	40-90	20	10
Ngala <i>et al.</i>	1997	65	-	5
Shutter <i>et al.</i>	2004	60	20	10
Fattuhi	2002	84	23	100
Papadakis <i>et al.</i>	1991	65	30	50
Isaia	1995	65	23	10
Jun <i>et al.</i>	2005	80	23	98
Dhir <i>et al.</i>	1989	50	20	4
Horiguchi <i>et al.</i>	1994	60	30	5
Mira <i>et al.</i>	2002	45-55	20 ± 2	50
Villain <i>et al.</i>	2006	53	20	50
Dalla Lana	2005	75 ± 2	23 ± 1	5
Sperb	2003	75 ± 2	23 ± 1	5
Venquiaruto	2002	75 ± 2	23 ± 1	5
(-) Não Determinado				

Em função dessa gama de variações, a comparação de resultados de diferentes pesquisas fica prejudicada, pois a carbonatação pode assumir comportamentos distintos quando os corpos-de-prova são submetidos a diferentes concentrações de CO₂. Segundo Van Balen *et al.* (1994), o resultado da reação de carbonatação é a formação de carbonatos, principalmente a calcita, porém quando os corpos-de-prova são submetidos a elevadas concentrações de CO₂, pode ocorrer a formação de estrutura de cristais de aragonita, principalmente em teores próximos a 100% de CO₂.

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

Ao estabelecer relações entre os coeficientes de carbonatação natural e acelerada (teor de 10%), Isaia (1995) concluiu que para as misturas com até 25% de pozolanas, os coeficientes revelam equivalência de $1,0 \text{ mm/sem}^{0,5} = 1,0 \text{ mm/ano}^{0,5}$; e para as misturas com substituição de 50% de pozolanas a relação passa para $1,0 \text{ mm/sem}^{0,5} = 3,6 \text{ mm/ano}^{0,5}$. Conclui ainda que o aumento da velocidade do coeficiente de carbonatação dos ensaios acelerados em relação aos ambientais, para misturas com altos teores de pozolanas, podem ser explicados pela maior concentração de CO₂ na câmara condicionada, menor reserva alcalina das misturas pozolânicas e variação do teor de umidade do concreto exposto ao meio ambiente natural, que não ocorre na câmara climática, onde é mantido um teor de umidade fixo constante.

Segundo Isaia (1995) e conforme figura 2.6 que existe linearidade entre a profundidade carbonatada e a raiz quadrada do tempo multiplicada pela concentração molar de CO₂. O autor também realizou a regressão linear de 10 pesquisas e obteve coeficiente de determinação de 92,8%, mostrando que existe grande correlação entre a profundidade carbonatada e a raiz quadrada do produto entre o tempo de exposição e a concentração molar de CO₂. Dal Molin (2005) sugere que os teores para a realização de ensaios de carbonatação acelerada

devem ser utilizados percentuais de CO₂ inferiores a 6%, pois de acordo com a autora, teores maiores tendem além de produzir profundidades de carbonatação inferiores e parecem alterar o seu comportamento.

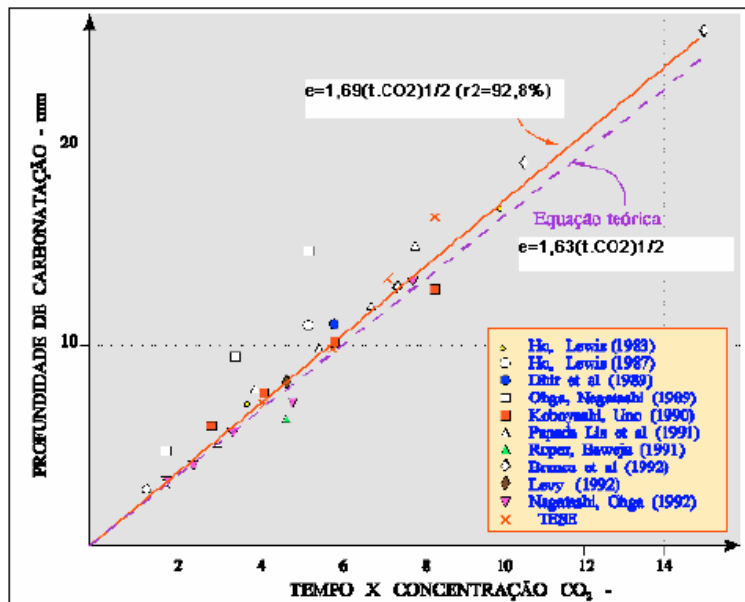


Figura 2.6 – Regressão entre profundidade de carbonatação, tempo de exposição e teor de CO₂, segundo vários autores (ISAIA, 1995).

2.2.5 Saturação dos Poros

Segundo Papadakis *et al.* (1992), o grau de saturação dos poros é um fator decisivo para a reação de carbonatação do concreto, pois o processo de difusão do CO₂ através da rede de poros é fortemente influenciado pela quantidade de água no interior da mesma. Sabe-se que a umidade relativa do ar influencia diretamente no grau de saturação dos poros. Dessa forma, ambos são importantes para a reação de neutralização.

A condição de umidade dos poros do concreto é um parâmetro primordial que afeta a carbonatação onde em elevados conteúdos de umidade, os poros irão estar preenchidos com água e restringirão o ingresso de dióxido de carbono da atmosfera para o interior do concreto, conforme Parrot (1990). Pode-se afirmar que, em poros saturados de água, com umidade superior a 80% o processo de carbonatação quase não ocorre, devido à baixa difusão do CO₂ na água, que apresenta uma velocidade

de difusão do CO₂ cerca de 10⁴ vezes menor que no ar, (KAZMIERCZAK & HELENE, 1993 ; VAN BALEN, 2005).

Por outro lado, em poros que apresentam baixa umidade ou até excessivamente secos, o gás penetra com bastante facilidade, de acordo com Van Balen *et al.* (1994), porém a reação não ocorre devido à falta de eletrólito, para a transformação do CO₂ em ácido carbônico.

Segundo Parrot (1994) a escala de umidade relativa entre 70% e 90% tem particular importância sobre os danos induzidos por carbonatação e corrosão das armaduras, em baixas umidades o processo de corrosão do aço poderá ser reduzido e em elevadas umidades relativas a taxa de carbonatação será minimizada.

Jones *et al.* (2001) pesquisou concreto com a incorporação de CV, E e SA em teores de incorporação variando entre 10 % a 30% em substituição o cimento (em massa) e submeteu os concretos a exposição conforme European Committee for Standardisation (CEN) para se verificar a influência do grau de saturação dos poros através das diferentes classes de exposição:

- Classe 1 : 350 ± 50 ppm CO₂, (20 ± 2) °C e (65 ± 5)%U.R.
- Classe 2 : 350 ± 50 ppm CO₂, (20 ± 2) °C e (65 ± 5)%U.R, onde os corpos-de-prova foram retirados da câmara e imersos em água a (20 ± 2) °C por seis horas diárias, posteriormente secos superficialmente durante um período de 28 dias.
- Classe 3 : 350 ± 50 ppm CO₂, (20 ± 2) °C e (65 ± 5)%U.R. onde os corpos-de-prova foram retirados da câmara e imersos em água a (20 ± 2) °C durante um período de 7 dias.

Segundo o autor, embora a classe 1 representasse o pior cenário para a carbonatação, a corrosão seria difícil de ocorrer devido à falta de umidade.

Por outro lado, a classe 3 poderia representar um perfil muito úmido para a carbonatação inibindo dessa forma o problema da corrosão induzida por carbonatação. De acordo com os resultados obtidos nesse estudo, os resultados de profundidade de neutralização para a classe de exposição 3 foram os menores apresentados no estudo e o autor creditou esse fato basicamente devido ao elevado grau de saturação dos poros.

Em ambientes que apresentam diferentes ciclos de molhagem e secagem em que a variação de umidade no interior dos poros do concreto torna-se um fator bastante variável, a taxa de carbonatação do concreto apresenta valores bastante

reduzidos se comparados às taxas de carbonatação de concretos expostos a condições de umidade e temperatura controladas, como os ensaios realizados em câmaras condicionadas em pesquisas laboratoriais.

Estudos mostram que as maiores velocidades de carbonatação ocorrem para umidades relativas entre 50% e 80% como de Isaia *et al.* (1998), e conforme figura 2.7 Vénuat *apud* Rosenberg (1989).

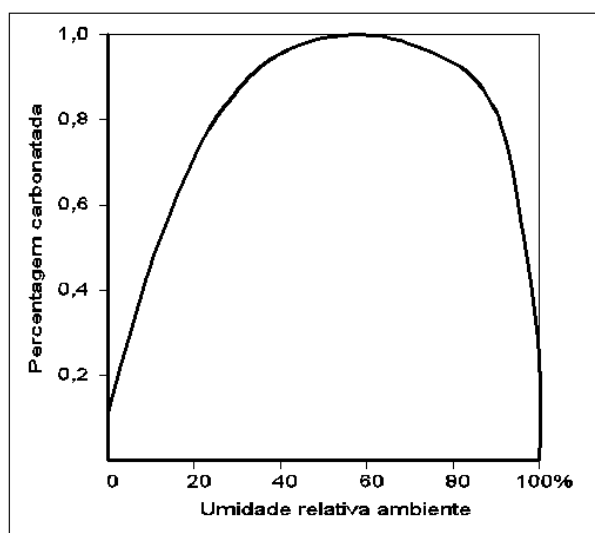


Figura 2.7 – Profundidade carbonatada como função da umidade relativa (VENUAT *apud* ROSENBERG, 1989).

2.2.6 Resistência à Compressão

Segundo Parrot (1987), uma das alternativas para a estimativa da profundidade de carbonatação seria a determinação da resistência mecânica do concreto. Uma de suas vantagens seria que os resultados de resistência à compressão axial freqüentemente estão mais disponíveis e as diferenças entre as relações a/a_g pode ser representada por essa variável. Por outro lado o autor enfatiza que a medida da carbonatação através da resistência à compressão do concreto não pode ser generalizada, ou seja, a primeira além de ser função da resistência mecânica do concreto também depende de fatores como nível de compactidade da pasta, conteúdo total de hidróxido de cálcio para reagir com o CO_2 , condições de cura, concentração de dióxido de carbono entre outros.

Venquiaruto (2002), em misturas com CV e CCA, em teores de 25% e 50%, com duas finuras (finura 1 = 3,5 m²/g e finura 2 = 4,6 m²/g para CV e finura 1 = 23,0 m²/g e finura 2 = 36,6 m²/g para CCA), mostra uma correlação entre as resistências a compressão axial e os coeficientes de carbonatação acelerada, conforme figura 2.8. Como pode ser visualizado, houve tendência de diminuição dos coeficientes de carbonatação com o aumento da resistência mecânica dos concretos, para os diferentes traços e diferentes finuras empregadas.

A autora mostra que para a CCA, na resistência de 40 MPa nenhuma das misturas apresentou coeficiente menor do que 4 mm/sem^{0.5}, observou também que as misturas 1CA25 e 2CA25 apresentaram coeficientes de carbonatação de 4 mm/sem^{0.5} para as resistências de 48 MPa e 62 MPa. As misturas 1CA50 e 2CA50 apresentaram coeficientes maiores que 4 mm/sem^{0.5} para todos os níveis de resistência, conforme figura 2.8.

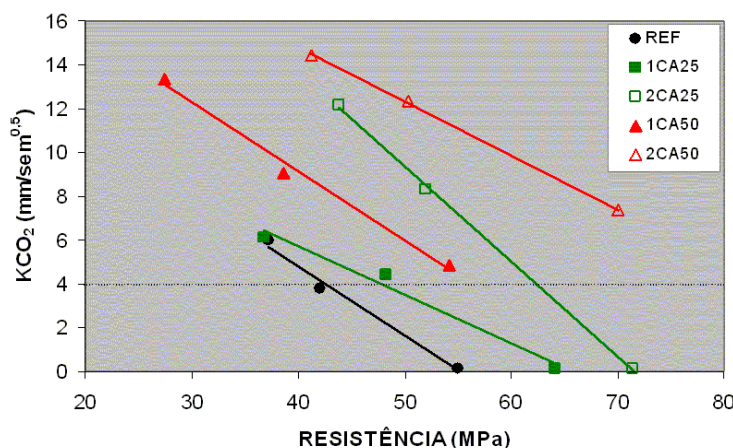


Figura 2.8 – Correlação entre a resistência a compressão axial e o coeficiente de carbonatação para CCA (VENQUIARUTTO, 2002).

Pode-se verificar que a figura 2.8 apresenta tendência de diminuição dos coeficientes de carbonatação com o aumento da resistência mecânica dos concretos, para os diferentes traços e diferentes finuras empregadas.

Isaia, Vaguetti & Gastaldini (1998), mostram que em misturas binárias de SA (10% e 20%), CV (25% e 50%), CCA (25% e 50%), e misturas ternárias de CV+SA (15+10% e 30+20%), e CV+CA (10+15% e 20+30%), existe uma relação entre os coeficientes de carbonatação e a resistência à compressão axial. Concluíram que para o mesmo nível de resistência os coeficientes de carbonatação variaram do

menor para o maior valor de 122 vezes aos 28 dias e 97 vezes aos 91 dias. Os autores empregaram nessa pesquisa relação a/ag cada vez menores conforme o aumento do teor de adição mineral em substituição ao cimento Portland, com o objetivo de se alcançarem patamares de resistência mecânica de 60 MPa. Os resultados podem ser visualizados na figura 2.9.

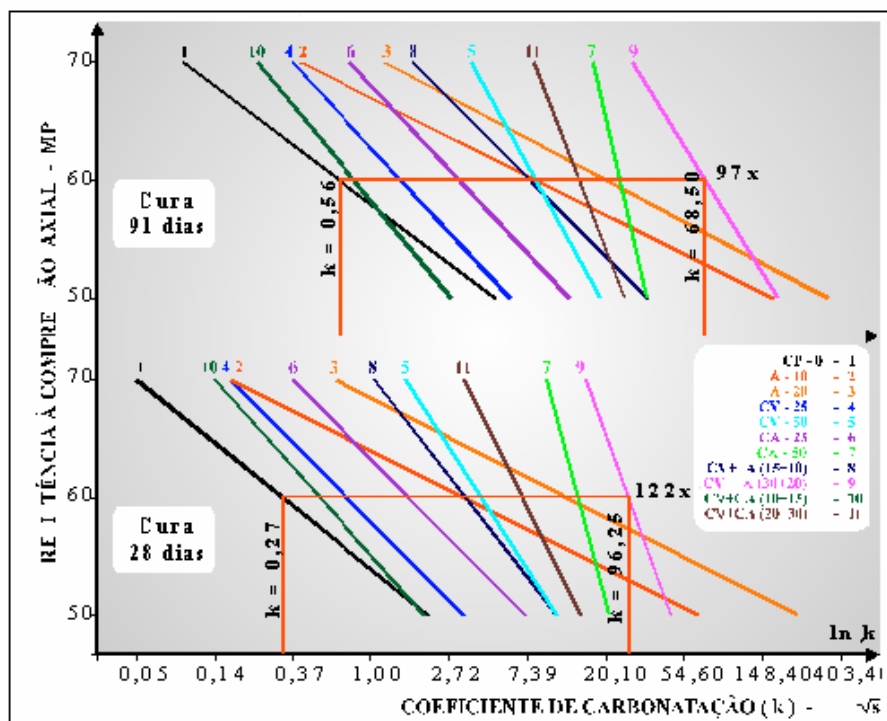


Figura 2.9 – Evolução do coeficiente de carbonatação acelerada com a resistência à compressão de 11 misturas de concreto com e sem pozolana, em igualdade de resistência de 60 MPa (ISAIA, VAGUETTI & GASTALDINI, 1998).

2.2.7 Teor de hidróxido de cálcio remanescente

O teor de CH presente na solução aquosa dos poros do concreto devido ao processo de hidratação do cimento portland tem fundamental importância na velocidade de carbonatação, visto ser a reação de neutralização realizada entre os gases atmosféricos, principalmente o dióxido de carbono e os álcalis do concreto, preponderantemente o CH.

Quanto maior o teor de CH presente na composição do concreto, maior será a reserva alcalina disponível, e mais retardado será o avanço da frente carbonatada, pois haverá maior teor de CH a ser consumido pelas reações de carbonatação.

Para Isaia, Vaguetti & Gastaldini (1998), a relação entre o teor de CH remanescente e os coeficientes de carbonatação, em misturas binárias e ternárias de SA, CV e CCA, é representado conforme a figura 2.10. Observa-se que os teores mais elevados de substituição apresentam menores teores de hidróxido de cálcio remanescente e, por sua vez, maiores coeficientes de carbonatação.

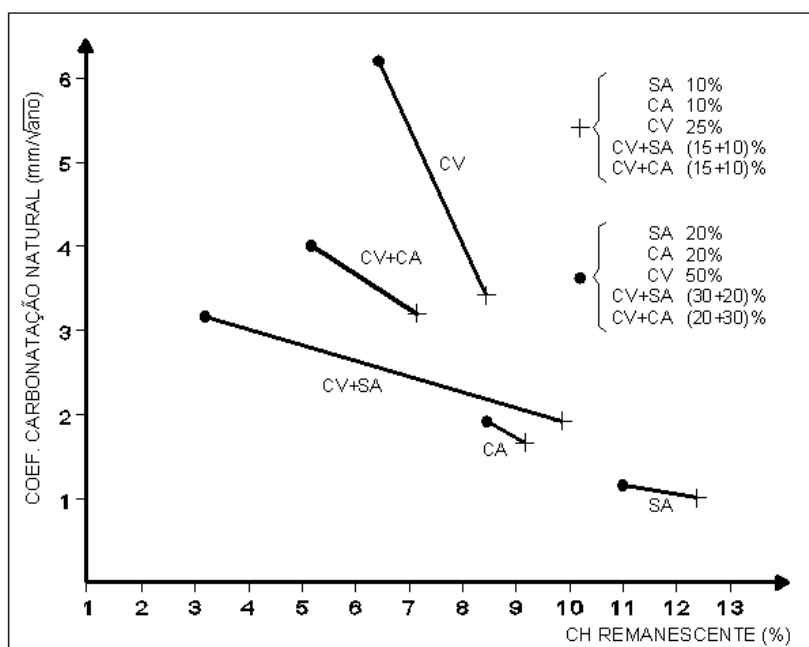


Figura 2.10 – Correlação entre o coeficiente de carbonatação natural e o teor de hidróxido de cálcio remanescente para nível de resistência de 70 MPa (ISAIA, VAGUETTI & GASTALDINI, 1998).

Vaguetti (2005) pesquisou o teor de CH remanescente em concretos com 100% de cimento Portland, 75% de cimento Portland e 25% de CV, 50% de cimento Portland e 50% de CV, 75% de cimento Portland e 25% de CCA e 30% de cimento Portland e 70% de E. Através de seus resultados, verificou que a mistura com 100% de cimento Portland apresentou o maior teor de CH remanescente, ao passo que, nas misturas com a incorporação de adições minerais, além do menor teor de clínquer na mistura, grande parte do CH gerado pela hidratação do cimento Portland foi consumido pelas reações pozolânicas.

2.2.8 Temperatura

A temperatura pode afetar a reação de carbonatação através da sua influência sobre a solubilidade dos componentes e o processo de difusão do CO₂.

Segundo Van Balen *et al.* (1994), a solubilidade do dióxido de carbono diminui com o aumento da temperatura, enquanto que as reações químicas se processam de maneira mais rápida com o incremento de temperatura. Segundo o mesmo autor, a velocidade máxima de carbonatação ocorre quando a temperatura encontra-se na faixa de 20°C.

Song *et al.* (2006) menciona ainda que a difusividade do CO₂ é aumentada devido ao aumento da energia de ativação. Houst *et al.* (2002) argumenta que a difusividade do CO₂ é melhorada com o acréscimo da temperatura, fato este que pode ser explicado pois, com o aumento da temperatura ocorre uma diminuição do conteúdo de umidade no interior da rede de poros do concreto, conseqüentemente existe uma melhora na difusividade do CO₂.

Por outro lado, com relação à influência da temperatura de exposição em ensaios acelerados de carbonatação, Papadakis *et al.* (1991) apresenta uma idéia de oposição. O autor cita que para temperaturas habituais, a influência parece não ser significativa sobre a profundidade de carbonatação.

Segundo Loo *et al.* (1994) *apud* Kulakowski (2002) que estudou a carbonatação em temperaturas variando de 20°C a 40°C, concluiu que a temperatura de exposição não se apresenta de maneira tão significativa para a reação de carbonatação como a concentração de CO₂. Neville (1997) compartilha da mesma idéia, afirmando que pequenas variações de temperatura exercem pouca influência sobre o processo de carbonatação do concreto.

3 ADIÇÕES MINERAIS

3.1 Adições minerais no concreto

As adições minerais vêm sendo incorporadas ao concreto estrutural ou utilizadas na fabricação de cimento composto há bastante tempo com o intuito de melhorar as propriedades de resistência mecânica e de durabilidade, associado à economia de custos de produção e à redução de impactos ambientais provocados pela indústria cimenteira. A utilização de adições minerais foi proporcionada, por um lado, pela preocupação ecológica para a obtenção de matérias-primas necessárias para a produção do concreto e, por outro, por fornecer meios de disposição dos resíduos agroindustriais como a CCA, de acordo com Neville (1997).

Segundo Mehta (1997) considerações econômicas e ambientais têm acentuado a utilização adições minerais ao concreto ou como constituintes para a produção de cimentos compostos. As adições minerais são divididas em dois grupos: sílica ativa (SA), a cinza volante com baixos teores de cálcio (CV/B) e a cinza de casca de arroz (CCA) são chamadas de pozolanas, sendo estes materiais que necessitam do CH para formar compostos resistentes; a escória de alto forno (E) e a cinza volante com altos teores de cálcio (CV/A) são chamadas de materiais cimentantes, ou seja, que não necessitam do CH presente no cimento Portland para formar produtos cimentantes, como o C-S-H. No entanto, no caso dos materiais cimentantes, a sua auto-hidratação é bastante lenta, e a quantidade de produtos cimentantes formados é insuficiente para a aplicação do material para fins estruturais, segundo Dal Molin (2005). Para ambos os materiais, o CH é o elemento ativador para a reação pozolânica, pois no primeiro caso o CH reage com a sílica presente nas pozolanas e no segundo acelera a hidratação dos materiais cimentantes.

Como grande parte destes resíduos possuem atividade pozolânica, isto é, são de origem silicosa e mineralogicamente amorfos, apresentando reatividade com a cal, a indústria da construção civil enquadra-se como sendo a mais indicada para consumi-los em produtos derivados do cimento Portland. A incorporação das

adições minerais ao concreto representa uma forma segura e viável economicamente de removê-los da superfície do solo, contribuindo para a conservação de energia e de recursos minerais (calcário e argila) cuja exploração geralmente agride o meio ambiente, segundo Isaia *et al.* (1999).

Segundo Aïtcin (2000), a maioria das adições minerais têm uma característica em comum: elas contêm alguma forma de sílica vítrea reativa que, na presença de água, pode combinar-se com o CH, à temperatura ambiente, para formar o C-S-H secundário. Para serem introduzidas no concreto as adições minerais necessitam ter finura e granulometria adequadas, e ainda devem ser bem conhecidas as suas características físicas e químicas. Papadakis (2002) salienta que a reatividade das adições minerais está intimamente ligada ao fato de que as mesmas possuem conteúdos significativos de constituintes ativos, principalmente a sílica ativa, que se combina com o CH produzido pelo processo de hidratação do cimento Portland. A sílica ativa, ou seja, que se apresenta na forma vítrea, que pode se combinar com o CH e formar os compostos de C-S-H de estrutura bastante similar aos produzidos pela hidratação do cimento, diferentemente da sílica cristalina, sendo que esta exibe baixa reatividade devido à sua estrutura cristalizada.

As pozolanas mais empregadas são a sílica ativa, gerada na siderurgia do silício, a escória de alto-forno, subproduto da fabricação do aço, a cinza volante, resíduo da queima de carvão mineral triturado em termoelétricas e a CCA originada na combustão da casca de arroz em fornalhas de caldeiras ou geradas pela queima da casca a céu aberto. Como se vê, todas são artificiais, subprodutos resultantes de um processo em que se tem outro objetivo. Por um lado são potencialmente poluidoras do meio ambiente, por outro lado, podem apresentar estrutura amorfa, que as torna reativas com os produtos hidratados do cimento, gerando vários benefícios ao concreto, quando a ele são incorporadas.

Kilinçkale (1997) menciona que as pozolanas apresentam diferentes propriedades sobre o aspecto de durabilidade do concreto, sendo que estas dependem da quantidade de sílica ativa presente em sua composição química além do seu tipo, finura, quantidade e tipo de cimento empregado na mistura aglomerante.

Uma pozolana é assim definida:

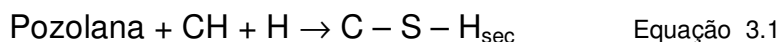
Material silicoso ou sílico-aluminoso que em si mesmo possui pouca ou nenhuma propriedade cimentante mas, numa forma finamente dividida e na presença de umidade, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio a

temperaturas ambientes para formar compostos com propriedades cimentantes (MEHTA & MONTEIRO, 1994, p. 217)

Esses autores, ao classificarem as adições minerais ao concreto, definem a CCA em duas formas distintas:

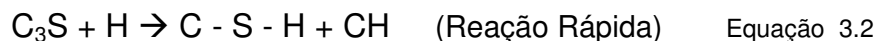
- Pozolana altamente reativa – quando o material é obtido por um processo de queima controlado e constituída essencialmente de sílica pura, na forma não cristalina e em estrutura celular.
- Pozolana pouco reativa – quando queimada em campo e constituída essencialmente por silicatos cristalinos, com uma pequena quantidade de matéria não cristalina, indicando que este material deve ser moído e reduzido a um pó muito fino, para desenvolver certa atividade pozolânica.

A reação principal que ocorre entre o CH liberado da hidratação do cimento Portland e a pozolana, chamada reação pozolânica, é a seguinte:



A reação pozolânica consome os cristais de CH, formando uma estrutura chamada C-S-H secundário, de estrutura bastante similar ao C-S-H produzido pela hidratação do cimento, com baixa densidade e menor relação C/S, contribuindo para o refinamento do tamanho dos poros, transformando vazios capilares grandes em muitos vazios de pequenos tamanhos. É fundamental que a pozolana esteja finamente subdividida, pois somente assim a sílica pode combinar com o CH (liberado pela hidratação do cimento Portland) na presença de água para formar silicatos estáveis que têm propriedades cimentícias. Deve ser notado que a sílica deve estar no estado amorfo, isto é vítreo, pois quando cristalina sua reatividade com a cal diminui consideravelmente.

A diferença básica entre a reação de uma mistura de cimento Portland e outra de cimento Portland e pozolana, está na velocidade de formação e forma do silicato de cálcio hidratado. A reação que ocorre no primeiro caso é a seguinte:



No caso do cimento Portland e pozolana a reação pode ser assim descrita:



Nas reações pozolânicas, de acordo com Massazza (1998), ocorre uma aceleração da hidratação do C_3S pelas partículas finas das pozolanas, liberando os íons Ca^{2+} e, posteriormente, formando o C-S-H com locais preferenciais de nucleação, fazendo com que este precipite na solução dos poros. Em outras palavras, acontece um mecanismo de dissolução e precipitação do CH, com a adsorção dos íons Ca^{2+} pelos íons Si^{4+} dissolvidos da superfície dos grãos da pozolana, com a conseqüente formação do C-S-H. A formação dos silicatos de cálcio hidratados C-S-H_{secundários}, de baixa densidade, contribui para o refinamento do tamanho dos poros, ou seja, a transformação de vazios capilares grandes em vazios de pequenos tamanhos.

Os efeitos benéficos proporcionados pelas reações pozolânicas são bastante significativos e são relatados por vários pesquisadores. Segundo Gastaldini (1996), as adições minerais, através das reações pozolânicas, reduzem a porosidade e a permeabilidade da pasta de acordo com sua reatividade com o CH. Soma-se isso, o fato de que as adições minerais propiciam um refinamento dos grãos de CH, que é a transformação dos grãos maiores de um componente em grãos menores, aumentando dessa forma a compacidade da pasta de cimento. Além disso, proporcionam o tamponamento ou obstrução dos poros capilares e distribuem de forma mais homogênea os produtos da hidratação do cimento Portland em relação a um concreto sem a incorporação de adições minerais, ocasionando dessa forma, uma diminuição do transporte de fluidos para o seu interior, segundo Metha & Monteiro, (1994).

Pramada (2005) menciona que uma das principais razões para a melhora das propriedades do concreto proporcionada pela incorporação da adição mineral pode ser atribuída a formação de maior quantidade de C-S-H gel no concreto, devido à reação da sílica presente no seu conteúdo e os íons Ca^{2+} , OH^- ou o CH produzido pela hidratação do cimento Portland.

A redução da porosidade resulta conseqüentemente em uma menor permeabilidade do concreto a fluidos, proporcionada pela alteração da microestrutura da pasta. Essa diminuição da permeabilidade do concreto é decorrente de ações físicas (microfiller) ocorridas no processo de hidratação dos aglomerantes, que bloqueiam ou obstruem os poros e vazios pela ação dos grãos mais finos oriundos das adições minerais, e químicas (pozolânicas), as quais promovem o refinamento do tamanho dos grãos, as quais ocorrem do processo de hidratação dos cimentos, através do consumo de cristais de CH, conforme Isaia *et al.* (2000).

Embora as vantagens técnicas e econômicas advindas da substituição de cimento por adições minerais sejam inegáveis, alguns efeitos colaterais são decorrentes de sua utilização, como a menor reserva alcalina devido ao consumo do CH pelas reações pozolânicas. Este efeito tem como derivativo a maior velocidade de carbonatação. Como a substituição do cimento por pozolanas reduz a reserva alcalina e o pH da fase intersticial, faz-se necessários estudos que viabilizem o emprego de adições minerais no concreto, de forma a compatibilizar o período de utilização da estrutura de concreto armado com a vida útil de projeto, principalmente para o caso da neutralização do concreto.

De fato, estas adições, por utilizarem o CH oriundo da hidratação do cimento, promovem, em um menor intervalo de tempo as reações de neutralização, o que, para o concreto em si, não traz conseqüências danosas. Entretanto, para a armadura, em virtude da diminuição do pH de 12,0 para 8,5, resulta na despassivação da mesma, acarretando em uma predisposição ao processo de corrosão do aço em estruturas de concreto armado. O desenvolvimento das reações pozolânicas, portanto, induz a uma diminuição nos teores de CH na solução dos poros do concreto, fazendo com que necessite menor quantidade de CO₂ para reagir com o CH e formar os carbonatos, segundo Neville (1997). Este processo, conseqüentemente, aumenta a velocidade de carbonatação, pois a difusão do CO₂ nos poros é mais rápida devido à menor quantidade de CH disponível para reagir.

Segundo Venquiaruto (2002), que pesquisou a carbonatação em concretos com diferentes tipos de adições minerais, a resistência de concretos com a incorporação de adições minerais frente ao ingresso de CO₂ é inferior àqueles somente compostos de cimento Portland. Nepomuceno *et al.* (2006) compartilha da mesma opinião sobre o assunto.

De acordo com Sulapha *et al.* (2003) que pesquisaram a carbonatação em concretos com a incorporação de adições minerais comparando os resultados obtidos com o concreto de referência, concluíram que o efeito proporcionado pela redução da quantidade de CH na solução dos poros do concreto é dominante sobre o efeito do refinamento dos poros causado pela incorporação de adições minerais aos concretos, quando a variável de durabilidade requerida é a carbonatação.

Evidencia-se que a utilização de adições minerais ocasiona vantagens técnicas e econômicas substanciais ao concreto. Entretanto, a menor produção de CH decorrente do processo de hidratação do cimento aliada ao consumo de CH ocasionado pelas reações pozolânicas resulta em um decréscimo na quantidade remanescente deste na solução dos poros do concreto diminuindo, desta forma, a reserva alcalina do concreto, propiciando um avanço mais acentuado da frente de carbonatação em um determinado intervalo de tempo e concentração de CO₂. Esta reação pode vir a desencadear a despassivação da armadura e promovendo o potencial processo de corrosão das armaduras no caso do concreto armado.

3.2 Cinza de casca de arroz

A CCA é um subproduto agrícola originado da queima da casca de arroz, a qual pode ser obtida pela combustão com controle de temperatura, em fornos de olarias para a fabricação de tijolos, em engenhos para a secagem dos grãos, e pela queima não controlada a céu aberto.

A casca do arroz, segundo o Dal Molin (2005) é uma dura capa lenhosa, com elevado teor de sílica, composta aproximadamente por 50% de celulose, 30% de lignina e 20% de sílica anidra. A casca representa um revestimento ou capa protetora formada durante o crescimento do grão, de baixa densidade, elevado volume e altamente porosa, onde a variedade do teor de sílica da amostra depende também da safra, da variedade plantada, do clima e das condições do solo, além da sua localização geográfica, conforme salienta Pouey (2006).

A CCA produzida pela queima da casca a céu aberto ou pela combustão não controlada em fornos industriais geralmente contém uma grande proporção de

minerais de sílica não reativos, tais como a cristobalita e a tridmita, segundo Sensale (2000).

Devido à ausência de controle do processo de queima, diz-se que a CCA produzida sem controle de temperatura é chamada de CCA residual. Segundo Rego (2002), a necessidade de implementar estudos com a CCA é de extrema importância, pois estar-se-á contribuindo para mostrar a viabilidade ou não do uso de enorme quantidade de CCA residual existente no mercado nacional, queimada a céu aberto, especialmente no RS, que representa praticamente a totalidade dos modos de queima da CCA no país. A necessidade de se dar um destino nobre à casca de arroz tem motivado vários pesquisadores a vislumbrar o emprego de CCA como adição mineral em concretos. Soma-se a isso, a lacuna propiciada pela falta de maiores subsídios sobre as características físico-químicas da CCA residual “in natura”, quando comparada com a CCA beneficiada, bem como a colocação dos materiais na betoneira, para otimizar a auto-moagem da CCA “in natura”, quando a variável de durabilidade requerida é a carbonatação do concreto. Além disso, optou-se por avaliar o desempenho do concreto com a incorporação de CCA residual “in natura” em conjunto com o tipo de cimento mais empregado em território brasileiro, o CP II F-32. Pelas razões enunciadas acima, optou-se pelo estudo da CCA residual “in natura”, sem nenhum tipo de beneficiamento, nesse estudo laboratorial.

Segundo Houston (1972) que avaliou a composição química de diversas amostras de CCA de diferentes partes do mundo, concluiu que a variação entre os elementos parece ser não significativa, onde os teores de sílica aproximadamente ficam na faixa de 90% a 95%. O silício contido na casca do arroz ocorre geralmente em uma forma amorfa hidratada de sílica, com uma estrutura em estado similar ao vítreo ou na forma de gel. Quanto às alterações no concreto promovidas pela utilização da CCA, seja como adição ou substituição parcial ao cimento Portland, pode-se afirmar que as mesmas estão condicionadas às suas características físicas, químicas e história térmica disponibilizada pelo processo de combustão da casca.

Quanto à finura, a CCA está representada pela sua elevada superfície específica, que é determinada por adsorção de nitrogênio e gira ao redor de 50000 a 60000 m²/kg, quando produzidas industrialmente, segundo Mehta & Monteiro (1994). A alta reatividade da CCA, comparável à da sílica ativa, se deve ao fato de que ao ser formada a baixas temperaturas, apresenta superfície microporosa, conforme a figura 3.1, facilitando assim a formação de C-S-H secundário. Em vista

desta característica, a CCA desperta significativo interesse no meio técnico e científico.

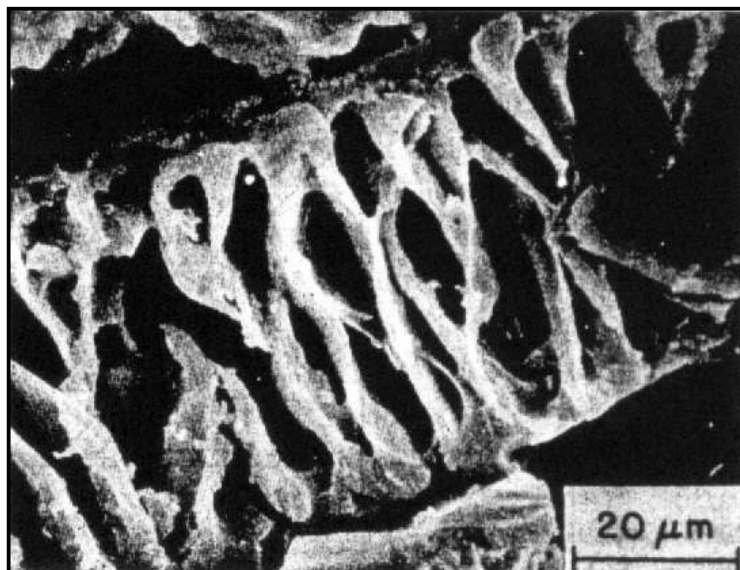


Figura 3.1 – Micrografia de cinza de casca de arroz (METHA & MONTEIRO, 1994, p. 300).

Sua utilização configura em uma das soluções para o problema ambiental gerado pela deposição deste material, reduzindo as áreas necessárias para descarte deste resíduo agroindustrial e minimizando os riscos potenciais de poluição ao meio ambiente. Por fim, sua incorporação ao concreto implica em uma redução de custos e de energia, na manutenção das reservas naturais e na possibilidade de melhoria do desempenho de algumas variáveis de durabilidade dos concretos que receberem tal adição. Desta forma, a utilização de CCA residual “in natura” é justificada por contribuir para a despoluição dos ambientes, por acarretar em uma sensível economia de energia relacionada à produção do clínquer e, por proporcionar a possibilidade de conservação das reservas naturais de calcário e argila. Além disso, por apresentar uma possibilidade de redução no custo final do concreto, quando a ele incorporado.

3.2.1 Temperatura e tempo de queima

A temperatura de queima e as condições de exposição às quais a casca do arroz estará submetida para a obtenção da CCA apresentam forte influência sobre

as características físicas e químicas da amostra. A CCA, quando moída adequadamente, torna-se um material muito fino, onde o tamanho da partícula e a sua área específica e conseqüentemente a sua reatividade são dependentes das condições de combustão da casca, segundo Zhang & Malhotra (1995).

James & Rao (1986) relataram resultados de um estudo abrangente do Institute of Science of Bangalore, Índia, do efeito das condições de queima da casca de arroz sobre as características físicas e a atividade pozolânica da CCA produzida. Pesquisaram a morfologia, o tamanho das partículas, área específica, distribuição dos poros e as fases cristalográficas. Os autores estudaram a CCA em diferentes temperaturas de queima, 400 °C, 500 °C, 600 °C, 700 °C, 800 °C e 900 °C em períodos de exposição à queima, variando de uma a trinta horas. Os autores concluíram que a reatividade da CCA é fortemente influenciada pela temperatura a qual a mesma é produzida e mencionam que a maior atividade pozolânica foi apresentada pelas amostras produzidas a uma temperatura estabelecida na faixa de 500 °C.

Conforme Chopra (1979) *apud* Sensale (2000), analisou a difração de raio-X em amostras de CCA obtida por combustão durante um período de duas horas a 600 °C, e observou que a CCA continha sílica na sua fase amorfa, permanecendo basicamente amorfa para temperaturas até 700 °C. O autor ainda menciona que com o aumento do período de exposição e da temperatura de combustão, a sílica tende a apresentar formas cristalinas, reduzindo deste modo sua atividade pozolânica.

El-Hosiny *et al.* (1997) pesquisaram pastas de cimento com a incorporação de CCA queimada em diferentes temperaturas de queima 450 °C, 700 °C e 1000 °C, com um teor em substituição de cimento Portland de 15% em massa. Por meio de sua pesquisa, verificaram que as CCA's produzidas em temperaturas entre 450 °C e 700 °C apresentaram boa atividade pozolânica, enquanto que a CCA produzida a temperatura de combustão de 1000 °C apresentou pouca reatividade com o CH. Os autores creditam esse fato à formação de cristais de cristobalita e de tridmita na amostra de CCA queimada na temperatura de 1000 °C.

Na mesma linha de pesquisa Isaia (1995), relata que quando a CCA é originada por meio de queima controlada entre 400 °C e 600° C ter-se-á sílica amorfa abundante e, conseqüentemente, altamente reativa com compostos hidratados do cimento. Da mesma forma, Neville (1997) enaltece o alto teor de sílica presente na casca de arroz, a qual com tratamento a uma temperatura entre 500 °C e 700° C resulta um material amorfo com uma estrutura preponderantemente porosa.

Segundo Chaudhary (2002) a CCA é um sub-produto agrícola, em que a quantidade de sílica ativa é reduzida quando as temperaturas de queima são superiores a 500°C. Além disso, o autor ainda defende que um aquecimento acima desta temperatura proporcionará a formação de cristais de cristobalita e de tridmita e não ocorrerá a remoção das impurezas da CCA, como o teor de carbono. A CCA, em geral, apresenta uma coloração variando do preto ao cinza, devido basicamente às impurezas orgânicas, originadas devido ao teor de carbono não queimado, conforme Pouey (2006). Quanto mais escura a amostra de CCA, maior o teor de carbono não queimado, ou seja, maior a quantidade de matéria orgânica não queimada durante o processo de combustão da casca de arroz. Agarwal (2006) pesquisou a atividade pozolânica de vários materiais silicosos verificando a influência do teor de carbono presente nas amostras de CCA com relação à sua reatividade. O autor concluiu que, para a CCA, quando o teor de carbono das amostras aumentou de 13% para 20% a atividade pozolânica da CCA decresceu de 26% para 23%.

Para a incorporação de CCA como substituição parcial ao cimento Portland para a produção de concreto estrutural, a indústria do cimento necessita de um material pozolânico de qualidade e de padrão adequado para a sua utilização, ou seja, os métodos de produção da CCA devem garantir as características de homogeneidade e reatividade do produto final. Segundo Rego (2006) a diferença básica entre a CCA residual produzida sem o controle de temperatura de queima e da CCA produzida em condições controladas é a quantidade de material amorfo nas cinzas. Verifica-se dessa forma, que a obtenção de uma CCA com alta reatividade exige um processo de produção com tempo de exposição ou residência e de temperatura de queima controlados.

A indústria do cimento, atualmente, produz um material de elevada qualidade e uniformidade, fornecendo à indústria da construção civil um produto de padrão controlado. Desta forma, as condições necessárias para a padronização das características da CCA possibilitando a sua utilização no concreto, ou como incorporação na fabricação de um cimento composto, passam pela uniformização das condições de queima e de período de exposição. Justamente esses fatores são os principais obstáculos para a sua utilização como material pozolânico em concretos estruturais, conforme defende Sugita (2004).

No entanto, diversas pesquisas comprovam que mesmo aquelas CCA's originadas de processos de queima não controlados podem apresentar características pozolânicas satisfatórias (ISAIA, 1995; RÉGO *et al.*, 2004; RODRIGUEZ de SENSALE & REINA, 2004).

Isaia (1995) faz críticas à linha de raciocínio que pré-define CCA's que tenham em sua composição a presença marcante de fases cristalinas, como sendo de baixa pozolanidade, sem que tenham sido apresentadas evidências de baixo desempenho quando adicionadas a concretos ou argamassas. O autor questiona a importância destas fases cristalinas nas CCA's para o desempenho dos concretos, quando analisadas isoladamente. Em sua opinião o que importa são os resultados que estas CCA's apresentam, em relação a uma mistura de referência, quando substituem parte do cimento na mistura aglomerante.

Rego (2002) demonstrou a potencialidade da utilização de CCA residual como adição mineral. A CCA residual, quando moída em moinho de bolas por um período de 5 horas, apresentou índice de atividade pozolânica com o cimento de 85%, considerado já como material pozolânico, tendo em vista que a NBR 12653 determina o valor de 75% para a especificação do material como pozolana.

A amostra de CCA empregada para a elaboração deste projeto não apresentou nenhum tipo de controle de temperatura e de período de exposição ou residência durante todo o processo de queima da casca de arroz, sendo a amostra classificada como CCA residual. O processo de combustão da casca do arroz foi realizado no interior das fornalhas da indústria de beneficiamento de arroz localizada na cidade de Santa Maria /RS.

3.2.2 Tempo de moagem

O tempo de moagem ao qual a amostra de CCA será exposta, também apresenta influência marcante sobre a reatividade da cinza, tendo em vista que o processo de moagem proporciona um maior refinamento dos grãos da amostra de CCA. Após um processo de moagem, as partículas ficam mais finas passando a desenvolver maior índice de atividade pozolânica e influenciar significativamente na resistência à compressão, mesmo que demonstrem elevada cristalinidade no

diagrama de difração de raio-x, de acordo com Mehta & Monteiro (1994). Nesse aspecto, a CCA tem comportamento similar ou até melhor que a sílica ativa, devido a sua alta reatividade quando a queima for controlada.

De acordo com Santos (1997) *apud* Sensale (2000), o processo de moagem da cinza apresenta influência sobre a reatividade da mesma com o CH. O autor pesquisou CCA's residuais produzidas por diversos tipos de queima sem controle de temperatura e de tempo de exposição. Na mesma pesquisa, os diferentes tempos de moagem da CCA levaram a distintas superfícies específicas do material, concluindo que, para cada CCA produzida por um diferente tipo de queima, possui seu tempo de moagem ótimo para atingir a maior pozolanicidade (IAP).

Bouzoubaâ (2001) pesquisou concretos com a incorporação de CCA com períodos de moagem de 80, 140 e 200 segundos. De acordo com os resultados obtidos, o autor verificou que o tamanho da partícula diminuiu com o aumento do tempo de moagem para o máximo de 200 segundos. O decréscimo foi de 40 μ m para 8,3 μ m com um tempo de moagem de 140 segundos e 40 μ m para 7,5 μ m com um tempo de moagem de 200 segundos. Além disso, o autor comenta que o decréscimo do tamanho da partícula foi maior durante os primeiros 140 segundos de moagem.

Rego (2002) pesquisou a CCA residual onde as amostras foram moídas por um período de 3 e de 5 horas. De acordo com os resultados, o autor verificou que para o tempo de moagem de três horas, o diâmetro médio de partícula da amostra foi de 19,78 μ m, enquanto que para o tempo de moagem de cinco horas o diâmetro médio de partícula da amostra foi de 15,19 μ m. Além disso, o autor comprovou a redução da reatividade da amostra com o aumento do diâmetro médio das partículas. O índice de atividade pozolânica com o cimento Portland decresceu de 84,50% para 77,70% quando o tempo de moagem foi reduzido de cinco para três horas. Dessa forma, pode-se verificar a importância da finura da partícula para a atividade pozolânica da amostra de CCA.

Silveira *et al.* (1996) fizeram um experimento com queima controlada de CCA a 700°C e 1100°C, com dois tempos de moagem, de uma hora e meia e de três horas, e obtiveram a CCA de maior superfície específica BET (41,5 m²/g) na temperatura de 700 °C e tempo de moagem de três horas. A pozolanicidade também se mostrou menor para cinza queimada a 1100°C quando comparada à cinza queimada a 700°C. Comparando-se as amostras com a mesma temperatura de

queima 700°C e 1100°C, porém com diferentes tempos de moagem (uma hora e meia e três horas), concluíram que a superfície específica da cinza cresceu com o aumento do tempo de moagem empregado às amostras.

Guedert (1989) *apud* Rego (2002) avaliou a eficiência de moagem através da medida da área específica, obtida em CCA queimada sem controle de temperatura. Os resultados mostraram claramente o crescimento da área superficial com o aumento do tempo de moagem, correspondentes a 1, 2, 4 e 8 horas. Para esses tempos de moagem respectivos, as amostras de CCA foram submetidas ao ensaio de pozolanicidade com a cal, que indicou também um crescimento da resistência à compressão aos 7 dias com o aumento da área específica.

De acordo com Wada *et al.* (2000), que verificaram a influência da finura de três CCA's, com superfícies específicas BET de 112, 53 e 42 m²/g, e de uma sílica ativa, com superfície específica de 18,9 m²/g, na resistência à compressão e a ácidos em argamassas com 5% a 40% de adição em relação à massa de cimento. Também foram realizados ensaios de resistência à abrasão, de expansão álcali-sílica, de distribuição de poros e difração de raio-X. Em todas as substituições, a CCA de maior finura foi a que obteve melhor desempenho na resistência à compressão e na resistência a ácidos. A sílica ativa, que apresentava menor superfície específica, obteve os piores desempenhos nos ensaios. A distribuição e a redução do tamanho dos poros da argamassa também foi mais eficiente nas amostras com maior finura para o mesmo percentual de adição.

Frizzo (2001) analisou duas amostras de CCA de diferentes finuras, uma com diâmetro médio de partícula de 11,25 µm e superfície específica BET 23,00 m²/g e outra amostra de CCA com diâmetro médio de partícula de 9,45 µm e superfície específica BET 36,30 m²/g. Por meio de ensaios de permeabilidade a oxigênio, o autor demonstrou que a amostra com o diâmetro médio de 9,45 µm apresentou maior reatividade devido a da diminuição dos coeficientes de permeabilidade a oxigênio para o teor de 50% de substituição de cimento por CCA, nas três relações a/ag empregadas, 0,35, 0,50 e 0,65, em comparação com a amostra de diâmetro médio de partícula de 11,25 µm.

Como exposto acima, verifica-se a importância da moagem para que a amostra de CCA apresente seu maior potencial de atividade pozolânica. Sabe-se

que quanto mais fina for a amostra de CCA, maior será a sua reatividade com o CH proveniente do processo de hidratação do cimento Portland.

Porém, estima-se que, quando se compara CCA residual beneficiada (moída) com a CCA residual “in natura”, ocorra um decréscimo desta em relação à CCA residual beneficiada tanto da resistência mecânica quanto das propriedades de durabilidade do concreto, para mesmos teores de substituição e relação a/ag. Com o objetivo de se fornecer resposta a esse questionamento, através deste projeto de pesquisa, buscou-se, analisar as amostras de CCA residual do tipo “in natura” e com beneficiamento e através dos resultados dos ensaios laboratoriais de parâmetros de durabilidade, avaliar a viabilidade técnica do emprego de CCA residual “in natura” ao concreto estrutural.

3.3 Efeitos da CCA no concreto

Muitas propriedades apresentadas pelos concretos decorrentes da incorporação da CCA ao concreto têm sido reportadas por diversos pesquisadores na área tecnológica. Pouey (2006) verificou que ao ser incorporada ao concreto em substituição ao cimento, a CCA modifica a microestrutura da pasta, pois ao se combinar com o CH, gera uma pasta menos heterogênea, mais resistente e apresentando um menor calor de hidratação.

Além da reação química, a CCA promove o efeito microfiller, devido ao tamanho das partículas, uma vez que se introduzem entre os grãos de cimento e se alojam nos interstícios da pasta. Tal ocupação reduz os espaços disponíveis para a água e atua como pontos de nucleação, dificultando, assim, a formação de cristais de CH orientados de forma preferencial.

Quanto ao processo de aceleração da hidratação do cimento Portland em decorrência da incorporação de CCA, Zhang & Malhotra (1995) pesquisaram pastas e concretos com a incorporação de 10% de CCA e 10% de SA, como adições minerais em substituição ao cimento Portland em massa e verificaram que, para a mistura de referência, o valor em percentual de cimento não hidratado foi de 22%, depois de 28 dias de cura úmida. Quando houve a substituição de cimento por SA com teor de 10%, a quantidade de partículas não hidratadas de cimento apresentou

um decréscimo para 20%. Para a incorporação de CCA com teor de 10%, a quantidade de partículas de cimento anidro apresentou uma diminuição para 18%.

Os autores afirmam que a incorporação de CCA promoveu uma aceleração da hidratação das partículas de cimento.

Segundo Mehta & Monteiro (1994), para uma determinada consistência do concreto, o emprego de materiais muito finos, de área específica muito elevada, tal como a CCA, tende a aumentar a demanda de água necessária para uma trabalhabilidade anteriormente estabelecida. Ismail *et al.* (1996) pesquisaram concretos com a incorporação de CCA nos teores de 0%, 10%, 20% e 30% em substituição ao cimento Portland. Segundo os autores, enquanto observavam as características do concreto fresco, eles notaram que quando o cimento era substituído por teores crescentes de CCA, a trabalhabilidade dos concretos decrescia consideravelmente nos traços investigados. Os autores creditam esse fato à grande quantidade de material fino nas misturas e devido a este fator, um teor maior de aditivo superplastificante foi necessário para atingir a trabalhabilidade requerida.

Quanto aos aspectos reológicos, conforme Mehta & Monteiro (1994), os concretos frescos mostram uma tendência à exsudação e à segregação. Por outro lado, a incorporação de partículas finas, como as partículas de CCA, tende a propiciar uma melhor coesão devido à redução do tamanho e do volume dos vazios. Zhang & Malhotra (1995) empregando uma relação a/ag de 0,40 e com um teor de substituição de cimento Portland por CCA de 10%, observaram que a exsudação do concreto tornou-se praticamente desprezível. Desta forma, os autores salientam que o emprego de CCA ao concreto tende a produzir concretos mais coesos, com redução considerável da tendência à segregação e à exsudação, quando comparados a concretos sem a incorporação de CCA.

Outro aspecto relevante sobre as propriedades que a CCA confere aos concretos quando adicionada aos mesmos é em relação ao calor de hidratação. A reação de hidratação dos compostos do cimento é exotérmica, onde ocorre o desprendimento de energia, podendo alcançar 500J/g de cimento conforme Neville (1997). De acordo com Dal Molin (2005) o calor de hidratação pode ser substancialmente reduzido pela substituição de clínquer de cimento Portland por CCA, onde a quantidade de clínquer diminui e ocorre uma menor liberação de calor

durante as reações de hidratação do cimento Portland. Como a reação pozolânica em geral é mais lenta, e ocorre somente após a liberação de CH proveniente da hidratação do C_2S e C_3S , o calor proveniente da reação pozolânica somente será liberado após o pico de calor promovido pela hidratação do cimento. De acordo com Mehta & Monteiro (1994), o calor de hidratação total produzido pelas reações pozolânicas envolvendo adições minerais, entre elas a CCA pode ser considerado como metade do valor médio produzido pela hidratação do cimento Portland.

Segundo Mehta (1989) *apud* Sensale (2000), os concretos com a incorporação de CCA desenvolvem menor calor de hidratação aos 7 e 28 dias que os concretos sem a incorporação de CCA.

3.3.1 Resistência à compressão axial

Torna-se consensual afirmar que o emprego de CCA em substituição ao cimento Portland acarreta benefícios ao concreto. Alguns deles são obtidos por meio dos efeitos físicos proporcionados pelo tamanho das partículas de CCA e em outros pelas reações pozolânicas, resultado da combinação entre a sílica ativa presente na amostra de CCA e o CH proveniente do processo de hidratação do cimento Portland.

Sensale (2006) pesquisou concretos com a incorporação de CCA de diferentes procedências, uma amostra oriunda do Uruguai, sendo essa residual e uma amostra de CCA proveniente dos EUA, sendo essa última produzida por controle de temperatura e de período de combustão da casca. A autora pesquisou a resistência à compressão axial em idade de 91 dias em concretos produzidos com a incorporação de 10% e 20% de CCA em substituição ao cimento Portland e em três relações a/ag 0,32, 0,40 e 0,50. A composição química demonstrou que, ambas as amostras continham grande porcentagem de sílica em sua composição, sendo a amostra de CCA uruguaia com um teor de 87,2% e a norte-americana com 88,0% e um teor de sílica amorfa de 98,5% para a CCA norte-americana e de 38,5% para a CCA uruguaia. Através de ensaios de difração de raio-x, a autora verificou que a CCA norte-americana poderia ser considerada como amorfa enquanto que a CCA uruguaia apresentava materiais cristalinos em sua composição, entre eles a cristobalita. Analisando os resultados, verificou que para a relação a/ag de 0,32, o

teor de 10% de substituição praticamente apresentou os mesmos valores tanto para a CCA uruguaia como também para a amostra norte-americana, por outro lado, o teor de 20% de substituição apresentou um valor cerca de 10% superior para a amostra norte-americana em relação à amostra uruguaia.

Para a relação de 0,50, para ambos os teores de 10% e 20% de substituição, os valores apresentados pelas amostras norte-americanas foram superiores às uruguaias em 25% e 40% respectivamente. Com conclusão da pesquisa, credencia os níveis elevados de resistência à compressão em concretos compostos com CCA residual uruguaia devido à ação principal do microfiller ocasionado pelas partículas finas da CCA. Por outro lado, em concretos elaborados com CCA norte-americana, o efeito pozolânico torna-se mais pronunciado na taxa de desenvolvimento da resistência mecânica dos concretos analisados, devido ao maior teor de sílica ativa (98,5%) presente em sua composição química.

Em pesquisa realizada por Isaia *et al.* (2000), que investigaram a substituição de cimento por teores de 12,5%, 25% e 50% de CCA, nas relações a/ag 0,35, 0,50 e 0,65, constatou-se, aos 91 dias, acréscimos na resistência para os três teores acima citados. Quando se observam os valores obtidos frente ao referencial na relação a/ag de 0,35, enfatizando como valor máximo 79,4 MPa contra 68,8 MPa do referencial, valor este ocorrido no concreto com 25% de cinza de casca de arroz.

Na relação 0,50, o concreto com adição de 12,5% de CCA apresentou valor inferior ao referencial, enquanto que, nos teores de 25% e 50% valores superiores ao concreto de cimento Portland foram constatados, salientando-se como valor máximo 61,1 MPa oriundo do concreto com 25% de adição. Ao empregar uma relação a/ag 0,65, o concreto com 50% de CCA apresentou resistência à compressão inferior ao referencial. Entretanto, para os teores de 12,5% e 25% valores superiores foram averiguados e, novamente, o concreto com teor de 25% apresentou o maior valor de resistência (42,8 MPa).

Hoppe (2005) investigou a resistência à compressão em concretos produzidos com CCA e CP V ARI com três relações a/ag 0,35, 0,50 e 0,65 para a comparação das misturas (com 10%, 20% e 30% de CCA), na idade de 91 dias, com o concreto de referência (REF). Observou que, para a relação a/ag 0,35, os concretos com a incorporação de 10%, 20% e 30% de CCA apresentaram valores de resistência à compressão 13%, 26% e 16% superiores, respectivamente. Para a relação a/ag 0,50, as misturas com 10%, 20% e 30% de CCA apresentaram valores 21%, 22% e

27% superiores e, para a relação a/ag 0,65, essas mesmas misturas apresentaram acréscimos, nos valores de resistência à compressão, de 10%, 19% e 7%, respectivamente em relação ao concreto de referência.

Rego *et al.* (2002) pesquisaram concretos com a incorporação de CCA residual para a produção de concretos com substituição de cimento Portland por CCA nos teores de 0%, 5%, 10% e 20% com uma relação a/ag estipulada de 0.35. O objetivo dessa pesquisa foi a comparação de dados de resistência à compressão axial dos concretos produzidos, nas idades de 7, 28 e 63 dias. Para a idade de 7 dias, os teores de substituição de 5% e 10% apresentaram respectivamente um aumento de resistência à compressão de 6,3% e 1,4 % enquanto que o teor de 20% apresentou um decréscimo de 6,2% em relação ao concreto de referência. Já para a idade de 28 dias, todos os concretos com a incorporação de CCA apresentaram valores de resistência à compressão superiores ao concreto de referência. Mesma tendência foi demonstrada para a idade de 63 dias, com valores 6,0%, 4,8% e 6,5% superiores ao concreto de referência, para os teores de substituição de 5%, 10% e 20% respectivamente.

Com relação à resistência à compressão, o emprego de CCA ao concreto traz ganhos significativos na taxa de desenvolvimento de resistência nas primeiras idades, principalmente devido ao efeito microfiller. Como efeito, Mehta & Folliard (1995) argumentam que exceto a CCA, nenhum outro material pozolânico, incluindo-se a sílica ativa, tem a habilidade de contribuir para o aumento na resistência mecânica do concreto em baixas idades, como 1 e 3 dias.

3.3.2 Densificação da zona de transição e redução da porosidade

Com o objetivo de se avaliar os efeitos da CCA acarreta na zona de transição Zhang & Malhotra (1996) pesquisaram concretos com a incorporação de 10% de CCA e 10% de sílica ativa como adições minerais, em substituição ao cimento Portland (em massa) analisando-os em função da distância da superfície do agregado na idade 28 dias. Os autores verificaram que a uma distância de 20 μ m da superfície do agregado a porosidade da pasta de controle, com CCA e SA foram 25%, 18% e 10% respectivamente. Para a distância de 33 μ m a porosidade foi de

17%, 9% e 7%, respectivamente. Observa-se que a incorporação de CCA reduziu a porosidade da zona de transição entre o agregado e a matriz pasta de cimento em comparação à mistura sem a incorporação de adição mineral. Além disso, a incorporação de CCA e de SA segundo os autores, acarretou em diminuição da espessura da zona de transição entre o agregado e a matriz pasta de cimento. Tanto o refinamento do tamanho dos poros proporcionado pelo tamponamento da rede de poros devido à formação do C-S-H secundário como o refinamento dos grãos ocasionado pelo consumo das partículas maiores de CH proporcionam o aumento da resistência da zona de transição, que para concretos convencionais, representa o elemento mais vulnerável à presença de microfissuras no concreto, de acordo com Mehta & Monteiro (1994).

3.3.3 Carbonatação acelerada

Com relação à carbonatação acelerada, sabe-se que muitos fatores influenciam a taxa de desenvolvimento da reação, a saber: grau de saturação dos poros, teor de umidade, concentração de CO_2 , tipo de cimento, teor de adição mineral empregado, temperatura e agressividade ambiental. Conceito importante é o de reserva alcalina, onde os concretos com a incorporação de CCA apresentam uma predisposição a apresentar coeficientes de carbonatação superiores ao concreto de referência para as mesmas idades e relações a/ag . Este comportamento está associado basicamente à maior reserva de CH que o cimento Portland proporciona ao concreto, pois existe maior quantidade de CH disponível para ser consumido pelo CO_2 nas reações de carbonatação, necessitando primeiro baixar o pH da solução para depois continuar avançando, fazendo com que a profundidade carbonatada progrida lentamente, diminuindo, assim, os coeficientes de carbonatação.

Venquiaruto (2002) pesquisou a carbonatação acelerada em concretos com CCA nos teores de 25% e 50% de substituição parcial ao cimento Portland, em três relações a/ag 0,35, 0,50 e 0,65, além de duas finuras das amostras $23,0\text{m}^2/\text{g}$ (finura 1) e $36,3\text{m}^2/\text{g}$ (finura 2). Segundo a autora todas as misturas com a incorporação de CCA apresentaram coeficientes de carbonatação superiores à mistura de referência para as relações a/ag 0,50 e 0,65. Para a relação a/ag 0,35, somente as misturas

1CA50 (finura 1 com 50% de substituição) e 2CA50 (finura 2 com 50% de substituição), carbonataram. Além disso, observou que a variação do teor de 25% para 50% contribuiu para o aumento dos coeficientes de carbonatação.

Para a relação a/ag 0,50, as misturas 1CA50 e 2CA50 apresentaram os coeficientes de carbonatação 106% e 48% superiores as misturas 1CA25 (finura 1 com 25% de substituição), e 2CA25 (finura 2 com 25% de substituição), respectivamente. Para a relação a/ag 0,65, o aumento do coeficiente de carbonatação, para as misturas 1CA50 e 2CA50, foram de 120% e 19% em relação às misturas 1CA25 e 2CA25.

Vaguetti (1999) pesquisou a carbonatação acelerada em concretos contendo baixos e elevados teores de adições minerais, entre elas a CCA, em misturas binárias. Os níveis de substituição foram para a CCA em mistura binária de 25% e 50%. O cimento empregado na pesquisa foi o tipo CP V - ARI, com três relações a/ag 0,35, 0,45 e 0,55 e dois diferentes período de cura ao ar, de 28 e 91 dias.

Analisando-se o desempenho das misturas em relação a carbonatação acelerada na idade de cura dos 28 dias e resistência de 60MPa, o concreto com a incorporação de CCA apresentou coeficiente $1,77 \text{ mm}/\sqrt{\text{semana}}$ para o teor de 25% de substituição. Nas misturas binárias com teor de 50%, concreto com a incorporação de CCA apresentou o coeficiente de carbonatação $14,41 \text{ mm}/\sqrt{\text{semana}}$. De acordo com seus resultados, o autor conclui que, as misturas que apresentaram melhor desempenho neste experimento, considerando a idade de pré-cura aos 28 dias, em relação à carbonatação acelerada com a incorporação de adições minerais, foram a CV (25%) e a CCA (25%) para os traços binários, todos com coeficientes abaixo de $2,0 \text{ mm}/\sqrt{\text{semana}}$. O autor concluiu que todas as misturas com pozolanas apresentaram maior coeficiente de carbonatação que o concreto de referência (sem a incorporação de adições minerais), independentemente do período de pré-cura ao ar dos concretos investigados.

Vaguetti (2005) analisou os coeficientes de carbonatação para concretos com incorporação de adições minerais, 25% de CV (VB), 50% de CV (VA), 25% de CCA (A) e 70% de E (E), além da mistura de referência, TR. Para verificar a influência de cada adição mineral frente ao comportamento da carbonatação, o autor fixou uma resistência mecânica de 40 MPa para a análise dos seus resultados. Quando houve a comparação entre os teores de 25% de incorporação (VB e A), os coeficientes de

carbonatação foram respectivamente $8,62 \text{ mm}/\sqrt{\text{semana}}$ e $4,57 \text{ mm}/\sqrt{\text{semana}}$. O autor credita esse fato devido à maior reatividade pozolânica da CCA quando comparada à reatividade da CV, contribuindo para isso o maior refinamento dos poros do concreto elaborado com a CCA em relação à CV.

Sperb (2003) pesquisou a carbonatação com a CCA, no teor de 20% de substituição de cimento por CCA, (20 A) com e sem a presença de ativadores químicos, o sulfato de potássio (K_2SO_4), sulfato de sódio (Na_2SO_4), em três relações a/ag 0,35, 0,50 e 0,65. O coeficiente de carbonatação médio para o traço de referência foi $7,194 \text{ mm}/\sqrt{\text{semana}}$. Para a mistura 20 A sem ativador, o Kc médio apresentado foi de $7,245 \text{ mm}/\sqrt{\text{semana}}$. Para a mistura (20 A Na_2SO_4 1%), o Kc médio apresentado foi de $7,468 \text{ mm}/\sqrt{\text{semana}}$. Apenas a mistura (20 A K_2SO_4 1%) apresentou Kc inferior ao valor apresentado pelo concreto de referência, sendo o valor de $5,156 \text{ mm}/\sqrt{\text{semana}}$. O autor credita esse fato ao elevado valor de pH, de 12,14 a 12,71 apresentado com o uso deste ativador, com valor pouco abaixo da mistura de referência.

3.3.4 Teor de hidróxido de cálcio remanescente

A incorporação de CCA ao concreto, em substituição ao cimento Portland promove a densificação da pasta, com refinamento dos poros e aumento da tortuosidade dos capilares, diminuindo a permeabilidade. A redução do teor de clínquer do aglomerante, com a substituição do cimento por CCA, tem como consequência diminuição na quantidade de CH gerada pelas reações de hidratação do cimento. Além disso, ocorre o consumo de CH pelas reações pozolânicas ocorridas entre o CH e a sílica ativa presente na composição química da CCA. Essa incorporação resulta em um incremento de taxa de carbonatação devido à ação sinérgica do CO_2 e das reações pozolânicas.

Segundo Isaia *et al.* (2000), que estudaram a substituição de cimento por teores de 12,5%, 25% e 50% de CCA, nas relações a/ag 0,35, 0,50 e 0,65, observaram que, quanto maior for o teor de incorporação de CCA ao concreto, menor será a reserva alcalina apresentada pelo mesmo para conter o avanço da

reação de carbonatação. Em análise do teor de hidróxido de cálcio remanescente, para o teor de substituição de 50%, observou o consumo quase total do mesmo (98%), nas três relações a/ag investigadas, ou seja, a reserva alcalina diminuiu significativamente em virtude da atividade pozolânica desenvolvida pela CCA. Para o teor de 12,5% houve um decréscimo médio de 34% no teor de hidróxido de cálcio e para 25% de adição, decréscimo médio de 61%, em relação ao referencial.

4 INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL

4.1 Introdução

No intuito de fornecer subsídios ao estudo da carbonatação do concreto, tendo em vista a influência da substituição de parte do cimento por CCA residual “in natura”, investigou-se misturas com aglomerante composto por diferentes teores de CCA residual, 15% e 25% denominadas como NATURAL e MOÍDA em conjunto com uma mistura contendo 100% de cimento CP II F-32, em três relações a/ag 0,45, 0,55 e 0,65. A mistura de referência foi utilizada como parâmetro de comparação em relação aos resultados obtidos com os concretos produzidos com a incorporação de CCA residual, do tipo NATURAL e MOÍDA. A diretriz da investigação foi a determinação das profundidades de carbonatação conforme preconiza a RILEM CPC-18 e, posteriormente, dos coeficientes de neutralização em concretos com e sem a incorporação de CCA em substituição parcial ao cimento Portland. Para tanto, a partir da determinação das variáveis envolvidas na pesquisa, procurou-se fixar as condições dos ensaios, tais como a idade de cura do concreto, as relações a/ag, a temperatura de exposição do concreto, umidade e concentração de CO₂ na câmara climatizada, e idades de ensaio.

Com as variáveis definidas, determinaram-se os procedimentos e técnicas para a execução dos ensaios, como a preparação dos materiais com o auxílio de recomendações das normas brasileiras e internacionais. Posteriormente, esta pesquisa procurou desenvolver uma metodologia de ações que possibilitasse a confirmação dos resultados obtidos por qualquer outro pesquisador da área de tecnologia do concreto.

O experimento dividiu-se em três fases seqüenciais, com o objetivo final de obtenção dos resultados para análise e a busca pelas conclusões que respondessem aos questionamentos propostos pela pesquisa.

Em um primeiro momento, fase inicial, procedeu-se à busca das amostras de CCA residual e à preparação das mesmas para os ensaios. A CCA, primeiramente, foi coletada em cinco engenhos da região, que a obtinham através da queima da

casca de arroz para secagem dos grãos. Por meio de ensaios de resistência à compressão axial em argamassas com teores de substituição de 0%, 15% e 30% de cimento CP II F-32 por CCA. Foi escolhida a amostra de CCA que apresentou melhores índices de resistência final aos 28 dias em comparação com o concreto de referência (100% CP II F-32). Portanto, optou-se pela cinza proveniente 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. Tendo em vista a importância do conhecimento das características físicas e químicas dos materiais envolvidos na pesquisa, procedeu-se à realização dos ensaios de caracterização dos materiais, segundo as normas brasileiras.

Na fase seguinte do experimento, fase intermediária, foram realizados os ensaios de trabalhabilidade em concreto fresco, com o objetivo de se otimizar tanto a ordem de colocação dos materiais no interior da betoneira, quanto o tempo de mistura e o teor de aditivo dispersante necessário para a completa homogeneização das misturas aglomerantes.

Na terceira fase do projeto, foram realizadas as moldagens dos corpos-de-prova e, posteriormente, adotados os procedimentos necessários para a realização dos ensaios de carbonatação acelerada, resistência à compressão axial e teor de hidróxido de cálcio remanescente e porosimetria por intrusão de mercúrio.

Os ensaios de durabilidade do concreto, como carbonatação, resistência à penetração de cloretos, resistividade elétrica, permeabilidade ao oxigênio e resistência à compressão axial desta pesquisa foram realizados no L.M.C.C. (Laboratório de Materiais de Construção Civil) do C.T. (Centro de Tecnologia), da U.F.S.M. (Universidade Federal de Santa Maria), em Santa Maria, RS.

4.2 Variáveis estudadas

As variáveis estudadas nesta investigação são:

- **Variáveis independentes:** Nesta pesquisa, as variáveis classificadas nesta categoria são: relações a/ag (em massa): 0,45, 0,55 e 0,65 para os todos os traços com ou sem a incorporação de CCA residual “in natura” e moída, para os ensaios de carbonatação, hidróxido de cálcio remanescente e resistência à compressão axial. Misturas aglomerantes: REFERÊNCIA, 15% de CCA NATURAL, 25% de CCA NATURAL, 15% de CCA MOÍDA, 25% de CCA MOÍDA. Idade de ensaio: 91 dias para compressão axial; 91 dias para o ensaio de teor de hidróxido de cálcio remanescente; 91 dias para porosimetria por intrusão de mercúrio; e, zero dias, 3, 6, 9, 12 semanas de exposição ao CO₂ em câmara climática para a carbonatação acelerada.
- **Variáveis intervenientes:** Tipo de adição mineral: CCA; tipo de CCA residual: NATURAL (sem moagem) e MOÍDA (com beneficiamento), teor da substituição de cimento CP II F-32 por CCA: 15% e 25 % em massa.
- **Variáveis dependentes:** Resistência à compressão axial, profundidade de carbonatação acelerada; teor de hidróxido de cálcio remanescente.

4.3 Materiais empregados

4.3.1 Materiais Cimentícios

4.3.1.1 Cimento CP II F- 32

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

Para este estudo, foi utilizado cimento Portland CP II F-32 por apresentar grande empregabilidade no território nacional. Na tabela 4.1, tem-se expostos os parâmetros químicos da amostra do cimento CP II F-32.

Na tabela 4.2 mostra-se a dimensão média das partículas e o diâmetro abaixo do qual encontram-se respectivamente, 10% e 90% das partículas. Na tabela 4.3 encontram-se as características físicas e na tabela 4.4 consta a resistência à compressão do cimento empregado na pesquisa.

Tabela 4.1 – Composição química do cimento - CP II F-32

% em massa	
Ensaio	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
CaO	60,29
MgO	4,95
SO ₃	3,17
Na ₂ O	-
K ₂ O	-

Tabela 4.2 – Dimensões características do 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

Tabela 4.3 – Características físicas do cimento - CP II F-32

CP II F-32	
Resíduo na # 0.075 (%)	2,56
Início de pega (hora:min)	2:41
Área específica Blaine (cm²/g)	3341
Massa específica (kg/m³)	3,06

Tabela 4.4 – Resistência à compressão - CP II F-32

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

4.3.1.2 Cinza de casca de arroz (CCA)

O processo de obtenção da CCA deve-se basicamente ao processo de queima da casca de arroz. A incineração da casca tem como objetivo a remoção da lignina, bem como qualquer outro componente orgânico, resultando apenas em cinza com elevado teor de sílica.

Para o desenvolvimento da pesquisa, amostras de CCA foram recolhidas e selecionadas em diversos engenhos e indústrias de beneficiamento de arroz da região de Santa Maria/RS, durante o período de fevereiro a março de 2006. Por meio de um estudo exploratório, a CCA foi escolhida através de ensaios de resistência mecânica em argamassas contendo amostras de cinzas de diferentes origens com os teores de incorporação 0%, 15% e 30% de CCA residual em substituição ao cimento CP II F-32 (valores em massa). De acordo com os resultados obtidos com os ensaios de resistência mecânica, procedeu-se a escolha da CCA residual de uma indústria beneficiadora de arroz da região, em que a obtenção da CCA deu-se através do procedimento de queima da casca de arroz, sem nenhum tipo de controle de temperatura e de período de exposição durante o processo de combustão.

Posteriormente as amostras de CCA residuais foram transportadas e armazenadas em um depósito localizado no interior da empresa, a céu aberto. Por

fim, as amostras de CCA foram coletadas, transportadas e acondicionadas em sacos de polipropileno, homogeneizadas e estocadas no interior do LMCC, em local protegido da chuva e de umidade.

Para a elaboração desta dissertação de mestrado, o tempo de moagem empregado para a amostra denominada como CCA MOÍDA foi de uma hora em moinho de bolas. O objetivo principal do processo de moagem empregado nesta pesquisa foi o de se verificar a influência do procedimento sobre a amostra de CCA residual através de uma avaliação comparativa dos resultados de resistência mecânica e de variáveis de durabilidade com a amostra denominada como NATURAL, a qual não sofreu nenhum tipo de beneficiamento (moagem).

A caracterização físico-química da CCA 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 adição mineral utilizada como substituição ao cimento foi a CCA residual denominada CCA NATURAL (sem moagem) com massa específica de 1,41 g/cm³, e a CCA MOÍDA (com beneficiamento) com massa específica de 2,09 g/cm³, que foram utilizadas em substituição à massa percentual de cimento CP II F-32, nos teores de 15% e 25%. O processo de homogeneização em laboratório ocorreu devido ao fato de as CCA's não terem sido coletadas durante o mesmo período. Porém, as amostras são provenientes da mesma safra do cereal. Em seguida as amostras de CCA foram armazenadas em sacos de polipropileno no interior do laboratório, ficando protegidas da chuva e umidade. Posteriormente houve a secagem da CCA residual em estufa a 105 °C durante um período aproximado de 48 horas e a moagem de uma parte da CCA residual. Na fase seguinte posterior à secagem, as amostras foram acondicionadas em sacos de polipropileno fechados, com o objetivo de não permitir a entrada de umidade.

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 na tabela 4.5 e 4.6

Tabela 4.5 – Composição Química da CCA residual

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

Tabela 4.6 – Dimensões características da CCA residual

Amostras	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
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

4.3.2. Agregados

A determinação das características física dos agregados baseou-se nos ensaios normalizados citados abaixo.

- 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

4.3.2.1 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado foi areia natural de origem quartzosa, proveniente do município de Santa Maria-RS. O agregado foi peneirado na peneira 4,8 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.

4.3.2.2 Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado foi de rocha diabásica britada proveniente do município de Itaara/RS. Os agregados foram classificados como brita 1 e brita 0. As amostras de agregado foram lavadas e secas em estufa a 105°C e, posteriormente, armazenada em baias. Para o desenvolvimento da pesquisa foram utilizados dois tipos de brita, com o intuito de se obter uma melhor composição granulométrica do agregado graúdo. A representação das curvas granulométricas dos agregados miúdo e graúdo podem ser visualizadas através das figuras 4.1 e 4.2 respectivamente.

A caracterização dos agregados pode ser vista na tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Caracterização dos agregados utilizados

AGREGADOS	Brita 1 (100%) (%)	Brita 0 (100%) (%)	Areia G. (100%) (%)	Areia F. (100%) (%)
D.máx Característico (mm)	19,0	9,5	4,8	1,2
Módulo de Finura	6,91	5,42	2,81	1,85
Massa Específica (Kg/dm³)	2,49	2,55	2,60	2,62
Massa Unitária Solta (Kg/dm³)	1,39	1,40	1,57	1,51
Massa Unitária Compacta (Kg/dm³)	2,02	2,01	-	-
Abrasão Los Angeles (%)	16,36	-	-	-
Índice de forma	2,31	-	-	-

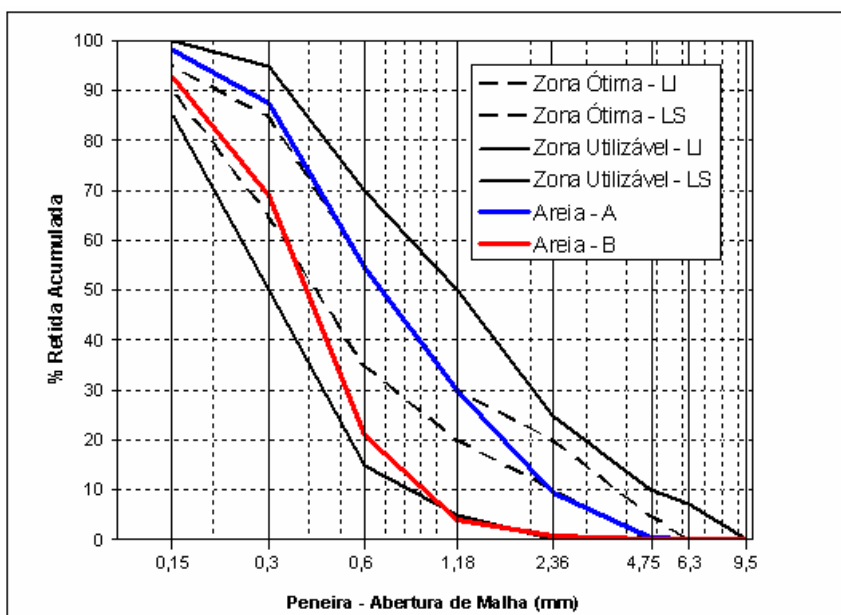


Figura 4.1 – Características físicas do agregado miúdo

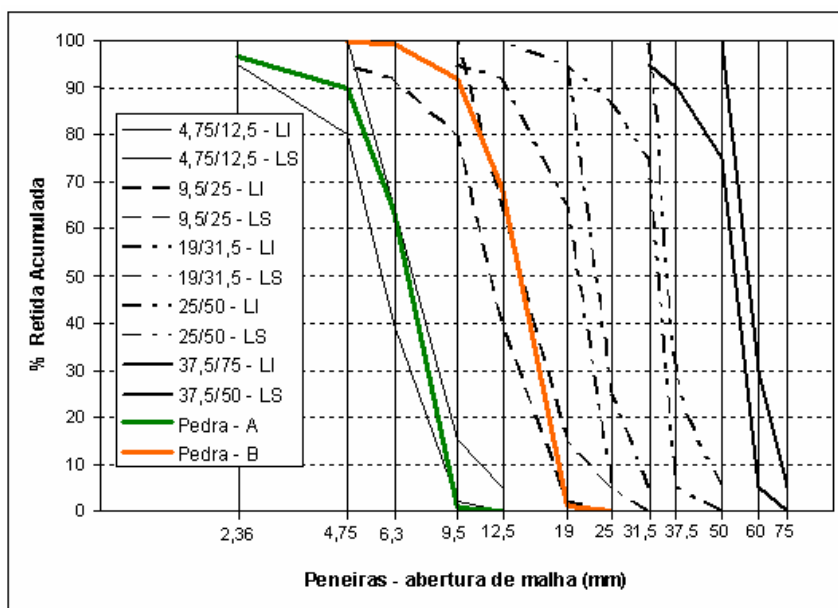


Figura 4.2 – Características físicas do agregado graúdo

4.3.3 Aditivo químico

O abatimento especificado para os concretos produzidos foi $80 \text{ mm} \pm 20 \text{ mm}$. Para a obtenção do abatimento estabelecido, sem variações na relação a/ag, foi utilizado o aditivo superplastificante GLENIUM 51 da MBT. O aditivo GLENIUM 51 é um superplastificante com base em uma cadeia de éter carboxílico modificado, isento de cloretos, com pH de 5 à 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.

4.4 Nomenclatura utilizada

Os traços de concreto analisados nessa pesquisa seguiram a nomenclatura estabelecida na tabela 4.8. A quantidade de materiais empregada em cada traço está representada na tabela 4.9.

Tabela 4.8 – Nomenclatura dos traços de concreto investigados

DEFINIÇÃO	TRAÇO	COMPOSIÇÃO
REFERÊNCIA	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

4.5 Método de Dosagem

Os teores de CCA residual utilizados nesta pesquisa baseiam-se em trabalhos anteriores, elaborados no GEPECON, os quais comprovaram a viabilidade na substituição do cimento por teores de até 50% de CCA em algumas variáveis de durabilidade do concreto. O método de dosagem empregado na pesquisa foi proposto por Helene & Terzian (1992). Inicialmente foram fixados todos os traços de concreto com os valores da proporção cimento materiais inertes 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.

Além disso, 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.

Tabela 4.9 – Quantidade de materiais por m³ de concreto

TRAÇO	AG/AGLO	AGLOMERANTE	CIMENTO	CCA	AG. MIÚDO	AG. GRAÚDO	ÁGUA	ADITIVO
		Kg/m ³	Kg/m ³	Kg/m ³	Kg/m ³	Kg/m ³	Kg/m ³	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

4.6 Moldagem dos corpos de prova

Foram realizados estudos exploratórios sobre os traços a serem pesquisados, em face à falta de disponibilidade sobre informações a respeito da ordem de colocação dos materiais no interior da betoneira, teor de aditivo necessário para cada traço e muito menos no que se dizia respeito ao tempo necessário para a homogeneização dos materiais no interior do misturador intermitente de eixo inclinado. Esta etapa da pesquisa foi bastante árdua, principalmente por se tratar do emprego da amostra de CCA residual sem moagem.

A moldagem dos corpos-de-prova 10 x 20 cm realizou-se em duas camadas, com a utilização de uma mesa vibratória, com um tempo mínimo de 30 segundos por camada e seguiram as instruções preconizadas na norma NBR 5738. A moldagem ocorreu durante um período onde as temperaturas são mais baixas, desta forma, optou-se por realizar o controle de temperatura da mistura (fixou-se a temperatura do concreto em 18°C) por meio do controle da temperatura da água de amassamento de acordo com a equação proposta por Mehta & Monteiro (1994). Este procedimento visa a obtenção de concretos com iguais temperaturas de produção, garantindo-lhes a mesma taxa de desenvolvimento de resistência mecânica.

Foram realizados os seguintes ensaios e medições 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;
- ✓ 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 na tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Ordem de colocação e tempo de mistura para os traços de concreto

TRAÇO	MATERIAL/ TEMPO (min)	MATERIAL/ TEMPO (min)	MATERIAL/ TEMPO(min)	MATERIAL/ TEMPO (min)
REFERÊNCIA	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'

Antes da moldagem dos corpos-de-prova (cp's), foram realizados ensaios de trabalhabilidade com cada traço, onde foi verificado o abatimento das misturas.

Procurou-se manter a consistência do concreto constante para todos os traços, com valores no intervalo de 60 a 100 mm para o abatimento do tronco de cone. As misturas definitivas foram executadas em uma betoneira de eixo inclinado de 420 litros com as proporções de material encontradas no cálculo dos traços.

As fôrmas foram untadas com óleo desmoldante, para facilitar a desfôrma dos corpos-de-prova. Depois da moldagem, as fôrmas foram cobertas com sacos de aniagem para evitar a perda acentuada de água. Posteriormente os cp's foram desmoldados e identificados 24 horas depois da moldagem. Em seguida foram colocados em cura úmida por um período de sete dias em câmara úmida (U.R > 95%). Por fim, foram armazenados em uma sala climatizada (75 ± 2)% e com temperatura (23 ± 2)°C, durante todo o período de sazonalidade até o início do pré-condicionamento.

4.7 Ensaio de carbonatação acelerada

Para a determinação das profundidades e dos coeficientes de carbonatação, cada corpo-de-prova originalmente moldado de dimensões de 10x20 cm foi cortado em três partes iguais de aproximadamente 6,67x10 cm (figuras 4.3 e 4.4). A parte

superior do corpo-de-prova foi denominada como **Topo**, a parte mediana como **Intermediária** e a parte inferior como **Base**.

Os corpos-de-prova para a realização do ensaio de carbonatação acelerada foram identificados da seguinte maneira: a parte superior do corpo-de-prova moldado (10x20cm) como “n”, a parte intermediária como “n+1” e a parte inferior como “n+2”. Posteriormente a essa etapa, procedeu-se ao corte dos corpos-de-prova, conforme mostra a figura 4.4.



Figura 4.3 – Identificação dos corpos-de-prova



Figura 4.4 – Corte dos corpos-de-prova

Tabela 4.11 – Tempo de exposição ao CO₂ dos corpos-de-prova

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

Para o ensaio 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 (75 ± 2)% em um ambiente aéreo e com temperatura (23 ± 2)°C e com distribuição uniforme de água evaporável. Partindo-se da idade escolhida para o ensaio de 91 dias, adotou-se o tempo de sazonalidade de 41 dias, conforme esquema proposto por Frizzo (2001): subtrair-se, da idade de ensaio, de forma retroativa os prazos necessários para a realização do experimento. As fases do mesmo e seus prazos estimados foram redistribuição da umidade (14 dias), pré-secagem (14 dias), determinação dos parâmetros de pré-secagem (14 dias), selagem lateral (3 dias), corte (2 dias), havendo um excesso de 3 dias para possíveis imprevistos, que eram acrescentados ao período de redistribuição da umidade, quando não utilizados.

Conforme recomenda a norma, o corpo-de-prova cilíndrico de 6,67x10cm foi mantido em estufa a uma temperatura de 105°C, até uma constância de peso de 0,5 g entre duas leituras com 24 horas de diferença, determinando-se a água total evaporável. Foram moídos 500 g de concreto passantes na peneira 6,3 mm e retidos na peneira 2,4 mm. Os mesmos foram colocados dentro de uma bandeja de alumínio no interior de uma câmara climática modelo FEUTRON KPK 200 com U.R. de 75% e temperatura de 23°C, até a estabilização de peso com diferença de leituras consecutivas após 24 horas de 0,1 g. Dessa forma determinava-se a água evaporável, conforme figuras 4.5 e 4.6.

Foi determinada a perda de peso necessária para cada corpo-de-prova, em função de seu peso após uma semana de cura. Após foram pintados na face lateral (figura 4.7) com três demãos de verniz poliuretânico e, posteriormente, colocados

em estufa ventilada a uma temperatura de 50°C, sendo realizadas pesagens repetidas até a obtenção do peso requerido determinado na etapa de determinação dos parâmetros, com nível de precisão de $\pm 5\%$.



Figura 4.5 – Câmara climática FEUTRON MODELO KPK 200



Figura 4.6 – Câmara climática FEUTRON – detalhe do interior

Em seguida, os corpos-de-prova foram pintados na face em que representava a face em piores condições devido ao corte para a camada intermediária, sendo que

a face oposta foi mantida “in natura” de modo a permitir o fluxo de CO_2 no sentido axial. Para a camada denominada topo, a parte superior foi pintada, tornando-se impermeável esta superfície, a face oposta corte foi mantida “in natura” de modo a permitir o fluxo de CO_2 no sentido axial. Para a camada denominada base, a parte inferior foi pintada e a face oposta ao corte foi mantida “in natura”. Todas as etapas de pintura dos cp's foram realizadas com três demãos de verniz poliuretânico.



Figura 4.7 – Pintura com verniz poliuretânico

Na próxima etapa, realizava-se a selagem dos corpos-de-prova em camadas seqüenciais de filme de polietileno (PVC), conforme figuras 4.8 e 4.9 :



Figura 4.8 – Colocação do filme de polietileno



Figura 4.9 – Corpos-de-prova com filme de polietileno



Figura 4.10 – Detalhe das embalagens de polipropileno

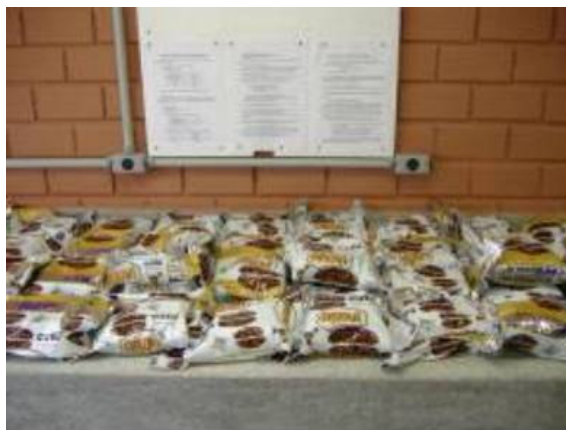


Figura 4.11 – Detalhe das embalagens de polietileno

Sobre o filme de polietileno foram colocados dois sacos de polipropileno selado à quente (figura 4.10) e, ainda, um saco de filme de polietileno e alumínio (figura 4.11), utilizado em indústrias de moagem de café. Deste modo ficava impedida a perda de massa dos testemunhos, por evaporação, durante a fase de redistribuição da umidade que consistia em manter os mesmos por um período mínimo de 14 dias, em estufa à temperatura de 50°C, sem trocas externas, (figura 4.12). A temperatura de 50°C acelera a redistribuição do gradiente de umidade axial no sentido de obter-se uma distribuição homogênea da umidade por todo o corpo-de-prova.



Figura 4.12 – Estufa para a redistribuição da umidade (50°C)

Os corpos-de-prova ficaram acondicionados nessa estufa até 24h antes da colocação dos mesmos na câmara de carbonatação onde então, foram transferidos para a sala climatizada (75 ± 2)% e com temperatura (23 ± 2)°C.

Os cp's permaneceram selados até o momento da colocação dos mesmos no interior da câmara climática com exposição ao CO₂.

4.7.1 Câmara de carbonatação

No ensaio de carbonatação acelerada, simulou-se uma atmosfera com teor de 5% de CO₂, (75 ± 2)% de U.R e temperatura de (23 ± 2)°C em câmara climática automatizada, modelo 345 da marca FANEM, figura 4.13.



Figura 4.13 – Detalhe da câmara de carbonatação FANEM – 345.

Terminado o período de pré-condicionamento, os corpos-de-prova foram retirados da estufa (50 °C), e colocados em ambiente climatizado de (22 ± 2)°C, e (75± 2)% de U.R. por um período de 24 horas. Após esse período de resfriamento, os mesmos foram colocados na câmara de carbonatação, com uma umidade de (75 ± 2)% e temperatura de (23 ± 2) °C e uma concentração de CO₂ de 5% em volume.

Foram utilizados três corpos-de-prova por idade de ensaio, ou seja, doze corpos-de-prova por mistura, para ensaios com zero dias, 3, 6, 9 e 12 semanas de exposição ao CO₂.

4.7.2 Determinação das profundidades de carbonatação

Após 3, 6, 9 e 12 semanas os corpos de prova foram retirados da câmara de carbonatação, rompidos, em prensa hidráulica com força de compressão diametral, para determinação da profundidade de carbonatação. Com a finalidade de se obter maior precisão no corte, foram utilizados perfis metálicos, cuidadosamente colocados no eixo de simetria do corpo-de-prova. Esse procedimento evita que ocorra o esmagamento dos cp's e possibilita uma ruptura mais próximo possível do eixo da peça, conforme pode ser visto na figuras 4.14 e 4.15.

As duas partes, provenientes do corpo-de-prova, foram utilizadas para as medidas, com isso foi possível medir um número maior de pontos (200 para cada corpo-de-prova), conseqüentemente obteve-se uma maior precisão na determinação do coeficiente de carbonatação.



Figura 4.14 - Detalhe da colocação dos perfis



Figura 4.15 - Detalhe do cp depois da ruptura

Após a ruptura do corpo-de-prova, limpou-se a superfície e aspergiu-se sobre a superfície fraturada fresca a solução de fenolftaleína em ambas as faces do corpo-de-prova para medir a profundidade de carbonatação.

A solução de fenolftaleína foi dosada conforme a RILEM CPC-18:

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

Esta solução possui ponto de viragem conhecido, onde ocorre a mudança do pH. A aspensão da solução de fenolftaleína torna o concreto não carbonatado ($\text{pH} \geq$

12) vermelho-carmim e permanece incolor no concreto carbonatado ($\text{pH} < 9$), conforme figura 4.16.



Figura 4.16 – Detalhe do corpo-de-prova após a aspersão de fenolftaleína

Visualmente foi possível definir a cor vermelho carmin, caracterizando um pH alto e uma faixa incolor, onde o pH encontrava-se abaixo de 9,0. Esta região incolor, a partir da superfície, representava a profundidade do concreto carbonatado. Depois de um período de vinte minutos, cada uma das faces dos corpos-de-prova analisados foram medidas com o auxílio de um paquímetro digital, para a obtenção das dimensões dos cp's, como pode ser visto na figura 4.17.

Cada face do corpo de prova foi fotografada com câmera fotográfica digital, para posteriormente dimensionar a frente de carbonatação através das imagens obtidas.



Figura 4.17 – Detalhe da obtenção das medidas do corpo-de-prova

Para medir a frente de carbonatação utilizou-se o software AutoCAD da Autodesk, com os passos a seguir:

- Inicialmente inseriu-se a foto digitalizada, do corpo-de-prova, no AutoCAD;
- Colocou-se a foto na escala utilizando como unidade o milímetro, em conformidade com as dimensões do corpo-de-prova, retiradas com o paquímetro digital. Desenhou-se uma poligonal no limite entre a área carbonatada e a área não carbonatada.
- Foram desenhadas linhas, com afastamento de um milímetro, da frente de carbonatação até a face superior do corpo-de-prova (figura 4.18).
- O comprimento das linhas foi obtido através da rotina denominada “COTA.LSP”, desenvolvida em Autolisp, que é uma linguagem de programação do AutoCAD. Esta rotina é mostrada no Anexo 1.
- Os dados obtidos através da rotina “COTA.LSP” foram gravados diretamente em um arquivo do tipo Excel da Microsoft, onde são tratados estatisticamente.
- Dos valores obtidos através da rotina, aproximadamente 200 (100 para cada face do corpo-de-prova) calculou-se a média, desvio padrão e coeficiente de variação. Os valores limites, inferior e superior, de cada corpo-de-prova foram eliminados (desprezados) até que o coeficiente de variação atingisse valor inferior a 7%.

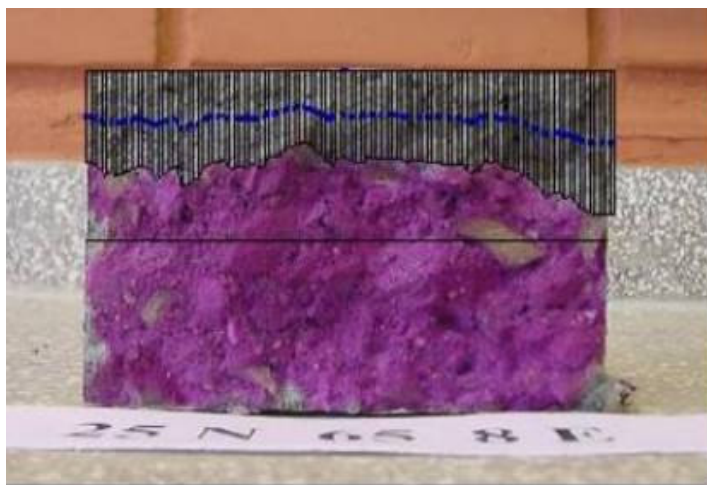


Figura 4.18 – Detalhe das medidas das profundidades de carbonatação

4.7.3 Determinação dos coeficientes de carbonatação

Segundo Vaguetti (2005) a velocidade com que a reação de carbonatação se desenvolve depende de muitos fatores, sendo que os mesmos podem atuar de forma sinérgica na estrutura de concreto.

O modelo para a previsão da profundidade de carbonatação mais empregado é o modelo proposto por Tuuti (1982) *apud* Carmona *et al.* (2006).

Assim, é usual a representação da evolução da frente carbonatada pela expressão:

$$X = k.t^n \quad \text{Equação 4.1}$$

sendo x a profundidade carbonatada, n , em condições internas, igual a 0,5 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 $\text{mm/ano}^{0,5}$ (figura 4.19). Para ambientes externos com possibilidade de variações de umidade, em decorrência de ciclos de molhagem e secagem, o valor de n pode chegar a 0,25, de acordo com Parrot (1987).

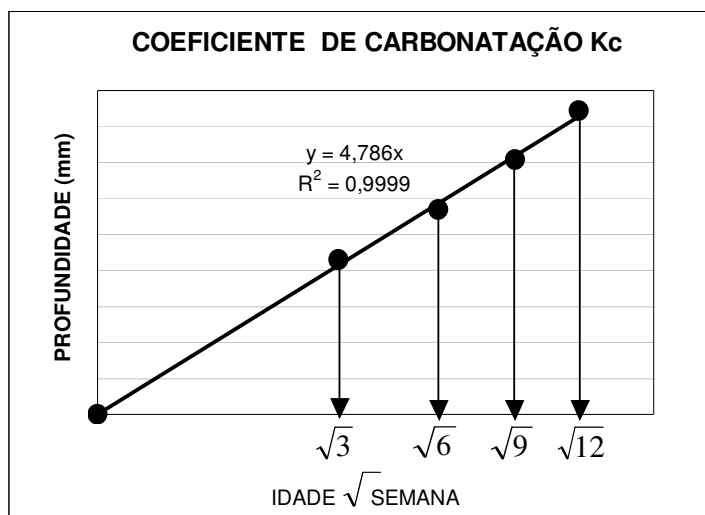


Figura 4.19 – Exemplo de determinação do K_c

4.8 Ensaio de teor de hidróxido de cálcio remanescente

A extração das amostras de pó para os ensaios de teor de hidróxido de cálcio remanescente deu-se nos corpos-de-prova inicialmente ensaiados à compressão axial. A coleta foi feita com uma furadeira de precisão com aspirador e filtro para o pó. Após a coleta, o pó foi peneirado com uma peneira de malha #200, figura 4.20.



Figura 4.20 – Pó peneirado na peneira de malha #200

Com o uso de um almofariz, pulverizou-se a fração não passante na malha #200 e peneirou-se novamente, até obter-se uma quantidade de pelo menos 120 g de pó de cada profundidade de cada traço. Depois deste procedimento, as amostras foram imersas em álcool etílico, a fim de paralisar as reações de hidratação do cimento. Após, as amostras foram secas em estufa à 60°C por 24 horas e armazenadas, figura 4.21.

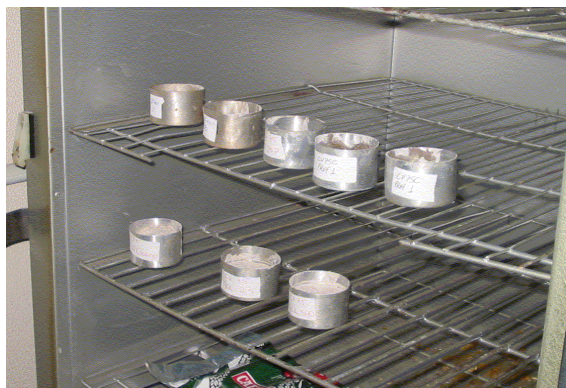


Figura 4.21 – Secagem das amostras em estufa a 60°C

Posteriormente a essas etapas, as amostras para o ensaio de teor de CH remanescente foram enviadas para ensaio químico no Laboratório de Análise de Resíduos de Pesticidas, (LARP/UFSM). O ensaio para a determinação do teor de hidróxido de cálcio remanescente foi realizado segundo a NBR 7227 - Determinação do Hidróxido de cálcio livre pelo etilenoglicol.

5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 Introdução

Neste capítulo serão apresentados e discutidos primeiramente os dados referentes à resistência à compressão axial, posteriormente as profundidades de neutralização em função do tempo e uma discussão dos resultados para a idade de exposição ao CO₂ em câmara climática de doze semanas.

Em seqüência à análise dos resultados será abordado o processo de carbonatação nas misturas investigadas, com os assuntos discriminados na seguinte ordem:

Análise dos coeficientes de carbonatação acelerada;

Análise dos coeficientes de carbonatação em função da relação a/ag;

Análise dos coeficientes de carbonatação em função do tipo de CCA;

Análise dos coeficientes de carbonatação em função do teor de CCA;

Análise do teor de CH remanescente (%);

Análise dos coeficientes de carbonatação em função da resistência mecânica aos 91 dias;

Análise dos coeficientes de carbonatação em igualdade de resistência de 30 MPa aos 91 dias de idade.

A avaliação de concretos em igualdade de resistência à compressão permite a comparação entre as misturas em idade pré-estabelecida, possibilitando a observação do comportamento das demais propriedades, relacionando-as entre si.

Além disso, ter-se-á a análise dos coeficientes de carbonatação em função dos resultados do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio, além de um breve comentário sobre a influência da incorporação de CCA residual ao concreto, em relação às modificações na microestrutura da pasta.

5.2 Análise dos resultados de resistência à compressão axial

A resistência à compressão dos concretos apresenta-se como uma das propriedades de maior importância para a análise e interpretação de experimentos, pois através dela pode-se fazer comparações entre as misturas em uma determinada idade.

Na tabela 5.1 têm-se os valores referentes à resistência à compressão axial para as idades de 7, 28 e 91 dias para os 15 traços de concreto investigados na pesquisa.

Tabela 5.1 – Valores de Resistência à compressão axial aos 7, 28 e 91 dias

TRAÇO	ag/aglo	Resistência (MPa)		
		7 DIAS	28 DIAS	91 DIAS
REFERÊNCIA	0,45	25,65	42,20	43,03
	0,55	22,56	30,45	33,63
	0,65	17,77	24,27	27,97
15% CCA MOÍDA	0,45	29,23	43,60	53,07
	0,55	20,98	32,63	40,43
	0,65	18,88	27,20	33,40
25% CCA MOÍDA	0,45	28,86	43,50	50,93
	0,55	19,51	30,30	36,90
	0,65	12,74	22,43	29,63
15% CCA NATURAL	0,45	29,80	37,73	50,53
	0,55	18,57	27,53	33,80
	0,65	16,13	23,60	24,20
25% CCA NATURAL	0,45	16,30	22,73	30,50
	0,55	11,73	17,50	24,23
	0,65	9,93	13,87	18,97

No gráfico da figura 5.1, observa-se o desenvolvimento da resistência à compressão com as relações a/ag para a idade de 91 dias das 15 misturas aglomerantes ensaiadas. A avaliação foi feita na idade de 91 dias tendo em vista que os resultados de teor de CH remanescente e porosimetria por intrusão de mercúrio também foram analisados para a idade de 91 dias.

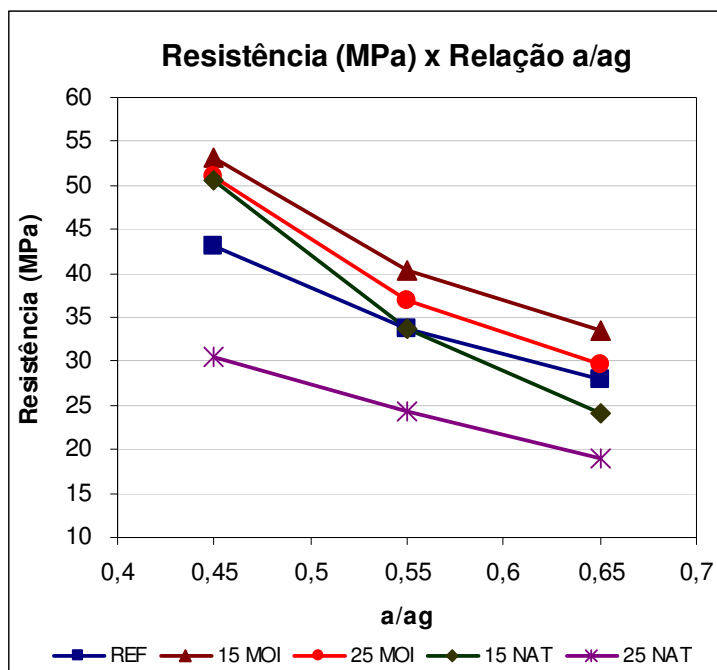


Figura 5.1 – Resistência à compressão x a/ag

De acordo com os resultados obtidos, percebe-se que apenas o traço com a incorporação de 25% CCA “IN NATURA” apresentou valores de resistência mecânica aos 91 dias inferiores aos apresentados pelo concreto de REFERÊNCIA, em todas as relações a/ag empregadas na pesquisa, 31 MPa, 24 MPa e 19 MPa, respectivamente. Esses valores foram aproximadamente 29%, 28% e 32% inferiores ao concreto de REFERÊNCIA, com valores de 43 MPa, 34 MPa e 28 MPa, para as relações a/ag 0,45, 0,55 e 0,65.

Com relação aos níveis de incorporação de CCA residual, para o teor de 15%, a amostra MOÍDA apresentou valores de resistência à compressão de 53 MPa, 40 MPa e 33 MPa, sendo ,aproximadamente, superiores em 5%, 20% e 38% à amostra “IN NATURA”, que apresentou valores de resistência à compressão de 50 MPa, 34 MPa e 24 MPa, respectivamente para as três relações a/ag empregadas.

Já para o nível de substituição de 25% de CP II F-32 por CCA, a amostra MOÍDA apresentou valores de 51 MPa, 37 MPa e 30 MPa, sendo respectivamente superior à amostra “IN NATURA” em, aproximadamente, 67%, 52% e 56%. A mostra “IN NATURA” demonstrou valores de resistência de 31 MPa, 24 MPa e 19 MPa, para as relações a/ag de 0,45, 0,55 e 0,65, respectivamente.

Com relação ao concreto de REFERÊNCIA, o concreto 15% MOÍDA apresentou valores de 53 MPa, 40 MPa e 33 MPa, os quais são superiores em aproximadamente 23%, 20% e 19% ao concreto de REFERÊNCIA, que apresentou valores de 43 MPa, 34 MPa e 28 MPa, em igualdade de relação a/ag. Por outro lado, para o traço com a incorporação de 15% “IN NATURA”, os valores foram 50 MPa, 34 MPa e 24 MPa, sendo 17% superior, aproximadamente igual, e 13% inferior ao traço de REFERÊNCIA, para as relações a/ag 0,45, 0,55 e 0,65 respectivamente.

Para o teor de 25% MOÍDA, com valores 51 MPa, 37 MPa e 30 MPa, sendo aproximadamente 18%, 10%, 6% superiores ao concreto de REFERÊNCIA, que apresentou valores de 43 MPa, 34 MPa e 28 MPa. Para o teor de incorporação de 15%, a amostra MOÍDA apresentou valor de resistência mecânica, em média, 21% superior ao traço “IN NATURA”, enquanto que, o traço 25% MOÍDA apresentou valor, em média, 59% superior ao traço 25% “IN NATURA”.

Em geral, exceto para o traço 15% “IN NATURA” para a relação a/ag de 0,65 e para o nível de substituição de 25% “IN NATURA”, os demais traços analisados, em igualdade de relação a/ag, apresentaram valores superiores de resistência à compressão para as amostras contendo CCA residual, tanto para a amostra MOÍDA como para a “IN NATURA”, em comparação ao concreto de REFERÊNCIA. Esse incremento de resistência mecânica apresentado pelo concreto com a incorporação de CCA residual pode ser atribuído ao efeito microfiller e ao efeito pozolânico, os quais provocam modificações na microestrutura da pasta, tornando-a mais densa e compacta. Estes efeitos são oriundos das reações pozolânicas advindos da incorporação da CCA residual ao concreto, em comparação ao concreto de REFERÊNCIA (100% de cimento CP II F-32). Através da tabela 5.2, têm-se expostas as equações de correlação entre a variável resistência mecânica do concreto versus a relação a/ag empregada ao mesmo.

Tabela 5.2 – Equações de correlação e valor r^2 - Resistência (f_c) x rel. a/ag

Misturas	Regressão Linear	r^2
REF	$f_c = - 75,33 \text{ a/ag} + 76,31$	0,98
15% NAT	$f_c = -131,67 \text{ a/ag} + 108,59$	0,97
25% NAT	$f_c = - 57,67 \text{ a/ag} + 56,28$	1,00
15 % MOI	$f_c = -98,33 \text{ a/ag} + 96,38$	0,97
25 % MOI	$f_c = -106,50 \text{ a/ag} + 97,73$	0,98

Como se pode visualizar da tabela 5.2 percebe-se uma boa correlação entre as variáveis, sendo que todas as famílias de concreto apresentaram o valor de r^2 superiores a 0,97. Além disso, pode-se constatar também que o comportamento das misturas investigadas está diretamente associado à relação a/ag utilizada nas moldagens, conforme ilustrado pela figura 5.1.

Outros pesquisadores como Alves (2000) e Vagheti (1999), também estudaram a influência da CCA na resistência mecânica do concreto. Alves (2000), concluiu que as misturas contendo teores de 12,5% e 25% de CCA apresentaram bons resultados para a resistência à compressão. Contudo, para os teores de substituição de 50%, os valores obtidos foram inferiores aos da mistura de referência.

Vagheti (1999) observou que as misturas com teores de CCA de 25% apresentaram valores de resistência superiores a mistura de referência e as misturas com teores de CCA de 50% aos 91 dias.

5.3 Profundidades carbonatadas em função do tempo

Os corpos-de-prova para o ensaio de carbonatação acelerada foram identificados como TOPO (parte superior), INTERMEDIÁRIO (parte mediana) e BASE (parte inferior). Este procedimento objetivou observar o comportamento do avanço das profundidades de carbonatação nas distintas partes dos corpos-de-prova inicialmente moldados para o ensaio.

As profundidades carbonatadas (e) para as partes denominadas TOPO, INTERMEDIÁRIA e BASE foram determinadas através de ensaio colorimétrico e posteriormente lançadas em uma tabela. A seguir foram elaborados gráficos de profundidade carbonatada (mm) x idade/(semana)^{0,5}. Para a idade de zero dias, (antes da colocação dos corpos-de-prova no interior da câmara climática), foi verificada através do ensaio colorimétrico proposto pela RILEM CPC-18, profundidade de carbonatação praticamente nula para todos os traços de concreto investigados. Dessa forma, tem-se, para esta pesquisa, para $t=0$ coeficiente de carbonatação nulo.

De acordo com a tabela 5.3 pode-se verificar a influência das diferentes localizações/partes de origem dos diversos corpos-de-prova empregados na pesquisa. Objetivando-se uma análise dos valores para as profundidades e coeficientes de carbonatação, a partir daqui, os dados analisados para cada traço de concreto empregado na pesquisa corresponderão à média aritmética dos valores apresentados pelas partes: TOPO, INTERMEDIÁRIA e BASE de cada corpo-de-prova moldado originalmente para o ensaio de carbonatação acelerada.

Tabela 5.3 – Variação (%) entre as partes dos corpos-de-prova (T, I, B)

LOCAL	TRAÇO DE CONCRETO				
	REF	15% NAT	15% MOI	25% NAT	25% MOI
TOPO	0,99	1,00	0,99	1,01	1,01
INTERMEDIÁRIA	1,00	1,02	1,03	1,01	1,01
BASE	1,02	0,98	0,99	0,98	0,99
MÉDIA	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Este procedimento foi adotado tendo em vista que a diferença apresentada entre os valores das médias aritméticas e os valores provenientes de cada uma das partes de cada corpo-de-prova não excederam a 3,0% de variação, valor considerado como dispersão do ensaio. Cabe ressaltar que essa determinação considera que o valor analisado, para cada idade, representa a média aritmética de aproximadamente seiscentas determinações para cada idade de ensaio.

Posteriormente a essa etapa, os cinco pontos relacionados (0, 3, 6, 9 e 12 semanas de ensaio), formam plotados em um gráfico e dele foram obtidas linhas de tendência para o avanço das profundidades de neutralização do concreto em função do tempo e equações de reta do tipo $f(x) = ax + b$, onde foi tomado o coeficiente angular da reta “a”, como sendo o coeficiente de carbonatação acelerada K_c , para cada mistura.

A tabela 5.4 apresenta as profundidades de carbonatação acelerada, em mm, após 03, 06, 09 e 12 semanas de ensaio em câmara climática com teor de 5% de CO_2 , (75 ± 2) % de U.R e (20 ± 2) °C.

Tabela 5.4 – Profundidade de Carbonatação dos traços analisados

MISTURA	a/ag	e - 3 SEM	e - 6 SEM	e - 9 SEM	e - 12 SEM
REF	0,45	2,99	3,53	5,85	6,53
	0,55	3,61	5,43	8,12	9,25
	0,65	5,33	6,55	11,43	12,63
15 NAT	0,45	3,21	5,05	7,03	7,74
	0,55	5,52	7,80	8,99	11,77
	0,65	7,43	9,15	12,56	13,37
15 MOI	0,45	3,22	4,05	6,01	6,76
	0,55	4,77	7,15	9,47	10,87
	0,65	6,12	9,04	11,85	13,55
25 NAT	0,45	4,82	6,90	8,92	11,25
	0,55	7,45	8,85	11,44	16,14
	0,65	10,66	13,20	19,02	24,20
25 MOI	0,45	4,55	6,02	8,38	9,06
	0,55	6,15	8,48	11,37	12,68
	0,65	8,64	11,61	13,63	17,18

e: Profundidade carbonatada (em mm)

5.4 Profundidade carbonatada para idade de doze semanas

A figura 5.2 representa as profundidades de carbonatação para cada relação a/ag empregada na pesquisa, verificadas para a idade de 12 semanas.

Através da visualização da figura 5.2, pode verificar a influência da relação a/ag sobre as profundidades de carbonatação para a idade de doze semanas.

Para a relação a/ag de 0,45, em relação ao tipo de CCA residual empregada, percebe-se que as profundidades de neutralização apresentadas pelos concretos com a incorporação de CCA “IN NATURA” foram superiores às apresentadas pela amostra MOIDA. Quanto ao teor de CCA empregado, o teor de substituição de 25% apresentou profundidades de carbonatação superiores ao traço com 15% de incorporação, tanto para a amostra MOIDA quanto a “IN NATURA”.

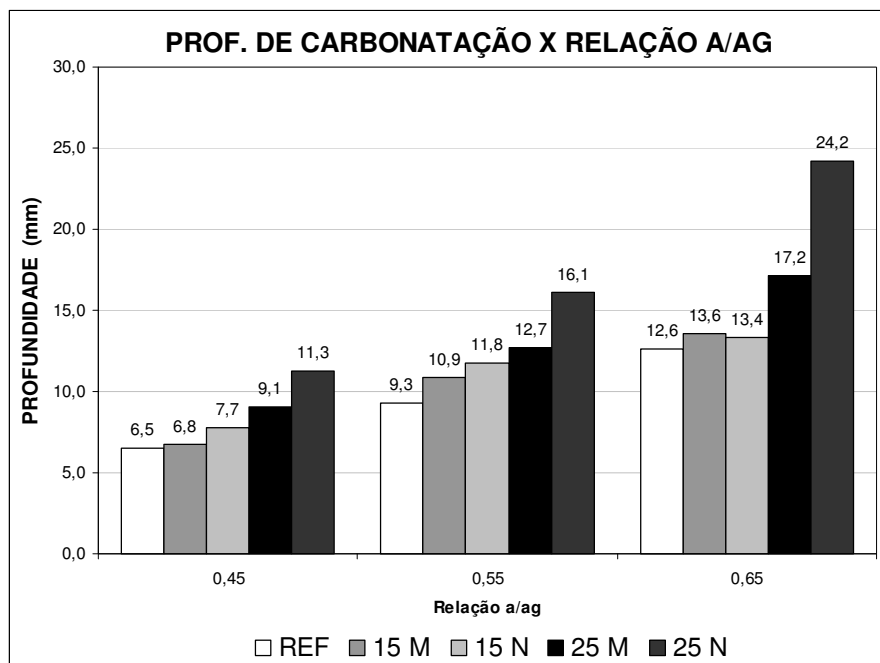


Figura 5.2 – Profundidade de carbonatação a 12 semanas para os concretos investigados

Tendência similar pode ser verificada para a relação a/ag de 0,55, que apresentaram valores superiores em comparação às profundidades de carbonatação para a relação a/ag de 0,45, porém inferiores aos apresentados pela relação a/ag de 0,65, demonstrando dessa forma, a influência que a variável exerce sobre a neutralização do concreto. Quanto ao tipo de CCA residual empregada, as profundidades de neutralização apresentadas pelos concretos com CCA “IN NATURA” se comportaram de forma semelhante à relação a/ag e 0,45. Quanto ao teor de CCA empregado, as amostras com o teor de 25% de incorporação apresentaram valores de profundidade de neutralização superiores às amostras com 15% de substituição, para ambas as amostras de CCA residual, MOÍDA e “IN NATURA”. Em relação ao tipo de CCA empregada, verifica-se novamente que as profundidades de neutralização apresentadas pelos concretos com CCA “IN NATURA” foram superiores às apresentadas pela amostra MOÍDA.

De forma semelhante apresentaram-se as profundidades de carbonatação para a relação a/ag 0,65. Quanto ao teor e tipo de CCA empregado, a variação entre as amostras apresentou igual tendência das relações a/ag 0,45 e 0,55, diferindo apenas nos valores apresentados.

De acordo com a figura 5.2, para a idade de doze semanas e em igualdade de relação a/ag, as profundidades de carbonatação para as amostras de concreto com a incorporação de CCA, tanto a amostra "IN NATURA" quanto a MOÍDA, para ambos os teores 15% e 25% de substituição de CP II F-32 por CCA apresentaram valores superiores quando comparados ao concreto de REFERÊNCIA. Através da visualização da tabela 5.4 e da figura 5.2, verifica-se um aumento da profundidade de carbonatação para concretos com a incorporação de CCA em comparação ao REFERÊNCIA, entre uma faixa de 4% até 72%, para a relação a/ag de 0,45, um incremento de 18% até 74% para 0,55 e um acréscimo entre 6% e 92% para a relação a/ag de 0,65.

5.5 Coeficiente de carbonatação acelerada – Kc

A segunda análise do processo de carbonatação nas misturas investigadas realizou-se através dos coeficientes de carbonatação acelerada. Estes coeficientes indicam a profundidade carbonatada em função do tempo em direção ao interior do corpo-de-prova de concreto e são expressos em mm/ $\sqrt{\text{semana}}$.

Para a determinação dos coeficientes de carbonatação utilizou-se procedimento analítico (regressão linear), sendo as profundidades de carbonatação (em milímetros) plotadas no eixo y e no eixo x, a raiz quadrada da idade cronológica de permanência dos corpos de prova em câmara climatizada com exposição ao CO₂ (0, 3, 6, 9 e 12 semanas). Para o tempo zero (data de colocação dos corpos de prova na câmara de carbonatação), através de ensaio colorimétrico, verificou-se profundidade de neutralização praticamente nula para todos os traços. Dessa forma, tomou-se $K_c = 0$ para $t(0) = \text{zero dias}$ (colocação dos corpos-de-prova no interior da câmara de carbonatação).

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. A tabela 5.5 traz os coeficientes de carbonatação para cada traço de concreto investigado na pesquisa.

Tabela - 5.5 Coeficientes de carbonatação dos traços analisados

TRAÇO	A/AG	T	I	B	KC MÉDIO	EQUAÇÃO	r ²
REFERÊNCIA	0,45	1,80	1,83	1,77	1,79	Y = 1,7999 x	0,96
	0,55	2,49	2,56	2,54	2,53	Y = 2,5314 x	0,97
	0,65	3,58	3,36	3,39	3,44	Y = 3,4436 x	0,95
15% NATURAL	0,45	2,13	2,20	2,25	2,19	Y = 2,1938 x	0,98
	0,55	3,21	3,14	3,29	3,21	Y = 3,2141 x	0,98
	0,65	3,97	3,94	4,01	3,97	Y = 3,9753 x	0,99
15 % MOÍDA	0,45	1,91	1,85	1,94	1,89	Y = 1,8984 x	0,98
	0,55	3,14	3,07	2,97	3,06	Y = 3,0623 x	0,99
	0,65	3,79	3,81	3,93	3,84	Y = 3,8401 x	0,99
25% NATURAL	0,45	3,05	2,98	3,07	3,03	Y = 3,0321 x	0,99
	0,55	3,97	4,14	4,38	4,16	Y = 4,1606 x	0,96
	0,65	6,30	6,49	6,38	6,39	Y = 6,3889 x	0,97
25% MOÍDA	0,45	2,60	2,59	2,73	2,64	Y = 2,6383 x	0,99
	0,55	3,62	3,61	3,71	3,65	Y = 3,6492 x	1,00
	0,65	4,81	4,78	4,79	4,79	Y = 4,7930 x	0,99

T = Topo; I = Intermediário; B = Base – Kc Médio (mm/ $\sqrt{\text{semana}}$)

Através da tabela 5.5, como se pode visualizar, têm-se apresentados os valores de r², sendo que os mesmos situaram-se acima de 0,95, indicando que existe correlação muito forte dos valores das profundidades de carbonatação e tempos de exposição em câmara climática ao CO₂ para cada traço de concreto investigado na pesquisa.

5.6 Coeficiente de carbonatação (Kc) versus relação a/ag

Conforme pode ser visualizado na figura 5.3, têm-se plotados os respectivos valores de coeficientes de carbonatação para as diferentes relações a/ag empregadas na pesquisa. Pela análise da figura, observa-se que todas as misturas com a incorporação de CCA (MOÍDA e “IN NATURA”) apresentaram coeficientes de carbonatação superiores à mistura de REFERÊNCIA para as relações a/ag de 0,45, 0,55 e 0,65.

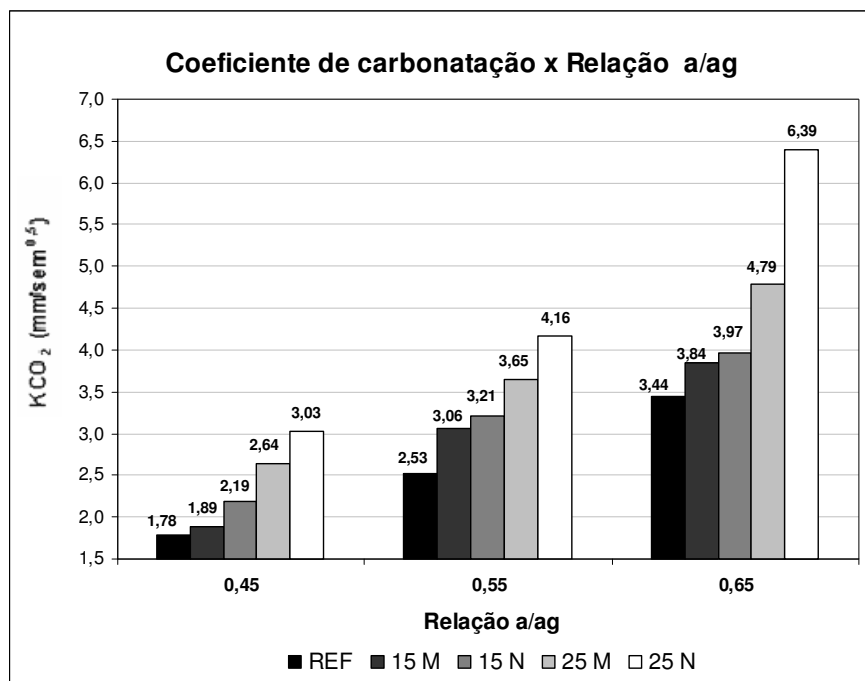


Figura 5.3 – Coeficiente de carbonatação (Kc) x a/ag

De acordo com a tabela 5.6, têm-se expostas as equações obtidas em função da regressão exponencial do coeficiente de carbonatação versus a relação a/ag, onde os valores de r^2 ficaram acima de 0,96 indicando uma boa correlação entre Kc e a relação a/ag para as respectivas famílias de concreto analisados.

Tabela 5.6 – Equações e valor de r^2 - Kc x relação a/ag

Misturas	Regressão Exponencial	r^2
REF	$Kc = 0,4072 e^{(3,2943 a/ag)}$	1,00
15% NAT	$Kc = 0,5908 e^{(2,9743 a/ag)}$	0,98
25% NAT	$Kc = 0,5549 e^{(3,7309 a/ag)}$	0,99
15 % MOI	$Kc = 0,4001 e^{(3,5445 a/ag)}$	0,96
25 % MOI	$Kc = 0,697 e^{(2,9788 a/ag)}$	1,00

Através da observação da figura 5.3, verifica-se a influência da relação a/ag sobre o coeficiente de carbonatação nos concretos analisados. Para o concreto de REFERÊNCIA, os valores apresentados pelas relações a/ag de 0,45, 0,55 e 0,65

foram respectivamente 1.78 mm/ $\sqrt{\text{semana}}$, 2.53 mm/ $\sqrt{\text{semana}}$ e 3.44 mm/ $\sqrt{\text{semana}}$. Dessa forma, a variação foi de aproximadamente 42% e 93% superior para as respectivas relações a/ag de 0,55 e 0,65 quando comparados os valores obtidos com o concreto com relação 0,45.

Para o traço 15% MOÍDA, os valores apresentados foram respectivamente 1,89 mm/ $\sqrt{\text{semana}}$, 3,06 mm/ $\sqrt{\text{semana}}$ e 3,84 mm/ $\sqrt{\text{semana}}$, gerando um incremento de valor próximo de 62% e 103% para as relações a/ag de 0,55 e 0,65 quando comparadas com a relação 0,45. Para o traço com a substituição de 25% MOÍDA, os valores apresentados pelas relações a/ag de 0,55 e 0,65 foram 3,65 mm/ $\sqrt{\text{semana}}$ e 4,79 mm/ $\sqrt{\text{semana}}$, aproximadamente 38% e 81% superiores em relação a 0,45, que foi de 2,64 mm/ $\sqrt{\text{semana}}$.

De forma semelhante, para a substituição de CP II F-32 por CCA "IN NATURA", para o teor de 15%, os valores apresentados pelas relações a/ag de 0,55 e 0,65 foram 3,21 mm/ $\sqrt{\text{semana}}$ e 3,97 mm/ $\sqrt{\text{semana}}$, aproximadamente 47% e 81% superiores em relação a 0,45, que foi de 2,19 mm/ $\sqrt{\text{semana}}$. Para o traço com a incorporação de 25% "IN NATURA", os valores dos coeficientes de carbonatação foram 3,03 mm/ $\sqrt{\text{semana}}$, 4,16 mm/ $\sqrt{\text{semana}}$ e 6,39 mm/ $\sqrt{\text{semana}}$, ocasionando a maior variação observada nos concretos analisados, sendo esta aproximadamente de 37% e 111%, superiores para as respectivas relações 0,55 e 0,65 quando comparados aos valores apresentados pelo concreto com a relação 0,45.

Verifica-se dessa forma que, um aumento da relação a/ag empregada ao concreto ocasiona, por sua vez, um aumento do coeficiente de carbonatação. Esse incremento pode ser explicado em função do aumento do tamanho, distribuição, interconectividade e redução da tortuosidade dos canais da rede de poros quando se tem um incremento da relação a/ag empregada ao concreto.

5.7 Coeficiente de carbonatação (K_c) versus tipo de CCA empregado

Quanto ao tipo de CCA empregado em substituição ao CP II F-32, "IN NATURA" ou MOÍDA, verifica-se que os coeficientes de carbonatação apresentaram valores superiores para as amostras contendo CCA "IN NATURA" em comparação

às amostras contendo CCA MOÍDA, para todas as relações a/ag empregadas na pesquisa.

De acordo com os resultados verificados, para o teor de 15% de substituição, a amostra com a incorporação de CCA "IN NATURA" apresentou coeficientes 2.19 mm/ $\sqrt{\text{semana}}$, 3,21 mm/ $\sqrt{\text{semana}}$ e 3,97 mm/ $\sqrt{\text{semana}}$, sendo aproximadamente 16%, 5% e 3% superiores à amostra de CCA MOÍDA, que apresentaram valores de 1,89 mm/ $\sqrt{\text{semana}}$, 3,06 mm/ $\sqrt{\text{semana}}$ e 3,84 mm/ $\sqrt{\text{semana}}$, para as relações a/ag de 0,45, 0,55 e 0,65, respectivamente.

Para o teor de incorporação de 25%, a amostra com CCA "IN NATURA" apresentou coeficientes de 3,03mm/ $\sqrt{\text{semana}}$, 4,16mm/ $\sqrt{\text{semana}}$ e 6,39 mm/ $\sqrt{\text{semana}}$, respectivamente sendo aproximadamente 15%, 14% e 33% superiores à amostra com CCA MOÍDA, com valores de 2,64 mm/ $\sqrt{\text{semana}}$, 3,65 mm/ $\sqrt{\text{semana}}$ e 4,79 mm/ $\sqrt{\text{semana}}$, para as relações a/ag de 0,45, 0,55 e 0,65, conforme pode ser visualizado na figura 5.4.

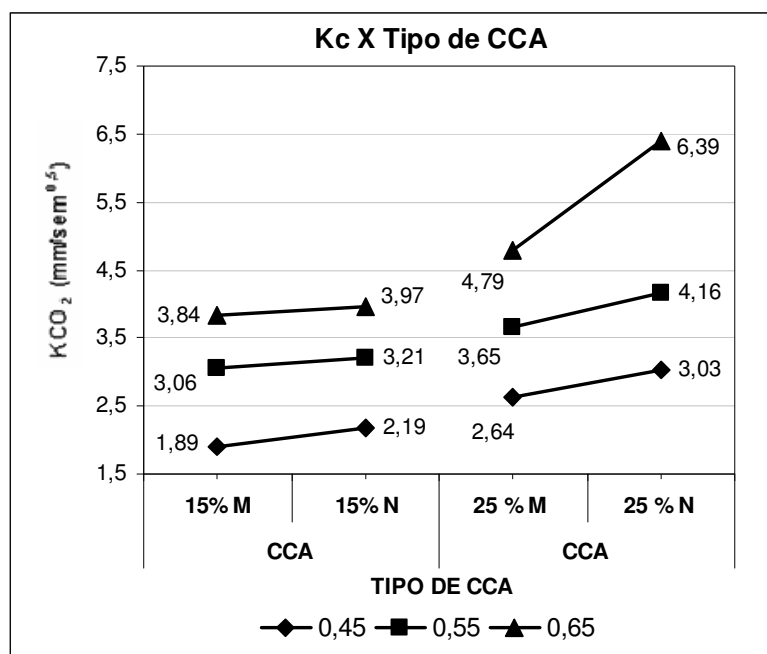


Figura 5.4 – Kc x Tipo de CCA residual empregado

Pode-se observar que os coeficientes de carbonatação para o mesmo teor de incorporação 15% ou 25% de CCA residual foram menores para as amostras do tipo MOÍDA, ou seja, que passaram por uma moagem durante uma hora em moinho de

bolas, quando comparadas aos resultados da CCA “IN NATURA”, sendo estas sem nenhum tipo beneficiamento prévio. Este fato pode ser credenciado ao maior tamanho das partículas apresentado pela amostra de CCA “IN NATURA” em comparação à amostra MOÍDA, sendo estas oriundas do processo de moagem, o que resultou em um aumento da superfície específica das partículas dessa amostra.

De acordo com a tabela 4.6, pode-se verificar a influência do processo de moagem sobre o tamanho das partículas de CCA empregadas na pesquisa. Para a amostra do tipo MOÍDA, cerca de 90% das partículas da amostra se encontram abaixo do diâmetro de 54,14 μm , ao passo que a amostra com CCA “IN NATURA” apresentam 90% das partículas se enquadraram com diâmetro inferior a 80,51 μm e 69,39 μm , para os teores de incorporação de 15% e 25% respectivamente. Esse processo de moagem em moinho de bolas evidencia os efeitos benéficos proporcionados pela redução do tamanho das partículas de CCA, proporcionando uma melhora na reatividade da amostra com o CH proveniente do processo de hidratação do cimento Portland, gerando uma microestrutura mais densa e compacta.

5.8 Coeficiente de carbonatação versus teor de CCA

Quando se analisa os teores de substituição de CP II F-32 por CCA residual, nos teores de 15% e 25% de CCA MOÍDA e “IN NATURA”, percebe-se um aumento dos valores dos coeficientes de carbonatação com o aumento do teor de substituição, para as mesmas relações a/ag, como visto na figura 5.5.

Os valores apresentados pelo traço 25% “IN NATURA” foram 3,03 mm/ $\sqrt{\text{semana}}$, 4,16 mm/ $\sqrt{\text{semana}}$ e 6,39 mm/ $\sqrt{\text{semana}}$, aproximadamente 38%, 30% e 61%, superiores quando comparados com os valores obtidos para o traço 15% “IN NATURA”, que apresentou valores de Kc de 2,19 mm/ $\sqrt{\text{semana}}$, 3,21 mm/ $\sqrt{\text{semana}}$ e 3,97 mm/ $\sqrt{\text{semana}}$, para as relações 0,45, 0,55 e 0,65, respectivamente.

Quando se focaliza o traço com teor de substituição de 25% MOÍDA, os valores de Kc apresentados foram 2,64 mm/ $\sqrt{\text{semana}}$, 3,65 mm/ $\sqrt{\text{semana}}$ e 4,79 mm/ $\sqrt{\text{semana}}$, sendo os mesmos aproximadamente 40%, 19% e 25% superiores ao

concreto de traço com teor de incorporação de 15% MOÍDA, com valores de 1,89 mm/ $\sqrt{\text{semana}}$, 3,06 mm/ $\sqrt{\text{semana}}$ e 3,84 mm/ $\sqrt{\text{semana}}$, para as relações a/ag 0,45, 0,55 e 0,65. Para ambos os tipos de CCA residual empregada na pesquisa, MOÍDA ou “IN NATURA”, verifica-se que um acréscimo no teor de incorporação de CCA residual ocasiona um conseqüente aumento do coeficiente de carbonatação.

Sabe-se que esse fato pode ser explicado através do conceito de reserva alcalina, onde a quantidade de hidróxidos formados pela hidratação do cimento Portland em concretos com a incorporação de CCA residual é menor, em comparação com o concreto de REFERÊNCIA (100% de CP II F-32). Além desse fato, ainda existe o consumo de CH pelas reações pozolânicas ocorridas entre a sílica ativa presente na amostra de CCA e o composto CH. Essa redução da reserva alcalina torna-se mais evidenciada quando o teor de substituição de cimento por CCA residual passa de 15% para 25%, tornando o concreto com a incorporação de teores elevados de CCA residual mais susceptível ao processo de carbonatação do concreto, apesar da mesma provocar o refinamento dos poros da pasta de cimento, como será visto a seguir.

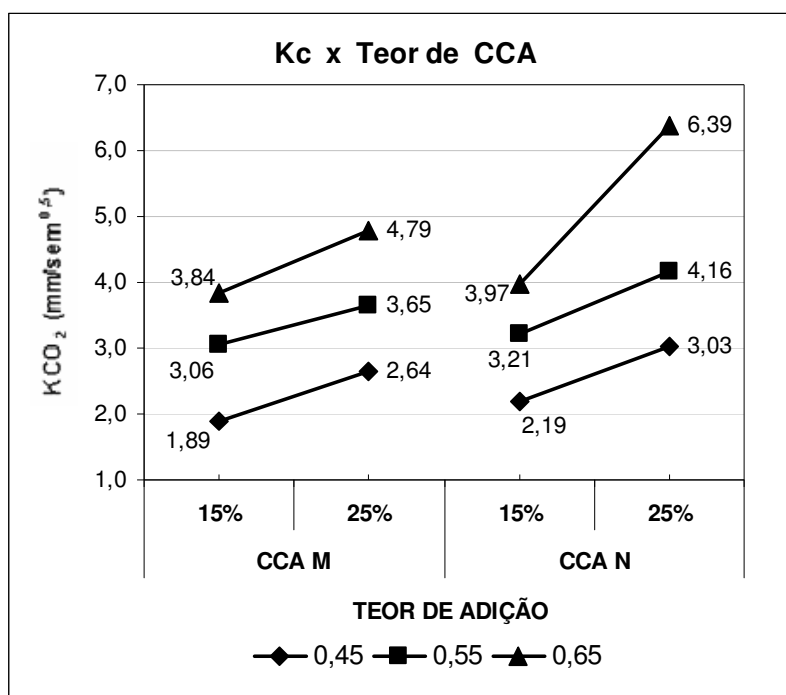


Figura 5.5 – Gráfico Kc x Teor de CCA (%)

Isaia (1995) pesquisou a carbonatação em concretos com a incorporação de CCA, CV e MS, em misturas binárias e ternárias. Para os concretos investigados com a incorporação de CCA, com misturas binárias, o autor verificou através de seus resultados que, um aumento do teor de substituição de 10% para 20% de cimento por CCA apresentou um incremento no coeficiente de carbonatação, passando de 1,50 mm/ $\sqrt{\text{semana}}$ para o valor de 2,30 mm/ $\sqrt{\text{semana}}$, respectivamente.

Venquiaruto (2002) pesquisou a carbonatação em concretos com CCA e cimento CP V-ARI, nas relações a/ag de 0,35; 0,50 e 0,65, com diferentes teores de substituição (25% e 50%) além de distintas finuras (23,0 m²/g e 36,6 m²/g), observou que a variação do teor de 25% para 50% contribuiu para o aumento dos coeficientes de carbonatação. Para a relação a/ag 0,50, as misturas 1CA50 e 2CA50 apresentaram os coeficientes de carbonatação 106% e 48% superiores as misturas 1CA25 e 2CA25 respectivamente. Para a relação a/ag 0,65, o aumento do K_c para as misturas 1CA50 e 2CA50 foram de 120% e 19% em relação às misturas 1CA25 e 2CA25.

Vaguetti (2001) pesquisou a incorporação de CCA nos teores de 25% e 50% em substituição ao cimento Portland verificando que o coeficiente de carbonatação apresentou um acréscimo com o aumento do teor de substituição de cimento por CCA.

5.9 Hidróxido de cálcio remanescente

O teor de hidróxido de cálcio remanescente para as diversas misturas na idade de 91 dias encontra-se na tabela 5.7. A figura 5.6 mostra o conteúdo de CH nesta idade para as três relações a/ag estudadas no experimento.

Na tabela 5.8 tem-se expostas as equações de regressão linear para cada família de concretos analisados na pesquisa, bem como o seu valor de r². Como se pode visualizar através da mesma, todos os valores de r² situaram-se acima de 0,88, indicando que existe uma boa correlação entre o teor de CH remanescente e a relação a/ag.

Tabela 5.7 – Teor de CH remanescente aos 91 dias e Kc

TRAÇOS	CH (%) 91 Dias	Kc (mm/ $\sqrt{\text{sem}}$)
REF 45	2,26	1,79
REF 55	2,99	2,53
REF 65	4,62	3,44
15 NAT 45	1,74	2,19
15 NAT 55	2,54	3,21
15 NAT 65	3,38	3,97
25 NAT 45	1,16	3,03
25 NAT 55	2,04	4,16
25 NAT 65	2,94	6,39
15 MOI 45	2,34	1,89
15 MOI 55	3,11	3,06
15 MOI 65	3,32	3,84
25 MOI 45	1,34	2,64
25 MOI 55	2,11	3,65
25 MOI 65	2,27	4,79

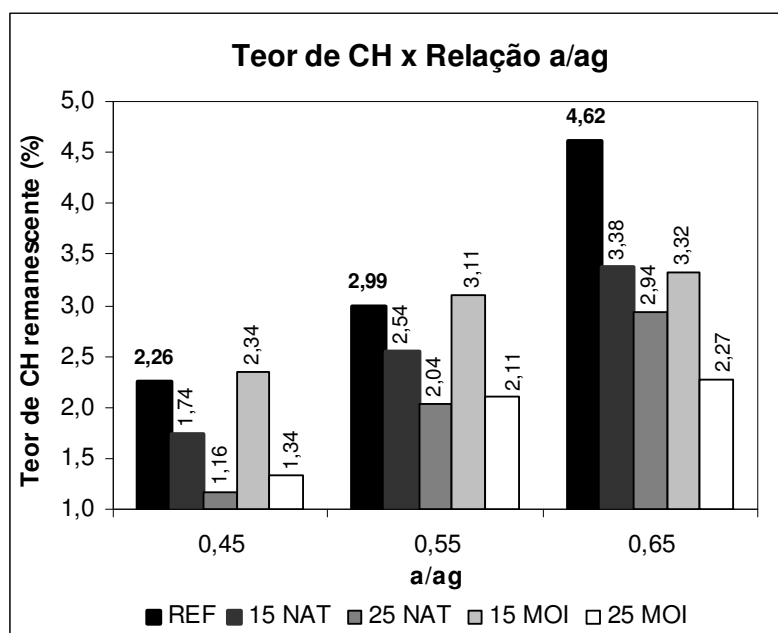


Figura 5.6 – Relação teor de CH remanescente (%) x a/ag

Tabela 5.8 – Equações e valor de r^2 - Teor de CH x relação a/ag

Misturas	Regressão Linear	r^2
REF	T. CH (%) = 11,8 a/ag – 3,2	0,95
15% NAT	T. CH (%) = 8,2 a/ag – 1,96	1,00
25% NAT	T. CH (%) = 8,9 a/ag – 2,85	1,00
15 % MOI	T. CH (%) = 4,9 a/ag – 0,23	0,91
25 % MOI	T. CH (%) = 4,65 a/ag – 0,65	0,88

Quanto ao tipo de CCA, percebe-se pela tabela 5.7 que, para o teor de 15%, a amostra “IN NATURA”, para as relações a/ag de 0,45 e 0,55 apresentou valores de CH remanescente aproximadamente 26% e 18% inferiores à amostra MOÍDA para as mesmas relações a/ag. Já para a relação 0,65, o valor apresentado pela amostra “IN NATURA” foi 2% superior à amostra MOÍDA. Tendência similar foi apresentada pelo teor de 25% de incorporação de CCA, onde os valores de CH remanescente da amostra “IN NATURA” foram aproximadamente 13% e 3% inferiores à amostra MOÍDA para as mesmas relações 0,45 e 0,55. Porém, para a relação a/ag de 0,65, o valor apresentado pela amostra “IN NATURA” foi 30% superior à amostra MOÍDA.

Esse fato pode ser explicado tendo em vista que, para uma estrutura mais densa, com menores valores de relação a/ag, existe menos espaço disponível para a formação e posterior deposição das partículas de CH, caso da amostra de CCA MOÍDA, em comparação à amostra “IN NATURA”. Para o caso da CCA “IN NATURA”, como visto anteriormente, as partículas são de maiores dimensões, dessa forma, haveria mais espaço para a formação das partículas de CH, que em conjunto com uma maior relação a/ag empregada, ocasionaria um maior teor de CH remanescente para a amostra “IN NATURA”, em comparação à amostra MOÍDA, para a relação a/ag de 0,65.

Quanto ao teor de incorporação de CCA, verifica-se através da tabela 5.7, que para a amostra “IN NATURA”, o teor 15% apresentou valores de CH remanescente superiores ao traço com 25% de incorporação, sendo os mesmos aproximadamente 50%, 25% e 15% para as relações a/ag de 0,45, 0,55 e 0,65 respectivamente. Para o caso da CCA MOÍDA, o teor de incorporação de 15% apresentou valores próximos de 75%, 47% e 46% superiores de CH remanescente

em relação ao traço com a incorporação de 25% CCA MOÍDA, para as relações 0,45, 0,55 e 0,65. Confirma-se, nesta pesquisa que, um incremento do teor de incorporação de CCA residual ao concreto, acarreta em um decréscimo no conteúdo de CH remanescente para a idade de 91 dias.

Comparando-se os diversos traços de concreto em igualdade de relação a/ag, tem-se que para o traço com a incorporação de 15% de CCA "IN NATURA", os valores apresentados para o teor e CH remanescente foram aproximadamente 23%, 15% e 27% inferiores ao concreto de REFERÊNCIA. Para o traço com 15% MOIDA, os valores apresentados são 4% superior para a relação a/ag de 0,45; 4% superior para a relação a/ag de 0,55 e para a relação a/ag de 0,65 cerca de 28% inferior ao traço de REFERÊNCIA.

Para a incorporação de 25% "IN NATURA", os valores apresentados por esse traço são aproximadamente 49%, 32% e 36% inferiores ao traço de REFERÊNCIA. Por fim, a incorporação de 25% MOÍDA, os valores verificados são próximos de 41%, 29% e 51% inferiores ao traço de REFERÊNCIA, para as relações a/ag de 0.45, 0.55 e 0.65 respectivamente.

A figura 5.7 mostra a relação entre o coeficiente de carbonatação e o teor de hidróxido de cálcio remanescente aos 91 dias (tabela 5.7) para todas as misturas.

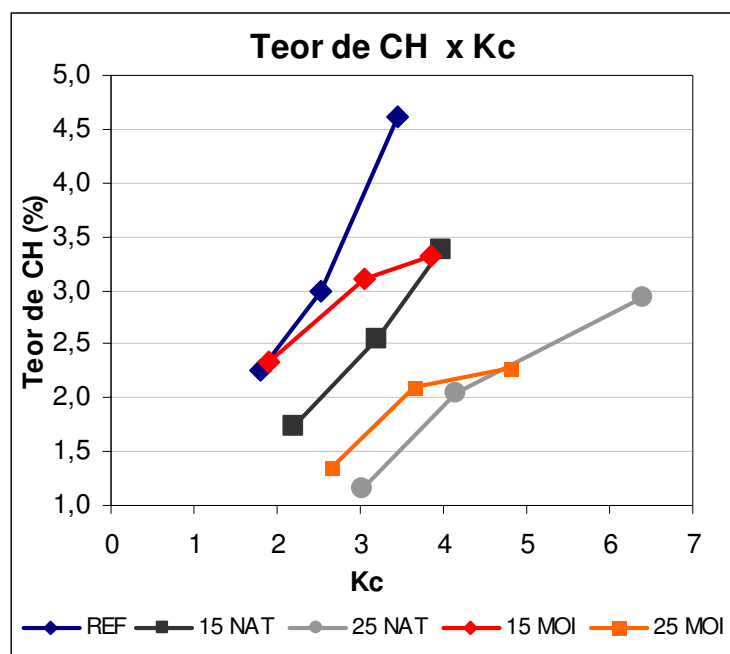


Figura 5.7 – Relação teor de CH remanescente (%) x Kc

Observa-se uma quantidade maior de CH disponível para a mistura de REFERÊNCIA, enquanto todas as traços com a incorporação de CCA situaram-se na parte mais à direita do gráfico, provavelmente devido ao consumo de CH que foi elevado, devido às reações pozolânicas e ao menor teor de clínquer da composição, sendo esses, alguns dos fatores responsáveis pelo incremento no coeficiente de carbonatação dessas misturas.

Com relação aos coeficientes de carbonatação, através da visualização da figura 5.7, nota-se um aumento significativo do K_c para os teores de 25% de CCA, em comparação com os teores 15%, especialmente para a amostra denominada como CCA "IN NATURA", que também podem ser justificados pelo decréscimo na proporção de CH remanescente aos 91 dias.

Relacionando as misturas com compostas de CCA com misturas somente de cimento CP II F-32, verifica-se neste último, que a maior reserva alcalina resultou no menor coeficiente de carbonatação, em igualdade de relação a/ag, provavelmente devido à menor velocidade de difusão do CO_2 na solução dos poros, pois a concentração de CH neste caso é mais elevada, necessitando primeiro rebaixar o pH para depois reagir com todo o CH presente e então seguir penetrando no interior da rede de poros do concreto.

Já nas misturas com CCA, tanto a amostra "IN NATURA" quanto a MOÍDA, apesar do efeito físico de redução da permeabilidade do concreto frente a agentes agressivos, nesse caso o CO_2 atmosférico, ocasionado pela incorporação da CCA ao concreto, prepondera nesta pesquisa, o fator de menor conteúdo de reserva alcalina e, como consequência, a maior predisposição ao processo de carbonatação quando comparado com misturas elaboradas somente com cimento Portland. A figura 5.7 confirma a tendência das reações pozolânicas, ocorridas entre a sílica ativa presente nas amostras de CCA residual e o CH, consumirem maior quantidade de CH na medida em que cresce o teor de CCA residual incorporada ao concreto.

5.10 Coeficiente de carbonatação em função da resistência à compressão axial

Nesta etapa será realizada a análise do comportamento das misturas aglomerantes tomando-se como limite o coeficiente de carbonatação de

4mm/ $\sqrt{\text{semana}}$, conforme Isaia (1995), considerando a profundidade carbonatada que o concreto armado pode apresentar para ser considerado concreto durável. Na figura 5.8 estão representados os coeficientes de carbonatação em função da resistência mecânica aos 91 dias para as misturas investigadas. Na tabela 5.9 têm-se expostas as equações de regressão exponencial e valores de r^2 para a relação entre Kc e resistência mecânica aos 91 dias respectivamente. Verifica-se através da mesma, que os valores de r^2 situaram-se acima de 0,98, evidenciando uma forte correlação entre Kc e resistência mecânica para a idade de 91 dias.

Conforme a figura 5.8, à medida que a resistência mecânica aumentou, para cada traço, houve um decréscimo no coeficiente de carbonatação acelerada.

Através da figura 5.8, que correlaciona o Kc e a resistência mecânica dos concretos aos 91 dias, verifica-se a forte influência exercida pela resistência à compressão do concreto sobre o coeficiente de carbonatação apresentado pelo concreto com a incorporação de 25% de CCA “IN NATURA”.

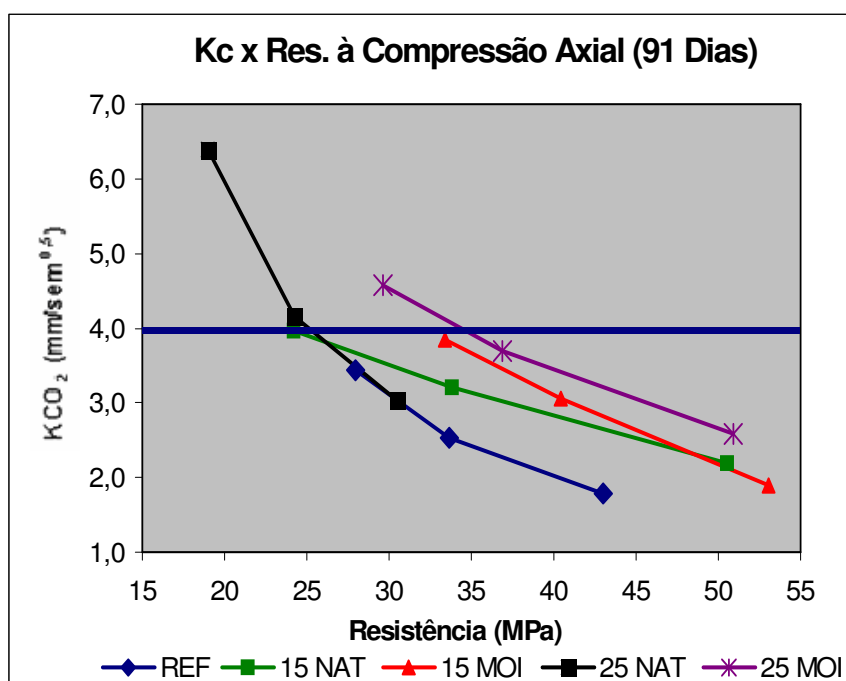


Figura 5.8 – Kc em função da resistência à compressão axial aos 91 dias

Os pontos apresentados por esse traço de incorporação (25% “IN NATURA”) apresentam-se de forma bastante verticalizada em comparação com as demais

curvas plotadas nesse gráfico, evidenciando uma grande variação do coeficiente de carbonatação em um pequeno intervalo de resistência mecânica.

Tabela 5.9 – Equações de regressão K_c x f_c aos 91 dias

Misturas	Regressão Exponencial	r^2
REF	$K_c = 11,210 e^{(-0,0431f_c)}$	0,99
15% NAT	$K_c = 6,876 e^{(-0,0226 f_c)}$	1,00
25% NAT	$K_c = 20,942 e^{(-0,0643 f_c)}$	0,98
15 % MOI	$K_c = 13,045 e^{(-0,0363 f_c)}$	1,00
25 % MOI	$K_c = 9,926 e^{(-0,0265 f_c)}$	1,00

Verifica-se através da figura 5.8 que os traços de REFERÊNCIA e com 15% CCA MOÍDA e NATURAL produzem concretos com $K_c < 4\text{mm}/\sqrt{\text{semana}}$ para as relações a/ag 0,45, 0,55 e 0,65. Para o traço 25% “IN NATURA”, apenas a relação a/ag de 0,45 produz um concreto com $K_c < 4\text{mm}/\sqrt{\text{semana}}$, enquanto que o traço com a incorporação de 25% de CCA MOÍDA, as relações 0,45 e 0,55 produzem concretos com $K_c < 4\text{mm}/\sqrt{\text{semana}}$. Já para o concreto com a incorporação de 25% CCA “IN NATURA”, observa-se novamente uma forte dependência do coeficiente de carbonatação em função da resistência mecânica do concreto, onde apenas a relação a/ag de 0,45 apresenta $K_c < 4\text{mm}/\sqrt{\text{semana}}$.

Observa-se que o traço com a substituição de 25% de CP II F-32 por CCA “IN NATURA” apresentou os menores valores de resistência mecânica aos 91 dias e maiores valores de K_c , em comparação com os demais concretos empregados na pesquisa, em igualdade de relação a/ag.

5.11 Coeficiente de carbonatação em igualdade de resistência

Como importante propriedade na análise do comportamento apresentado pelas diferentes misturas empregadas na pesquisa, a resistência à compressão apresenta-se como uma das propriedades de maior importância para a interpretação de experimentos, pois através dela pode-se fazer comparações entre as misturas em uma determinada idade, verificando o comportamento das demais propriedades, relacionando-as entre si. Por isso, avaliam-se concretos em igualdade de resistência

à compressão. Para acompanhar o desenvolvimento da carbonatação dos concretos para as diferentes misturas investigadas, tornou-se necessário a comparação dos resultados em igualdade de resistência à compressão axial, sendo esta de 30 MPa aos 91 dias, sendo que este valor foi escolhido em função de grande parte dos concretos investigados apresentar valor igual ou superior de resistência de 30MPa para essa idade de ensaio, sendo o único valor de f_c que não possibilita extrapolação das correlações. A figura 5.9 apresenta a relação entre o teor e tipo de CCA residual sobre os coeficientes de carbonatação para igualdade de resistência de 30MPa.

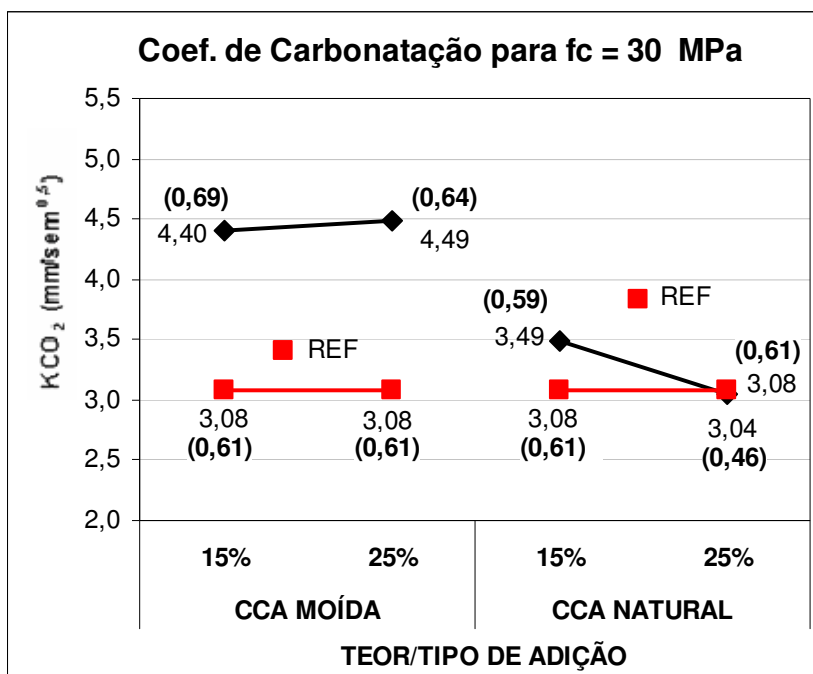


Figura 5.9 – Relação entre o teor e tipo de CCA com o K_c para $f_c = 30$ MPa. Os valores entre parênteses () são as relações a/ag.

Através da visualização da figura 5.9, pode-se interpretar importantes aspectos na comparação entre as misturas aglomerantes elucidando, assim, alguns questionamentos propostos inicialmente para a pesquisa

Com relação a variação do teor de adições, observou-se que para os traços com a incorporação de CCA MOÍDA, os coeficientes de carbonatação apresentaram um pequeno incremento, cerca de 2% para essa resistência estabelecida. Para o traço com 15% CCA MOÍDA o valor de K_c foi de 4,40 mm/ $\sqrt{\text{semana}}$ e a relação a/ag

empregada para o traço foi de 0,69; enquanto que o valor do K_c demonstrado para o traço com 25% MOÍDA foi de 4,49 mm/ $\sqrt{\text{semana}}$, com relação a/ag de 0,64.

Quanto à incorporação de CCA “IN NATURA”, o teor de substituição de 15% apresentou uma relação a/ag de 0,59 e K_c de 3,49 mm/ $\sqrt{\text{semana}}$. Porém, quando se analisa a mudança de teor de 15% para 25% “IN NATURA”, percebe-se uma forte redução do coeficiente de carbonatação. Para este teor de incorporação, percebe-se a influência marcante da variável a/ag sobre a resistência à compressão e o coeficiente de carbonatação. Este fato pode ser explicado pela baixa relação a/ag que se faz necessária para a produção deste concreto para uma resistência à compressão axial de 30 MPa aos 91 dias de idade, fazendo com que o mesmo apresentasse um coeficiente de carbonatação inferior até mesmo ao apresentado pelo REFERÊNCIA para a resistência de 30 MPa. Como se sabe, um decréscimo da relação a/ag provoca uma redução da interconectividade e da permeabilidade e um aumento da tortuosidade da rede de poros do concreto, gerando uma pasta mais impermeável, densa e compacta. Por outro lado, o K_c apresentado pelo traço com 25% “IN NATURA”, 3,04 mm/ $\sqrt{\text{semana}}$, apresentou uma pequena variação em relação ao K_c apresentado pelo concreto de REFERÊNCIA, situando-se em valor pouco abaixo do mesmo, em que a relação a/ag apresentada é igual a 0,61, enquanto que a relação a/ag apresentada pelo traço 25% “IN NATURA” foi de 0,46.

Quanto aos demais níveis de substituição, percebe-se que os concretos com a incorporação de 15% de CCA MOÍDA e “IN NATURA” e 25% MOÍDA apresentaram coeficientes de carbonatação superiores ao concreto de REFERÊNCIA para a resistência mecânica de 30 MPa especificada para os 91 dias de idade. O menor coeficiente de carbonatação, apresentado pelo concreto de REFERÊNCIA, para essa resistência especificada, pode ser explicado devido ao maior teor de clínquer em sua composição e à ausência das reações pozolânicas, gerando conseqüentemente, uma maior reserva alcalina nessa família de concretos.

Com relação ao valor limite considerado para concretos duráveis 4mm/ $\sqrt{\text{semana}}$ e para a resistência estipulada de 30 MPa aos 91 dias de idade, observa-se através da figura 5.9 que os traços com a incorporação de CCA do tipo MOÍDA, para ambos os teores de 15% e 25%, apresentaram valores de K_c de 4,40 mm/ $\sqrt{\text{semana}}$ e 4,49 mm/ $\sqrt{\text{semana}}$, valores superiores ao limite de 4mm/ $\sqrt{\text{semana}}$, para relações a/ag de 0,69 e 0,64 respectivamente. Já para a incorporação de CCA

do tipo "IN NATURA", para o teor de 15%, o valor apresentado para o K_c foi de 3,49 mm/ $\sqrt{\text{semana}}$ e relação a/ag de 0,59, inferior ao limite de 4,0 mm/ $\sqrt{\text{semana}}$.

Por outro lado, para o teor de 25% de incorporação de CCA "IN NATURA" observa-se que o mesmo apresentou um baixo coeficiente de carbonatação 3.04 mm/ $\sqrt{\text{semana}}$. Porém, para atingir o nível de resistência de 30 MPa aos 91 dias, este traço necessita de uma baixa relação a/ag , 0,46. Essa baixa relação a/ag pode explicar o motivo pelo qual o valor do K_c apresentado pelo traço com 25% de CCA "IN NATURA" ser baixo, tendo em vista que a redução da relação a/ag provoca uma diminuição da porosidade e interconectividade e um aumento da tortuosidade, conseqüentemente, um aumento da impermeabilidade do concreto.

5.12 Coeficiente de carbonatação em relação à porosidade

Com o objetivo de se verificar a influência da porosidade sobre os coeficientes de carbonatação, realizou-se uma análise dos mesmos em função da porosidade total, volume de mercúrio intrudido e distribuição dos poros através do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio para todas as misturas estudadas na pesquisa. Como se pode visualizar pela tabela 5.5 e figura 5.3, percebe-se que para a mesma relação a/ag empregada para cada traço de concreto, ocorre um aumento do K_c em função do teor de substituição 15% ou 25% de CCA residual e em função do tipo de CCA (MOÍDA ou "IN NATURA") em comparação com o concreto de REFERÊNCIA.

Para análise da distribuição da rede de poros do concreto depara-se sobre três níveis de volume de Hg intrudido: poros de diâmetro inferiores a 10 nm, poros situados na faixa entre 10 nm a 50 nm e superiores a 50 nm, ou seja, os microporos, mesoporos e macroporos, segundo Mehta & Monteiro (1994).

Visualiza-se através da tabela 5.10, que o volume de Hg intrudido em poros menores que 10 nm, para os concretos com a incorporação de CCA, apresentou um incremento em relação ao concreto de REFERÊNCIA, sendo essa variação de 3% a 63% para a relação 0,45. Para a relação a/ag de 0,55, para o traço com a incorporação de 15% CCA "IN NATURA", o volume de Hg intrudido foi levemente inferior ao apresentado pelo concreto de REFERÊNCIA. Já para os demais níveis de

substituição, para esta relação a/ag, a variação apresentada em relação ao concreto de REFERÊNCIA foi superior entre 4% a 66%.

Tendência similar foi apresentada pela relação a/ag de 0,65 em relação volume Hg intrudido em poros com diâmetro inferior a 10 nm, sendo que os concretos com a incorporação de CCA apresentaram maior volume de mercúrio intrudido, com uma faixa de variação de 22% a 32% superiores ao concreto de REFERÊNCIA.

Tabela 5.10 – Volume de mercúrio intrudido aos 91 dias.

TRAÇO	a/ag	V. Intrudido (ml/g)	MICROPOROS	MESOPOROS	MACROPOROS
REF	0,45	0,083	0,013	0,024	0,046
15 NAT	0,45	0,075	0,018	0,024	0,033
15 MOI	0,45	0,056	0,015	0,022	0,019
25 NAT	0,45	0,078	0,020	0,032	0,026
25 MOI	0,45	0,079	0,013	0,031	0,035
REF	0,55	0,082	0,012	0,023	0,047
15 NAT	0,55	0,079	0,011	0,030	0,038
15 MOI	0,55	0,078	0,017	0,036	0,025
25 NAT	0,55	0,089	0,013	0,036	0,041
25 MOI	0,55	0,083	0,020	0,033	0,030
REF	0,65	0,087	0,011	0,027	0,048
15 NAT	0,65	0,089	0,015	0,026	0,049
15 MOI	0,65	0,103	0,014	0,037	0,051
25 NAT	0,65	0,092	0,014	0,036	0,043
25 MOI	0,65	0,096	0,015	0,038	0,043

Com relação ao volume de mercúrio intrudido para a faixa de poros situada entre 10 e 50 nm, exceto para a relação a/ag de 0.45 para o traço com 15% MOÍDA, e para a relação 0.65 para o traço 15%“IN NATURA”, que apresentaram valores de volume de Hg intrudido inferiores ao concreto de REFERÊNCIA, de uma maneira geral, os valores apresentados para os traços com a incorporação de CCA residual foram superiores ao concreto de REFERÊNCIA. Para as relações a/ag de 0,45, 0,55 e 0,65 as faixas de incremento apresentadas situaram-se entre 2% a 31%, 32% a 58%, 31% a 39%, respectivamente. Quanto ao volume de mercúrio intrudido para os poros maiores que 50 nm, exceto para os traços com 15% de substituição tanto “IN NATURA” quanto MOÍDA, para a relação a/ag de 0,65 cujos valores foram aproximadamente 3% e 8% respectivamente superiores ao volume de Hg intrudido

para o concreto de REFERÊNCIA, para os demais traços com relação a/ag de 0,45, 0,55 e 0,65 as faixas de decréscimo de volume intrudido situaram-se entre 29% a 60%, 13% a 48% e 9%, respectivamente.

Verifica-se que incorporação de CCA residual ao concreto, tanto a amostra “IN NATURA” quanto a MOÍDA, acarreta em benefícios ao mesmo, através das alterações provocadas na microestrutura da pasta, promovendo o tamponamento, a obstrução e redução da interconectividade da rede de poros tendo em vista o aumento do volume de mercúrio intrudido nos microporos e mesoporos, além de uma redução no volume de mercúrio intrudido nos macroporos, em comparação ao concreto de REFERÊNCIA. Gastaldini *et al.* (1996), também estudaram a influência da CCA na porosidade total e no diâmetro médio dos poros, onde os resultados encontrados permitiram concluir que a CCA provocou um efeito benéfico na microestrutura das pastas, através do refinamento dos poros. Através da visualização da tabela 5.11, pode-se observar a relação entre o coeficiente de carbonatação e a porosidade total apresentada para os diferentes tipos de concreto investigados.

Tabela 5.11 – Kc x Porosidade Total (%)

TRAÇO	a/ag	Kc (mm/sem^{0,5})	Porosidade Total (%)
REF	0,45	1,78	17,5%
15 NAT	0,45	2,19	16,2%
15 MOI	0,45	1,89	18,5%
25 NAT	0,45	3,03	16,4%
25 MOI	0,45	2,64	17,0%
REF	0,55	2,53	17,7%
15 NAT	0,55	3,21	16,5%
15 MOI	0,55	3,06	16,8%
25 NAT	0,55	4,16	18,6%
25 MOI	0,55	3,65	17,1%
REF	0,65	3,44	17,1%
15 NAT	0,65	3,97	18,5%
15 MOI	0,65	3,84	21,1%
25 NAT	0,65	6,39	18,9%
25 MOI	0,65	4,79	20,0%

Quando se analisa a influência da CCA sobre a porosidade total dos concretos, percebe-se que a mesma não provoca acentuadas melhoras sobre esse

parâmetro, sendo que os valores apresentados pela relação a/ag de 0,45 foram em média para o teor de 15% de substituição de 14,7% e para o teor de 25% de substituição de 16,7%, enquanto que para o concreto de REFERÊNCIA, o valor apresentado foi de 17,5 %. Já para a relação 0,55, os valores foram em média para o teor de 15% de substituição de 16,6% e para o teor de 25% de substituição 17,9%, enquanto que para o concreto de REFERÊNCIA, o valor apresentado foi de 17,7%. Por outro lado, para a relação a/ag de 0,65, a porosidade total das amostras de concreto com a incorporação de CCA apresentaram valores superiores ao concreto de REFERÊNCIA, sendo em média 19,8% e 19,5 % respectivamente para o teor de 15% e 25% de substituição. Segundo Mehta & Monteiro (1994), a porosidade total do concreto não representa o parâmetro mais adequado para a determinação da permeabilidade do concreto frente a agentes agressivos. Conforme mesma referência, a distribuição dos poros, mais precisamente a presença de macroporos ($\phi > 50\text{nm}$) é que determina a maior ou menor facilidade de penetração de agentes agressivos para o interior do concreto, no caso o CO_2 atmosférico. Constatação importante pode ser retirada da figura 5.10, que se embasa sobre a redistribuição dos poros ocasionada pela incorporação de CCA ao concreto.

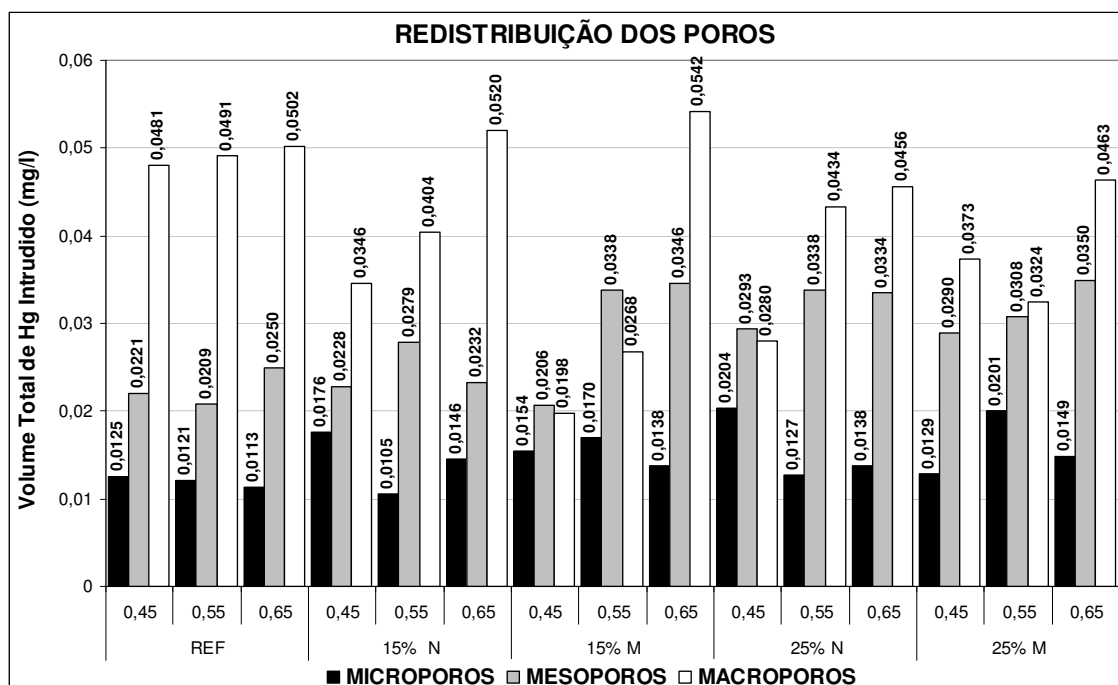


Figura 5.10 – Redistribuição dos poros ocasionada pela CCA

Em concretos com a substituição de cimento CP II F-32 por CCA residual, ocorreu, de maneira geral, um acréscimo de poros com $\phi < 10\text{nm}$ (microporos), um aumento de poros com diâmetro entre $10\text{ nm} < \phi < 50\text{ nm}$ (mesoporos), e uma redução dos poros com $\phi > 50\text{ nm}$ (macroporos), em relação ao volume de mercúrio intrudido, em todas as relações a/ag empregadas. Esse é o efeito benéfico produzido pela incorporação de CCA residual ao concreto através de alterações na microestrutura.

Essa comparação tem por finalidade mostrar o incremento na quantidade de microporos, um aumento da concentração de mesoporos um decréscimo da quantidade de macroporos nos concretos produzidos com a incorporação de CCA residual em comparação ao concreto de REFERÊNCIA, evidenciando o efeito do refinamento dos poros ocasionado pela incorporação de CCA residual ao concreto.

Analisando-se os coeficientes de carbonatação em relação à porosidade apresentada pelos distintos traços de concreto empregados na pesquisa, percebe-se resultados semelhantes às pesquisas de Isaia, Vaguetti & Gastaldini (1998) e Sulapha *et al.* (2003), em que os autores pesquisaram a carbonatação em concretos de cimento Portland puros e com a presença de adições minerais. De forma semelhante, os autores citados concluíram que em concretos com a incorporação de adições minerais, apesar de as mesmas propiciarem um maior refinamento dos poros, aumentando a tortuosidade dos capilares e diminuindo sua permeabilidade, prepondera o efeito da menor reserva alcalina, resultando em frente de carbonatação mais veloz do que no cimento Portland comum.

Nesta pesquisa, de acordo com os resultados expostos na tabela 5.5 e figura 5.3, percebe-se um aumento dos coeficientes de carbonatação com a substituição de CP II F-32 por CCA residual, em igualdade de relação a/ag. Esse incremento fica mais pronunciado, quando os teores de incorporação de CCA chegam a 25%, tanto das amostras MOÍDA e "IN NATURA". Este fato pode ser atribuído ao efeito dominante da diminuição da reserva alcalina ocasionado pela menor produção de CH oriundo do processo de hidratação do cimento, além do consumo de CH remanescente pelas reações pozolânicas, (tabela 5.7) sobre o efeito de refinamento da rede de poros proporcionados pela incorporação de CCA residual ao concreto, conforme pode ser visualizado pela figura 5.10.

6 CONCLUSÃO

6.1 Conclusão geral

A partir da análise dos resultados obtidos nos ensaios e com base na literatura consultada sobre o tema, foi possível obter conclusões a respeito dos objetivos e questionamentos propostos inicialmente por essa pesquisa. Partindo das questões levantadas nos objetivos específicos, procurou-se estabelecer as respostas com base nos resultados obtidos, nas análises realizadas e também na literatura existente sobre o tema.

Com base nos resultados dos ensaios de laboratório, e nas discussões apresentadas pode se concluir, genericamente, que para teores de 15% de incorporação de CCA residual tanto a amostra MOÍDA quanto "IN NATURA" nas três relações a/ag empregadas na pesquisa 0,45, 0,55 e 0,65 e para o teor de 25% de substituição, amostra "IN NATURA" de relação a/ag de 0,45 bem como a amostra MOÍDA com relação a/ag de 0,45 e 0,55 podem ser empregadas em concreto estrutural, quando a variável de durabilidade do concreto é a carbonatação, pois apresentam K_c inferior a 4,0 mm/ $\sqrt{\text{semana}}$. Para se garantir tal propósito, também deve-se levar em consideração as boas condições de execução de estrutura de concreto armado.

6.2 Coeficientes de carbonatação (K_c)

Verificou-se que o concreto de REFERÊNCIA (100% CP II F-32) apresentou valores de coeficientes de carbonatação, para as relações a/ag de 0,45, 0,55 e 0,65, inferiores em relação aos valores apresentados pelos concretos com a incorporação de CCA residual, tanto para a amostra MOÍDA quanto a "IN NATURA" em igualdade de relação a/ag. Os traços com 25% de incorporação de CCA "IN NATURA" de relação a/ag de 0,55 e 0,65, além do traço com a substituição de 25% de CCA

MOÍDA e relação a/ag 0,65 apresentaram coeficientes de carbonatação superiores ao limite de K_c 4,0 mm/sem^{0,5}.

Verifica-se a possível viabilidade técnica do emprego da CCA residual "IN NATURA" e MOÍDA, no teor de 15% para as relações a/ag de 0,45, 0,55 e 0,65 que podem ser considerados concretos duráveis frente à carbonatação, pois apresentaram coeficientes de carbonatação abaixo de 4,00 mm/sem^{0,5}. Caso semelhante para o teor de 25% de incorporação, amostra "IN NATURA" de relação a/ag de 0,45 e a amostra MOÍDA com relação a/ag de 0,45 e 0,55 que também podem ser empregadas em concreto estrutural, quando a variável de durabilidade do concreto é a carbonatação, pois apresentaram valor de K_c abaixo do valor limite.

6.3 Teor de CH versus coeficiente de carbonatação

Quanto ao teor de CH remanescente, percebe-se a confirmação de outras pesquisas relatadas anteriormente, onde a incorporação de CCA ocasiona um maior consumo de CH através das reações pozolânicas.

O traço com a substituição de 15% CCA "IN NATURA" apresentou valores de CH remanescente superiores com 25% CCA "IN NATURA", para as relações a/ag de 0,45, 0,55 e 0,65 respectivamente. Da mesma forma, para o caso da CCA MOÍDA, o teor de 15% apresentou valores superiores em relação ao traço 25% MOÍDA, para as relações a/ag de 0,45, 0,55 e 0,65. Esse fato comprova que, devido às reações pozolânicas, a quantidade de CH remanescente diminuiu à medida que aumentou o teor de incorporação de CCA no traço, tendo, como consequência, o incremento dos coeficientes de carbonatação dos concretos.

Confirma-se através dos resultados desta pesquisa que, o concreto de REFERÊNCIA (100% CII F-32) apresentou os maiores teores de CH remanescente e também os menores coeficientes de carbonatação em igualdade de relação a/ag, em comparação com os concretos com a incorporação de CCA residual. Este comportamento pode ser creditado à maior reserva alcalina que o cimento CP II F-32 proporciona em comparação aos concretos elaborados com a incorporação de CCA residual.

6.4 Relação a/ag versus coeficiente de carbonatação

De acordo com os resultados da pesquisa, verificou-se que um aumento da relação a/ag provoca um acréscimo dos valores dos coeficientes de neutralização para todos os traços de concreto investigados. Para o concreto de REFERÊNCIA, a variação foi de 42% e 93% superiores, para o teor de 15% MOÍDA, o acréscimo foi de 62% e 103%; para a substituição de 15% "IN NATURA", o incremento foi de 47% e 81%, para o traço 25% MOÍDA, o aumento foi de 38% e 81% e para o concreto 25% "IN NATURA", o acréscimo foi de 37% e 111%, para as relações a/ag de 0,55 e 0,65 quando comparados ao concreto com relação 0,45. Conclui-se que, um aumento da relação a/ag provoca um aumento dos coeficientes de carbonatação, para a mesma família de concretos, pois, um incremento dessa variável ocasiona um aumento da interconectividade e da permeabilidade diminuindo a tortuosidade dos canais da rede de poros do concreto, gerando uma pasta mais permeável frente à entrada de agentes agressivos, no caso desta pesquisa o CO₂ atmosférico.

Comparando-se resistência estipulada de 30 MPa aos 91 dias de idade, observa-se que os traços com a incorporação de CCA do tipo MOÍDA, para ambos os teores de 15% e 25%, apresentaram valores superiores ao limite de 4mm^{1/2}/semana, com relação a/ag de 0,69 e 0,64 respectivamente. Para a incorporação de CCA do tipo "IN NATURA", para o teor de 15%, o valor apresentado para o Kc foi inferior ao limite de 4,0 mm/sem^{0,5}, com relação a/ag de 0,59. Para o teor de 25% substituição de CCA "IN NATURA", observa-se que o mesmo apresentou baixo coeficiente de carbonatação, 3,04 mm/sem^{0,5}. Este fato pode ser explicado tendo em vista que, para atingir 30 MPa aos 91 dias, este traço necessita de uma baixa relação a/ag, 0,46. Devido a esse baixo valor de relação a/ag empregado ao traço 25% "IN NATURA", consegue-se um Kc abaixo de 4,0 mm/sem^{0,5}.

6.5 Influência do tipo de CCA residual empregado

Quanto ao tipo de CCA residual empregado, MOÍDA ou “IN NATURA” conforme resultados dessa pesquisa percebe-se, genericamente, que os coeficientes de carbonatação apresentaram valores superiores para as amostras contendo CCA “IN NATURA” em comparação às amostras contendo CCA MOÍDA.

Para ambos os teores de incorporação, 15% e 25%, a amostra “IN NATURA” apresentou coeficientes de carbonatação superiores à amostra MOÍDA para as relações a/ag de 0,45, 0,55 e 0,65. Pode-se observar que os coeficientes de carbonatação para o mesmo teor de incorporação 15% ou 25%, foram inferiores para as amostras que sofreram beneficiamento (MOÍDA), quando comparadas aos resultados da CCA “IN NATURA” (sem beneficiamento). Este fato pode ser explicado tendo em vista a redução do tamanho das partículas de CCA ocasionada pelo processo de moagem conferido à amostra do tipo beneficiada. Para a amostra do tipo MOÍDA, cerca de 90% das partículas da amostra se encontram abaixo do diâmetro de 54,14 μm , ao passo que a amostra com CCA “IN NATURA” apresentam 90% das partículas com diâmetro inferior a 80,51 μm e 69,39 μm , para os teores de incorporação de 15% e 25% respectivamente.

Dessa forma, pode-se concluir que o processo de moagem empregado nessa pesquisa ocasionou um efeito benéfico aos concretos elaborados com esse tipo de CCA residual, ocasionado decréscimo no tamanho das partículas, aumentando sua reatividade com o CH, e proporcionando valores de K_c inferiores para a amostra MOÍDA em comparação com a amostra “IN NATURA”, para ambos os teores de incorporação.

Apesar deste fato, a CCA residual “IN NATURA” pode ser empregada em concreto estrutural sob determinadas circunstâncias, para o teor de 15% de substituição nas relações a/ag de 0,45, 0,55 e 0,65 e para o teor de 25% de incorporação para a relação a/ag de 0,45.

6.6 Influência do teor de CCA residual empregado

Quanto aos teores de substituição 15% e 25% de CCA “IN NATURA” e MOÍDA, percebe-se um aumento dos coeficientes de carbonatação, com um aumento do teor de substituição de CP II F-32 por CCA residual, para as mesmas relações a/ag empregadas.

Quando se efetuou a comparação entre a amostra “IN NATURA”, verificou-se que o teor de incorporação de 25% apresentou valores de coeficiente de carbonatação superiores ao teor de 15% de substituição, para as relações a/ag de 0,45, 0,55 e 0,65. De maneira similar, para a substituição por CCA MOÍDA, o teor 25% apresentou valores de K_c também superiores ao concreto de traço 15% de incorporação para as três relações a/ag, respectivamente.

Quanto ao teor de substituição do cimento por CCA residual, concluiu-se que, para a amostra “IN NATURA” não é vantajoso utilizar o teor de 25% de incorporação, pois o mesmo contribui de forma marcante para o aumento do coeficiente de carbonatação, além de pouco contribuir para a manutenção dos índices de resistência mecânica apresentados pelo concreto de REFERÊNCIA.

Quanto ao teor de incorporação de 25% residual MOÍDA, verifica-se que, as relações a/ag de 0,45 e 0,55 produzem concretos com $K_c < 4,0 \text{ mm/sem}^{0,5}$, sendo que esses traços podem ser considerados duráveis frente à carbonatação, em relação ao valor limite de $4,0 \text{ mm/sem}^{0,5}$.

Concluiu-se que, para a CCA residual empregada nessa pesquisa, o teor de incorporação de 15% tanto a amostra “IN NATURA” quanto a amostra MOÍDA, constitui-se no teor ótimo analisado, pois produz concretos que podem ser considerados duráveis frente à carbonatação, nas três relações a/ag estudadas, apresentando valores de K_c inferiores ao limite de $4,0 \text{ mm/sem}^{0,5}$, além de bons índices de resistência mecânica quando comparados ao REFERÊNCIA.

6.7 Influência da CCA sobre a porosidade e sobre os coeficientes de carbonatação

Para concretos com a substituição de cimento CP II F-32 por CCA residual, ocorreu, de maneira geral, um acréscimo da quantidade de poros com $\phi < 10\text{nm}$ (microporos), um aumento da quantidade de poros com diâmetro entre $10\text{ nm} < \phi < 50\text{ nm}$ (mesoporos), e uma redução, do valor percentual de poros com $\phi > 50\text{ nm}$ (macroporos), em relação ao volume de mercúrio intrudido, em todas as relações a/ag empregadas nos concretos compostos com a incorporação de CCA residual em comparação ao concreto de REFERÊNCIA. Evidencia-se, dessa forma, o efeito do refinamento dos poros ocasionado pela CCA.

Quando se analisou a influência da CCA residual sobre a porosidade total dos concretos, percebe-se que a mesma não provoca acentuadas melhoras sobre esse parâmetro.

Como conclusão desta pesquisa, verifica-se que, a CCA residual propicia um refinamento dos poros e dos grãos especialmente para o caso da amostra MOÍDA, em comparação com a amostra "IN NATURA" tanto para os teores de 15% e 25% de incorporação e em comparação ao concreto de REFERÊNCIA (100% CP II F-32), aumentando a tortuosidade dos capilares e conseqüentemente diminuindo a permeabilidade do concreto. Por outro lado, prepondera, o efeito dominante da menor reserva alcalina apresentada pelos concretos com a incorporação de CCA residual, para ambos os teores 15% e 25%, resultando em uma frente de carbonatação mais veloz quando comparadas ao concreto de REFERÊNCIA (100% CP II F-32).

6.8 Sugestões para futuras pesquisas

Como continuidade deste trabalho, sugere-se a determinação das profundidades de carbonatação para o ensaio natural, com os mesmos materiais

empregados nesta pesquisa, nas idades estabelecidas na metodologia do experimento e comparados com os resultados de carbonatação acelerada.

Para os ensaios de carbonatação acelerada, torna-se importante a normalização do período de cura inicial, da concentração de CO₂, temperatura e umidade relativa no interior da câmara climática, para que os resultados acelerados sejam comparáveis entre si como também com os resultados oriundos da carbonatação natural.

Para futuros trabalhos na área, poderão ser estudados outros teores de incorporação de CCA residual "IN NATURA", tais como: 5%, 10% , 20% e 30% para que se determine um percentual ideal para esta adição, além do seu tempo de moagem ótimo no interior da betoneira, verificando a influência destes teores sobre as propriedades de resistência mecânica, carbonatação acelerada e natural, absorção capilar, permeabilidade ao oxigênio, penetração de cloretos e resistividade elétrica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBAS, A.; CARCASSES, M.; OLLIVIER, J.P. **Gas permeability of concrete in relation to its degree of saturation**. Matériaux et Constructions vol.32 – p.03-08, January/February, 1999.

AITCIN, P. C. **Concreto de alto desempenho**. São Paulo: Editora Pini, 2000.

ALVES, A. S. **Efeitos físicos e químicos de misturas pozolânicas na carbonatação e penetrabilidade à água em concretos de alto desempenho**. Santa Maria, 2000. 117 p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, 2000.

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.

BOUZOUBAÂ, N.; B. FOURNIER. **Concrete incorporating rice-husk ash; compressive strength and chloride-ion penetrability.** Materials and technology laboratory mtl 2001 – 5, July 2001.

CADORE, W.W.; ISAIA, G.C.; GASTALDINI, A.L.G.; DIESEL, F.B. **Carbonatação em protótipos com altos teores de adição.** 48º Congresso Brasileiro do Concreto IBRACON, Setembro de 2006.

CARMONA, T.G. ; HELENE, P.R.L. **Modelos de previsão de despassivação das armaduras em estruturas de concreto sujeitas à carbonatação.** Boletim Técnico. Departamento de Engenharia e Construção Civil. BT/PCC/425. São Paulo, 2006.

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.** Goiás 2003, 237 p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Goiás, UFG, 2003.

CAZMIERCZAK, C. S.; HELENE, P. R. L. **Estimativa e determinação da profundidade de carbonatação em estruturas de concreto.** Seminário Qualidade

e Durabilidade das Estruturas de Concreto 08 e 09 de dezembro de 1993 – Porto Alegre – RS.

CBIC – Câmara Brasileira da Indústria da Construção - **Boletim técnico fevereiro de 2007**, ANO III N°02, disponível em: [http:// www.cbic.com.br](http://www.cbic.com.br). Acesso em 26/03/2007.

CEUKELAIRE,L.D. ; NIEUWENBURG, D.V. **Accelerate carbonation of blast-furnace cement concrete**. Cement and Concrete Research, vol 23 pp. 442 – 452, 1993.

CHANG, C.F.; CHEN, J.W. **Strength and elastic modulus of carbonated concrete**. ACI Materials Journal, pp. 315 - 321 September/October 2005.

CHAUDHARY,D.S.; JOLLANS, M.D.; CSER.,F. **Understanding rice hull ash as fillers in polymers: a review**. Silicon Chemistry, vol 1 p. 281-289, 2002.

CONAB **Sétimo levantamento de avaliação da safra 2006/2007**. Disponível em www.conab.org.br. Acesso em 21/04/2007.

DAL MOLIN D.C.C.; ISAIA G.C. **Concreto: Ensino Pesquisa e Realizações**. Ed. Geraldo C. Isaia – São Paulo: IBRACON, 2005 2v, 1600p.

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

DHIR, R.K.; HEWLETT, P.C.; CHAN. Y.N. **Near characteristics of concrete : prediction of carbonation resistance**. Magazine of concrete research vol.41 p. 137 - 143 September, 1989.

EL HOSINY, F. I.; ABO-EL-ENEIN S. A.; HELMY I.M.; KHALIL, A. **Effect of termal treatment of rice husk ash on surface prperties of hydrated portland cement-rice ash pastes**. Journal of Thermal Analysis, vol 48 (1997), pp 809-817.

EUROPEAN RENEWABLE ENERGY COUNCIL. **Energy [r]evolution. A sustainable world energy outlook**. (EREC,2007).

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

FIGUEIREDO, E. J. P.; HELENE, P. R. L.; ANDRADE, C. **Fatores determinantes da iniciação e propagação da corrosão da armadura do concreto**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo BT/PCC/121 São Paulo, 1993.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). **Rice Market Monitor**. Junho de 2005. Disponível em:

<http://www.fao.org/es/ESC/en/20953/21026/21631/highlight_23001en.html>. Acesso em: 26/09/2005.

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.

FUKUSHIMA, T.; YOSHIZAKI, Y.; TOMOSAWA, F.; TAKAHASHI, K. **Relationship between neutralization depth and concentration distribution of CaCO_3 – Ca(OH)_2 in carbonated concrete.** In: MALHOTRA, V. M. (ed.). CANMET/ACI. International Conference on Durability of Concrete, Fourth CANMET/ACI/JCI. International Conference, Tokushima, Japan, 1988. SP 179.

GASTALDINI, A. L. G. **Influência das adições minerais na porosidade de pastas de cimento Portland.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIMENTO, 4., 1996, São Paulo. Anais Porto Alegre: ABCP, 1996, 3v, v. 1, p. 119-136.

HELENE, P.; VIEIRA, J.O.; ANDRADE, T.; DELGADO, C.; JUST, A. **Influência da relação água / cimento e abatimento na carbonatação do concreto.** 1999. Publicação IBRACON 1999.

HELENE, P. R. L.; MITIDIERI, C. V.; THOMAZ, E. **Influência do tipo de cimento e da relação a/c na carbonatação do concreto: estimativa da vida útil de projeto.** São Paulo, 1995. Publicação IBRACON 95 dur 011.

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

HOPPE, T.F. **Resistividade elétrica de concretos contendo diferentes teores de cinza de casca de arroz.** Santa Maria, 147 p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, 2005.

HOUST, Y.F. **Microstructural changes of hydrated paste due to carbonisation.** Mechanisms of chemical degradation of cement-based systems. **Proceedings** of the Materials Research Society's. Symposium on Mechanisms of Chemical degradation of cement-based systems, Boston 27-30 November 1995.

HOUST, Y.F.; WITTMANN, F.H. **Influence of porosity and water content on the diffusivity of CO_2 and O_2 through hydrated cement paste.** Cement and Concrete Research, vol 24 p. 1165 – 1176, 1994.

HOUST, Y.F.; WITTMANN, F.H. **Depth profiles carbonates formed during natural carbonation.** Cement and Concrete Research, vol 32 p. 1923 – 1930, 2002.

HOUSTON, D. F. Rice hulls. **Rice chemistry and technology.** Am. Ass. Cereal Chem. Ins. St. Paul, Minesota, USA p 301-350, 1972.

IRGA. **Instituto Rio Grandense do Arroz. Roteiro Técnico Barra do Ribeiro, 2006.** Disponível em: <http://www.irga.rs.gov.br>. Acesso em 10/02/2007.

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. Tese de Doutorado. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1995.

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.

ISAIA, G.C.; VAGHETTI, M.A.O.; GASTALDINI, A.L. **Carbonatação acelerada e natural de concreto com alto teor de pozolanas: um estudo preliminar**. Foz do Iguaçu, Paraná, 2001. 43º Congresso Brasileiro do Concreto.

ISAIA, G. C.; GASTALDINI, A. L. G.; MORAES, R. C. **The physical and pozzolanic action of mineral additions on the mechanical strength of high-performance concrete**. In: Sustainable Construction Into The Next Millenium Environmentally-Friendly And Innovative Cement Based Materials, 2000, João Pessoa. Proceedings Of The International Conference On Sustainable Construction Into The Next Millenium, João Pessoa: Universidade Federal Da Paraíba, 2000. V.1, P. 229-244.

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.

ISMAIL, M.S.; WALIUDDIN, A.M. **Effect os rice husk ash on high strength concrete**. Construction and Building Materials, vol 10 N°7 p. 521-526, 1996.

JOHANNESON, B.; UTGENANNT, P. **Microstructural changes caused by carbonation of cement mortar**. Cement and Concrete Research, vol 31 p. 925 – 931, 2001.

JOHN, V.M.; TUDISCO, M. **Durabilidade e carbonatação do concreto armado na revisão da NBR 6118**. Seminário Qualidade e Durabilidade das Estruturas de concreto - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto-Alegre, 08/09 dezembro, 1993.

JONES, M.R.; NEWLANDS, M.D.; ABBAS, A.M.O.; DHIR, R.K. **Comparison of 2 year carbonation depths of common cement concretes using the modified draft CEN test**. Materials and Structures / Matériaux et Constructions, Vol 34, August/September, pp. 396-403, 2001.

JOSE JAMES, J.; RAO, M. S. **Reactivity of rice husk ash** Cement and Concrete Research 16 VOL 16 pp. 296 – 302, 1986.

KAZMIERCZAK, C. S.; HELENE, P. R. L. **Análise e fatores que influenciam a velocidade de carbonatação em estruturas de concreto armado.** IBRACON – Reunião Anual. Brasília, 1993. Controle de Qualidade do concreto. Processos construtivos em obras de Concreto. Publicação IBRACON 93 dur001.

KILINÇKALE, F.M.. **The effect of MgSO₄ and HCl solutions of the strength and durability of pozzolan cement mortars.** Cement and Concrete Research, vol 27 n°12 pp. 1911-1918,1997.

KOKUBU, M; NAGATAKI, S. **Carbonation of concrete with fly-ash and corrosion of reinforcements in 20-years tests.** In: Malhotra, V. M. (ed.) International Conference on fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete, 3rd, Trondheim, 1989. *Proceedings.* American Concrete Institute, Detroit, 1989.

KUHN, M.C.; WILLRICH, F.L.; LIMA, H.C.. **Efeito da resistência à compressão na resistência à carbonatação do concreto.** 47º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON, Setembro de 2005, Anais.

KULAKOWSKI, M.P.; PEREIRA, M.P.; DAL MOLIN, D.C.C.; KAZMIERCZAK, C.S.. **Estudo da porosidade como condicionante da durabilidade e da carbonatação em concretos.** 48º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON, Setembro de 2006, Anais.

KULAKOWSKI, M.P. **Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas compostos com adição de sílica ativa.** Porto Alegre, 1999 p.. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, 2002.

LEA. **Chemistry of Cement and Concrete.** London: Arnold, 1998.

MALHOTRA, V.M. **Reducing CO₂ emissions.** Concrete International. September, 2006.

MASSAZZA, F. **Pozzolana and pozzolanic cements.** In: HEWLWTT, P. C. (ed). Lea's Chemistry of Cement and Concrete. London: Arnold, 1998, p. 471-632.

MEHTA, P.K. **Durability: Critical issues for the future.** Concrete International, July 1997.

MEHTA, P.K. **Reducing the environmental impact of concrete.** Concrete International, October, 2001.

MEHTA, P.K. **Greening of the concrete industry for Sustainable Development.** – Concrete International, July, 2002.

MEHTA P.K.; D. MANMOHAN. **Sustainable high-performance concrete structures.** Concrete International, July, 2006.

MEHTA, P.K. **Properties of blended cements made from rice husk ash.** ACI Materials Journal, September 1977.

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. **Concrete technology for sustainable development**. Concrete International. November, 1999.

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

MIRA P., PAPADAKIS V. G., TSIMAS S. **Effect of lime putty addition on structural and durability properties of concrete**. Cement and Concrete Research, VOL 32 pp. 683 – 689, 2002.

NEPOMUCENO, A. A.; NEVES, I. B. F. **Avaliação da capacidade de proteção de argamassas produzidas com cinza de casca de arroz em relação à corrosão de armaduras em ambientes com CO₂**. VI Simpósio EPUSP sobre estruturas de concreto, abril de 2006, Anais.

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

NGALA, V.T.; PAGE,C.L. **Effects of carbonation on pore structure and diffusional properties of hydrated cement pastes**. Cement and Concrete Research, VOL 27 pp. 995 – 1007, 1997.

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

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

PAPADAKIS, V. G.; TSIMAS, S. A. **Supplementary cementing materials in concrete part II : A fundamental estimation of efficiency factor**. Cement and Concrete Research vol. 32 p. 1533 -1538, 2002.

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

PARROT, L.J. **Some effects of cement and curing upon carbonation and reinforcement corrosion in concrete**. Materials and Structures, vol. 29, p. 164 - 173, April, 1996.

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

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

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

PENTTALA, V. **Concrete and Sustainable Development**. Technical Paper ACI Materials Journal / September, p. 409 – 416, October 1997.

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.

PRAMADA, P.N.; CHANDRASSEKHAR, S. **Effect of calcination temperature and heating rate on the optical properties and reactivity of rice husk ash**. Journal Materials and Structures, 2005.

REGO, J.H.S.; FIGUEIREDO, E. J. P. **Rice husk ash (rha) obtained without temperature control as partial substitute of cement in high performance concrete**. III International Conference on High-Performance Concrete, and Performance and Quality of Concrete Structures, Recife, Pernambuco, Brasil, October 2002.

REGO, J.H.S.; FIGUEIREDO, E.P. **Rice husk ash (RHA) obtained without temperature control as partial substitute of cement in high performance concretes**. In: International Conference on High-Performance Concrete, and Performance and Quality of Concrete Structures, 3., 2002. Recife -PE. Proceedings... Recife: UPE, 2002. 1 CD-ROM.

REGO, J.H.S. **Caracterização do resíduo cinza de casca de arroz (CCA) no Brasil**. In: Jornadas Sud-Americanas de Ingeniería Estructural, 2004, Mendoza-Argentina. Anais. Mendoza, Argentina: Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo, 2004. 1 CD-ROM.

REGO, J.H.S.; NEPOMUCENO, A. A.; FIGUEIREDO, E. J. P.; VIEIRA, F. L. **Análise da microestrutura e da estrutura porosa de pastas de cimento compostas com cinza de casca de arroz (cca's) amorfa e cristalina**. 48° Congresso Brasileiro do Concreto, IBRACON 2006, Anais.

REGO, J.H.S. ; FIGUEIREDO, E.P.; NEPOMUCENO, A. A. **A utilização da cinza de casca de arroz residual (cca residual) como adição mineral ao cimento em concretos**. 44° Congresso Brasileiro do Concreto, IBRACON 2002.

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.

RODRIGUEZ DE SENSALE, G.; REINA, D. **Influencia de la incorporación de ceniza de cáscara de arroz residual uruguayana como material cementício suplementario en hormigones de alto desempeño**. In: Jornadas Sud-Americanas de Ingeniería Estructural, 2004, Mendoza-Argentina. Anais. Mendoza, Argentina: Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo, 2004. 1 CD-ROM.

ROMER, M. **Effect of moisture and concrete composition on the Torrent permeability measurement**. Materials and Structures, vol. 38, p. 541 - 547, June, 2005.

ROSENBERG, A. **Mechanisms of Corrosion of Steel in Concrete** "Materials science of concrete/ edited by P. Skalny" - 1989 - The American Ceramic Society - Westerville, OH - USA.

SAETTA, A.V.; VITALIANI, R.V. **Experimental investigation and numerical modeling of carbonation process in reinforced concrete structures Part II. Pratical Applications**. Cement and Concrete Research, vol 35 p. 958 – 967, 2005.

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

SENSALE, G. R.; DAL MOLIN, D. C. C. **Estudo comparativo entre as propriedades mecânicas e durabilidade de concretos de alta resistência e convencionais com cinza de casca de arroz**. In: 43º Congresso Brasileiro Do Concreto. Anais eletrônicos. Foz do Iguaçu-PR, 2001. 1 CD-ROM.

SENSALE, G. R. B. **Estudo comparativo entre as propriedades mecânicas de concretos de alta resistência e convencionais com cinza de casca de arroz**. Porto Alegre 350 p.. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, 2000.

SENSALE, G. R. **Strength development of concrete with rice husk ash cement**. Concrete Composities vol 28 p. 158 -160, 2006.

SILVEIRA, A. A.; FERREIRA; DAL MOLIN, D. **A cinza de casca de arroz como adição mineral**. In: Workshop Reciclagem e Reutilização de Resíduos como Materiais de Construção Civil. USP. São Paulo, p. 39-45, 1996.

SKOJOSVOLD, O. **Carbonation depths of concrete with and without condensed silica fume**. ACI SP 91-51. Madrid, Proc., p.1031-1047, 1986.

SONG, H.W.; KWON, S.J.; BYUN, K.J.; PARK, C.K. **Predicting carbonation in early-aged cracked concrete**. Cement and Concrete Research, vol 36 p. 979 – 989, 2006.

SPERB, J.M.K. **Carbonatação e absorção capilar de concretos com adições minerais e ativadores químicos**. Santa Maria, 118p.. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, 2003.

STEFFENS, A.; DINKLER, D.; AHRENS, H. **Modeling of carbonations corrosion risk prediction of concrete structures.** Cement and Concrete Research, vol 32 p. 935 - 941, 2002.

STUMPP, M. J. **Carbonatação de concretos com altos teores de adições minerais e cal hidratada.** Santa Maria, 147p.. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, 2003.

SUGITA, S.; SHOYA, H.; FENG, Q. **Study on the pozzolanic properties of rice husk ash by hydrochloric acid pretreatment.** Cement and Concrete Research, vol. 24, p 521-526, 2004.

SULAPHA, P.; WONG, S.F.; WEE, T.H. **Carbonation of Concrete Containing Mineral Admixtures.** Journal Materials in Civil. Engineering, Volume 15, Issue 2, pp. 134-143, March/April 2003.

THOMAS, M.D.A.; MATTEWS, J.D. **Carbonation of fly ash concrete.** Magazine of Concrete Research vol. 44 p. 217 - 228 September, 1992.

VAGHETTI, M. A. O. **Efeitos da cinza volante com cinza de casca de arroz ou sílica ativa sobre a carbonatação do concreto de cimento Portland.** Santa Maria, 1999. 113 p..Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, 1999.

VAGUETTI, M. A. O. **Estudo da corrosão do aço, induzida por carbonatação, em concretos com adições minerais.** Porto Alegre, 2005, 286 pp. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, 2005.

VAN BALEN, K. **Carbonation reaction of lime, kinetics at ambient temperature.** Cement and Concrete Research, vol 35 p. 647– 657, 2005.

VAN BALEN, K., VAN GEMERT, D.. **Modelling lime mortar carbonation.** Materials and Structures , vol. 27, pp. 393 - 398, 1994.

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

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.

ZHANG, M.H.; MALHOTRA, V.M. **High-performance concrete incorporating rice husk ash as a supplementary cementing material.** In: Fifth CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Wisconsin, U.S.A., 1995. ACI Materials Journal. Canadá, 1995, p.1-25.

ZHANG, M.; MALHOTRA, V. M. **High-performance concrete incorporating rice husk ash as a supplementary cementing material**. ACI Materials Journal, v. 93, n° 6, November - December, 1996.

WADA, I.; KAWANO, T.; KAWAKAMI, M. **Reactive rice husk ash on durability of concrete and mortar**. In: MALHOTRA, V. M. (ed.). CANMET/ACI. International Conference on Durability of Concrete, 5th., Barcelona, 2000. Proceedings. American Concrete Institute, 2 v., v. 1, p. 205-223 (SP-192-13).

WorldWide Found for Nature. Disponível em: <http://www.wwf.org.br>. Acessado em 05 de junho de 2007. (WWF Brasil, 2007).

ANEXOS

```

;;;;;
;;; COTA.LSP
;;; Rotina que extrai a dimensão de linhas
;;; salvando os valores em um arquivo Excel.
;;;
;;;;;
(defun c:cota ()
  (setvar "cmdecho" 0)
  (setvar "osmode" 0)
  (setvar "blipmode" 0)
  (setvar "cmdecho" 0)
  (setvar "dimdec" 2)
  (command "ucs" "")
  (command "osnap" "none")
  (command "layer" "make" "COTAS" "color" "170" "COTAS" "")
  (command "-style" "dalla" "technic_.ttf" "" "" "" "" "")
  (prompt "\nselecione as linha com um retangulo.")
  (setq p1 (getpoint "\nPrimeiro ponto:"))
  (setq p2 (getcorner p1 "\nsegundo ponto na diagonal:"))
  (setq alt 0.25)
  (setq sel (ssget "c" p1 p2))
  (if (/= sel nil)
    (setq nsel (sslenght sel)))
  (setq ind 0)
  (while (< ind nsel)
    (setq nome (ssname sel ind))
    (setq tipo (cdr (assoc 0 (entget nome))))
    (if (= tipo "LINE")
      (progn
        (setq pti (cdr (assoc 10 (entget nome))))
        (setq ptf (cdr (assoc 11 (entget nome))))
        (setq dis (distance pti ptf))
        (setq ang (angle pti ptf))
        (setq ang2 (/ (* ang 180) pi))
        (setq ptm (polar pti ang (/ dis 2)))
        (if (and (> ang2 90) (< ang2 270))
          (progn
            (setq ang2 (- ang2 180))
            (setq ptm (polar ptm (- ang 90) (/ alt 2))))
          (setq ptm (polar ptm (+ ang 90) (/ alt 2))))
        (setq dis (rtos dis 2 2))
        (command "_.text" "j" "c" ptm alt ang2 dis)
        (setq gravar (open "c:\\cv40E13.xls" "a"))
        (write-line dis gravar)
        (close gravar)
        (setq ind (+ 1 ind)))
      (setq ind (+ 1 ind))))
  (setvar "cmdecho" 1)
)

```