

**ANÁLISE COMPARATIVA DE PROCEDIMENTOS PARA  
ENSAIOS ACELERADOS DE CARBONATAÇÃO**

**Cristiane Pauletti**

Porto Alegre  
Dezembro 2004

**CRISTIANE PAULETTI**

**ANÁLISE COMPARATIVA DE PROCEDIMENTOS PARA  
ENSAIOS ACELERADOS DE CARBONATAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul,  
como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em  
Engenharia na modalidade Acadêmico

Porto Alegre  
Dezembro 2004

PAULETTI, Cristiane

Análise comparativa de procedimentos para ensaios acelerados de carbonatação / Cristiane Pauletti. – Porto Alegre: PPGEC/UFRGS, 2004.

176 p.

Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul; Mestre em engenharia. Orientadores: Denise Carpena Coitinho Dal Molin e Claudio de Souza Kazmierczak.

Assunto I. Carbonatação II. Sazonamento III. Ensaio acelerado.

CCAA2

**CRISTIANE PAULETTI**

**ANÁLISE COMPARATIVA DE PROCEDIMENTOS PARA  
ENSAIOS ACELERADOS DE CARBONATAÇÃO**

Porto Alegre, 10 de dezembro de 2004

Prof.a. Denise Carpena Coitinho Dal Molin  
Dra. pela Universidade de São Paulo  
Orientadora

Prof. Claudio de Souza Kazmierczak  
Dr. pela Universidade de São Paulo  
Orientador

Prof. Dr. Américo Campos Filho  
Coordenador do PPGEC/UFRGS

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Geraldo Cechella Isaia (UFSM)**  
Dr. pela Universidade de São Paulo

**Prof.a. Marlova Piva Kulakowski (FEEVALE)**  
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Prof.a. Angela Borges Masuero (UFRGS)**  
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Aos meus pais, Elio e Maria  
Aos meus manos, Solange e Julio

## **AGRADECIMENTOS**

Ao papai do céu, o Deus Todo Poderoso, fonte fé e força, pela saúde e proteção, por acompanhar e guiar meus passos dia após dia.

Ao meu pai, um grande homem que é exemplo de vida, inspirador da escolha pela engenharia civil, pelo apoio, independente da carreira a ser seguida, por minha formação como ser humano. À minha mãe, uma grande guerreira, pela educação, pelo incentivo e pela confiança, depositados em todas as etapas da minha vida. Muito obrigada, eu amo vocês!

Aos meus manos, pelo carinho e pela torcida de todos os momentos. Amo vocês!

À professora Denise Dal Molin, a qual considero uma mãe, pela orientação, capaz de tornar as tarefas mais leves, pelo conhecimento transmitido, pelo apoio e amizade.

Ao professor Claudio Kazmierczak, responsável pela minha iniciação científica, pelo grande incentivo e confiança, pela orientação, pela dedicação e amizade.

Aos professores, Angela, Carin, Formoso, Greven, Ronaldo, Ruy e Sattler, pelos conhecimentos transmitidos. Ao professor José Luis Duarte Ribeiro, pelas importantes contribuições na análise estatística deste trabalho.

Aos demais professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS, pelos auxílios recebidos, e aos funcionários do NORIE, Luiz Carlos e Simone, pela disponibilidade em ajudar no que fosse possível. Ao Seu Fontes, do LEME.

Ao Ederson e ao Airton, pela ajuda prestada no laboratório do NORIE.

Aos auxiliares de pesquisa da UFRGS, em especial ao Andreas e ao Roger, que colaboraram nas moagens de material, realizadas em laboratório.

À UNISINOS, pela oportunidade de realizar parte desta pesquisa em suas dependências.

Aos laboratoristas da UNISINOS, Décio, Marcos Paulo, Letícia e João, pela ajuda em todas as etapas deste trabalho, pela amizade desenvolvida ao longo desses anos.

Aos auxiliares de pesquisa da UNISINOS, Alexandre, Vicente e Débora, pelo auxílio nas moldagens, ensaios e análise de imagens. Também à Emília, pela colaboração.

Aos órgãos de fomento à pesquisa, CAPES e CNPq, pelo apoio financeiro.

Às empresas que fizeram doações para este estudo: Cimentos Votorantim, pelo cimento e cinza volante utilizados nos experimentos; Cimentos Cimpor, pelos corpos moedores; Duratex S.A. (Deca), pelas esferas de alumina; Café Iguaçu, pelas embalagens utilizadas no procedimento da RILEM, Chellmar Embalagem Moderna Ltda, pelas embalagens empregadas no procedimento baseado na metodologia adotada no NORIE. Muito obrigada!

Aos meus colegas de turma, César, Daniel, Fábio, Fabrício, Gustavo, Manuel, Morello, Tiago, Vladimir, além da pequena ala feminina, Aline B. e Natália, pelo carinho e pelos laços de amizade, que tornaram os dias mais agradáveis e as dificuldades menos pesadas.

Às amigonas que me abrigaram nas noites que passei em Porto Alegre, Aline Barroso, Aline Morales, Ana Paula, Mara e Natália, pela cama, comida, mas principalmente pela companhia e amizade de vocês. Muito, muito obrigada!

Aos demais colegas e amigos, sejam eles do NORIE ou não, Alexandre, Andrea Kern, Ângela Azevedo, Antônio Eduardo, Bernardo, Cristóvão, Daiana, Daniel Pinho, Denise Pitan, Edna, Elaine, Eugen, Fernanda Baiana, Fernanda Leite, Franciele, Geilma, Guguinha, Jairo Wolf, Lu Miron, Lucília, Ludmila, Marcel, Maria Teresa, Paulo (“Fifi Kanê”), Paulo Sérgio, Renato, Rodrigo, Simone, pelo carinho e amizade de sempre.

Às amigas Aguida e Marlova, pela disposição e inestimável ajuda, prestadas em todos os momentos, pela força e amizade de vocês, muito obrigada.

Aos amigos que conquistei vida afora, Ana Krei, Arlete, Claudinha, Dênis, Iraci, Lisete, Lu Mendel, Pati, Onilde, Serginho, pelo incentivo e apoio de todas as horas, pela amizade, maior bem que vocês me proporcionam.

À minha amigona, Yuriko, e meu afilhado, Pedro Henrique, pelos imensos momentos de alegria que passei ao lado de vocês, pelo apoio e por acreditarem em mim, amo vocês.

Ao meu namorado, Vinícius, verdadeiro amigo e companheiro, pelo amor, pelo conforto do colo, pela dedicação, apoio e confiança. Eu te amo muito!

Aos meus familiares e aos que considero parte da família, Roberta, Inês, Andrea, Deise e Vicente, pelo carinho, pelo incentivo. Muito obrigada!

A todas as pessoas que não foram citadas aqui, mas que de uma forma ou de outra contribuíram para a realização deste trabalho. Muito obrigada.

A todos, do fundo do meu coração, muito obrigada, e minha eterna gratidão.

Cristiane

“A mente que se abre a uma nova idéia  
jamais voltará ao seu tamanho natural”.

*Albert Einstein*

## RESUMO

PAULETTI, C. Análise comparativa de procedimentos para ensaios acelerados de carbonatação. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

A durabilidade das estruturas de concreto armado tem sido motivo de grande interesse nas pesquisas em construção civil, nos últimos anos. Dentre os problemas que mais afetam a durabilidade dessas estruturas, está a corrosão de armaduras. O concreto que envolve o aço, proporciona-lhe uma barreira física, através do cobrimento, e uma proteção química, gerada pela elevada alcalinidade do concreto, formando uma película passivadora em torno do aço. Uma das formas de romper essa película passivadora, é através da diminuição da alcalinidade do concreto, por reações físico-químicas entre o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) da atmosfera, com os produtos da hidratação do cimento, caracterizando a carbonatação. Esse fenômeno em si, não é prejudicial ao concreto armado, mas propicia condições para a corrosão da armadura. Em função do tempo que as estruturas levam para carbonatarem naturalmente, são utilizados ensaios acelerados para conhecer seu comportamento. Esses ensaios não são padronizados, o que muitas vezes dificulta, e até mesmo impede a comparação entre as diversas pesquisas. Nesse sentido, esse trabalho faz uma análise comparativa de alguns procedimentos e fatores envolvidos nos ensaios de carbonatação acelerada. Para tanto, foram empregadas argamassas, que foram preparadas com dois tempos de cura submersa (7 e 28 dias), dois tipos de cimento (CPI-S e CPIV), três relações água/cimento (0,40, 0,55 e 0,70), dois tipos de secagem (em sala climatizada e em estufa, pelas recomendações da RILEM), dois tempos de secagem (o mesmo período para todas as amostras, e diferentes períodos para cada traço) e, dois percentuais de dióxido de carbono (6% e câmara saturada de  $\text{CO}_2$ ). Os resultados da análise estatística, indicaram que os fatores mais significativos foram o percentual de  $\text{CO}_2$  e a relação água/cimento. As amostras carbonatadas em câmara saturada de  $\text{CO}_2$  apresentaram um comportamento distinto daquelas carbonatadas a 6%, além de atingirem profundidades de carbonatação inferiores. A secagem que segue as recomendações da RILEM, propiciou condições para profundidades de carbonatação maiores. O tipo de cimento e o tipo de secagem apresentaram uma significância intermediária na profundidade de carbonatação, quando comparados aos demais fatores. O tempo de cura submersa e o tempo de secagem, influenciaram muito pouco na carbonatação.

Palavras-chave: carbonatação, sazonalidade, ensaio acelerado.

## ABSTRACT

PAULETTI, C. Comparative assessment of procedures used in accelerated carbonation tests. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

The life of reinforced concrete structures has been the object of in-depth research in civil construction in recent years. One of the most serious problems affecting these structures is the corrosion of steel bars. In this type of material, the concrete layer acts both as a physical and as a chemical barrier. The former effect is provided by the concrete layer covering the steel while the latter is a result of the high alkalinity of the concrete, which generates a passivation film on the steel surface. The alkalinity of the concrete may be reduced by physical-chemical reactions between atmospheric carbon dioxide with the products of cement hydration, in a process known as carbonation. This alone is not detrimental to the concrete but can create favorable conditions to the corrosion of the steel bars. Since natural carbonation is a process extending over an extremely long period, accelerated carbonation tests are used to assess the behavior of reinforced concrete structures. These tests are not standardized, which makes comparisons between different studies difficult or even impossible. The present study presents a comparative assessment of some procedures and factors affecting accelerated carbonation tests. The study used mortars prepared with two periods of underwater cure (7 and 28 days), two cement types (ordinary Portland cement and pozzolanic Portland cement), three different w/c ratios (0.40, 0.55 and 0.70), two drying processes (in a room with controlled temperature and in an oven, according to the RILEM recommendations), two drying periods (the same period for all samples and different periods for each composition) and two concentrations of carbon dioxide (6% and saturated chamber). Statistical analysis results indicate that the most significant factors are the concentration of carbon dioxide and the w/c ratio used. The samples undergoing carbonation in saturated chamber behaved differently from those undergoing carbonation with 6% CO<sub>2</sub>, in addition to displaying lower carbonation depths. The drying procedure following the RILEM guidelines yielded greater carbonation depths. The type of cement and the type of drying process used had an intermediate impact on carbonation, assessing with the other factors. The length of underwater cure and the length of the drying period were shown to have a negligible effect on carbonation.

Keywords: carbonation, drying period, accelerated tests.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	13
LISTA DE TABELAS.....	16
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	17
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>19</b>
1.1 JUSTIFICATIVA.....	22
1.2 OBJETIVOS.....	25
1.2.1 Objetivo Principal.....	25
1.2.2 Objetivos Secundários.....	25
1.3 LIMITAÇÕES DA PESQUISA.....	26
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	26
<b>2 ASPECTOS RELACIONADOS COM A DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO.....</b>	<b>27</b>
2.1 DURABILIDADE, DESEMPENHO E VIDA ÚTIL.....	27
2.2 MECANISMOS DE DETERIORAÇÃO.....	30
2.3 MECANISMOS DE TRANSPORTE.....	32
2.3.1 Permeabilidade.....	34
2.3.2 Sucção Capilar.....	36
2.3.3 Difusão.....	38
<b>3 CARBONATAÇÃO.....</b>	<b>41</b>
3.1 MECANISMOS DA CARBONATAÇÃO.....	42
3.2 MEDIÇÃO DA CARBONATAÇÃO ATRAVÉS DE INDICADORES QUÍMICOS.....	45

3.3 FATORES QUE INFLUENCIAM A CARBONATAÇÃO.....	47
3.3.1 Meio Ambiente.....	47
3.3.1.1 Concentração de CO <sub>2</sub> .....	48
3.3.1.2 Umidade Relativa.....	49
3.3.1.3 Temperatura.....	51
3.3.2 Fatores Relacionados ao Concreto.....	52
3.3.2.1 Cimento.....	52
3.3.2.2 Adições.....	54
3.3.2.3 Cura.....	57
3.3.2.4 Porosidade.....	59
3.4 MÉTODOS ADOTADOS POR DIVERSOS PESQUISADORES PARA OS ENSAIO DE CARBONATAÇÃO.....	61
3.4.1 Quanto às Condições do Ambiente.....	61
3.4.1.1 Concentração de CO <sub>2</sub> .....	61
3.4.1.2 Umidade Relativa.....	63
3.4.1.3 Temperatura.....	64
3.4.2 Quanto às Características das Amostras e dos Ensaio de Carbonatação .....	65
3.4.2.1 Tipo e Forma de Amostra.....	65
3.4.2.2 Relação a/c.....	67
3.4.2.3 Condições e Tempo de Cura.....	68
3.4.2.4 Sazonamento.....	69
3.4.2.5 Tempo de Exposição.....	71
3.4.3 Resumo das variáveis adotadas em diversas pesquisas.....	71
<b>4 PROGRAMA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>76</b>
4.1 PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO.....	77
4.1.1 Variáveis Independentes.....	77
4.1.2 Variáveis de Resposta.....	78
4.1.3 Organização das Atividades.....	79
4.2 MATERIAIS.....	80

4.2.1 Cimento.....	80
4.2.2 Agregado Miúdo.....	82
4.2.3 Cinza Volante.....	83
4.2.4 Água.....	84
<b>4.3 PROPORCIONAMENTO E PROCEDIMENTO DE MISTURA DAS ARGAMASSAS.....</b>	<b>84</b>
<b>4.4 MÉTODOS.....</b>	<b>86</b>
4.4.1 Carbonatação Acelerada.....	86
4.4.1.1 Sazonamento.....	87
4.4.1.1.1 <i>Sazonamento Utilizado no NORIE.....</i>	<i>87</i>
4.4.1.1.2 <i>Sazonamento conforme a RILEM.....</i>	<i>91</i>
4.4.1.2 Ensaio de Carbonatação Acelerada.....	97
4.4.1.3 Procedimentos para Análise dos Resultados.....	101
4.4.2 Resistência à Compressão Axial.....	105
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>107</b>
5.1 CARBONATAÇÃO.....	107
5.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL.....	138
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>140</b>
6.1 CONCLUSÕES.....	140
6.1.1 Com Relação aos Resultados de Profundidade de Carbonatação.....	140
6.1.2 Com Relação aos Resultados de Resistência à Compressão Axial.....	143
6.1.3 Com Relação à Forma de Medição da Profundidade de Carbonatação.....	144
6.1.4 Considerações Finais Quanto aos Procedimentos.....	144
6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	145
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>147</b>

<b>APÊNDICE A – Data de início e período de duração, de cada etapa dos procedimentos que antecederam os ensaios acelerados de carbonatação.....</b>	<b>156</b>
<b>APÊNDICE B – Massa após cura e ao final da secagem em sala climatizada, conforme a metodologia baseada nos procedimentos do NORIE, do bloco 1, a título de exemplo.....</b>	<b>158</b>
<b>APÊNDICE C – Parâmetros da etapa de condicionamento, conforme recomendações da RILEM (1999), no TC 116-PCD.....</b>	<b>160</b>
<b>APÊNDICE D – Massa após cura, <math>\Delta m</math> calculado e massa a ser atingida ao final de secagem em estufa, conforme os procedimentos da RILEM, do bloco 1, a título de exemplo.....</b>	<b>162</b>
<b>APÊNDICE E – Equações utilizadas para o cálculo de algumas profundidades de carbonatação.....</b>	<b>166</b>
<b>APÊNDICE F – Valores médios da profundidade de carbonatação aos 7, 14, 21 e 28 dias de exposição ao CO<sub>2</sub>.....</b>	<b>168</b>
<b>APÊNDICE G – Resultados da resistência à compressão axial dos quatro blocos de ensaio, aos 7, 28 e 63 dias.....</b>	<b>173</b>
<b>APÊNDICE H – Dados de alguns equipamentos e materiais, e seus respectivos fornecedores.....</b>	<b>175</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Limites dos raios dos poros relevantes para diferentes fenômenos de transporte.....	33
Figura 4.1: Etapas do programa experimental.....	80
Figura 4.2: Câmara de sazonalidade, (a) croqui e (b) fotografia.....	88
Figura 4.3: Disposição das amostras para secagem na sala climatizada.....	89
Figura 4.4: Corpo-de-prova embalado após equilíbrio da umidade na sala climatizada..	90
Figura 4.5: Corpos-de-prova em fase de redistribuição da umidade na sala climatizada.	90
Figura 4.6: Disposição das amostras para secagem na estufa.....	96
Figura 4.7: Corpo-de-prova embalado após atingir perda de massa desejada na estufa...	97
Figura 4.8: Corpos-de-prova em fase de redistribuição da umidade na estufa.....	97
Figura 4.9: Esquema de montagem da câmara de carbonatação a 6% de CO <sub>2</sub> .....	98
Figura 4.10: Ventiladores da parte superior da câmara de 6% de CO <sub>2</sub> .....	98
Figura 4.11: Vista lateral da câmara de 6% de CO <sub>2</sub> .....	99
Figura 4.12: Vista frontal da câmara de saturada de CO <sub>2</sub> .....	100
Figura 4.13: Imagem digital aberta no programa de análise.....	102
Figura 4.14: Imagem com a área não carbonatada delimitada pelas linhas traço, ponto, ponto.....	103
Figura 4.15: Imagem com delimitação das áreas carbonatadas em cada uma das laterais (linhas contínuas).....	103
Figura 4.16: Imagem com medida da distância (linhas tracejadas) limitada pelas linhas traço, ponto, ponto.....	104
Figura 4.17: Imagem com medida da maior e menor profundidade de carbonatação para cada uma das laterais (linhas pontilhadas).....	104
Figura 5.1: Esquema dos blocos de ensaio com os resultados de $e_c$ médios.....	110
Figura 5.2: Amostra em que a frente de carbonatação não é bem definida e $e_c$ foi determinada pela linha de tendência dos demais pontos.....	113
Figura 5.3: Valores de profundidade de carbonatação obtidos em função do tempo de exposição do bloco 1, para (a) relação $a/c=0,40$ ; (b) relação $a/c=0,55$ e (c) relação $a/c=0,70$ .....	114

Figura 5.4: Valores de profundidade de carbonatação obtidos em função do tempo de exposição do bloco 2, para (a) relação $a/c=0,40$ ; (b) relação $a/c=0,55$ e (c) relação $a/c=0,70$ .....	115
Figura 5.5: Valores de profundidade de carbonatação obtidos em função do tempo de exposição do bloco 3, para (a) relação $a/c=0,40$ ; (b) relação $a/c=0,55$ e (c) relação $a/c=0,70$ .....	116
Figura 5.6: Valores de profundidade de carbonatação obtidos em função do tempo de exposição do bloco 4, para (a) relação $a/c=0,40$ ; (b) relação $a/c=0,55$ e (c) relação $a/c=0,70$ .....	117
Figura 5.7: Efeito isolado do tempo de cura submersa na profundidade de carbonatação.....	119
Figura 5.8: Efeito isolado do tipo de cimento na profundidade de carbonatação.....	121
Figura 5.9: Efeito isolado da relação $a/c$ na profundidade de carbonatação.....	122
Figura 5.10: Efeito isolado do tipo de secagem na profundidade de carbonatação.....	124
Figura 5.11: Efeito isolado do percentual de $CO_2$ na profundidade de carbonatação.....	125
Figura 5.12: Efeito isolado do tempo de secagem na profundidade de carbonatação.....	127
Figura 5.13: Interação entre o tempo de cura submersa e o tipo de cimento na profundidade de carbonatação.....	128
Figura 5.14: Interação entre o tempo de cura submersa e o percentual de $CO_2$ na profundidade de carbonatação.....	129
Figura 5.15: Interação entre o tempo de cura submersa e o tipo de cimento para: (a) 6% de $CO_2$ e (b) câmara saturada de $CO_2$ , na profundidade de carbonatação.....	130
Figura 5.16: Interação entre o tempo de cura submersa e o tipo de secagem na profundidade de carbonatação.....	131
Figura 5.17: Interação entre o tipo de cimento e o tipo de secagem na profundidade de carbonatação.....	132
Figura 5.18: Interação entre o tipo de cimento e o percentual de $CO_2$ na profundidade de carbonatação.....	133
Figura 5.19: Interação entre o tempo de cura submersa e a relação $a/c$ na profundidade de carbonatação.....	133
Figura 5.20: Interação entre o tipo de cimento e a relação $a/c$ na profundidade de carbonatação.....	134
Figura 5.21: Interação entre o tipo de secagem e a relação $a/c$ na profundidade de carbonatação.....	135

Figura 5.22: Interação entre o tipo de cimento e o percentual de CO <sub>2</sub> na profundidade de carbonatação.....	136
Figura 5.23: Interação entre o tipo de secagem e o percentual de CO <sub>2</sub> na profundidade de carbonatação.....	136
Figura 5.24: Interação entre o tipo e o tempo de secagem na profundidade de carbonatação.....	137
Figura 5.25: Resistência à compressão axial média com relação ao tempo de ruptura, (a) bloco 1, (b) bloco 2, (c) bloco 3 e (d) bloco 4.....	139

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Características dos estudos de carbonatação em concretos realizados por diversos pesquisadores.....	72
Tabela 3.2: Características dos estudos de carbonatação em argamassas realizados por diversos pesquisadores.....	74
Tabela 4.1: Normas adotadas para a caracterização física e mecânica dos cimentos empregados.....	81
Tabela 4.2: Resultados da caracterização física e mecânica dos cimentos CPI-S e CPIV.....	81
Tabela 4.3: Composição química dos cimentos utilizados na pesquisa.....	82
Tabela 4.4: Normas adotadas para a caracterização física do agregado miúdo.....	83
Tabela 4.5: Resultados da caracterização física do agregado miúdo.....	83
Tabela 4.6: Diâmetros médios da cinza volante em função do tempo de moagem.....	84
Tabela 4.7: Caracterização física da cinza volante.....	84
Tabela 4.8: Proporcionamento de materiais, em massa, para confecção das argamassas.	85
Tabela 4.9: Quantidade de materiais para cada moldagem.....	85
Tabela 5.1: Resultados das medidas de profundidade de carbonatação média aos 28 dias de ensaio dos blocos 1 e 2.....	111
Tabela 5.2: Resultados das medidas de profundidade de carbonatação média aos 28 dias de ensaio dos blocos 3 e 4.....	112
Tabela 5.3: Análise de variância dos resultados de carbonatação acelerada aos 28 dias de ensaio.....	118
Tabela 5.4: Resultados médios da resistência à compressão axial dos quatro blocos, em cada idade de ruptura.....	138

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a/agl: relação água/aglomerante

a/c: relação água/cimento

ABCP: Associação Brasileira de Cimento Portland

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI: American Concrete Institute

AMN: Asociación Mercosur de Normalización

ANOVA: Análise de Variância

ASTM: American Society for Testing and Materials

C<sub>2</sub>S: silicato dicálcico

C<sub>3</sub>A: aluminato tricálcico

C<sub>3</sub>S: silicato tricálcico

C<sub>4</sub>AF: ferroaluminato tetracálcico

Ca(OH)<sub>2</sub>: hidróxido de cálcio

CaCO<sub>3</sub>: carbonato de cálcio

CaO: óxido de cálcio

carb.: carbonatação

CEB: Comité Euro-International du Béton

CEN: Comité Européen de Normalisation

CO<sub>2</sub>: dióxido de carbono ou gás carbônico

CPI: cimento Portland comum

CPII: cimento Portland composto

CPIII: cimento Portland de alto-forno

CPI-S: cimento Portland comum com adição

CPIV: cimento Portland pozolânico

CPV-ARI: cimento Portland de alta resistência inicial

CPV-ARI-RS-MS: cimento Portland de alta resistência inicial resistente à sulfatos com adição de sílica micropulverizada

C-S-H: silicato de cálcio hidratado

$e_c$ : profundidade de carbonatação

$f_c$ : resistência à compressão axial

H<sub>2</sub>S: ácido sulfídrico

ident.: identificação

ISO: International Organization for Standardization

KOH: hidróxido de potássio

LACER: Laboratório de Cerâmica

LMC: Laboratório de Materiais de Construção

MPa: Mega Pascal

NaCl: cloreto de sódio

NBR: Norma Brasileira Regulamentada

$\mu\text{m}$ : micro metro ( $10^{-6}$  metros)

nm: nano metro ( $10^{-9}$  metros)

NORIE: Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação

pH: potencial de hidrogênio

redist.: redistribuição de umidade

RILEM: Reunion Internationale de Laboratoires D'essais et Materiaux

sat.: saturada de CO<sub>2</sub>

sec.: secagem

SO<sub>2</sub>: dióxido de enxofre

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UNISINOS: Universidade do Vale do Rio dos Sinos

UR: umidade relativa

## 1 INTRODUÇÃO

O cimento é um dos materiais mais utilizados na construção civil, no mundo todo. Coutinho (1997, p. 1) faz um histórico do início de seu uso. Entre 1812 e 1817, Louis Vicat realizou estudos que mostraram que a queima conjunta do calcário e argila conduzia à obtenção do cimento, sendo autorizado, em 1819, a utilizar o material na construção da ponte Souillac, sobre o rio Dordogne. Em 1824, Joseph Aspdin patenteava a fabricação do cimento artificial, usando temperaturas superiores às utilizadas por Vicat. O impulso decisivo para o concreto armado foi dado em 1848, por Joseph-Louis Lambot, ao construir um barco. A primeira obra em concreto armado com a idéia de dar às armaduras o papel da resistência à tração e, ao concreto, da resistência à compressão, foi realizada por François Coignet, em 1852. E, a partir de 1890, o concreto toma as proporções que se conhecem hoje.

Usa-se concreto armado desde 1848 e, no entanto, faz pouco tempo que os aspectos de durabilidade passaram a ter importância. Cerca de 30 anos após a invenção do cimento, o próprio Louis Vicat observava as primeiras alterações decorrentes da água do mar no produto que tinha criado. Thomas E. Stanton descobria, em 1940, a possibilidade da intervenção da natureza na estabilidade do concreto. Em 1950, Jacques Farran despertou a atenção para reações químicas e físico-químicas entre os compostos hidratados do cimento e a superfície do agregado (COUTINHO, 1997, p. 3).

Conforme Mehta (1991, p. 2), no Simpósio de Química dos Cimentos, em 1938, ainda não havia publicações que fizessem referência a questões como corrosão, ataques por sulfatos, carbonatação ou reação álcali-agregado, apenas um parágrafo contemplando aspectos de resistência química. Em 1952, no Terceiro Simpósio de Química dos Cimentos, Thorvaldson fez a primeira publicação com aspectos químicos de durabilidade com referência à ação de sulfatos (MEHTA, 1991, p. 4). Nos últimos anos, a durabilidade das edificações tem sido um dos temas mais estudados pelos pesquisadores de materiais e estruturas. As características de durabilidade dos materiais passaram a ter a mesma importância dos aspectos de resistência mecânica e custo inicial.

Conforme Papadakis et al. (1989, p. 1639), o concreto é largamente utilizado na construção civil, em todo o mundo, não só pelo baixo custo, mas também pelo seu desempenho

satisfatório em serviço. O bom desempenho inclui durabilidade que pode ser superior à do aço e da madeira. No entanto, nos últimos tempos, a durabilidade tem se tornado insatisfatória. Laranjeiras e Helene (1993, p. 1) justificam que o aumento do número de problemas das estruturas de concreto é devido ao seu envelhecimento e que muitos defeitos se originam na fase de projeto. Saetta e Vitaliani (2004, p. 578) salientam que, nos últimos anos, a atenção às estruturas de concreto têm aumentado, devido à sua falência precoce e altos custos de reparo, indicando que há interesse em construções seguras. Os pesquisadores também sugerem que há problemas na fase de projeto, uma vez que se deve considerar os materiais e o meio em que serão inseridos, sendo difícil fazer previsões.

Até a recente revisão da norma brasileira de projeto de estruturas de concreto, sob a designação NBR 6118 (ABNT, 2004), os aspectos referentes à durabilidade das estruturas de concreto referiam-se aos ambientes que a norma classifica como agressivos. A durabilidade era abordada em termos de escolha dos materiais constituintes, consumo de cimento e relação água/cimento, no entanto, em limites bastante amplos. Hoje, a norma possui um capítulo que contempla os critérios de projeto que visam a durabilidade.

É preciso entender que a durabilidade vai depender de diversos fatores que envolvem o concreto. Conforme Mehta (1991, p. 18), para ser durável, o concreto necessitaria permanecer impermeável ou livre de fissuras durante a vida útil de projeto requerida, e isso não será possível até que fornecedores e usuários de concreto entendam e respeitem os efeitos do comportamento de cada componente principal do concreto e a interação entre eles.

Segundo Mehta e Monteiro (1994, p. 120), os custos de reparos e substituições em estruturas devido a falhas nos materiais têm se tornado parte substancial do orçamento total das construções. Por exemplo, estima-se que acima de 40% do total dos recursos da indústria de construção sejam aplicados no reparo e manutenção de estruturas já existentes, em países industrialmente desenvolvidos, e menos de 60% em novas instalações. Esse crescimento no custo de recuperação de estruturas e a ênfase do custo do ciclo da vida ao invés do custo inicial estão forçando os engenheiros a tomarem consciência dos aspectos de durabilidade. Somado a isso, sabe-se que existe uma estreita relação entre a durabilidade de materiais e ecologia. A preservação de recursos através da produção de materiais mais duráveis é, além de tudo, um passo ecológico (MEHTA; MONTEIRO, 1994, p. 120). Deve-se usar as informações e conhecimento disponíveis para conscientizar a fazer certo.

Dentre os problemas que afetam a durabilidade das estruturas de concreto armado destaca-se a corrosão de armaduras, que pode causar grandes danos, tanto no aspecto econômico, como pela dificuldade das técnicas de recuperação e sua eficácia ao longo do tempo.

Andrade (1992, p. 19) coloca que a durabilidade do aço nas estruturas de concreto armado depende da ação que o concreto exerce sobre o aço: por uma parte, o cobrimento de concreto é uma barreira física, e por outra, a elevada alcalinidade do concreto desenvolve sobre o aço uma camada passiva que o mantém inalterado por um tempo indefinido. Essa alcalinidade surge durante o processo de hidratação do cimento, quando é gerado um conglomerado sólido, constituído pelas fases hidratadas do cimento e pela fase aquosa que ocupa a rede de poros intersticiais e capilares do concreto. A alcalinidade gerada apresenta um potencial de hidrogênio (pH) suficiente para passivar o aço, protegendo-o da corrosão enquanto não houver alterações físicas ou químicas na camada de concreto que o cerca, que permitam a ação de agentes agressivos externos (KAZMIERCZAK, 1995, p. 11).

Caso ocorram alterações e o aço perca a passividade, pode iniciar um processo de corrosão eletroquímica. Os produtos da corrosão têm volume superior ao aço, o que gera pressões que fissuram o concreto ao longo da barra, fazendo com que a aderência ao concreto seja perdida e, até mesmo, que a armadura seja exposta por descolamento do concreto de cobrimento (TUUTTI, 1982, p. 18). Frequentemente a segurança e problemas estéticos causados pela corrosão antes do fim da vida útil da estrutura são tão sérios que a mesma precisa ser demolida, ou o custo de reparo é muito elevado. Isso tem levado a muitas pesquisas no intuito de entender os mecanismos e controlá-los (PAPADAKIS et al., 1989, p. 1639).

A película passivadora que protege a armadura pode ser destruída, principalmente, pela ação de íons cloreto, que penetram no concreto por difusão na água dos poros e alcançam a armadura, ou pela perda de alcalinidade do concreto, devido à difusão do dióxido de carbono da atmosfera no líquido existente nos poros do concreto e reação com o hidróxido de cálcio, caracterizando a carbonatação, ou ainda, pela combinação desses dois mecanismos (PAPADAKIS et al., 1989, p. 1639), sendo a carbonatação o tema central deste trabalho.

A carbonatação é um complexo processo físico-químico de difusão e dissolução do gás carbônico nos poros do concreto, preenchidos parcialmente por água, que irá reagir com hidróxidos e silicatos de cálcio hidratados ou não (PAPADAKIS, 1989, p. 1640), para formar e precipitar carbonatos menos solúveis. O resultado final é uma lenta, mas completa

substituição do óxido de cálcio solúvel, em carbonato de cálcio insolúvel (SMOLCZYK, 1976, p. 2).

Parrot (1986, p. 28) alerta que os custos de manutenção, reparo e reabilitação associados aos danos causados por carbonatação podem ser consideráveis. Seria muito mais lucrativo canalizar recursos equivalentes a pequenas frações desses montantes para desenvolver medidas preventivas e minimizar ou evitar trabalhos de recuperação e reparo.

Para prover condições de predição e medidas preventivas que sejam satisfatórias, com relação aos danos que podem ser causados por carbonatação, as pesquisas relacionadas a esses aspectos necessitam de padronização, no sentido de possibilitar a união de esforços em prol desses objetivos.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Apesar do grande número de pesquisas realizadas na área da durabilidade, com relação à carbonatação do concreto, no Brasil (ABREU, 2004; ALVES, 2000; FIGUEIREDO, 2004; ISAIA, 1995; JOHN, 1996; KAZMIERCZAK, 1995; KIRCHHEIM, 2003; KULAKOWSKI, 2002; LOPES, 1999; MONTEIRO, 1996; SEIDLER, 1999; VAGHETTI, 1999; VENQUIARUTO, 2002; WOLF, 1991, entre outros), e no mundo (ANDRADE et al., 1988; BALAYSSAC et al., 1995; DHIR et al., 1989; FATTUHI, 1988; GERVAIS et al., 2004; PAPADAKIS, 2000, PAPADAKIS et al., 1989, 1991a, 1991b, 1992; ROY et al., 1999; SAETTA et al., 1995, entre outros), ainda há muito a ser estudado.

Um estudo a ser realizado é o que determina os procedimentos a serem adotados para ensaios acelerados de carbonatação realizados em laboratório, uma vez que não há padronização para esses ensaios devido à falta de normas que regulamentem os mesmos. Desta forma, cada pesquisador adota uma metodologia de pesquisa distinta, dificultando e até mesmo impossibilitando comparações entre estudos.

Apesar da necessidade de se comparar o resultado de pesquisas com outras realizadas, vários autores (ALVES, 2000, p. 95; ISAIA, 1995, p. 203; JIANG et al. 2000, p. 699; KIRCHHEIM, 2003, p. 45; KULAKOWSKI, 2002, p. 5; VAGHETTI, 1999, p. 84; VENQUIARUTO, 2002,

p. 113, entre outros) salientam que na maioria das vezes as condições de investigação são distintas, o que dificulta uma comparação fidedigna dos resultados obtidos.

Parrot (1986, p. 15) alerta que raramente se encontram informações descrevendo condições de exposição dos materiais ensaiados. Às vezes, são citadas a temperatura e umidade, mas o método utilizado não é claro. A quantidade de CO<sub>2</sub> empregada em ensaios ao ambiente natural raramente é reportada. O autor salienta que é necessário realizar um programa de ensaios com diferentes umidades relativas, temperaturas e percentuais de CO<sub>2</sub>, colocando amostras iguais em diferentes ambientes, com condições distintas (PARROT, 1986, p. 29).

Vagheti (1999, p. 85) alerta para a necessidade de normalizar o período de cura inicial e o percentual de gás carbônico a ser utilizado nos ensaios acelerados de carbonatação. Sanjuán e Olmo (2001, p. 951) também consideram que o percentual de gás carbônico, assim como a umidade relativa, deveriam ser padronizados para os testes de laboratório.

Segundo Neville (1997, p. 500), muitos trabalhos são feitos com bases variáveis, não levando a generalizações aproveitáveis. A exemplo de identificar o concreto ideal para prover um desempenho ótimo, em particular para a corrosão de armaduras, Papadakis (2000, p. 291) coloca que apesar do grande número de contribuições técnicas, isso não é possível, pois, além de haver uma quantidade de parâmetros envolvidos bastante significativa, há diversas controvérsias na literatura a respeito de uma mesma variável.

Mehta (1991, p. 18) e Saetta et al. (1995, p. 1704) ressaltam que o conhecimento é muito fragmentado, que os estudos são realizados com uma variável por vez e que existe grande dificuldade de transpor os resultados obtidos em laboratório para a realidade.

O Comité Européen de Normalisation (CEN) (2000) desenvolveu um esboço de norma sob a designação prEN 13293. Tal esboço prescreve a determinação da resistência de carbonatação, de amostras feitas com produtos de reparo ou com sistemas de reparo, excluindo camadas de proteção, a partir de ensaios acelerados de laboratório. Apesar de ser recente, nenhuma publicação consultada fez uso ou menção do referido esboço, com exceção de Abreu (2004, p. 39) que cita os parâmetros por ele estabelecidos.

A Reunion Internationale de Laboratoires D'essais et Materiaux (RILEM) (1988), nas recomendações do CPC-18, apresenta os procedimentos para medição da profundidade de carbonatação, quando as amostras já estão carbonatadas. Os parâmetros nos quais os ensaios

de carbonatação devem ser conduzidos não são especificados. O TC 116-PCD (RILEM, 1999), referente à permeabilidade do concreto como critério da sua durabilidade, parte “A”, traz um esboço de norma que descreve um método para preconditionar corpos-de-prova de concreto para medição da permeabilidade a gases e absorção capilar de água. Essa recomendação ressalta que o método também pode ser usado para outros ensaios que desejam distribuição uniforme de umidade no corpo-de-prova. As especificações das recomendações citadas são detalhadas no item 4.4.1.1.2 deste trabalho. Na literatura consultada, diversos pesquisadores (BALAYSSAC et al., 1995; DHIR et al., 1989; KAZMIERCZAK, 1995; KIRCHHEIM, 2003; KULAKOWSKI, 2002; LOPES, 1999; VENQUIARUTO, 2002, entre outros) utilizam as recomendações do CPC-18 para determinação da profundidade de carbonatação, entretanto, na bibliografia consultada, apenas um trabalho (VENQUIARUTO, 2002) adota a metodologia prescrita nas recomendações do TC 116-PCD.

A determinação da carbonatação já possui métodos consagrados (aspersão de indicadores químicos, petrografia, análise térmica diferencial, variação de massa, entre outros), que apresentam resultados bastante semelhantes entre si, embora sejam utilizadas diferentes concentrações de CO<sub>2</sub>.

No entanto, os procedimentos de sazramento empregados são os mais diversos. O sazramento constitui a etapa entre a cura das amostras e o início do ensaio de carbonatação propriamente dito, quando os corpos-de-prova são submetidos à ação do CO<sub>2</sub>. Para a etapa de sazramento devem ser definidos o tipo e o tempo de secagem a serem adotados, a fim de que os corpos-de-prova alcancem as condições ideais para o ensaio acelerado. Segundo alguns autores (ABREU, 2004, p. 62; KAZMIERCZAK, 1995, p. 56; KIRCHHEIM, 2002, p. 86; KULAKOWSKI, 2002, p. 55, entre outros), na fase de sazramento, as amostras devem ficar livres de qualquer contato com o gás carbônico, a espera da obtenção da umidade determinada para o ensaio de carbonatação e equilíbrio da mesma dentro do corpo-de-prova.

As diferentes formas de sazramento influenciam na carbonatação, pois é nessa etapa que serão desenvolvidas propriedades que interferem nos resultados dos ensaios. A quantidade de água a ser perdida pelo corpo-de-prova, bem como a forma e o tempo necessários para alcançar essa perda, podem alterar a hidratação dos aglomerantes e, por consequência, a quantidade e tamanho dos poros. Em última análise, os diferentes procedimentos de sazramento podem alterar a velocidade de penetração da frente de carbonatação. No entanto, não há normalização que padronize esta etapa e assim, cada pesquisador sazona as amostras

de uma forma diferenciada. Em alguns trabalhos (BRANCA et al., 1993; LO; LEE, 2002; NAGATAKI; OHGA, 1993; ROY et al., 1999, entre outros), esta etapa de sazonalidade nem é descrita ou não é realizada. Dessa forma, esta pesquisa procura avaliar uma série de procedimentos para os ensaios acelerados de carbonatação, contemplando diferentes sazonalidades.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Principal

Comparação de diferentes formas de sazonalidade, contemplando dois tipos de secagem (em sala climatizada e em estufa) e dois tempos de secagem (o mesmo período para todas as corpos-de-prova e diferentes períodos para cada traço), na carbonatação de corpos-de-prova de argamassa utilizando-se ensaios acelerados.

### 1.2.2 Objetivos Secundários

Os ensaios de carbonatação acelerada em laboratório têm por objetivos secundários:

- a) verificação da influência do tempo de cura, tipo de cimento, relação a/c e percentual de CO<sub>2</sub> na profundidade de carbonatação;
- b) verificação da existência de interações entre os fatores analisados nos ensaios de profundidade de carbonatação;
- c) verificação da influência do tipo de cimento e da relação a/c na resistência à compressão para fins de controle de produção.

### 1.3 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

As limitações da pesquisa estão relacionadas ao número de fôrmas disponíveis para a moldagem dos corpos-de-prova, tamanho das câmaras de carbonatação e tamanho da estufa. Em função disso, os ensaios foram realizados em 4 blocos distintos.

O tempo para a carbonatação completa, dos corpos-de-prova ensaiados na câmara saturada de CO<sub>2</sub><sup>1</sup> foi superior ao previsto. Em função disso, quando as amostras do bloco 4 estavam prontas para o início do ensaio de carbonatação, não havia espaço suficiente na câmara saturada de CO<sub>2</sub>. Com isso, essas amostras foram carbonatadas somente na câmara com 6% de CO<sub>2</sub> e os valores para a câmara saturada de CO<sub>2</sub> foram estimados.

### 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está dividido em 6 capítulos. No capítulo 1 está a apresentação do tema, a justificativa do estudo, os objetivos, as limitações da pesquisa e a estrutura do trabalho.

Aspectos relacionados às estruturas de concreto, referentes à sua durabilidade, e os principais fatores intervenientes são abordados no capítulo 2. Neste capítulo, ainda são expostos os mecanismos de transporte no concreto e principais formas de deterioração.

No capítulo 3 são contemplados os assuntos referentes à carbonatação, seus mecanismos, os fatores que a influenciam, e por fim, as variáveis adotadas por diversos pesquisadores para os ensaios de carbonatação.

No capítulo 4 está a descrição do programa experimental. São relatadas as etapas relacionadas à escolha e caracterização dos materiais, os ensaios realizados e procedimentos adotados.

Os resultados obtidos estão no capítulo 5. Além disso, são feitas considerações, discussões e ilustrações dos mesmos.

No capítulo 6 são apresentadas as conclusões às quais este estudo conduziu.

---

<sup>1</sup> Definiu-se chamar câmara saturada de CO<sub>2</sub> aquela em que a substituição do ar por CO<sub>2</sub>, no interior da mesma, foi sempre igual ou superior a 60%. Este valor é estimado, uma vez que não se tem disponibilidade de um sensor específico para a mensuração do teor de CO<sub>2</sub>.

## **2 ASPECTOS RELACIONADOS COM A DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO**

Neste capítulo são apresentados aspectos referentes à durabilidade, desempenho e vida útil das estruturas de concreto, bem como as formas de deterioração e os mecanismos de transporte de líquidos e gases.

### **2.1 DURABILIDADE, DESEMPENHO E VIDA ÚTIL**

De acordo com o Comité Euro-International du Béton (CEB) (1993, p. 264), como conceito de durabilidade entende-se que as estruturas de concreto devem ser projetadas, construídas e operadas de forma que mantenham sua segurança, utilidade e aparência aceitável, sob as influências ambientais esperadas, durante um período de tempo, sem a necessidade de altos custos de manutenção e reparo. Conforme a mesma fonte, a durabilidade depende fundamentalmente das propriedades da camada de superfície dos elementos de concreto. Portanto, essa camada deverá ser da mais alta qualidade possível.

O American Concrete Institute (ACI) (1991, p. 201.2R-2), no Comitê 201, define a durabilidade do concreto de cimento Portland como a sua capacidade de resistir à ação das intempéries, ataques químicos, abrasão ou qualquer outro processo de deterioração, mantendo sua forma original, qualidade e vida útil quando exposto ao meio.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (2004, p. 13), na norma de projeto de estruturas de concreto (NBR 6118), coloca que a durabilidade “consiste na capacidade de a estrutura resistir às influências ambientais previstas e definidas em conjunto pelo autor do projeto estrutural e o contratante, no início dos trabalhos de elaboração do projeto”.

Nakamura<sup>2</sup> (2004, p. 24) aborda as principais mudanças da NBR 6118 que passou a ser válida a partir de 30 de março de 2004. Antes da sua revisão, a norma compreendia projeto e execução de obras de concreto armado, passando agora a contemplar apenas aspectos referentes ao projeto de estruturas de concreto armado. Dentre as principais mudanças está o

---

<sup>2</sup> Reportagem da revista *Téchné*, edição 86, editora Pini, 2004.

aumento dos cobrimentos mínimos de armadura, em função do grau de agressividade do ambiente, e o controle mais rigoroso de fissuras.

Acredita-se que uma série de fatores, tais como: envelhecimento das obras de construção civil, negligência na escolha e mistura dos materiais, falta de inspeção e eventual reparo, entre outros, tenham tornado a durabilidade insatisfatória. Em função disto, os aspectos relacionados à durabilidade passaram a ter maior importância nas últimas décadas, aumentando o número de pesquisas na área, bem como, levando profissionais e usuários a encontrarem formas de diminuir custos de manutenção e reparos, em muitos casos considerados elevados para curtos períodos de utilização (cerca de 5 a 10 anos). Estes esforços vêm contribuindo para o entendimento dos fatores que afetam a durabilidade, provendo condições de torná-la satisfatória.

Atrelados ao conceito de durabilidade estão os conceitos de desempenho e de vida útil. A International Organization for Standardization (1980, p. 1), na ISO-6240, define que o desempenho está relacionado ao comportamento de um produto em relação ao seu uso. Leal<sup>3</sup> (2004, p. 32) comenta a criação da norma brasileira de desempenho de edifícios habitacionais de até cinco pavimentos, que está em fase de discussão. A nova norma vai regulamentar a forma como a edificação deve se comportar depois de entregue. Em sua proposta atual, contempla a vida útil de projeto, para os diversos sistemas da edificação, estabelecendo níveis mínimos, intermediários e superiores.

Há cerca de 15 anos atrás, Kazmierczak (1989, p. 8) colocava que surgia uma tendência nacional de usar a metodologia de desempenho, utilizada na Europa a partir dos anos 50, para definir as condições finais a serem atendidas pelas edificações. As exigências do usuário são especificadas para cada edificação e abrangem aspectos técnicos, fisiológicos, psicológicos e sociológicos. Por razões econômicas entre outras, muitas vezes torna-se difícil o pleno atendimento dos requisitos estabelecidos, sendo que os únicos que devem ser obrigatoriamente satisfeitos são os relativos à segurança (KAZMIERCZAK, 1989, p. 10).

A American Society for Testing and Materials (ASTM) (1998)<sup>4</sup>, em sua norma E 632, conceitua a vida útil de uma estrutura ou material, como o período de tempo, após a

---

<sup>3</sup> Reportagem da revista *Téchne*, edição 86, editora Pini, 2004.

<sup>4</sup> A publicação original dessa norma foi em 1978, edição corrente de 1982 com reaprovação em 1996. A mesma está sob a responsabilidade do “Subcommittee G03.03 on Simulated and Controlled Environmental Tests”, pertencente ao “ASTM Committee G-3 on Durability of Nonmetallic Materials”.

instalação, durante o qual todas as propriedades superam os valores mínimos aceitáveis. No caso da corrosão de armaduras, Helene (1993, p. 48) coloca que esse período de tempo pode ser dividido em pelo menos três partes:

- a) **vida útil de projeto:** é o período de tempo que deve ser adotado no projeto da estrutura, ficando a favor da segurança. Normalmente denominado como período de iniciação, vai até a despassivação da armadura, o que não significa que a partir desse momento haverá corrosão importante;
- b) **vida útil de serviço ou de utilização:** é o período de tempo que vai até o aparecimento de manchas na superfície do concreto, ou ocorrência de fissuras no concreto de cobertura, ou ainda ao destacamento do concreto de cobertura. Varia de caso a caso pois, em certos lugares, a presença de manchas e fissuras não é aceitável, em outros, apenas a queda de pedaços de concreto, colocando em risco a segurança humana, é considerado o momento de término da vida útil de serviço;
- c) **vida útil total:** é o período de tempo no qual há redução significativa da seção resistente da armadura ou perda importante da aderência, e vai até a ruptura e colapso parcial ou total da estrutura.

No modelo de vida útil das estruturas de concreto com referência ao fenômeno da corrosão de armaduras proposto por Helene (1993, p. 49), ainda há a introdução do conceito de **vida útil residual**, correspondente ao período de tempo que a estrutura ainda desempenhará suas funções, a partir da data de uma vistoria. A vistoria e diagnóstico podem ser realizados a qualquer momento da vida em uso da estrutura, e o fim do período de vida útil residual pode ser tanto o limite das condições de serviço, quanto o limite de ruptura, originando uma vida útil residual mais curta, contada até o aparecimento de manchas, fissuras ou destacamento do concreto, e outra longa, contada até a perda da capacidade resistente do componente estrutural.

O modelo clássico de vida útil das estruturas de concreto, do ponto de vista das armaduras, foi proposto por Tuutti (1982, p. 18). O modelo consiste num período de iniciação, onde agentes agressivos, como o dióxido de carbono e os cloretos, penetram na estrutura até alcançarem a armadura, despassivando-a, e num posterior período de propagação, onde inicia-se o processo de corrosão que irá depender da temperatura, umidade relativa e composição química da

solução dos poros em que a armadura está inserida. Esse período de propagação acaba no nível máximo aceitável do grau de deterioração, sendo influenciado pela porosidade do concreto e espessura do cobrimento, entre outros.

As medidas necessárias para assegurar a vida útil são escolhidas de acordo com as condições do ambiente e a importância da estrutura. A vida útil depende, ainda, do comportamento dos elementos da edificação, devendo os mesmos ser considerados no projeto, execução e uso da estrutura (CEB, 1993, p. 264).

Durabilidade, desempenho e vida útil estão diretamente relacionados, por isso, o desempenho inadequado de um componente qualquer numa edificação, pode comprometer sua durabilidade e diminuir sua vida útil. Os mecanismos de deterioração, que são apresentados a seguir, também contribuem para a diminuição da durabilidade e em consequência, da vida útil das obras de construção civil.

## 2.2 MECANISMOS DE DETERIORAÇÃO

Mehta e Monteiro (1994, p. 120) colocam que, com o passar do tempo, a microestrutura e as propriedades dos materiais podem mudar como resultado de interações ambientais, e como consequência, a durabilidade do concreto é alterada.

Neville<sup>5</sup> (1987, apud MEHTA, 1991, p. 22) expressa que, antes de tudo, se deve levar em conta que o concreto estrutural não tem uma vida útil indefinida, e que a qualidade do concreto, em termos de composição e não de resistência aos 28 dias, irá determinar a sua vida útil. Mais que isso, é necessária a manutenção do concreto, e isso significa a adoção de inspeções regulares e reparos ocasionais.

De acordo com Neville (1997, p. 481), raramente a deterioração tem uma causa isolada. As causas da durabilidade inadequada podem ser físicas, químicas ou mecânicas, sendo que os efeitos químicos e físicos podem atuar sinergicamente, e estão assim divididas:

---

<sup>5</sup> NEVILLE, A. “Why we have concrete durability problems”. Editor: J. M. Scanlan, ACI SP-100, 1987, pp. 21-30.

- a) **físicas:** altas temperaturas, diferentes coeficientes de dilatação térmica, congelamento e degelo, entre outras;
- b) **químicas:** reações álcali-sílica, álcali-carbono, ação de íons agressivos (cloretos, sulfatos, CO<sub>2</sub>, líquidos e gases naturais ou industriais);
- c) **mecânicas:** impacto, abrasão, erosão e cavitação.

Mehta e Gerwick<sup>6</sup> (1982, apud MEHTA; MONTEIRO, 1994, p. 128) agruparam as causas físicas da deterioração do concreto em duas categorias e as causas químicas em três categorias, conforme descrito abaixo, embora ressaltem que a distinção é puramente arbitrária e que na prática as duas se sobrepõem:

- a) **físicas:** (1) desgaste superficial ou perda de massa devida à abrasão, erosão e cavitação; (2) fissuração devida a gradientes normais de temperatura e umidade, pressões de cristalização de sais nos poros, carregamento estrutural e exposição a extremos de temperatura tais como congelamento ou fogo;
- b) **químicas:** (1) hidrólise dos componentes da pasta de cimento por água pura; (2) trocas iônicas entre fluidos agressivos e a pasta de cimento; (3) reações causadoras de produtos expansíveis, tais como na expansão por sulfatos, reação álcali-agregado e corrosão da armadura no concreto.

Através de uma revisão bibliográfica abrangente, Mehta (1991, p. 3) aponta, em ordem decrescente de importância, as causas de deterioração que necessitam de maior atenção: corrosão de armaduras, ação do gelo e degelo em climas frios, efeitos químicos da hidratação da pasta de cimento por agentes externos (água contaminada por dióxido de carbono, sulfatos e cloretos) e efeitos físico-químicos de fenômenos internos como a reação álcali-agregado e resistência aos sais.

Semelhante ao apontado anteriormente, Saetta et al. (1995, p. 1703) colocam que vários autores identificaram a corrosão como a causa de deterioração mais importante, seguida de congelamento e efeitos físico-químicos da estrutura interna e externa da pasta de cimento hidratada. Os autores ainda acrescentam que, devido ao fato das causas geralmente serem combinadas, fica difícil a identificação da razão inicial e/ou principal.

---

<sup>6</sup> MEHTA, P. K.; GERWICK, B. C. Jr. **Concr. Int.** Vol. 4, n° 10, pp. 45-51, 1982.

## 2.3 MECANISMOS DE TRANSPORTE

Há falta de consenso na nomenclatura dos mecanismos de transporte de líquidos e gases no concreto, na literatura pesquisada. Acredita-se que parte dessa falta de consenso tenha origem em traduções inadequadas ou mesmo decorrente das sutis diferenças entre alguns termos.

O conflito maior está em torno do termo permeabilidade. Permeabilidade é definida como a propriedade que governa a taxa de fluxo de um fluido para o interior e através de um sólido poroso. Mehta (1994, p. 124) explica que o termo permeabilidade, em um sentido mais amplo, cobre a propriedade de transporte global de um fluido no material. Da mesma forma, Neville (1997, p. 482) coloca que permeabilidade é um termo comumente aceito para o movimento global dos fluidos para o concreto e através do mesmo. Diversos autores (MEHTA; MONTEIRO, 1994; MENG, 1994, NEVILLE, 1997, entre outros) adotam o termo permeabilidade com referência a um mecanismo de transporte, da mesma forma adota-se o termo neste trabalho, embora se saiba que a permeabilidade é uma propriedade e não um mecanismo de transporte do concreto.

Ao tratar de outro mecanismo de transporte, no caso a sucção capilar, também há distinção de nomenclaturas na literatura. São utilizados os termos: sucção, absorção, sorção e adsorção. Em consulta a um dicionário de língua portuguesa (HOUAISS; VILLAR, 2001), pode-se perceber que não há diferenciação que venha a alterar o mecanismo, apenas os diferentes ensaios que caracterizam o fenômeno. No presente trabalho será adotado o termo sucção capilar. No entanto, os termos utilizados pelos diversos autores citados serão mantidos conforme seus originais.

O CEB (1993, p. 66) divide o transporte de líquidos e gases no concreto em: penetração, difusão e sucção capilar, podendo, também, haver uma combinação desses mecanismos. Porém, quando expõe a penetração, após sua conceituação, passa a usar o termo permeabilidade.

Neville (1997, p. 483) distingue três mecanismos referentes ao deslocamento de fluidos: permeabilidade (escoamento sob diferencial de pressão), difusão (deslocamento por diferença de concentração) e sorção (resultado de movimentos capilares nos poros do concreto abertos ao meio), destacando que o que realmente importa é o grau de facilidade de penetração desses fluidos no concreto.

No caso específico do transporte de cloretos, há um outro fenômeno conhecido como migração iônica, que pode transportar e concentrar íons através da ação de um campo elétrico (HELENE, 1993, p. 128). Essa migração pode ser dada pelo próprio campo gerado pela corrente elétrica no processo eletroquímico ou oriundo de campos elétricos externos, como os gerados no emprego de proteção catódica para o controle da corrosão (CASCUDO, 1997, p. 44).

Meng (1994, p. 127) mostra que cada fenômeno de transporte ocorre em uma estrutura de poros distinta. A figura 2.1 mostra os vários limites dos raios de poros relevantes, para diferentes mecanismos de transporte.

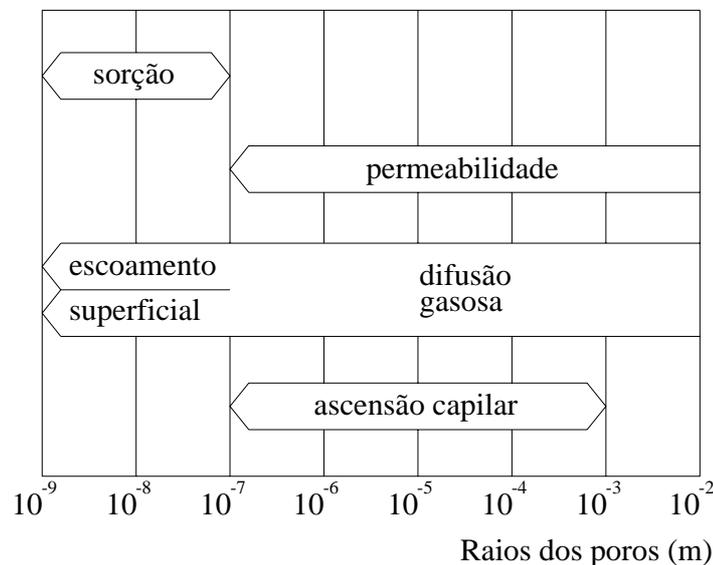


Figura 2.1: Limites dos raios dos poros relevantes para diferentes fenômenos de transporte (MENG, 1994)

Dependendo do tipo de fluido que será transportado, um dos mecanismos de transporte pode ser predominante, no entanto pode haver, também, uma combinação entre eles. No que diz respeito à penetração do  $\text{CO}_2$ , esta ocorre preponderantemente por difusão. Absorção capilar e migração de íons não se aplicam ao caso e dificilmente haverá gradientes de pressão que justifiquem permeabilidade (HELENE, 1993, p. 99). Embora este trabalho aborde a carbonatação, e neste caso a difusão seja o mecanismo predominante, a permeabilidade e a sucção capilar também são descritas brevemente.

### 2.3.1 Permeabilidade

Como descrito anteriormente, a permeabilidade é a propriedade que governa a velocidade de fluxo de um fluido para dentro e através de um material sólido poroso, por meio de um diferencial de pressão. O coeficiente de permeabilidade (K), para um fluxo laminar, é determinado pela expressão de Darcy, conforme a equação 2.1:

$$\frac{dq}{dt} = K \cdot \frac{\Delta H A}{L \mu} \quad (\text{equação 2.1})$$

Onde:

$dq/dt$  = taxa do fluxo do fluido;

K = coeficiente de permeabilidade;

$\Delta H$  = gradiente de pressão;

A = área superficial do sólido;

L = espessura do sólido;

$\mu$  = viscosidade do fluido.

Neville (1997, p. 492) alerta que o ensaio de permeabilidade não foi padronizado e os coeficientes apresentados em diversos trabalhos geralmente não são comparáveis. O autor coloca que se mede o escoamento em regime permanente e que, em concretos com baixas relações água/cimento (a/c), a água não escoar através do concreto, apenas penetra até uma determinada profundidade. A expressão, transformando a penetração em coeficiente de permeabilidade, desenvolvida por Valenta<sup>7</sup> (1969 apud NEVILLE, 1997, p. 492), assim como a permeabilidade ao ar e ao vapor, são apresentadas por Neville (1997, p. 484 e p. 493).

Diversos autores e publicações (CEB, 1993; HOUST et al., 1993; MENG, 1994; NEVILLE, 1997; RILEM, 1979, entre outros) apresentam fórmulas e métodos de ensaios para determinação dos coeficientes de permeabilidade à água, vapor d'água e aos gases para diversas situações.

---

<sup>7</sup> VALENTA, O. **Kinetics of water penetration into concrete as an important factor of its deterioration and of reinforcement corrosion**, RILEM International Symposium on the Durability of Concrete. Prague, Part I pp. 177-93 (1969).

A ABNT (1989), na norma NBR 10786, descreve um método para a determinação do coeficiente de permeabilidade à água para concretos endurecidos.

A permeabilidade do concreto não é uma simples função da porosidade, mas depende também das dimensões, distribuição, forma, tortuosidade e continuidade dos poros. A porosidade é a medida da proporção do volume total do concreto ocupada pelos poros, geralmente expressa em porcentagem. Mesmo com uma porosidade alta, a permeabilidade do concreto pode ser baixa, se os poros forem descontínuos, dependendo da maior ou menor comunicação de poros capilares (HELENE, 1986, p. 12; NEVILLE, 1997, p. 488).

Mehta e Monteiro (1994, p. 127) afirmam que a permeabilidade da argamassa e do concreto tendem a ser maiores que a permeabilidade da pasta de cimento correspondente, pois normalmente ocorrem microfissuras na zona de transição, entre agregados e pasta. Segundo eles, o tamanho e a granulometria dos agregados afetam a exsudação, e esta influencia a zona de transição.

Entretanto, Larbi<sup>8</sup> (1993 apud NEVILLE, 1997, p. 482) concluiu que apesar da zona de transição ser maior em concretos, a permeabilidade é controlada pela pasta de cimento hidratada, única fase contínua no concreto. Portanto, o autor afirma que a permeabilidade da pasta de um concreto não é maior que a permeabilidade de uma pasta de cimento semelhante.

Considerando que há zona de transição em concretos e argamassas, em função da presença dos agregados, e sendo que nesta zona geralmente ocorrem microfissuras, as quais podem tornar os poros comunicáveis, a afirmação de Larbi parece inconsistente, pois em função disto, a permeabilidade dessas pastas, provavelmente, será diferente da permeabilidade da pasta de cimento semelhante.

Segundo Mehta e Monteiro (1994, p. 128), a permeabilidade pode ser reduzida através da redução da relação a/c, com um consumo de cimento adequado e condições apropriadas de adensamento e cura. Além disso, deve-se dar atenção ao tamanho e granulometria dos agregados, deformações térmicas, retração por secagem, carga prematura e espessura do concreto que determina a tortuosidade da trajetória do fluxo do fluido.

---

<sup>8</sup> LARBI, L. A. **Microstructure of the interfacial zone around aggregate particles in concrete.** Heron, 38, n° 1, 69 pp. (1993).

### 2.3.2 Sucção Capilar

Líquidos, particularmente água, podem ser transportados para dentro do concreto por sucção capilar, também denominada absorção capilar (CEB, 1993, p. 71).

Neville (1997, p. 485) coloca que pela absorção mede-se o volume dos poros, geralmente secando-se uma amostra até constância de massa, em seguida imergindo-a em água e então, determinando-se o acréscimo percentual sobre a massa seca. O autor salienta que são utilizados vários procedimentos e os resultados são diversos, não se podendo usar a absorção como medida da qualidade do concreto. Tais ensaios podem ser utilizados para comparar a qualidade de materiais que seguem os mesmos métodos, no entanto, os resultados de diversas pesquisas não devem ser comparados indiscriminadamente.

O CEB (1993, p. 71) apresenta equações que permitem calcular o coeficiente de absorção de água e Neville (1997, p. 486) faz comentários a respeito de ensaios de absorção total e absorção inicial e explica que em função das dificuldades associadas aos ensaios de absorção e sendo que os ensaios de permeabilidade medem a resposta do concreto à pressão (que dificilmente é a força impulsora dos fluidos que entram no concreto), surgiu necessidade de outro ensaio. Este ensaio, que o autor chama de sorção, mede a absorção de água por sucção capilar no concreto não saturado posto em contato com a água, não havendo coluna de água, ou seja, sem pressão. No ensaio, um prisma de concreto é apoiado em suportes de modo que 2 a 5mm fiquem imersos, registrando-se o aumento de massa do prisma. As condições de umidade devem ser preestabelecidas e se possível acondicionar a amostra a 105°C antes do ensaio.

Hall (1989, p. 52) já dizia que a permeabilidade é um parâmetro errôneo para modelar o fluxo capilar nas estruturas de construção. É requerida uma teoria física do fluxo capilar em materiais insaturados, e que se incorpore a idéia do fluxo de Darcy nos poros do material em resposta à força capilar que surge de cada poro da estrutura, todos saturados fracionadamente. A absorção de água acumulada (por unidade de área) aumenta conforme a raiz quadrada do tempo transcorrido. Hall (1989, p. 52) e Neville (1997, p. 487) apresentam uma equação para cálculo da sorção.

A RILEM (1982a, 1982b, 1984) nos CPC11.1, CPC11.2 e CPC11.3 apresenta ensaios de absorção por imersão, por capilaridade e por imersão sob vácuo, respectivamente. A ABNT, (1995) sob designação NBR 9779, apresenta a determinação da absorção de água por capilaridade de argamassas e concretos endurecidos.

Helene (1993, p. 122) apresenta a clássica lei de Jurin que modela a ascensão capilar e Meng (1994, p. 126 e 128) coloca que o fluxo capilar é limitado pela força capilar na estrutura dos poros, descrevendo a equação desse fluxo.

Conforme Helene (1986, p. 13), a diminuição do diâmetro dos poros capilares aumenta as pressões capilares que irão fazer com que a absorção seja maior e mais rápida. Por outro lado, concretos porosos absorvem pouca água por capilaridade, mas têm maior permeabilidade.

Estudos realizados por Hall (1989) conduzem a um modelo matemático que relaciona sorção com difusão hidráulica (ou potencial de umidade, ou condutividade hidráulica). O modelo desenvolvido foi confirmado por experimentos de laboratório com vários materiais. Existe uma tendência de diminuir a sorção quando se aumenta a densidade do material, e isso depende da composição e do método de execução. O autor concluiu também que a sorção aumenta com o aumento da temperatura (cerca de 43%, ao passar a temperatura de 5 para 35°C), e que sofre alterações quando o líquido utilizado não é água pura. Além disso, a água absorvida acumulada é maior em argamassas que em concretos, em função da baixa absorção do agregado graúdo.

Martys e Ferraris (1997, p. 747) salientam que a sorção capilar vai depender da saturação dos poros. Experimentos por eles realizados determinaram os acréscimos de massa, conforme descrito anteriormente no ensaio de sorção. Concluíram que uma simples comparação com a teoria de sorção implica que, em idades iniciais, o processo é controlado pelos poros capilares e, em fases posteriores, o gel dos poros limita a taxa de fluxo, ou seja, o ingresso da água pode ser controlado pelo processo de difusão de umidade. Além do mais, dois regimes diferentes associados à sorção capilar em argamassas e concretos foram encontrados.

Em suas pesquisas, Meng (1994, p. 125) chegou à conclusão que o transporte de umidade envolve uma complexa interação entre diferentes processos de transporte. Difusão e fluxo capilar são interligados e é necessário estabelecer relações entre transporte de umidade e a estrutura de poros.

Segundo Helene (1993, p. 124), a absorção capilar pode ser considerada como um fenômeno de curta duração, uma vez que a água só pode penetrar por capilaridade até certa profundidade, limitada ao máximo pela lei de Jurin. Após esse máximo, só pode continuar penetrando por difusão e não mais por absorção capilar.

Diversos são os ensaios propostos para medir a sucção capilar e os métodos utilizados devem ser levados em conta quando forem comparados resultados de diferentes pesquisas.

### 2.3.3 Difusão

Difusão é o fenômeno de transporte de massa através de um fluido por efeito de gradientes de concentração. Se a difusão ocorre em estado estacionário, pode ser modelada pela primeira lei de Fick, se for em condição transiente, pode ser descrita pela segunda lei de Fick. O CEB (1993, p. 67) e Helene (1993, p. 124), entre outros, descrevem as leis de Fick.

A difusão de água e gases é apresentada de forma distinta pelo CEB (1993, p. 68-70). Meng (1994, p. 126) coloca que a difusão de gases é menor que a difusão de vapor de água.

Águas agressivas podem penetrar em concretos saturados por difusão, pois pode haver gradientes de concentração. Isso é propiciado pelos diferentes meios aquosos (o da solução dos poros do concreto e o do meio ambiente) em contato íntimo, e será tanto menor quanto mais compacto for o concreto (HELENE, 1986, p. 13).

A difusão de gases pode ocorrer em um espaço preenchido com água ou com ar, no entanto, quando esse espaço for preenchido com água o processo é mais lento que em ar, cerca de  $10^4$  a  $10^6$  vezes, segundo Neville (1997, p. 483) e cerca de  $10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s menor, segundo Papadakis et al. (1989, p. 1642). A difusão dos gases como ar, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> é primeiramente controlada pela umidade contida no concreto. Para concretos expostos às intempéries, o coeficiente de difusão é substancialmente menor que em concretos protegidos. A atmosfera circundante, assim como as propriedades de um concreto particular, têm forte influência no coeficiente de difusão (MENG, 1994, p. 126).

Lawrence<sup>9</sup> (1984 apud NEVILLE, 1997, p. 484) mostra que a difusividade é linearmente proporcional à permeabilidade intrínseca do concreto, em metros quadrados. Neville (1997, p. 484) e Papadakis et al. (1992, p. 126) colocam que o coeficiente de difusão de um gás é inversamente proporcional à raiz quadrada da sua massa molecular, permitindo, assim, fácil

---

<sup>9</sup> LAWRENCE, C. D. Transport of oxygen through concrete. In: The Chemistry and Chemically-Related Properties of Cement. Ed. F.P. Glasser, British Ceramics. **Proceedings**. N° 35 pp. 277-93 (1984).

conversão de um gás para outro. O oxigênio se difunde 1,17 vezes mais rapidamente que o dióxido de carbono (NEVILLE, 1997, p. 484).

Se a difusão através dos poros comunicáveis é dificultada, os gases necessitam atravessar uma distância maior, fazendo um caminho mais tortuoso. A tortuosidade é definida como a distância necessária para atravessar o material dividida por sua espessura. Assim, o coeficiente de difusividade efetiva (dado pelas leis de Fick) pode ser determinado apenas para uma amostra de espessura representativa (HOUST et al., 1993, p. 280).

Papadakis et al. (1991b, p. 371) consideram que a presença do agregado não afeta consideravelmente o valor da difusão efetiva, ou seja, a presença da zona de transição parece contrabalançar a baixa porosidade do agregado. Contudo, Houst et al. (1993, p. 281) colocam que a elevada porosidade da zona de transição tem grande influência nos mecanismos de transporte como a difusão de gases. Grandes volumes de agregados tendem a formar zonas de transição próximas, e estas tornam-se comunicáveis, criando canais contínuos e aumentando a porosidade. A existência da zona de transição é parcialmente devida à exsudação e depende da reatividade do agregado. A existência de microfissuras na zona de transição devidas à retração por secagem também é observada.

A difusão de gases pode ocorrer por:

- a) difusão molecular (ou difusão de Fick, ou difusão normal):** ocorre quando os poros são maiores que os diâmetros médios dos caminhos livres das moléculas de gás. As moléculas de gás se movem pela colisão entre si, e é assumido que a pressão absoluta é a mesma nas duas extremidades dos poros (HOUST; WITTMANN, 1994, p. 1166);
- b) difusão de Knudsen:** ocorre quando os poros são menores que os diâmetros médios dos caminhos livres das moléculas de gás. Assim, as moléculas de gás colidem mais com as paredes dos poros do que entre si (ISHIDA; MAEKAWA, 2000). A colisão entre moléculas pode ser negligenciada e este mecanismo é o mesmo para gradientes de pressão parcial ou absoluta (HOUST; WITTMANN, 1994, p. 1166);
- c) difusão superficial:** ocorre quando as moléculas de gás se difundem através das paredes dos poros por uma sucessão de reações de adsorção e dessorção, de

um lado ativo para outro (Van der Waals). Em poros muito grandes, a difusão superficial pode ser desconsiderada (HOUST; WITTMANN, 1994, p. 1166).

Ishida e Maekawa (2000) modelaram a difusão do CO<sub>2</sub> na fase gasosa dos poros e sua dissolução na fase aquosa, sendo que apenas a difusão molecular e a difusão de Knudsen foram consideradas no modelo por eles proposto. Diversos autores (HOUST et al., 1993; HOUST; WITTMANN, 1994; ISHIDA; MAEKAWA, 2000) apresentam expressões e considerações a respeito dessas difusões.

A difusão de gases como o dióxido de carbono e o oxigênio apresentam grande interesse, pois o primeiro leva à carbonatação e o segundo torna possível a corrosão da armadura (NEVILLE, 1997, p. 484).

No presente trabalho, a difusão do CO<sub>2</sub> possui a maior relevância. A taxa de difusão de CO<sub>2</sub> depende de diversos fatores como porosidade total, tamanho e distribuição dos poros, quantidade de água, cimento, agregados, cura, idade, temperatura, concentração de CO<sub>2</sub> e umidade relativa, entre outros (HOUST et al., 1993, p. 279; JIANG et al., 2000, p. 700; PAPADAKIS et al., 1992, p. 126; SAETTA; VITALIANI, 2004, p. 576). A primeira etapa das reações de carbonatação consiste exatamente na difusão do CO<sub>2</sub> da atmosfera na fase gasosa, nos poros do concreto. O CO<sub>2</sub> ocorre em uma concentração molar na atmosfera e a difusão através dos poros do concreto com uma difusibilidade efetiva, de regiões onde a concentração de CO<sub>2</sub> é alta para aquelas onde é baixa (PAPADAKIS et al., 1991a, p. 30).

Dhir et al. (1989, p. 141) dizem que há estreita relação entre a permeabilidade intrínseca da “capa de concreto” e a resistência à carbonatação, sem levar em conta o proporcionamento e cura da mistura. Esta relação pode ser usada para prever a resistência de carbonatação do concreto, e a permeabilidade intrínseca relacionada com a difusão de gases. Os autores explicam que esta relação ocorre porque a concentração e a pressão, associadas à difusão e permeabilidade, respectivamente, perturbam o equilíbrio dos fluidos nos poros médios, resultando num escoamento para restabelecer o equilíbrio.

Dos mecanismos de transporte apresentados, apenas a difusão tem relação direta com o tema central do presente trabalho, ou seja, com a carbonatação. É difícil dizer se um dos outros mecanismos, permeabilidade e sucção capilar, atua em alguma das etapas dos ensaios realizados. A seguir são apresentados o fenômeno de carbonatação e os fatores que a influenciam.

### 3 CARBONATAÇÃO

A carbonatação é um complexo processo físico-químico onde os compostos do cimento, hidratados ou não, são gradualmente substituídos por carbonatos, através de reações com o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e outros gases ácidos como o dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) e ácido sulfídrico (H<sub>2</sub>S). Este processo ocorre lentamente segundo a reação principal, apresentada na equação 3.1:



Quanto aos aspectos químicos, Smolczyk (1976, p. 1) ressalta que os cimentos possuem de 45 a 65% de óxido de cálcio (CaO) e mais 2% de álcalis. Os produtos gerados são fortemente básicos e a solução dos poros possui um pH entre 12,6 e 13,5<sup>10</sup>. O Ca(OH)<sub>2</sub> pode reagir com o CO<sub>2</sub> e formar carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>), que é insolúvel. O CaCO<sub>3</sub>, na forma mineralógica, aparece como: calcita, vaterita e raramente na forma de aragonita. Sob condições normais, uma certa quantidade de CaO permanece não carbonatada e parece ser independente do tipo de cimento e relação a/c. Um cimento com 65% de CaO tem aproximadamente 40% de CaO carbonatável. O CO<sub>2</sub> de 1m<sup>3</sup> de ar (com 0,03% de CO<sub>2</sub>) carbonata 2g desse cimento (SMOLCZYK, 1976, p. 3).

Referente aos aspectos físicos, Smolczyk (1976, p. 3) coloca que os concretos com elevada umidade ou de baixa permeabilidade são resistentes à carbonatação, tornando-se evidentes os problemas de transporte que existem também a altas concentrações de CO<sub>2</sub>. A porosidade e a distribuição dos poros exercem forte influência sobre a carbonatação. Aspectos físicos fornecem respostas a alguns fenômenos não explicados quimicamente (SMOLCZYK, 1976, p. 5).

O concreto exerce sobre o aço uma proteção física, por meio do cobrimento da armadura e também uma proteção química, através da passivação pelo elevado pH (acima de 10,5). Com a carbonatação o pH diminui para valores próximos a 9,4 (HELENE, 1986, p. 9). Isaia (1999, p. 5) explica que isso ocorre porque, quando o Ca(OH)<sub>2</sub> é transformado em carbonato, este se precipita, havendo diminuição da sua concentração na solução dos poros, possibilitando a

---

<sup>10</sup> O pH da solução dos poros depende dos constituintes do cimento, podendo atingir valores próximos a 14,0. O valor do pH da solução saturada de Ca(OH)<sub>2</sub> (à temperatura ambiente) é da ordem de 12,6 (HELENE, 1986, p. 4).

dissolução de maiores quantidades de  $\text{Ca(OH)}_2$  para restabelecer o equilíbrio, resultando na diminuição da reserva alcalina.

A espessura da capa superficial carbonatada denomina-se “profundidade de carbonatação” e a redução do pH pode ser visualizada através de um indicador químico apropriado, pela mudança de cor (ANDRADE, 1992, p. 76). Ying-Yu e Qui-Dong (1987, p. 1927) salientam que há uma área carbonatando entre as áreas carbonatada e não carbonatada. Esta área “carbonatando” pode ser chamada de frente de carbonatação e geralmente possui pH distinto daqueles apresentados pelas áreas já carbonatada e não carbonatada.

Tuutti (1982, p. 36) indica que a carbonatação faz parte do processo de iniciação da corrosão, pois diminui a estabilidade química da capa protetora ou película passivadora do aço. Além disso, o fenômeno provoca retração por carbonatação, a qual conduz a tensões de tração adicionais, aumentando sua tendência de fissuração (SILVA, 1995, p. 74).

### 3.1 MECANISMOS DA CARBONATAÇÃO

Na hidratação do cimento ocorrem reações químicas nas quais materiais carbonatáveis são produzidos. Os processos físico-químicos da carbonatação envolvem reações gasosas, dissolução e precipitação de sólidos. As reações envolvidas nas diversas etapas deste processo são apresentadas por Papadakis et al. (1989, 1991a, 1991b, 1992) e, segundo os autores, consistem em:

- a) difusão do  $\text{CO}_2$  da atmosfera na fase gasosa dos poros do material e posterior dissolução na água dos poros;
- c) dissolução do  $\text{Ca(OH)}_2$  sólido na água dos poros e difusão do  $\text{Ca(OH)}_2$  dissolvido das regiões de maior alcalinidade para as de menor alcalinidade;
- d) reação do  $\text{CO}_2$  dissolvido com o  $\text{Ca(OH)}_2$  dissolvido na água dos poros;
- e) reação do  $\text{CO}_2$  dissolvido com o C-S-H e os compostos não hidratados ( $\text{C}_2\text{S}$  e  $\text{C}_3\text{S}$ ) da pasta de cimento endurecida;

- f) redução do volume dos poros devido à precipitação dos produtos de carbonatação;
- g) condensação do vapor de água (gerado na reação de carbonatação) nas paredes dos poros do material, em equilíbrio com a temperatura e as condições de umidade relativa do ambiente de exposição.

Parrot (1986, p. 1) enfatiza que, apesar de todos os compostos hidratados do cimento poderem reagir com o CO<sub>2</sub> a concentrações atmosféricas normais (de 0,03% em volume), os compostos não hidratados só reagirão com o CO<sub>2</sub> quando este estiver presente em altas concentrações, mas não nas condições normais. Paris<sup>11</sup> (1993, apud ISAIA, 1999, p. 6) aponta que a etringita também sofre carbonatação, resultando ao final aragonita, gipsita e gesso.

A água que é produzida nas reações de carbonatação difunde da frente de reação para a superfície, onde a umidade é normalmente menor (HOUST et al., 1993, p. 279). Andrade (1992, p. 32) ressalta que após a carbonatação, devido à redução dos poros, o concreto está constantemente úmido. Isso acontece porque o mesmo é capaz de absorver água facilmente, no entanto, a perda dessa água é muito lenta. Da mesma forma, concretos expostos à chuva carbonatam menos que aqueles protegidos da chuva (PARROT, 1986, p. 27; SMOLCZYK, 1976, p. 6).

Nem todos os concretos carbonatam a uma mesma velocidade, pois esta depende da difusividade do CO<sub>2</sub> que está relacionado a numerosas variáveis, tais como: consumo e tipo de cimento, porosidade, umidade relativa, relação a/c, grau de hidratação, entre outras (ANDRADE, 1992, p. 78; NEVILLE, 1997, p. 499). Alguns autores (HELENE, 1986, p. 9; SMOLCZYK, 1976, p. 6) dizem que o progresso da carbonatação pode cessar após determinado período em função do aumento da compacidade pela deposição dos produtos de hidratação e carbonatação, dificultando a entrada do CO<sub>2</sub>.

Conforme Tuutti (1982, p. 24), a equação mais antiga para calcular matematicamente o processo de carbonatação é a apresentada na equação 3.2:

---

<sup>11</sup> PARIS, J. M. F. La carbonatación de la pasta hidratada de cemento portland. Interpretación físico-química. Madrid: **Monografías del Instituto Eduardo Torroja**, 1993, n° 130.

$$e_c = K\sqrt{t} \quad (\text{equação 3.2})$$

Onde:

$e_c$  = espessura carbonatada em mm;

$t$  = tempo em anos ou meses;

$K$  = depende da difusividade efetiva do  $\text{CO}_2$  através do concreto (TUUTTI, 1982, p. 25).

Conforme Andrade (1992, p. 78),  $K$  é uma constante cujo valor pode ser determinado quando se conhecem a espessura da capa carbonatada e a idade da estrutura. Uma vez conhecido  $K$ , pode-se prever a velocidade de avanço da frente de carbonatação. Neville (1997, p. 497) denomina  $K$  como coeficiente de carbonatação, em  $\text{mm/ano}^{0,5}$ .

Curie (1986, apud NEVILLE, 1997, p. 497) afirma que o coeficiente  $K$  é frequentemente maior que 3 ou 4  $\text{mm/ano}^{0,5}$ . Neville (1997, p. 497) coloca que a equação acima citada é aceita de um modo geral, entretanto, não é válida para condições variáveis de exposição, ou seja, condições higrométricas instáveis. O autor afirma que a profundidade de carbonatação é diferente na face interna e externa de um mesmo elemento estrutural.

Papadakis et al. (1989, p. 1647) ressaltam que em estudos realizados em ambientes internos, isto é, protegidos das intempéries, onde as condições climáticas foram controladas, houveram concordâncias com a equação. Porém, quando realizados externamente, sem proteção das intempéries, houveram desvios da equação, uma vez que variações na umidade provocaram variações na profundidade de carbonatação. Isso foi recentemente comprovado por Figueiredo (2004, p. 168), que comparou espessuras de carbonatação de estruturas expostas e não expostas às intempéries. A autora constatou que a profundidade carbonatada em ambiente externo não protegido da chuva corresponde a 30% (estrutura com 16 anos) daquela encontrada em ambiente protegido da chuva.

Smolczyk (1976, p. 7) salienta que prever a resistência à carbonatação torna-se difícil, devido ao longo período de testes necessários. As fórmulas empíricas são baseadas em testes de curta duração, sendo o restante, extrapolação. O desenvolvimento de fórmulas complexas, usadas pesquisas científicas, levam em conta porosidade capilar, composição química e tortuosidade, sendo difícil a sua aplicação prática pela dificuldade de obtenção desses dados.

O autor apresenta um fator relacionado à resistência à compressão como aproximação para a profundidade de carbonatação de concretos e argamassas.

Do mesmo modo, a revisão da literatura feita por Parrot (1986, p. 20) sugere que a resistência aos 28 dias pode ser usada para relatar os efeitos de diversas variáveis combinadas sobre a carbonatação. Todavia, o pesquisador enfatiza que os resultados dessa relação entre resistência e carbonatação são muito dispersos, principalmente em resistências baixas. Nessa comparação não se leva em conta a umidade relativa, a temperatura, percentual de CO<sub>2</sub>, tempo de cura e grau de compactação. Neville (1997, p. 500) concorda que usar a resistência à compressão para prever a profundidade de carbonatação é uma simplificação inadequada, uma vez que nem a resistência e nem a relação a/c fornecem informações da microestrutura da pasta de cimento endurecida. Além desses parâmetros, a resistência à compressão também não leva em consideração, a composição química do cimento.

Kulakowski (2002, p. 149) verificou que a resistência à compressão axial é inversamente proporcional à profundidade de carbonatação, com o aumento da relação água/aglomerante, para um mesmo teor de adição de sílica ativa. No entanto, a autora constatou que aumento do teor de sílica ativa é benéfico para a resistência à compressão e prejudicial para a profundidade de carbonatação. Este exemplo vem corroborar a afirmação que a resistência à compressão pode ser utilizada para prever a carbonatação quando os materiais são os mesmos, no entanto, não é um bom parâmetro se os materiais são modificados.

### 3.2 MEDIÇÃO DA CARBONATAÇÃO ATRAVÉS DE INDICADORES QUÍMICOS

A determinação da profundidade de carbonatação por meio de um indicador químico de pH é o método mais difundido, para a determinação da frente de carbonatação, devido a sua praticidade e baixo custo.

O indicador químico mais utilizado é a fenolftaleína. Diversos pesquisadores relatam a metodologia a ser utilizada na determinação da profundidade de carbonatação com indicadores químicos, porém, não há consenso entre eles sobre a faixa de pH na qual há a troca de coloração do indicador. Andrade (1992, p. 76) diz que uma solução de fenolftaleína a 1% dissolvida em álcool etílico é incolor em pH inferior a 8,3, para valores de pH superiores a

9,5 torna-se vermelho-carmim e entre 8,0 e 9,5 fica com coloração variável de rosa a vermelho-carmim. Forrester (1976, p. 3) considera que a troca de coloração ocorre quando o pH atinge valores inferiores a 9,2. Isaia (1999, p. 17) adota como parâmetro um pH igual a 10,0 sendo que para valores de pH inferiores, a solução apresenta-se incolor e para valores acima, vermelho-carmim. Kazmierczak e Lindenmeyer (1996, p. 404) colocam que a solução se apresenta incolor em pH 8,3 e vermelho-carmim em pH 10,0. Silva (1995, p. 74) indica que o pH teórico de modificação a 25°C é igual a 9,3.

Para pH acima de 9,5 a fenolftaleína apresenta coloração rosa. A cor rosa indica a elevada concentração de  $\text{Ca(OH)}_2$ , mas não a ausência total de carbonatação. A metodologia não faz distinção entre pH baixo por carbonatação ou outros gases ácidos (Neville, 1997, p. 502).

Podem ser utilizados, também, outros indicadores químicos como a timolftaleína, o amarelo de alizarina R, o Naphthol green B e um indicador de longa duração que envolve indicador fluorescente (Acridine orange) misturado com um indicador de absorção (Thiazole yellow) (FORRESTER, 1976, p. 3). A timolftaleína apresenta profundidades de carbonatação um pouco superiores à da fenolftaleína (KAZMIERCZAK; LINDENMEYER, 1996, p. 409).

A RILEM (1988), sob a designação CPC-18, descreve o procedimento para o ensaio. O indicador deve ser aspergido em uma região recém-fraturada, antes que a face exposta pela fratura venha a se carbonatar ao reagir com o  $\text{CO}_2$  do ar. Após a secagem do indicador pode-se passar uma resina incolor, sem brilho, para fixação da cor. A RILEM recomenda que a medição da profundidade de carbonatação seja feita 24 horas após a aspersão do indicador, quando o limite entre as faces carbonatadas e não carbonatadas é mais evidente. A precisão deve ser de 0,5mm, não sendo levados em conta valores de carbonatação inferiores. Os cantos de amostras prismáticas devem ser ignorados, uma vez que o  $\text{CO}_2$  entra por dois lados. Em amostras com agregados muito grandes, a carbonatação deve apenas ser medida na pasta de cimento.

Isaia (1999, p. 19), após analisar o trabalho de diversos pesquisadores que compararam métodos de medição da profundidade de carbonatação, conclui que o emprego de indicadores para esse fim é um meio bastante prático, fácil e de baixo custo, embora apresente deficiências como a de subestimar a frente real de carbonatação e a dispersão razoável das leituras. Considera que é um ensaio cujos resultados são válidos para efeito comparativo entre diversos traços de concreto de laboratório, embora para casos de obras acabadas com o intuito

de avaliação da verdadeira frente de carbonatação deixa de ser fidedigno, devendo ser realizados ensaios complementares por outros métodos.

Existem diversos outros métodos para determinar a profundidade de carbonatação. Dentre eles estão a petrografia, a diferença de massa, a difração por Raios-X, a análise térmica diferencial, a termogravimetria, a determinação do pH através de titulação da solução dos poros e a espectrofotometria no infravermelho. Kazmierczak e Lindenmeyer (1996, p. 405) apresentam alguns desses métodos. Cada método é utilizado de acordo com a necessidade e sua disponibilidade, muitas vezes, até para complementar as pesquisas. Alguns podem ser bastante incomuns, de difícil execução e custo elevado.

Parrot (1986, p. 27) salienta que outros métodos de medida de profundidade de carbonatação, como a análise termogravimétrica, a análise química, a difração de Raios-X, a microscopia ótica e a análise da solução do pH dos poros, entre outros, dão resultados superiores e mais precisos aos indicados pela fenolftaleína. Kazmierczak e Lindenmeyer (1996, p. 409) encontraram valores de profundidade de carbonatação superiores para análises por microscopia ótica com relação à fenolftaleína. Da mesma forma, os resultados obtidos por Lo e Lee (2002, p. 513) indicaram que a carbonatação de concretos analisados com espectroscopia por infravermelho é cerca de 24% maior que a apresentada pela fenolftaleína.

Apesar das diferenças apresentadas pelos vários métodos de medição da carbonatação, o uso de indicadores químicos, como a fenolftaleína, tem-se mostrado adequado para a avaliação da carbonatação.

### 3.3 FATORES QUE INFLUENCIAM A CARBONATAÇÃO

A carbonatação é influenciada pelas condições de exposição, ou seja, do meio ambiente em que a estrutura está inserida e também pela composição e condições do concreto.

#### 3.3.1 Meio Ambiente

Os fatores ambientais que mais exercem influência sobre o processo de carbonatação são a concentração de CO<sub>2</sub> e a umidade relativa.

### 3.3.1.1 Concentração de CO<sub>2</sub>

Todos os compostos hidratados do cimento podem reagir com o CO<sub>2</sub> a concentrações atmosféricas normais (cerca de 0,03% em volume). Os compostos não hidratados também podem reagir com o CO<sub>2</sub> quando presente em altas concentrações, mas não nas condições normais. Embora possa ocorrer facilmente em condições saturadas quando o CO<sub>2</sub> está livremente disponível, na prática é necessária a difusão do CO<sub>2</sub> através da camada superficial carbonatada para alcançar a zona de reação (PARROT, 1986, p. 1). O CO<sub>2</sub> deriva, principalmente, de processos industriais que usam combustíveis fósseis e da exaustão de veículos motorizados.

Saetta e Vitaliani (2004, p. 577) salientam que a concentração de CO<sub>2</sub> no ar é um parâmetro ambiental importante na taxa de carbonatação e apresentam concentrações de CO<sub>2</sub> usuais em diferentes ambientes:

a) Campo aberto	0,015%
b) Centro urbano	0,036%
c) Zona industrial	0,045%
d) Estábulo ventilado	0,046%
e) Estábulo	0,075%
f) Exaustão veículo motorizado	16,69%
g) Respiração humana	3,62%

Há significativas diferenças nas concentrações de CO<sub>2</sub> quando se comparam ambientes fechados e abertos. A carbonatação em ambientes fechados geralmente é superior à observada em ambientes abertos, que permitem a renovação constante do ar. Em ambientes onde não há renovação constante do ar, a existência de plantas, seres humanos e máquinas em funcionamento gera um aumento substancial na concentração de CO<sub>2</sub> (KAZMIERCZAK, 1995, p. 17).

O problema prático é o tempo necessário para experimentos ao natural. São necessários 5 a 20 anos para se obter resultados adequados. Para resolver esse problema, são usados ensaios

acelerados, que reduzem drasticamente o tempo necessário para o experimento (PAPADAKIS et al., 1989, p. 1647).

O tempo é inversamente proporcional à concentração de CO<sub>2</sub>. No método suíço<sup>12</sup> (1988) a concentração é de 100%. O mais freqüente em ensaios acelerados são concentrações de 4 ou 5% (NEVILLE, 1997, p. 502). Segundo diversos autores (ROY et al., 1999; SANJUÁN, OLMO, 2001; entre outros), deve-se tomar cuidado quando da realização de ensaios acelerados, pois o aumento no percentual de CO<sub>2</sub> pode distorcer os fenômenos, ou seja, pode haver alteração das reações químicas envolvidas no processo e nos compostos formados, cuja porosidade pode ser diferente.

Estudos realizados por Bier<sup>13</sup> (1987 apud NEVILLE, 1997, p. 502) mostraram que usando concentrações de CO<sub>2</sub> de 2%, as profundidades de carbonatação de cimentos CPIII e CPIV foram 2 vezes maiores que para o cimento CPI, sendo que essa tendência não foi verificada na concentração de 0,03% de CO<sub>2</sub>. A explicação provável é que em condições aceleradas a carbonatação do Ca(OH)<sub>2</sub> é seguida pela carbonatação do C-S-H.

Sanjuán e Olmo (2001, p. 951) realizaram ensaios com percentuais de CO<sub>2</sub> de 5, 20 e 100%. A carbonatação a 5 e 20% apresenta uma frente mais homogênea que 100%, sendo mais confiável em percentuais menores. Os resultados com 100% são totalmente diferentes e os autores acreditam que estejam longe dos obtidos em condições naturais. Os autores afirmam que o coeficiente de difusão encontrado a 100% não é real na prática e o carbonato de cálcio formado tem uma estrutura cristalina totalmente diferente do produzido quando o processo é lento, o que pode alterar as condições de difusão.

### 3.3.1.2 Umidade relativa

Com exceção da difusão do CO<sub>2</sub>, que toma lugar na fase gasosa dos poros do concreto, todos os outros processos físico-químicos envolvidos na carbonatação ocorrem nos poros preenchidos com água. A quantidade de água necessária para o equilíbrio higrotérmico depende do meio e do sistema de poros, que são função da temperatura, umidade relativa,

---

<sup>12</sup> Bulletin Du Ciment, Détermination rapide de la carbonatation du béton, Service de Recherches et Conseils Technigues de l'Industrie Suisse du Ciment, 56, N° 3, pp. 148-157 (1988).

<sup>13</sup> BIER, Th. A. Influence of type of cement and curing on carbonation progress and pore structure of hydrated cement paste, Materials Research Society Symposium, 85, pp. 123-134 (1987).

grau de hidratação e atividade pozolânica do cimento (PAPADAKIS et al., 1991a, p. 28). A água possui duplo papel: bloqueia os poros, dificultando a difusão do  $\text{CO}_2$ , porém, é também o meio de reação entre o  $\text{CO}_2$  e o  $\text{Ca(OH)}_2$  (PAPADAKIS et al., 1989, P. 1641). Parrot (1986, p. 1) salienta que, para que ocorra a reação, é necessário que haja água suficiente nos poros para primeiro dissolver os compostos hidratados, e se o teor de água for muito baixo (menor que cerca de 40%), não haverá dissolução. O processo é lento se os poros da matriz são preenchidos com água e a taxa de carbonatação máxima é observada em umidades intermediárias (umidades relativas em torno de 70%).

Kazmierczak (1995, p. 15) explica que a velocidade de carbonatação será afetada pelas variações de umidade relativa e de temperatura, uma vez que estas influenciam diretamente na existência de vapor d'água ou na saturação dos poros capilares, após a umidade interna do concreto equilibrar-se com o meio.

Não há consenso no meio técnico a respeito da umidade relativa ideal para as reações de carbonatação. De forma geral os pesquisadores indicam valores compreendidos entre 40 e 85%.

A umidade ideal para carbonatação, segundo diversos pesquisadores, é citada a seguir: ACI (1991, p. 222R-10) comitê 222, 50%, Andrade (1992, p. 30) entre 50 e 80%, Helene (1986, p. 19) entre 65 e 85%, Neville (1997, p. 496) entre 50 e 70%, Papadakis et al. (1989, p. 1649) entre 50 e 65%, Saetta et al. (1995, p. 1704) entre 40 e 80%, Silva (1995, p. 69) 60%, Wolf e Dal Molin (1989, p. 124), 70%, Ying-Yu e Qui-Dong (1987, p. 1926) entre 50 e 75%.

Papadakis et al. (1989, p. 1642) colocam que o efeito da água é muito importante. A difusão do  $\text{CO}_2$  diminui quando aumenta a umidade relativa. A carbonatação cai drasticamente com o aumento da umidade relativa. Aumentando a umidade relativa, aumenta a fração de poros cheios d'água e isso dificulta a difusão de  $\text{CO}_2$ , diminuindo a velocidade de carbonatação. Neville (1997, p. 496) diz que a velocidade de carbonatação depende da umidade do concreto que varia com a distância da superfície exposta. Andrade (1992, p. 30) ressalta que a umidade relativa é quem controla o acesso de oxigênio e outros gases.

O grau de saturação dos poros é definido como a fração de poros ocupados por água. A saturação diminui com o aumento da substituição do cimento por pozolanas. Neste caso, a redução ocorre, principalmente, porque concretos com cimentos pozolânicos possuem maior quantidade de poros grandes. Por isso, o grau de saturação de água, que depende principalmente

do volume relacionado aos poros pequenos que são completamente preenchidos com água, diminui com o aumento da substituição (PAPADAKIS et al., 1992, p. 126).

Roy et al. (1999, p. 598) submeteram amostras de concreto à carbonatação acelerada com 5 diferentes umidades relativas (52, 64, 75, 84 e 92%) e verificaram que, quando a umidade aumenta de 52 para 75%, há um incremento significativo na profundidade de carbonatação. Os pesquisadores salientam que 65% de umidade é a condição ótima.

Conforme Neville (1997, p. 496), as dimensões dos elementos são também um fator a ser levado em conta, pois a umidade liberada pelas reações de carbonatação deve sofrer difusão a fim de manter o equilíbrio higroscópico entre o interior do concreto e a atmosfera. Se a difusão for muito lenta, a pressão de vapor dentro do concreto se eleva até a saturação e a difusão do CO<sub>2</sub> dentro da pasta passa a ser praticamente interrompida.

Os resultados de carbonatação de ensaios contemplando ciclos de molhagem, em tanques de lixiviação, com períodos de estocagem em ambientes com umidades relativas de 23, 48 e 98%, realizados por Gervais et al. (2004, p. 124), apontam que a maior extensão da carbonatação foi obtida na menor umidade relativa. Os autores explicam que em função da saturação das amostras devido ao período que permaneceram submersas, a umidade ótima para as reações de carbonatação nos poros do material (segundo eles, cerca de 65%) tenha sido alcançada apenas no ambiente com umidade relativa de 23%. Nos demais ambientes (umidades relativas de 48 e 98%), a umidade interna permaneceu elevada, não favorecendo a carbonatação.

Sarría (1997, p. 79) colocou sensores de registro contínuo de umidade relativa e temperatura no interior de corpos-de-prova de concreto expostos ao clima de Madri, sem proteção das intempéries. Os registros também foram realizados externamente aos corpos-de-prova. Comparando os resultados, a umidade interna foi sempre maior que a umidade relativa, geralmente superior a 60%. Não foi encontrada a relação entre umidade relativa externa e temperatura que possibilite prever a umidade interna.

### 3.3.1.3 Temperatura

O aumento da temperatura normalmente funciona como acelerador das reações químicas, portanto climas equatoriais e tropicais são piores que temperados (HELENE, 1986, p. 19).

Tuutti (1982, p. 104) considera a temperatura importante, uma vez que seu acréscimo aumenta a mobilidade das moléculas, ou seja, o transporte de substâncias é facilitado. Frequentemente, aumenta a solubilidade de várias substâncias. Em temperaturas muito baixas, os líquidos congelam, impedindo o transporte.

No entanto, a temperatura praticamente não tem influência na carbonatação entre 20 e 40°C (PAPADAKIS et al., 1991b, p. 372), pois o processo ainda é controlado pela difusão. Neville (1997, p. 498) concorda que pequenas variações de temperatura exercem pouca influência na carbonatação.

Apesar da pouca influência na velocidade de carbonatação, a temperatura não pode ser desprezada pois exerce grande influência na taxa de corrosão da armadura.

### 3.3.2 Fatores Relacionados ao Concreto

Entre os fatores relacionados à composição do concreto, pode-se destacar o tipo e quantidade de cimento, tipo e quantidade de adições, a cura e a porosidade. Conforme Dhir et al. (1989, p. 142), a taxa de carbonatação é fortemente influenciada pela relação a/c e o período de cura.

#### 3.3.2.1 Cimento

Conforme o ACI (1991, p. 222R-8) comitê 222, o tipo e finura do cimento geram diferentes características ao concreto. Cimentos com adições, sob certas condições, diminuem a reserva alcalina, no entanto, diminuem a permeabilidade e aumentam a resistividade elétrica.

Em um dos primeiros artigos gerados sobre carbonatação, Hamada (1969, p. 350) indica que o cimento CPI tende a carbonatar menos que os cimentos com adições por possuir maiores quantidades de  $\text{Ca(OH)}_2$ . Smolczyk (1969, p. 369), na discussão escrita sobre o artigo de Hamada (1969), rebate a colocação sobre a quantidade de  $\text{Ca(OH)}_2$ , ressaltando que a carbonatação não depende da quantidade de  $\text{Ca(OH)}_2$  livre na pasta e que altas quantidades de  $\text{Ca(OH)}_2$  não protegem qualquer concreto contra a carbonatação. Papadakis et al. (1992, p. 120) ressaltam que nas reações pozolânicas existentes em outros cimentos, o  $\text{Ca(OH)}_2$  é consumido, enquanto que no CPI ele é produzido.

Abreu (2004, p. 168) constatou que cimentos, mesmo com baixos teores de cinza volante (15%), carbonatam mais que cimentos comuns. Meyer (1969, p. 401), estudando cimentos com escória de alto-forno e pozolânicos, concluiu que os mesmos conduzem a profundidades de carbonatação maiores que o cimento Portland comum. Monteiro (1996, p. 108) relata que cimentos CPIII e CPV-ARI-RS-MS (cimento Portland de alta resistência inicial resistente à sulfatos com adição de sílica micropulverizada) apresentam desempenho inferior frente à carbonatação, com menor tempo para iniciação da corrosão, com relação a cimentos sem adições. Wolf e Dal Molin (1989, p. 130) confirmam que a velocidade de carbonatação em cimentos de alto-forno e pozolânicos é superior à encontrada no cimento Portland comum.

Neville (1997, p. 501) diz que os cimentos compostos resultam em menores teores de  $\text{Ca(OH)}_2$ , sendo necessária uma quantidade menor de  $\text{CO}_2$  para combinar-se com o  $\text{Ca(OH)}_2$ , produzindo  $\text{CaCO}_3$ . Contudo, ocorre outro efeito: a densificação da estrutura de poros, diminuindo a difusividade do  $\text{CO}_2$  e tornando a carbonatação mais lenta. Neville questiona: “qual dos efeitos predomina?”

Helene (1993, p. 111) explica que as adições reduzem a porosidade, permeabilidade e aumentam a resistência à compressão, entretanto, aumentam a profundidade de carbonatação. O autor dá a explicação pela reserva alcalina: com o aumento do  $\text{Ca(OH)}_2$  na solução intersticial, o  $\text{CO}_2$  não penetra com a mesma velocidade pois precisa primeiro baixar o pH e depois reagir com o  $\text{Ca(OH)}_2$  para então seguir penetrando e precipitando  $\text{CaCO}_3$ . O que importa é a quantidade de  $\text{Ca(OH)}_2$  na solução intersticial dos poros e não a quantidade total de  $\text{Ca(OH)}_2$ . Concretos com elevado consumo de cimento (elevada quantidade de  $\text{Ca(OH)}_2$  total) devem ter profundidades de carbonatação iguais a concretos com baixo consumo de cimento, mantidos relação a/c, tipo de cimento, cura e condições de exposição. O fator de controle é a concentração de  $\text{Ca(OH)}_2$  nos poros, que depende do tipo de cimento, da relação a/c e do grau de hidratação do cimento, não importando o consumo de cimento. Kobayashi e Uno (1989, p. 826) concordam ao indicar que a carbonatação de argamassas e concretos é governada pela quantidade de álcalis, em efeito, o pH da solução dos poros. Entretanto, Balayssac et al. (1995, p. 92) verificaram que a profundidade de carbonatação diminui com o aumento do consumo de cimento, seja qual for o tempo de cura.

Jiang et al. (2000, p. 702) relatam que para um dado consumo de cimento, a profundidade de carbonatação com cinza volante é maior que para o cimento comum. Quanto maior a quantidade de cinza, maior a carbonatação, efeito que diminui com o aumento do tempo de

cura. Para cura de 90 dias, alguns concretos com cinza volante têm profundidades de carbonatação semelhante aos concretos com cimento comum.

Se apenas a carbonatação for levada em consideração, a literatura consultada indica que os cimentos que possuem adições tendem a carbonatar mais, no entanto, em ensaios de corrosão desencadeada por carbonatação, o refinamento dos poros através de adições pode ser benéfico, como é visto a seguir.

### 3.3.2.2 Adições

Segundo alguns pesquisadores (BRANCA et al., 1993, p. 248; ISAIA, 1999, p. 9; PAPADAKIS et al., 1992, p. 120, entre outros), o efeito das adições minerais no cimento Portland depende do modo como é realizada a mistura, se por substituição ou por adição<sup>14</sup>. No caso da adição de cinza volante sem redução do teor de cimento, há diminuição da penetração de CO<sub>2</sub>, enquanto que, sob a forma de substituição de cimento, para uma mesma relação a/agl, há aceleração do processo de carbonatação.

Papadakis et al. (1992, p. 120) realizaram estudos utilizando cimento Portland comum (CPI) e três tipos de cimentos pozolânicos, compostos com três diferentes pozolanas: uma pozolana natural, uma artificial de alta reatividade e outra artificial de baixa reatividade. Como esperado, os cimentos pozolânicos, especialmente com pozolana natural e artificial de alta reatividade, apresentaram menores quantidades Ca(OH)<sub>2</sub> quando comparados com o cimento comum. Substituindo 35% do cimento por pozolona artificial com alta atividade pozolânica e 50 e 60% nos outros, o CaO contido na mistura não foi suficiente para completar a atividade pozolânica. Segundo esses pesquisadores, as cinzas volantes possuem os mesmos componentes que o clínquer, mas em proporções diferentes e diferentes combinações mineralógicas, sendo que a maior diferença é a proporção relativa de óxidos: as cinzas volantes são ricas em SiO<sub>2</sub> e pobres em CaO. Os produtos de hidratação dessas pozolanas também são os mesmos do clínquer, no entanto, apenas a fração amorfa reage com o Ca(OH)<sub>2</sub> a temperatura ambiente (PAPADAKIS et al., 1991a, p. 29). Como há menos CaO, a quantidade de Ca(OH)<sub>2</sub> será menor e a carbonatação mais rápida.

---

<sup>14</sup> Quando a mistura é realizada por substituição, há uma diminuição na quantidade total de clínquer, ao passo que se a mesma for feita por adição, a quantidade de clínquer permanece a mesma.

Ensaaios conduzidos por Papadakis (2000, p. 298), substituindo parte do cimento por sílica ativa (5, 10 e 15%) e cinza volante (10, 20 e 30%), e também parte do agregado miúdo nas mesmas proporções, mostram que a carbonatação aumenta quando a substituição é feita no cimento (cerca de 18% para sílica ativa e cerca de 50% para cinzas volantes) e diminui quando feita no agregado (cerca de 25% para sílica ativa e entre 25 e 45% para cinzas volantes, dependendo da cinza). Coelho et al. (2002, p. 11) encontraram profundidades de carbonatação superiores para concretos com substituição simultânea de parte do cimento e agregado miúdo por escória de alto-forno.

Papadakis et al. (1992, p. 125) chamam a atenção para a comparação de resultados, alertando para que se tome cuidado se está sendo usado a/c ou a/agl, se está sendo levado em conta o cimento ou só o clínquer. Os resultados de diferentes pesquisas não devem ser comparados quando as pozolanas são adicionadas e não substituídas. Quando ocorre uma adição ou substituição de parte do agregado, a quantidade de C-S-H aumenta, mas a quantidade de  $\text{Ca(OH)}_2$  diminui. Essa redução final não aumenta a taxa de carbonatação porque é maior que o equivalente pelo aumento do conteúdo de C-S-H. A concentração total de CaO nos constituintes carbonatáveis, que é o que conta do ponto de vista da carbonatação, aumenta significativamente com a substituição do agregado por pozolana. Assim, essa reposição final é favorável na taxa de carbonatação (desacelerando), principalmente pela redução da porosidade.

Conforme Ohga e Nagataki (1989, p. 279), embora a relação a/c diminua com o aumento do percentual de substituição por cinza volante, a profundidade de carbonatação aumenta. Isso é menos evidente com elevados consumos de cimento e tempo de cura, dependendo, também, do tipo de cinza volante.

Ishida e Maekawa (2000, p. 15) analisaram a adição de escória de alto-forno em diferentes percentuais de substituição e constataram que para a/agl até 0,40 o percentual de substituição parece não influenciar a carbonatação. No entanto, para teores de 50% de substituição, a resistência à carbonatação diminui. Lopes (1999, p. 138), substituindo 8% de cimento CII-F-32 por sílica ativa, constatou que a sílica ativa não se mostrou vantajosa frente à carbonatação. Nas primeiras idades, sem a substituição, os concretos carbonataram menos, tendendo a igualar para idades superiores a cerca de 28 dias. Kulakowski (2002, p. 163) também concluiu que a substituição do cimento CPV por sílica ativa é desfavorável para a carbonatação, principalmente para teores a partir de 10%, em relações a/agl acima de 0,45,.

Estudando a carbonatação de misturas binárias e ternárias de pozolanas (cinza volante, sílica ativa e cinza de casca de arroz), Isaia (1995, p. 205) chegou à conclusão que as profundidades de carbonatação cresceram muito rápido, a partir da quarta semana de ensaio, nas misturas com altos teores de substituição de cimento por pozolanas (especialmente 50% de cinza volante em mistura binárias ou ternárias), quando comparadas com os teores normais (25%). Da mesma forma, os estudos realizados por Vagheti (1999, p. 74), sobre os efeitos da cinza volante com cinza de casca de arroz ou sílica ativa sobre a carbonatação, quando em substituição por parte do cimento, mostraram que prepondera o fator de menor reserva alcalina sobre a diminuição da permeabilidade, pois os concretos com as adições sempre carbonataram mais que os de referência.

Diferentemente da maioria dos resultados apresentados por pesquisadores, Atis (2002, p. 4) encontrou profundidades de carbonatação semelhantes ao concreto de referência (com cimento Portland comum) para concretos com substituições de cinza volante de 50%, curados por 3 e 7 dias. Para concretos curados por 28 e 120 dias, as profundidades de carbonatação dos concretos com cinza volante foram inferiores às dos de referência. Bai et al. (2002, p. 1819) também verificaram um comportamento diferenciado quando usaram substituição de cimento por metacaulim, onde a carbonatação foi menor.

Seidler (1999, p. 63) adicionou sílica ativa, cinza volante e cinza de casca de arroz, em percentuais de 10, 20 e 30%, e constatou que o tipo e percentual de adição não são estatisticamente significativos para alterar o pH das misturas. Já o consumo de  $\text{Ca(OH)}_2$ , quando medido por difração de Raios-X, mostrou-se significativo frente ao tipo e percentual de adição e não significativo quando a técnica de medição empregada é a titulometria. As profundidades de carbonatação não foram estatisticamente influenciadas pelo tipo e percentual de adição.

Em estudos de corrosão desencadeada por carbonatação, Vieira (2003, p. 160) verificou que mesmo aumentando a carbonatação ao aumentar-se a adição de sílica ativa, há uma pequena redução na variação final do potencial de corrosão para os concretos com 5% de sílica ativa em relação ao concreto sem adição.

A revisão bibliográfica realizada no presente trabalho, com relação às adições, mostra que o avanço da carbonatação vai depender da forma de adição e quantidade das mesmas. Embora as adições em substituição ao cimento piorem a carbonatação, melhoram a compacidade e

diminuem a penetração de líquidos, gases e íons. Estes fatores, entre outros, devem ser levados em conta quando da tomada de decisões em empregar ou não adições. Mesmo que a profundidade de carbonatação aumente com as substituições de cimento por adições, a mesma não é prejudicial por si só, e no balanço final, os benefícios das adições podem ser maiores que os prejuízos, devendo ser avaliado o efeito dessas adições na durabilidade.

### 3.3.2.3 Cura

Helene (1993, p. 112) salienta que a profundidade de carbonatação depende da cura, pois esta afeta as condições de hidratação nos primeiros milímetros superficiais. Cimentos com adições podem ter a profundidade de carbonatação minimizada com boa e prolongada cura. As condições de cura podem mudar também as características no interior do concreto e têm papel importante na camada superficial do mesmo, sendo a mesma dependente principalmente do tipo de cimento (BALAYSSAC et al., 1995, p. 91) e da relação a/c.

O ACI (1991, p. 201-2R-21), no comitê 201, coloca que a permeabilidade do concreto diminui pela crescente hidratação do cimento, e por essa razão, recomenda cura mínima de 7 dias para amenizar os efeitos negativos na durabilidade das estruturas de concreto armado.

Neville (1997 p. 325) relata que a hidratação em velocidade máxima somente ocorre em condições de saturação, sendo desejável uma umidade de pelo menos 80% no interior do concreto. Segundo o autor, para que a hidratação de um elemento selado após a desmoldagem seja completa, a quantidade de água deve ser ao menos de duas vezes a água combinada.

Uma argamassa curada por 2 dias pode ter o dobro da porosidade capilar que outra curada a 28 dias. O efeito não benéfico da cura insuficiente pode se tornar desastroso no caso de baixas resistências nas primeiras idades, especialmente se as amostras forem de pequenas dimensões (SMOLCZYK, 1976, p. 5).

Pelo fato da difusão do CO<sub>2</sub> depender da porosidade, a cura tem importante papel na formação da microestrutura do concreto e conseqüentemente da profundidade de carbonatação (LO; LEE, 2002, p. 507). Comparando a cura ao ar com a cura úmida, Lo e Lee (2002, p. 512) verificaram que concretos curados em água apresentam 72% da carbonatação de concretos curados ao ar, após 3 meses de ensaio acelerado. Os pesquisadores colocam que

quando curado ao ar o material tem poros maiores e mais canais intercomunicáveis, aumentando a velocidade de difusão de  $\text{CO}_2$ .

Da mesma forma, comparando os resultados de carbonatação de concretos curados em umidades relativas de 100 e 65%, Atis (2002, p. 4) constatou que em cura úmida ( $\text{UR}=100\%$ ) a carbonatação é entre 35 e 70% com relação à cura seca ( $\text{UR}=65\%$ ), dependendo da mistura, e que aumentando o tempo de cura a carbonatação diminui.

Dhir et al. (1989, p. 138) curaram concretos por 28 dias, em 4 diferentes combinações entre cura em água e ao ar, e constataram que a redução na cura inicial em água de 4 dias para 1 dia implicou num aumento da profundidade de carbonatação maior que 80%, após 20 semanas de exposição. Fattuhi (1988, p. 428) também realizou ensaios de carbonatação com concretos submetidos a diferentes condições de cura e constatou que aumentando o período de cura submersa, a profundidade de carbonatação diminui. Nos resultados obtidos pelo pesquisador, em corpos-de-prova nos quais a cura foi submersa por 1, 3, 5, 7 e 28 dias, as taxas de carbonatação foram de 66, 53, 42, 39 e 17%, respectivamente, com relação àqueles curados ao ar por 28 dias.

Lopes (1999, p. 130) e Monteiro (1996, p. 116) mostram que passando a cura de 7 para 28 dias tem-se uma diminuição na profundidade de carbonatação entre 20 e 30%. Ohga e Nagataki (1989, p. 279) constataram que os concretos sem cinza volante são menos dependentes da cura inicial em água, diminuindo a profundidade de carbonatação quando aumenta o tempo de cura. Isso é mais significativo para concretos com menos cimento ou com relações a/c mais elevadas (DAL MOLIN, 1995, p. 156; OHGA; NAGATAKI, 1989, p. 279).

Nagataki e Ohga (1993, p. 229) realizaram experimentos com cura em água destilada e em solução de cloreto de sódio ( $\text{NaCl}$ ) por 7, 28, 56 e 91 dias. A profundidade de carbonatação quando as amostras são curadas em água é maior que quando curadas em solução de  $\text{NaCl}$ . Essa tendência é observada independente da taxa de substituição do cimento por cinza volante e do período de cura inicial. A explicação é atribuída ao bloqueio dos poros pelos produtos de reação entre os produtos de hidratação e o  $\text{NaCl}$ , no entanto, a cura inicial com  $\text{NaCl}$  foi desvantajosa para a corrosão, especialmente com cinza volante.

Considerando que a cura vai afetar, principalmente, a superfície dos compostos à base de cimento, e que a entrada do  $\text{CO}_2$  ocorre a partir dessa superfície, a cura possui papel fundamental na redução da carbonatação. A revisão da literatura apresentada acima infere que

a cura submersa ou úmida propicia as melhores condições para hidratação do cimento, e conseqüente fechamento dos poros.

#### 3.3.2.4 Porosidade

A relação a/c e a porosidade estão intimamente relacionadas. Papadakis et al. (1991b, p. 370) colocam que, para um mesmo tipo de cimento, a distribuição de poros depende primeiramente da relação a/c. O aumento da relação a/c aumenta a porosidade, que aumenta a difusão, que aumenta a velocidade de carbonatação (BRANCA et al., 1993, p. 248; PAPADAKIS et al., 1991b, p. 372).

Conforme o ACI (1991, p. 222R-10), comitê 222, a baixa relação a/c diminui a difusão do CO<sub>2</sub>, do O<sub>2</sub>, dos cloretos e aumenta a resistência mecânica, e em conseqüência, o tempo para o ataque.

Neville (1997, p. 486) explica que a porosidade é diferente da permeabilidade, uma vez que apenas alguns poros contribuem para a permeabilidade. Segundo ele, a porosidade pode ser determinada pela proporção do volume total de concreto que é ocupada pelos poros. Se os poros forem interligados, contribuem para o deslocamento dos fluidos, caso contrário, uma porosidade alta não significa alta permeabilidade.

Andrade (1992, p. 71) coloca que é possível usar o ensaio de porosidade como indicador da permeabilidade do concreto: porosidade menor que 10%, indica boa qualidade e bem compacto; entre 10 e 15%, representa boa qualidade, porém permeável e não adequado para ambientes agressivos; acima de 15%, muito permeável e inadequado para proteger a armadura por muito tempo.

Os poros dependem do tipo e quantidade de cimento, relação a/c e grau de hidratação (JIANG et al., 2000, p. 700). Patel et al. (1988, p. 193) investigaram pastas de cimento que permaneceram nos moldes por um dia (a UR=100%), depois foram desmoldadas e colocadas no mesmo ambiente por mais um dia e então acondicionadas em umidades relativas de 33, 49, 69, 81, 91, 97 e 100%, mantidas com soluções saturadas. Os dois dias de cura saturada promoveram cerca de 50% da hidratação. Os pesquisadores constataram que a variação na porosidade total pode ser ignorada para umidades relativas abaixo de 81%, e acima desse

percentual ocorre uma redução visível na porosidade devido ao aumento da hidratação. Normalmente, o percentual de poros com diâmetro menor que 37nm (poros pequenos), aumenta com o acréscimo da hidratação, ou seja, aumentando o período de cura em umidades relativas elevadas (acima de 81%), ocorre a diminuição dos poros grandes (poros com diâmetro maior que 37nm), que ao serem fechados formam novos poros com diâmetro menor. O volume de poros grandes a umidades baixas é três vezes maior que os obtidos em condições saturadas ou próximas (PATEL et al., 1988, p. 196).

Diversos pesquisadores (HOUST et al., 1993, p. 281; PAPADAKIS et al. 1989, p. 1642; YING-YU; QUI-DONG, 1987, p. 1927) concluíram que devido à carbonatação, há uma redução na porosidade e concomitante diminuição na média de diâmetros de poros. A porosidade decresce com o tempo por causa do volume de sólidos dos produtos das reações químicas de hidratação e carbonatação.

Ishida e Maekawa (2000, p. 11) constaram que os poros se tornam mais finos após a carbonatação, no entanto, ressaltam que não há consenso em como a porosidade e sua distribuição mudam. Os autores indicam que o volume do cristal de  $\text{CaCO}_3$  é aproximadamente 11,7% maior que o do  $\text{Ca(OH)}_2$ . Papadakis et al. (1992, p. 124) definem porosidade final como o volume de poros do volume total do concreto, após a completa hidratação, atividade pozolânica e carbonatação.

Em resumo, o aumento da porosidade aumenta a velocidade de carbonatação, e ao final desta, há uma redução dos poros pela deposição dos produtos da reação de carbonatação. Por estar diretamente relacionada com a relação a/c, a porosidade pode ser reduzida com a diminuição dessa relação. Além disso, a cura e as pozolanas também exercem influência sobre a porosidade.

Um agrupamento dos valores empregados por diversos trabalhos, em cada um dos fatores anteriormente descritos é apresentado a seguir.

### 3.4 MÉTODOS ADOTADOS POR DIVERSOS PESQUISADORES PARA OS ENSAIOS DE CARBONATAÇÃO

As pesquisas que envolvem ensaios de carbonatação têm a preocupação de manter os procedimentos de ensaio durante todo o estudo, porém, em geral, não existe a padronização destes ensaios. Desta forma, os resultados obtidos dessas pesquisas dificilmente são comparáveis entre si. Cada pesquisador procura uma forma de estabelecer uma relação entre as variáveis que está estudando, sem poder facilmente compará-las com as variáveis de outras pesquisas.

Muitos estudos relacionam as variáveis que estão sendo investigadas, tais como: a idade de cura, a idade de medição da profundidade de carbonatação, os métodos de medição utilizados, os resultados obtidos e as relações que puderam ser estabelecidas. São raros os estudos com ênfase para a etapa de sazonalidade, o qual consiste num condicionamento dos corpos-de-prova a serem utilizados, sendo esta etapa compreendida entre a cura e o início dos ensaios de carbonatação. O sazonalidade compreende o tipo e tempo de secagem dos corpos-de-prova, porém, muitas vezes, os trabalhos não descrevem esta etapa, isto quando a mesma é realizada.

A seguir são descritas, resumidamente, as variáveis e procedimentos que envolvem os ensaios de carbonatação de algumas pesquisas.

#### 3.4.1 Quanto às Condições do Ambiente

Neste item são descritas as condições do ambiente adotadas, em algumas pesquisas, para a realização dos ensaios de carbonatação.

##### 3.4.1.1 Concentração de CO<sub>2</sub>

Os ensaios de carbonatação podem ser realizados com as concentrações de CO<sub>2</sub> usualmente encontradas no ambiente (entre 0,015% até aproximadamente 1%) ou em condições aceleradas (concentrações de 1% até 100%).

As pesquisas que empregam condições naturais, com concentrações atmosféricas, dificilmente medem ou relatam os percentuais de CO<sub>2</sub> do meio em que o ensaio foi realizado. Balayssac et al. (1995, p. 91), Hamada (1969, p. 346), Seidler (1999, p. 48), Wolf (1991, p. 85), entre outros, conduziram ensaios com concentrações existentes na atmosfera.

Nas condições aceleradas de carbonatação, os percentuais de CO<sub>2</sub> adotados são os mais diversos. A seguir são listados alguns pesquisadores e os percentuais de CO<sub>2</sub> de seus respectivos estudos:

- a) 1%:** Johannesson e Utgenannt (2001, p. 925), Tuutti (1982, p. 48);
- b) 2%:** Lo e Lee (2002, p. 509);
- c) 3%:** Papadakis (2000, p. 293), Sanjuán e Olmo (2001, p. 950);
- d) 4%:** Dhir et al. (1989, p. 137), Ho e Lewis (1987, p. 491);
- e) 5%:** Abreu<sup>15</sup> (2004, p. 47), Alves (2000, p. 57), Van Gerven et al. (2004, p. 150), Goñi e Guerrero (2003, p. 2), John (1995, p. 103), Kulakowski (2002, p. 52), Sanjuán e Olmo (2001, p. 950), Seidler (1999, p. 48), Venquiaruto (2002, p. 57);
- f) 6%:** Roy et al. (1999, p. 598);
- g) 7%:** Ohga e Nagataki (1989, p. 277);
- h) 10%:** Isaia (1995, p. 42), Kobayashi e Uno (1989, p. 823), Vaghetti (1999, p. 41);
- i) 15%:** Hamada (1969, p. 346);
- j) 20%:** Van Gerven et al. (2004, p. 150), Jiang et al. (2000, p. 702), Sanjuán e Olmo (2001, p. 950), Ying-Yu e Qui-Dong (1987, p. 1919);
- l) 30%:** Branca et al. (1993, p. 247);
- m) 50%:** Bauer (1995, p. 124), Papadakis et al. (1991b, p. 369);

---

<sup>15</sup> Além do percentual de CO<sub>2</sub> de 5%, Abreu (2004, p. 74) também utilizou uma concentração de CO<sub>2</sub> próxima ao ponto de saturação.

**n) 100%:** Andrade (1988, p. 61), Coelho et al. (2002, p. 5), Cunha e Helene (2001, p. 7), Fattuhi (1988, p. 427), Gervais et al. (2004, p. 121), Kazmierczak (1995, p. 55), Kirchheim (2003, p. 83), Lopes (1999, p. 72), Monteiro (1996, p. 43), Nepomuceno (1992, p. 110), Sanjuán e Olmo (2001, p. 950).

A concentração de CO<sub>2</sub> é comumente dada pela quantidade, em volume, do gás que é introduzido na câmara de ensaio. No caso das câmaras saturadas (com concentrações de até 100% de CO<sub>2</sub>), geralmente ocorre a entrada de gás até que o volume injetado seja igual a pelo menos uma vez o volume da câmara. Em geral, não são utilizados equipamentos que meçam a quantidade de CO<sub>2</sub>, pois estes possuem um custo bastante elevado.

#### 3.4.1.2 Umidade Relativa

Nos ensaios acelerados de carbonatação, a umidade relatada nas pesquisas pode ser a umidade no interior da câmara de carbonatação ou aquela onde a mesma está inserida, havendo, freqüentemente, dúvidas a esse respeito. Pelo fato das câmaras operarem em circuitos fechados (sem contato com o ambiente externo e para evitar a contaminação do ambiente com o CO<sub>2</sub>), as umidades interna e externa à câmara podem ser diferentes. Nota-se que usualmente existe o cuidado de realizar os ensaios em ambientes com umidade controlada, no entanto, muitas vezes, a umidade no interior da câmara não é monitorada. Dependendo das condições que foram adotadas para a cura e secagem das amostras antes do ensaio, a umidade no interior da câmara de carbonatação pode assumir valores bastante distintos.

Conforme colocado anteriormente, no item 3.3.1.2, na opinião de diversos pesquisadores, a umidade ideal para que ocorram as reações de carbonatação está entre 50 e 80%. Esse valor refere-se à umidade relativa nos poros do material. Portanto, o desenvolvimento das reações de carbonatação dependem das condições em que as amostras foram curadas e sazoadas antes do ensaio, bem como da umidade dentro da câmara de carbonatação.

Alguns trabalhos (GERVAIS et al., 2004, p. 121; ROY et al., 1999, p. 598; WOLF; DAL MOLIN, 1989, p. 124) focam a influência da umidade relativa na carbonatação. Em outros, a falta de consenso e padronização para os ensaios de carbonatação possibilita o uso de valores bastante diferentes entre si, como por exemplo:

- a) entre 50 e 55 %:** Dhir et al. (1989, p. 137), Ho e Lewis (1987, p. 491), Lopes (1999, p. 72), Meyer (1969, p. 397), Monteiro (1996, p. 43), Ohga e Nagataki (1989, p. 277), Ying-Yu e Qui-Dong (1987, p. 1919);
- b) entre 60 e 65%:** Balayssac (1995, p. 91), Cunha e Helene (2001, p. 7), Johannesson e Utgenannt (2001, p. 925), Kobayashi e Uno (1989, p. 823), Papadakis (2000, p. 293);
- c) entre 70 e 75%:** Abreu (2004, p. 47), Branca et al. (1993, p. 247), Jiang et al. (2000, p. 702), Kirchheim (2003, p. 83), Kulakowski (2002, p. 52), Seidler (1999, p. 48), Sanjuán e Olmo (2001, p. 950), Venquiaruto (2002, p. 57), Wolf e Dal Molin (1989, p. 124);
- d) maior ou igual a 80%:** Alves (2000, p. 72), Van Gerven et al. (2004, p. 150), Kazmierczak (1995, p. 55), Tuutti (182, p. 48).

Andrade (1988, p. 61), Fattuhi (1988, p. 47) e Nepomuceno (1992, p. 110) trabalharam com umidades relativas entre 50 e 70%. Coelho et al. (2002, p. 5) e Goñi e Guerrero (2003, p. 2) com valores entre 60 e 70%. E valores entre 50 e 80% foram empregados por Vaghetti (1999, p. 41). Nestes casos, a umidade relativa foi apenas registrada e não controlada.

Sarría (1997, p. 79) verificou que a umidade no interior de uma amostra sempre é maior que a umidade do seu entorno. Levando isso em consideração, tais fatores merecem atenção quando da realização de ensaios de carbonatação, através de um condicionamento adequado.

#### 3.4.1.3 Temperatura

Como no caso da umidade relativa, a temperatura também é normalmente controlada no ambiente em que a câmara de carbonatação está inserida, podendo ser diferente da temperatura no interior da mesma.

Como visto anteriormente, no item 3.3.1.3, temperaturas usuais (entre 20 e 40°C) exercem pouca influência nas reações de carbonatação. Todavia, a temperatura é importante no processo de corrosão de armaduras, finalidade última dos ensaios de carbonatação, sendo um fator que não pode ser desprezado.

Grande parte dos ensaios são conduzidos em temperaturas em torno de 20°C: Andrade (1988, p. 61), Balayssac et al. (1995, p. 91), Branca et al. (1993, p. 247), Dhir et al. (1989, p. 137), Goñi e Guerrero (2003, p. 2), John (1995, p. 103), Jiang et al. (2000, p. 702), Johannesson e Utgenannt (2001, p. 925), Kazmierczak (1995, p. 55), Lo e Lee (2002, p. 509), Meyer (1969, p. 397), Seidler (1999, p. 48), Ying-Yu e Qui-Dong (1987, p. 1919).

Outros autores trabalham com temperaturas um pouco maiores, entre 23 e 28°C: Abreu (2004, p. 47), Alves (2000, p. 57), Coelho et al. (2002, p. 5), Cunha e Helene (2001, p. 702), Ho e Lewis (1987, p. 491), Kirchheim (2003, p. 83), Kulakowski (2002, p. 52), Lopes (1999, p. 72), Monteiro (1996, p. 43), Papadakis (2000, p. 293), Venquiaruto (2002, p. 57).

Alguns poucos trabalhos são realizados em temperaturas maiores: a 37°C, Van Gerven et al. (2004, p. 150) e a 40°C, Ohga e Nagataki (1989, p. 277).

Fattuhi (1988, p. 427) e Vaggetti (1999, p. 41) realizaram os ensaios em temperaturas variando entre 20 e 26°C.

Novamente a falta de normalização faz com que as diversas pesquisas sejam conduzidas com valores distintos para uma mesma variável.

### 3.4.2 Quanto às Características das Amostras e dos Ensaios de Carbonatação

As características de forma e composição do material analisado devem ser levadas em conta quando se fazem comparações entre estudos. Da mesma forma, devem ser observados os procedimentos adotados com relação às amostras antes e durante o ensaio.

#### 3.4.2.1 Tipo e Forma de Amostra

Para os ensaios de carbonatação, geralmente são utilizados corpos-de-prova de argamassa ou concreto. Independente do tipo de material, as formas são as mais variadas:

**a) cubos de pasta:** Goñi e Guerrero (2003, p. 2) com arestas de 50mm;

**b) cubos de argamassa:** Gervais et al. (2004, p. 47) com arestas de 40mm;

- c) cubos de concreto:** Branca et al. (1993, p. 247) e Dhir et al. (1989, p. 137) com arestas de 100mm;
- d) prismas de argamassa:** Van Gerven et al. (2004, p. 150), John (1995, p. 103), Kulakowski (2002, p. 52), Meyer (1969, p. 397) e Seidler (1999, p. 48) utilizaram dimensões de 40x40x160mm; Kazmierczak (1995, p. 55) dimensões de 55x80x20mm e Monteiro (1996, p. 43) dimensões de 60x80x25mm, Ying-Yu e Qui-Dong (1987, p. 1919) dimensões de 80x40x160mm;
- e) prismas de concreto:** Roy et al. (1999, p. 598) utilizaram dimensões de 100x100x500mm, Kulakowski (2002, p. 52), Ohga e Nagataki (1989, p. 277) e Papadakis et al. (1991b, p. 369) dimensões de 100x100x300mm, Jiang et al. (2000, p. 702) dimensões de 100x100x200mm, Abreu (2004, p. 47) dimensões de 100x100x60mm, Kirchheim (2003, p. 83) dimensões de 60x60x180mm, Ho e Lewis (1987, p. 491) dimensões de 75x75x300mm, Fattuhi (1988, p. 427) dimensões de 50x50x285mm, Nepomuceno<sup>16</sup> (1992, p. 110) dimensões de 20x55x80mm e Cunha e Helene (2001, p. 7) dimensões de 279x152x114mm;
- f) cilindros de argamassa:** Bauer (1995, p. 124), Kobayashi e Uno (1989, p. 823), Wolf e Dal Molin (1989, p. 124) e Wolf (1991, p. 85) utilizaram cilindros com relação diâmetro x altura de 50x100mm, Papadakis (2000, p. 293) relação de 100x90mm e Johannesson e Utgenannt (2001, p. 925) fatias cilíndricas de 3mm de espessura;
- g) cilindros de concreto:** Coelho et al. (2002, p. 5), Lo e Lee (2002, p. 509) e Lopes (1999, p. 72) utilizaram cilindros com relação diâmetro x altura de 100x200mm, Isaia (1995, p. 42) e Vaghetti (1999, p. 41) relação de 100x100mm, Alves (2000, p. 57) e Venquiaruto (2002, p. 57) relação de 100x70mm, Sanjuán e Olmo (2001, p. 950) relação de 75x150mm e Balayssac (1995, p. 91) relação de 110x100mm.

---

<sup>16</sup> O pesquisador estudou materiais de reparo, classificados como concretos, mas que não possuíam agregados graúdos.

Diversos pesquisadores impermeabilizam parte dos corpos-de-prova para que o CO<sub>2</sub> penetre por apenas determinadas direções. Outros, desprezam as regiões em que o CO<sub>2</sub> penetra em duas direções perpendiculares.

Ao realizar comparações entre pesquisas, o tipo e a forma do material também devem ser levados em conta. Kulakowski (2002, p. 51) fez uma comparação entre a profundidade de carbonatação de amostras cilíndricas (diâmetro de 50mm e altura de 100mm) e prismáticas (com dimensões de 40x40x160mm) de argamassa, para um mesmo material e iguais condições de exposição. A pesquisadora constatou que o corpo-de-prova prismático apresentou uma profundidade de carbonatação média de 9,23mm, enquanto que para o corpo-de-prova cilíndrico, esse valor foi de 13,81mm, ou seja, cerca de 50% maior. A razão disso é atribuída à possível soma de vetores na difusão do CO<sub>2</sub> das amostras cilíndricas. No exemplo citado, as amostras não foram impermeabilizadas em nenhuma das faces e ambas foram rompidas transversalmente à face de menores dimensões.

As dimensões dos corpos-de-prova geralmente estão relacionadas com a quantidade de medidas a serem realizadas. O emprego de cubos é conveniente quando se pretende realizar a medição em uma ou duas idades específicas.

Com relação a diferentes materiais, Kulakowski (2002, p. 102), analisando concretos e argamassas (feitas a partir do proporcionamento dos concretos, através da retirada do agregado graúdo e sua água de absorção), constatou que as profundidades de carbonatação dos concretos foram inferiores às das argamassas, especialmente para a relação  $a/agl$  elevada (0,70). As pastas geralmente são utilizadas para alguma análise mais específica, como por exemplo, dos compostos da carbonatação, e para isso, convém minimizar a presença dos compostos dos agregados.

#### 3.4.2.2 Relação $a/c$

Embora os efeitos da relação  $a/c$  ou  $a/agl$  sejam, em geral, bastante conhecidos, cabe salientar que na comparação de diferentes trabalhos é necessário observar se está sendo usada a relação  $a/c$  ou  $a/agl$ .

A maioria dos trabalhos utiliza valores baixos, médios e altos para essas relações, ficando as mesmas entre 0,35 e 1,00. As relações adotadas pelos diversos pesquisadores são descritas adiante, nas tabelas 3.1 e 3.2.

### 3.4.2.3 Condições e Tempo de Cura

Como visto anteriormente, no item 3.3.2.3, as condições e o tempo de cura exercem influência sobre a carbonatação. Alguns estudos (BALAYSSAC, 1995, p. 91; FATTUHI, 1988, p. 427; GOÑI; GUERRERO, 2003, p. 5; HO; LEWIS, 1987, p. 491; LO; LEE, 2002, p. 509; LOPES, 1999, p. 72; MONTEIRO, 1996, p. 43; NEPOMUCENO, 1992, p. 110; OHGA; NAGATAKI, 1989, p. 277) enfatizam esses efeitos.

Quando o tipo e o tempo de cura não variam, geralmente são adotadas curas por 7 e 28 dias em câmara úmida ou cura submersa. Entretanto, há variações pela falta de padronização:

**a) cura úmida ou submersa por 7 dias:** esses tipos de cura foram empregados por Alves (2000, p. 57), Branca et al. (1993, p. 247), Isaia (1995, p. 42), Kazmierczak (1995, p. 55), Meyer (1969, p. 397), Roy et al. (1999, p. 598), Tuutti (1982, p. 48), Vaghetti (1999, p. 41), Venquiaruto (2002, p. 57), Wolf e Dal Molin (1989, p. 124);

**b) cura úmida ou submersa por 28 dias:** esses tipos de cura foram empregados por Abreu (2004, p. 47), Andrade (1988, p. 61), Coelho et al. (2002, p. 2), Dhir et al. (1989, p. 137), Van Gerven et al. (2004, p. 150), Kirchheim (2003, p. 83), Kobayashi e Uno (1989, p. 823), Sanjuán e Olmo (2001, p. 950), Seidler (1999, p. 48), Wolf (1991, p. 85).

Períodos de cura mais longos foram realizados por Bauer (1995, p. 124) (63 dias), Papadakis et al. (1991b, p. 369) (90 dias) e Papadakis (2000, p. 293) (365 dias).

Condições de cura distintas foram adotadas por alguns pesquisadores: Kulakowski (2002, p. 52) realizou a cura em câmara úmida por 14 dias, no entanto, as amostras foram embaladas em duas camadas de filme de PVC e mais duas camadas de sacos de polietileno, para que a cura fosse realizada somente com a água de amassamento; e Ying-Yu e Qui-Dong (1987, p. 1919) deixaram suas amostras em cura úmida por 2 dias. Em seguida foram postas ao vapor por 3h, aumentando a temperatura até 80°C, então foram mantidas nessas condições por 14h e durante as 5h seguintes, num processo para diminuição da temperatura.

Os resultados de pesquisas distintas não devem ser comparados indiferentemente do tipo e tempo de cura, uma vez que essas condições irão modificar a estrutura do material, e em consequência, a carbonatação.

#### 3.4.2.4 Sazonamento

O sazonalamento constitui a etapa entre a cura das amostras e o início do ensaio de carbonatação propriamente dito, quando os corpos-de-prova são submetidos à ação do CO<sub>2</sub>. É nesta etapa do ensaio que as amostras utilizadas desenvolvem algumas das propriedades que irão influenciar nos resultados que serão alcançados. Contudo, alguns trabalhos não realizam esta etapa (FATTUHI, 1988, p. 427; GERVAIS et al., 2004, p. 121; VAN GERVEN et al., 2004, p. 150; GOÑI; GUERRERO, 2002, p. 2; JIANG et al., 2000, p. 293; OHGA; NAGATAKI, 1989, p. 277; ROY et al., 1999, p. 598), passando suas amostras da cura, diretamente para a carbonatação. Alguns outros trabalhos (ANDRADE, 1988, p. 61; BRANCA et al., 1993, p. 247; HAMADA, 1969, P. 346; JOHN, 1995, p. 103; KOBAYASHI; UNO, 1989, p. 823; LO; LEE, 2002, p. 509; SANJUÁN; OLMO, 2001, p. 950) não realizaram e/ou descreveram tais procedimentos.

Um dos métodos mais adotados consiste em deixar as amostras, por alguns dias, em ambiente de laboratório (com umidade relativa e temperatura, conforme a região, geralmente não controladas), depois da cura e antes da carbonatação, com o intuito de equilibrar a umidade interna, por diferentes períodos de tempo, como por exemplo:

- a) por 14 dias:** Dhir et al. (1989, p. 137);
- b) por 15 dias:** Cunha e Helene (2001, p. 7), Monteiro (1996, p. 43)
- c) por 21 dias:** Alves (2000, p. 57), Ho e Lewis (1987, p. 491), Isaia (1995, p. 42), Vagheti (1999, p. 41);
- d) por 28 dias:** Papadakis (2000, p. 293);
- e) por 35 dias:** Coelho et al. (2002, p. 5);
- f) por 70 dias:** Nepomuceno (1992, p. 110);
- g) por 84 dias:** Vagheti (1999, p. 41);

**h) por 6 meses:** Tuutti (1982, p. 48).

Após a cura de 7 e 28 dias, Lopes (1999, p. 72) deixou suas amostras em laboratório até 50 dias e então colocou-as em estufa a 100°C por 24h.

Alguns pesquisadores utilizam câmaras de sazonalidade, onde o CO<sub>2</sub> do ar é retirado através de uma solução de hidróxido de potássio. Seidler (1999, p. 48) fez uso da câmara de sazonalidade por 7 dias, Kulakowski (2002, p. 52) até constância de massa (diferença de 0,01% em leituras com intervalo de 24h) por cerca de 14 dias (quando atingiram 28 dias), Abreu (2004, p. 47) por 22 dias, Kazmierczak (1995, p. 55) por 63 e 143 dias, Kirchheim (2003, p. 83) até constância de massa (quando foram embalados e ficaram na sala climatizada até completarem 31 dias).

Outra forma de retirar parte da umidade dos corpos-de-prova antes do ensaio de carbonatação pode ser através da secagem em estufa. Ying-Yu e Qui-Dong (1987, p. 1919) utilizaram estufa à vácuo a 60°C por 24h, Bauer (1995, p. 124) a 50°C por 14 dias e depois em câmara de estabilização (recipiente com tampa que marca UR) de UR entre 65 e 70% até constância de massa (diferença de 0,05% em leituras consecutivas com intervalo de 24h), Papadakis et al. (1991b, p. 369) também realizaram secagem em estufa, mas não especificaram a temperatura e o tempo.

Venquiaruto (2002, p. 57) contempla parcialmente os procedimentos da RILEM (1999) sob a designação TC 116-PCD (que são descritos no item 4.4.1.1.2). Após a cura úmida por 7 dias a autora deixou as amostras em laboratório por 5 semanas e depois realizou a secagem em estufa. No procedimento recomendado pela RILEM deve ser feita uma moldagem prévia para determinação dos parâmetros a serem calculados e após a cura as amostras, as mesmas iniciam o processo de secagem em estufa.

O emprego de diferentes formas de sazonalidade pode resultar em profundidades de carbonatação diversas para um mesmo material. Esta etapa é um ponto crítico e não deve ser ignorada (BAUER, 1955, p. 120; DHIR et al., 1989, p. 137; NEPOMUCENO, 1992, p. 306; PAPADAKIS, 2000, p. 72, entre outros).

#### 3.4.2.5 Tempo de Exposição

A duração dos ensaios de carbonatação depende muito do tipo de material que está sendo estudado e das demais condições do ensaio. Mesmo que os diversos pesquisadores (ISAIA, 1995; KULAKOWSKI, 2002; PAPADAKIS et al., 1991b, entre outros) não tenham feito as leituras de carbonatação nas mesmas idades, através de equações é possível relacionar diferentes tempos de ensaio.

Nos trabalhos relatados nas tabelas 3.1 e 3.2, o tempo decorrido para a primeira medição varia de horas (quando o material e as condições de ensaios são bastante favoráveis à carbonatação) até cerca de 28 dias. Mesmo em ensaios acelerados, alguns trabalhos realizam apenas uma medida da carbonatação, geralmente após alguns meses.

#### 3.4.3 Resumo das variáveis adotadas em diversas pesquisas

As pesquisas citadas indicam a falta de normalização para os ensaios acelerados de carbonatação. Mesmo que as condições ambientais e os procedimentos sejam constantes durante as pesquisas, há muita diversidade nas variáveis independentes. As tabelas 3.1 e 3.2 sintetizam os experimentos desenvolvidos pelos autores anteriormente citados.

Analisando as tabelas 3.1 e 3.2, é possível notar que há algumas lacunas e grande diversidade nas variáveis estudadas, nos trabalhos investigados. As pesquisas seguem caminhos diferentes, havendo a necessidade de uma padronização para estes ensaios no intuito de poder enriquecer as pesquisas, podendo compará-las entre si.

Tabela 3.1: Características dos estudos de carbonatação em concretos realizados por diversos pesquisadores

<b>Pesquisador</b>	<b>Ano</b>	<b>Amostras forma/dim (mm)</b>	<b>a/agl</b>	<b>Tipo cura Tempo cura (dias)</b>	<b>Sazonamento Tempo/local</b>	<b>UR (%)</b>	<b>T (°C)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (%)</b>	<b>Tempo de exposição (dias)</b>
Tuutti	1982	-	0,40 e 0,70	submersa 7	6 meses laboratório	80	-	1	90
Ho e Lewis	1987	prismas 75x75x300	-	úmida 1, 7, 28, 91 e 365	21 dias laboratório	50	23	4	7, 28, 63 e 112
Fattuhi	1988	prismas 50x50x285	-	submersa/ao ar 28	nota <sup>17</sup>	entre 50 e 70	entre 20 e 26	100	-
Dhir et al.	1989	cubos 100	-	úmida/ao ar 28	14 dias laboratório	50	20	4	140
Ohga e Nagataki	1989	prismas 100x100x300	-	submersa 7, 28 e 91	nota <sup>17</sup>	50	40	7	a cada 7 dias
Papadakis et al.	1991b	prismas 100x100x300	0,50 a 0,80	úmida 90	- estufa	-	-	50	1, 3, 5, 10, 15 e 20
Branca et al.	1993	cubos 100	0,35 a 0,65	úmida 7	-	75	20	30	-
Nepomuceno <sup>18</sup>	1992	prismas 20x55x80	-	úmida/ao ar 1, 7 e 28	70 dias laboratório	entre 50 e 70	20	100	variável
Isaia	1995	cilindros 100x100	0,30 a 0,50	úmida 7	28 dias laboratório	-	-	10	28, 56, 84 e 112
Balayssac et al.	1995	cilindros 110x100	-	submersa/ao ar 1, 3 e 28	-	60	20	0,03	-
Roy et al.	1999	prismas 100x100x500	0,55 a 0,75	submersa 7	Nota <sup>17</sup>	52, 64, 75, 84 e 92		6	7, 28, 56 e 112

<sup>17</sup> A etapa de sazonalimento não foi realizada. Depois da cura, as amostras seguiram direto para o ensaio de carbonatação.

<sup>18</sup> O autor utilizou concretos de reparo e as relações a/agl foram as recomendadas pelos fabricantes.

<b>Pesquisador</b>	<b>Ano</b>	<b>Amostras forma/dim (mm)</b>	<b>a/agl</b>	<b>Tipo cura Tempo cura (dias)</b>	<b>Sazonamento Tempo/local</b>	<b>UR (%)</b>	<b>T (°C)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (%)</b>	<b>Tempo de exposição (dias)</b>
Vagheti	1999	cilindros 100x100	0,35 a 0,55	úmida 7	21 e 84 laboratório	entre 50 e 80	23	10	28, 56, 84 e 112
Lopes	1999	cilindros 100x200	0,38 a 0,48	úmida 7 e 28	22 e 43 laboratório	55	27	100	7, 14, 21, 28 e 35
Alves	2000	cilindro 100x70	0,35 a 0,65	úmida 7	21 dias laboratório	80	24	5	28, 56 e 84
Jiang et al.	2000	prismas 100x100x200	-	-	Nota <sup>17</sup>	70	20	20	-
Cunha e Helene	2001	prismas 279x152x114	0,35 a 0,65	úmida 28	15 dias laboratório	65	23,5	100	2h/2h (a/c=0,35) 4h/4h (a/c=0,65)
Sanjuán e Olmo	2001	cilindros 75x150	-	submersa 28	-	70	-	5, 20 e 100	-
Venquiaruto	2002	cilindros 100x70	0,35 a 0,65	úmida 7	35 dias laboratório/ estufa RILEM	75	23	5	28, 56 e 84
Kulakowski	2002	prismas 100x100x300	0,30 a 0,80	úmida amostras embaladas 14	14 dias câmara sazón. <sup>19</sup>	70	25	5	35, 56, 91 e 126
Lo e Lee	2002	cilindros 100x200	0,38 a 0,54	submersa/ao ar 28	-	-	21	2	30, 60 e 90
Coelho et al.	2002	cilindros 100x200	-	úmida 28	35 dias laboratório	entre 60 e 70	26	100	77 e 91
Kirchheim	2003	prismas 60x60x180	0,40 a 0,60	úmida 28	até constância câmara sazón. <sup>19</sup>	70	25	100	
Abreu	2004	prismas 100x100x60	0,44 a 0,65	úmida 28	32 dias câmara sazón. <sup>19</sup>	70	25	5 e <50	63 e 195

<sup>19</sup> Câmara de sazónamento isenta de CO<sub>2</sub>.

Tabela 3.2: Características dos estudos de carbonatação em argamassas realizados por diversos pesquisadores

Pesquisador	Ano	Amostras forma/dim (mm)	a/agl	Tipo cura Tempo cura (dias)	Sazonamento Tempo/local	UR (%)	T (°C)	CO <sub>2</sub> (%)	Tempo de exposição (dias)
Meyer	1969	prismas 40x40x160	0,40 a 0,80	submersa 7	-	50	18	-	-
Ying-Yu e Qui-Dong	1987	prismas 80x40x160	-	submersa 2 dias e ao vapor por 22h	24 horas estufa a 60°C	52	20	20	-
Andrade	1988	-	0,50	úmida 28	-	entre 50 e 70	20	100	-
Wolf e Dal Molin	1989	cilindros 50x100	-	submersa 7	-	30, 50, 70 e 90	-	-	-
Kobayashi e Uno	1989	cilindros 50x100	0,40 a 0,60	úmida 28	-	60	20	10	-
Wolf	1991	cilindros 50x100	0,28 a 0,58	úmida 28	Nota <sup>17</sup>	-	-	-	28, 63, 91, 150 e 180
Kazmierczak	1995	prismas 55x80x20	-	submersa 7	câmara saz. <sup>19</sup>	-	-	100	-
John	1995	prismas 40x40x160	-	-	-	-	21,5	5	-
Bauer	1995	cilindros 50x100	0,30 a 0,70	úmida 63	15 dias estufa a 50°C, depois lab. cte massa	entre 65 e 70	-	50	inicial 2 dias, depois variável
Monteiro	1996	prismas 60x80x25	0,40 a 0,70	úmida 7 e 28	15 dias laboratório	entre 50 e 70	24	100	variável
Seidler	1999	prismas 40x40x160	0,40 a 0,70	úmida 28	7 dias câmara saz. <sup>19</sup>	68	21	5	56, 91 e 126
Papadakis	2000	cilindros 100x90	-	submersa 365	28 laboratório	61	25	3	100
Johannesson e Utgenannt	2001	cilindros φx3	-	-	-	65	20	1	120

<b>Pesquisador</b>	<b>Ano</b>	<b>Amostras forma/dim (mm)</b>	<b>a/agl</b>	<b>Tipo cura Tempo cura (dias)</b>	<b>Sazonamento Tempo/local</b>	<b>UR (%)</b>	<b>T (°C)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (%)</b>	<b>Tempo de exposição (dias)</b>
Kulakowski	2002	prismas 40x40x160	0,30 a 0,80	úmida amostras embaladas 14	14 dias câmara sazón. <sup>19</sup>	70	25	5	35, 56, 91 e 126
Van Gerven et al.	2004	cubos 40	-	úmida 28	Nota <sup>17</sup>	>90	37	5 e 20	72 e 360 horas
Gervais et al.	2004	cubos 40	-	-	-	23, 48 e 98	-	100	-

<sup>17</sup> A etapa de sazónamento não foi realizada. Depois da cura, as amostras seguiram direto para o ensaio de carbonatação.

<sup>19</sup> Câmara de sazónamento isenta de CO<sub>2</sub>.

## 4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental contempla ensaios em laboratório, os quais visam a determinação da influência de diversos fatores na carbonatação de corpos-de-prova de argamassa, utilizando-se ensaios acelerados.

Embora o alvo do estudo da durabilidade seja o concreto, a determinação da carbonatação em argamassas é mais definida. Neville (1997, p. 496) coloca que devido à presença de agregado graúdo em concretos, a frente de carbonatação não avança como uma linha reta perfeita. Kazmierczak (1995, p. 57) salienta que a existência de agregado graúdo em corpos-de-prova dificulta o acompanhamento visual da frente de carbonatação por meio de aspersão de indicadores químicos de pH. O agregado graúdo pode induzir a uma maior dispersão dos resultados, dependendo do critério a ser adotado pelo operador que realiza a leitura da profundidade de carbonatação. Além disso, as dimensões dos corpos-de-prova de argamassa podem ser menores (KULAKOWSKI, 2002, p. 102, MONTEIRO, 1996, p. 48).

Como o presente trabalho tem por objetivo principal a comparação de diferentes sazónamentos na profundidade de carbonatação, optou-se por utilizar argamassas ao invés de concretos, visando minimizar a influência do agregado graúdo na determinação da frente de carbonatação e permitindo a colocação de um elevado número de exemplares no espaço disponível nas câmaras de carbonatação. Dessa forma, acredita-se que as possíveis variações provenientes dos métodos empregados possam ser percebidas com maior facilidade. Outros trabalhos (ANDRADE et al., 1988; GERVAIS et al., 2004; KULAKOWSKI, 2002; MONTEIRO, 1996; PAPADAKIS, 2000; SEIDLER, 1999, entre outros) também utilizaram corpos-de-prova de argamassa.

Kulakowski (2002, p. 102) apresenta uma comparação entre a profundidade de carbonatação de concretos e argamassas e mostra que a mesma é maior para as argamassas. Ao fazer uso de corpos-de-prova de argamassa, os resultados obtidos ficam a favor da segurança.

A seguir são apresentados o planejamento, os materiais e métodos utilizados no desenvolvimento deste programa experimental.

## 4.1 PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO

As variáveis independentes, as variáveis de resposta e a organização das atividades contempladas nesse estudo são detalhadas na seqüência.

### 4.1.1 Variáveis Independentes

Tendo em vista a necessidade de limitar os fatores que envolvem os ensaios de carbonatação, alguns destes (tipo de cura, umidade relativa, temperatura, entre outros) foram mantidos constantes durante os ensaios. Os níveis e uma breve justificativa da escolha das variáveis independentes são apresentados a seguir:

- a) tipos de cimento: foram utilizados dois cimentos, sendo que um deles foi composto por substituição de 40% do cimento base por cinza volante, em massa. A escolha do cimento base foi em virtude do seu baixo teor de adições ( $\leq 5\%$ ). Assim, os cimentos empregados foram:
  - CPI-S-32 (cimento base);
  - 60% de CPI-S-32 + 40% de cinza volante (CPIV<sup>20</sup>).
- b) relações água/cimento: foram contempladas três relações a/c (baixa, média e alta) comumente usadas em proporcionamentos de concretos convencionais, sendo elas:
  - 0,40;
  - 0,55;
  - 0,70.
- c) idades de cura: foram escolhidas duas idades de cura submersa bastante empregadas em ensaios de laboratório, sendo elas:
  - 7 dias;
  - 28 dias.

---

<sup>20</sup> A substituição de 40% do cimento CPI-S-32 por cinza volante compõe um cimento equivalente ao CPIV, e é desta forma que esta mistura é chamada no presente trabalho. Apesar do cimento ser um aglomerante, a expressão “relação a/agl” é comumente empregada quando se utilizam adições minerais e/ou proporções não contempladas nas normas de cimento. Como o cimento que foi misturado (CPIV) atende aos requisitos de norma, faz-se uso da expressão “relação a/c”, aos invés de “relação a/agl”.

- d) tipos de secagem: foram realizados dois tipos de secagem no intuito de comparar distintas metodologias, sendo eles:
- em estufa (a  $50\pm 1^\circ\text{C}$ ), conforme RILEM (1999) no TC 116-PCD;
  - em ambiente com temperatura e umidade controladas (temperatura de  $20\pm 1^\circ\text{C}$  e umidade relativa de  $70\pm 5\%$ ).
- e) tempos de secagem: foram estudados dois tempos de secagem a fim de verificar sua influência nos resultados de carbonatação, sendo eles:
- até todos proporcionamentos de materiais atingirem a umidade especificada (todos juntos, ou seja, igual idade) + mínimo de 2 semanas em embalagens seladas (para equilíbrio interno da umidade);
  - até cada proporcionamento atingir a umidade especificada (por traço, idades diferentes) + mínimo de 2 semanas em embalagens seladas (para equilíbrio interno da umidade).
- f) percentuais de  $\text{CO}_2$ : foram empregados dois percentuais de  $\text{CO}_2$ , contemplando extremos de concentração, em função das câmaras disponíveis, sendo eles:
- 6%;
  - câmara saturada de  $\text{CO}_2$ .

#### 4.1.2 Variáveis de Resposta

Como variáveis de resposta tem-se a profundidade de carbonatação, tema central deste trabalho, e a resistência à compressão axial, utilizada como parâmetro de controle de execução das argamassas, sendo que seus níveis estão assim divididos:

- a) profundidades de carbonatação: a medição foi prevista para doze idades de ensaio acelerado, possibilitando a escolha daquela que apresente maior quantidade de dados para a análise dos fatores que influenciam a carbonatação, sendo elas:
- aos 2 dias;
  - aos 7 dias;
  - aos 14 dias;
  - aos 21 dias;
  - aos 28 dias;
  - aos 42 dias;

- aos 63 dias;
- aos 91 dias;
- aos 119 dias;
- aos 168 dias;
- aos 252 dias;
- aos 365 dias.

b) resistência à compressão axial: optou-se por ter um controle da resistência à compressão em idades distintas, sendo elas:

- aos 7 dias;
- aos 28 dias;
- aos 63 dias.

#### 4.1.3 Organização das Atividades

Para cada combinação de variáveis foram utilizadas 2 repetições, contabilizando 3 corpos-de-prova. Como a quantidade de variáveis envolvidas é relativamente grande e a capacidade das câmaras de carbonatação limitada, o experimento foi dividido em 4 blocos. Para cada etapa foram moldadas amostras para o ensaio de resistência à compressão, utilizado como parâmetro de controle de execução das argamassas. Assim, a quantidade de corpos-de-prova foi a seguinte:

- a) para carbonatação: 2 cimentos x 3 relações a/c x 2 curas x 2 tipos de sazonalidade x 2 tempos de sazonalidade x 3 repetições x 2 % CO<sub>2</sub> = 288 corpos-de-prova prismáticos (40x40x160mm). Como são 12 idades de carbonatação e de cada corpo-de-prova são feitas 4 medições, este número deve ser multiplicado por 3, totalizando 864 amostras prismáticas;
- b) para resistência à compressão axial: 2 cimentos x 3 a/c x 3 idades de ruptura x 3 repetições x 4 blocos = 216 corpos-de-prova cilíndricos (100x200mm).

A programação experimental seguiu as etapas da figura 4.1.

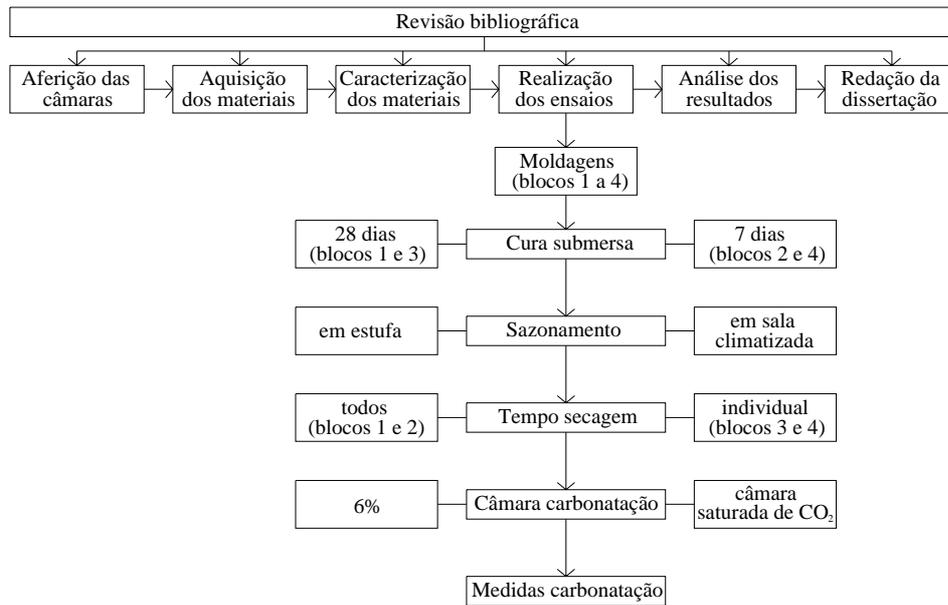


Figura 4.1: Etapas do programa experimental

## 4.2 MATERIAIS

Os materiais utilizados para a mistura das argamassas são provenientes do Estado do Rio Grande do Sul e suas características são apresentadas na seqüência.

### 4.2.1 Cimento

O cimento utilizado é o CPI-S-32 (cimento Portland comum com adição). A escolha desse tipo de cimento se deve ao fato de ser um dos cimentos Portland que apresenta menor teor de adições. Além disso, pretende-se controlar a quantidade de cinza volante a ser adicionada, compondo, assim, um segundo tipo de cimento, semelhante ao CPIV (cimento Portland pozolânico). Esse segundo cimento tem 40% de substituição, em massa, do CPI-S por cinza volante, misturados em laboratório, quando da confecção das argamassas. Decidiu-se que o cimento com substituição por cinza volante seria chamado de CPIV. Não foi usado CPIV comercial devido à grande variação sazonal em sua composição, que vem sendo constatada em estudos realizados pelo grupo de pesquisadores do NORIE (Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação).

Embora a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (1991), através da NBR 5736, permita que o cimento Portland pozolânico seja composto por até 50% de material pozolânico, optou-se por um percentual menor, em função da prescrição da American Society for Testing and Materials (ASTM) (1998) na designação C 150, que limita essa quantidade em 40%. Dessa maneira, o cimento atende às especificações de ambas as normas.

A caracterização física e mecânica dos cimentos utilizados foi realizada no Laboratório de Materiais de Construção (LMC) da UNISINOS, conforme as especificações das normas que constam na tabela 4.1. A granulometria dos cimentos foi determinada em granulômetro laser<sup>21</sup> pelo Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER) da UFRGS. A tabela 4.2 apresenta os resultados dessas caracterizações.

Tabela 4.1: Normas adotadas para a caracterização física e mecânica dos cimentos empregados

Ensaio	Referência	Norma
Massa específica	ABNT (2001)	NBR NM 23
Área específica - Blaine	ABNT (1998)	NBR NM 76
Água de consistência da pasta normal	ABNT (1991) <sup>22</sup>	NBR 11580
Tempo de pega	ABNT (1991) <sup>22</sup>	NBR 11581
Resistência à compressão	ABNT (1996)	NBR 7215

Tabela 4.2: Resultados da caracterização física e mecânica dos cimentos CPI-S e CPIV

Característica		CPI-S	CPIV
Granulometria laser – diâmetro médio ( $\mu\text{m}$ )		19,77	14,04
Massa específica ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )		3,11	2,75
Área específica – Blaine ( $\text{m}^3/\text{kg}$ )		388	450
Água de consistência da pasta normal (g)		136	160
Tempo de pega (min)	inicial	170	200
	final	260	300
Resistência à compressão (MPa)	3 dias	24,7	17,4
	7 dias	28,7	23,8
	28 dias	36,7	34,7
	63 dias	39,3	*

\* A prensa apresentou problemas e a ruptura não pode ser feita.

<sup>21</sup> Os resultados das granulometrias laser correspondem a média de 3 leituras. O dispersante utilizado foi água.

<sup>22</sup> As normas dos ensaios de água de consistência da pasta normal e tempo de pega, atualmente em vigor são a ABNT (2003), NBR NM 43 e NBR NM 65, respectivamente. Essas novas normas trazem alterações, no entanto, esses ensaios foram realizados antes de sua publicação.

A composição química dos cimentos CPI-S e CPIV foi realizada pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) e é apresentada na tabela 4.3.

Tabela 4.3: Composição química dos cimentos utilizados na pesquisa

Característica química	CPI-S (%)	CPIV (%)
SiO <sub>2</sub>	18,74	29,04
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,31	11,37
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,79	3,21
MgO	4,03	3,87
CaO	61,15	41,42
Na <sub>2</sub> O	0,07	0,08
K <sub>2</sub> O	0,78	0,85
SO <sub>3</sub>	3,11	2,69
Cal livre	1,94	1,17
Perda ao fogo	4,37	3,91
Resíduo insolúvel	0,55	27,33
Equivalente alcalino	0,58	0,64

Os resultados das tabelas 4.2 e 4.3 atendem aos requisitos das normas ABNT (1991) – NBR 5732 e 5736, que especificam os cimentos CPI-S e CPIV, respectivamente.

#### 4.2.2 Agregado Miúdo

O agregado miúdo empregado é uma areia de quartzo, selecionada entre um grupo de areias comercializadas no município de Sapucaia do Sul (RS), a partir da distribuição granulométrica mais contínua. É proveniente do Rio Jacuí - PK 51, tendo às margens do rio por um lado o município de São Jerônimo e por outro o município de Triunfo.

A areia foi caracterizada quanto a suas propriedades físicas conforme as normas detalhadas na tabela 4.4. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção (LMC) da UNISINOS. Os resultados da caracterização são apresentados na tabela 4.5.

Tabela 4.4: Normas adotadas para a caracterização física do agregado miúdo

Ensaio	Referência	Norma
Massa unitária	AMN <sup>23</sup> (1996)	NM 45
Massa específica	ABNT (1987) <sup>24</sup>	NBR 9776
Granulometria	ABNT (2003)	NBR NM 248

Tabela 4.5: Resultados da caracterização física do agregado miúdo

Abertura da peneira (mm)	Média retida (%)	Média acumulada (%)
4,8	0	0
2,4	5	5
1,2	15	20
0,6	37	57
0,3	34	91
0,15	8	99
<0,15	1	100
Diâmetro máximo (mm)	2,40	
Módulo de finura	2,72	
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,63	
Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )	1,61	

Os resultados da caracterização do agregado miúdo mostram que o mesmo enquadra-se dentro da zona 3, especificada na ABNT (2003) – NBR NM 248, que classifica a areia como média.

#### 4.2.3 Cinza Volante

Como mencionado anteriormente, no item 4.2.1, fez-se uso de cinza volante para a composição de um segundo tipo de cimento, o CPIV. A cinza volante empregada é a mesma que serve de matéria-prima às cimenteiras, e no caso desta, proveniente de Charqueadas (RS).

Antes de ser adicionada ao cimento, a cinza volante foi moída em moinho de bolas (em jarros com capacidade de 7,5 litros e um gira moinho trabalhando a 30 rpm), até atingir um diâmetro médio de 10µm. A tabela 4.6 apresenta os resultados da granulometria laser realizada antes da moagem e após diversos tempos de moagem.

<sup>23</sup> ASOCIACIÓN MERCOSUR DE NORMALIZACIÓN (AMN).

<sup>24</sup> Os ensaios foram realizados de acordo com a ABNT (1987), NBR 9776. A norma em vigor é a AMN (2002) – NM 52, que substitui a ABNT (1987), NBR 9776.

Tabela 4.6: Diâmetros médios da cinza volante em função do tempo de moagem

Tempo de moagem (h)	Diâmetro médio ( $\mu\text{m}$ )
Sem moagem	36,78
2	27,69
4	19,56
6	17,35
8	11,51
10	10,72
12	10,99

Os resultados da tabela 4.6 mostram que o diâmetro médio desejado só foi alcançado com tempo de moagem igual ou superior a 10 horas, sendo adotado, então, tempo de 10 horas para a moagem da cinza volante.

A massa específica da cinza foi determinada conforme a ABNT (2001) - NBR NM 23 e a área específica (Blaine) pelo especificado pela ABNT (1998) – NBR NM 76. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção (LMC) da UNISINOS e os resultados são apresentados na tabela 4.7.

Tabela 4.7: Caracterização física da cinza volante

Cinza volante	
Massa específica ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	2,36
Área específica - Blaine ( $\text{m}^2/\text{kg}$ )	545

#### 4.2.4 Água

A água utilizada para confecção das argamassas é proveniente da rede pública de abastecimento.

### 4.3 PROPORCIONAMENTO E PROCEDIMENTO DE MISTURA DAS ARGAMASSAS

Como base para o proporcionamento das argamassas foi fixada a quantidade de água ( $H$ ) a ser utilizada nas misturas, pela Lei de Lyse, apresentada na equação 4.1:

$$H = \frac{a/c}{1+m} \quad (\text{equação 4.1})$$

Onde:

H = quantidade de água (%);

a/c = relação água/cimento;

1 + m = massa de materiais secos, sendo o “1” correspondente ao cimento e “m”, a massa de areia + pedra, no caso, só areia (g).

Antes de estabelecer o percentual “H” a ser adotado, foram realizadas algumas misturas para testar a trabalhabilidade das argamassas. Além disso, o tipo de adensamento também foi um fator decisivo para a escolha do “H” mais adequado. Esses cuidados foram tomados para evitar que as amostras possuísem falhas de moldagem que fossem prejudicar os resultados de carbonatação. Depois de alguns testes, a quantidade de água foi fixada em 13,5% e os proporcionamentos de materiais calculados pela lei de Lyse, resultando nos dados da tabela 4.8.

Tabela 4.8: Proporcionamento de materiais, em massa, para confecção das argamassas

cimento	Areia	relação a/c
1	1,96	0,40
1	3,07	0,55
1	4,19	0,70

A quantidade de materiais para cada moldagem é apresentada na tabela 4.9, sendo que a mesma foi repetida para cada um dos 4 blocos de ensaios.

Tabela 4.9: Quantidade de materiais para cada moldagem

a/c	CPI-S (g)	Cinza volante (g)	Areia (g)	Água (g)
0,40	18840	0	36276	7392
0,40	11088	7392	36276	7392
0,55	13440	0	41316	7392
0,55	8064	5376	41316	7392
0,70	10560	0	44196	7392
0,70	6336	4224	44196	7392

A mistura das argamassas foi realizada em argamassadeira de eixo horizontal com capacidade para 80 litros e motor de 3cv (mais informações no apêndice H).

A seqüência de mistura foi testada em ensaios preliminares, de modo que a argamassa pronta ficasse homogênea e a quantidade de materiais aderidos às pás da argamassadeira fosse a menor possível. Ao final dos testes, a ordem estabelecida foi a seguinte:

- a) colocação da areia + 50% da água na argamassadeira;
- b) mistura para homogeneização, e adição do cimento com a argamassadeira em movimento;
- c) colocação da água restante, com a argamassadeira em movimento;
- d) após o término da adição de água, mistura por mais 3 minutos.

Concluída a mistura, o material foi colocado nos moldes e adensado conforme os procedimentos de cada ensaio.

## 4.4 MÉTODOS

Os métodos de cada ensaio realizado são especificados nos itens 4.4.1 e 4.4.2, apresentados na seqüência.

### 4.4.1 Carbonatação Acelerada

Para os ensaios de carbonatação foram utilizadas corpos-de-prova prismáticos com dimensões de 40x40x160mm. Cada molde metálico comporta um conjunto de 3 corpos-de-prova, e o desmoldante utilizado foi um óleo mineral automotor. Após a mistura, os moldes foram preenchidos em duas camadas e adensados em mesa vibratória, com tempos de vibração fixados previamente. Cada camada foi vibrada por dois períodos de oito segundos, sendo que entre eles houve um período de repouso de dez segundos, para que as bolhas de ar do material pudessem chegar à superfície. A mesa vibratória empregada possui área de 3.364cm<sup>2</sup>, motor de 3/4cv e 3500rpm.

Ao término do adensamento a superfície das amostras foi regularizada com uma desempenadeira de aço, retirando-se o material excedente. Em seguida, as amostras foram levadas à sala de cura úmida ( $UR \geq 95\%$  e temperatura de  $23 \pm 2^\circ\text{C}$ ), com as superfícies protegidas por placas para evitar que as gotas de condensação as danificassem, e lá permaneceram por cerca de 24 horas, sendo então desmoldadas.

Depois que as amostras foram retiradas dos moldes, voltaram para a sala de cura, sendo postas em tanques com água<sup>25</sup> saturada de cal, onde ficaram pelo período de cura especificado, ou seja, 7 dias (blocos 2 e 4) ou 28 dias (blocos 1 e 3).

#### 4.4.1.1 Sazonamento

Após a cura, os corpos-de-prova seguiram para a etapa de sazonalização, realizada segundo dois procedimentos distintos: metade dos corpos-de-prova foi sazonalizada pelos procedimentos utilizados no NORIE (Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação) e a outra metade, pelos recomendados pela RILEM (1999) no TC-116-PCD.

##### 4.4.1.1.1 Sazonamento Utilizado no NORIE

Diversos trabalhos (ABREU, 2004; KIRCHHEIM, 2003; KULAKOWSKI, 2002; SEIDLER, 1999) realizados no NORIE utilizam uma câmara específica para a etapa de sazonalização. A câmara de sazonalização consiste numa caixa de chapas compensadas com tampa. Depois de colocadas as amostras em seu interior, a mesma é fechada e através de canalizações ligadas à uma bomba de vácuo, força-se a circulação do ar em seu interior. Nessa circulação, o ar passa por uma solução do hidróxido de potássio (KOH), onde o  $\text{CO}_2$  contido no ar é retido. Cada pesquisador especifica o tempo e a frequência de circulação do ar, bem como o critério a ser adotado quanto à permanência das amostras nessa câmara. A figura 4.2 ilustra a câmara de sazonalização.

---

<sup>25</sup> Decidiu-se adotar a cura submersa pelo fato de que assim os ensaios realizados podem ser repetidos em qualquer laboratório, sem a necessidade de uma sala de cura úmida.

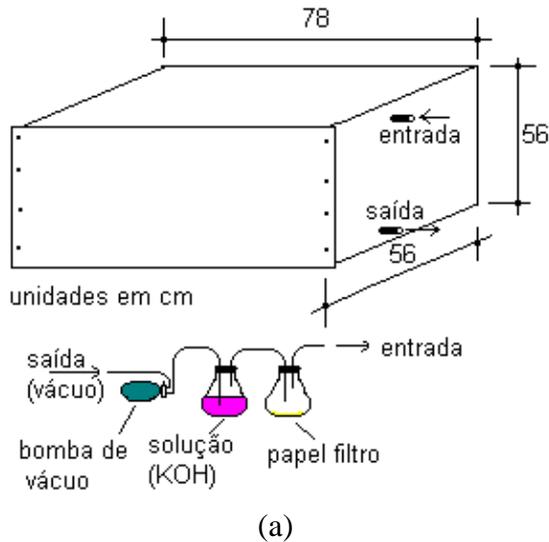


Figura 4.2: Câmara de sazonalização, (a) croqui e (b) fotografia (Kulakowski, 2002)

Antes do início da etapa de sazonalização foram abertas duas “janelas” na câmara de sazonalização a fim de poder visualizar um higrômetro colocado internamente à câmara, com o intuito de acompanhar a umidade no interior da mesma.

A câmara de sazonalização ficou em ambiente com temperatura e umidade controladas, no Laboratório de Materiais de Construção (LMC), da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS). A temperatura da sala durante os ensaios foi de  $20 \pm 1^\circ\text{C}$  e a umidade relativa de  $70 \pm 5\%$ .

Na saída da cura submersa, as amostras foram secas superficialmente, pesadas e então colocadas na câmara de sazonalização. Fez-se a circulação do ar da câmara, passando-o pela solução de KOH e na seqüência, por um recipiente com sílica gel, antes de seu retorno à câmara. A finalidade de fazer com que o ar passe pela sílica gel é retirar a umidade que foi adquirida ao passar na solução de KOH. A umidade das amostras foi monitorada diariamente e cada vez que a câmara era aberta, fazia-se o procedimento de circulação do ar por cerca de 30 minutos.

A intenção desse procedimento é equilibrar a umidade das amostras com a umidade da sala com condições controladas. No entanto, o circuito da câmara de sazonalização é fechado, tendo comunicação com a atmosfera da sala apenas na sua abertura. Em experimentos anteriores (ABREU, 2004; KIRCHHEIM, 2003; KULAKOWSKI, 2002; SEIDLER, 1999), antes da abertura das “janelas”, a umidade no interior da câmara de sazonalização nunca havia

sido controlada. No trabalho atual, o higrômetro registrou umidade constante de 100%, provavelmente pelo fato da cura ter sido submersa. Passados 7 dias, percebeu-se que, nessas condições, a umidade seria equilibrada apenas entre as amostras, não atingindo a umidade desejada para o ensaio. Decidiu-se, então, abandonar a câmara de sazramento e realizar toda a secagem na sala climatizada.

As amostras foram então dispostas sobre grades plásticas, na bancada da sala climatizada, e sua massa foi monitorada até constância de massa<sup>26</sup> (diferença de 0,1g entre duas leituras consecutivas de 24 horas). A figura 4.3 ilustra a disposição das amostras durante a secagem na sala climatizada.



Figura 4.3: Disposição das amostras para secagem na sala climatizada

Como a perda da umidade para o meio ocorre da superfície para o interior da amostra, não ocorrendo de forma homogênea, logo após atingir o equilíbrio com o meio, cada amostra foi isolada em uma embalagem composta por poliéster metalizado ( $17\text{g/m}^2$ ) + polietileno ( $30\text{g/m}^2$ ) selada a quente<sup>27</sup>, para equilíbrio da umidade interna. Esse período de redistribuição foi fixado em pelo menos 14 dias (para igualar ao tempo requerido nas recomendações da RILEM). As figuras 4.4 e 4.5 mostram um corpo-de-prova embalado e uma vista geral de

---

<sup>26</sup> A RILEM (1999), nas recomendações do TC 116-PCD estabelece que a constância de massa é atingida quando os corpos-de-prova apresentam diferença igual a 0,1g entre duas leituras consecutivas de 24 horas. O mesmo critério foi adotado para as amostras que seguiram o sazramento baseado na metodologia adotada no NORIE.

<sup>27</sup> Informações sobre a seladora podem ser consultadas no apêndice H.

diversos corpos-de-prova durante o período de redistribuição de umidade, respectivamente. Após o empacotamento as amostras foram pesadas, e repesadas após o término de redistribuição de umidade, como meio de verificar possíveis falhas no fechamento, o que permitiria alguma perda ou ganho de umidade, além de não realizar a redistribuição requerida. O desempenho das embalagens e o método de selagem utilizados foram satisfatórios, uma vez que massa do conjunto ao final da etapa de redistribuição, permaneceu a mesma para todos os exemplares.



Figura 4.4: Corpo-de-prova embalado após equilíbrio da umidade na sala climatizada



Figura 4.5: Corpos-de-prova em fase de redistribuição da umidade na sala climatizada

O tempo de secagem, independente do tempo de cura, foi de cerca de 21 dias. No bloco 1 (com cura de 28 dias), esse tempo foi de cerca de 28 dias, mas deve ser lembrado que as amostras permaneceram uma semana na câmara de sazonalidade, período em que praticamente não perderam umidade. Em função do cronograma de ensaios (contemplando feriados, finais de semana e a menor quantidade de vezes em que as câmaras de carbonatação seriam abertas), o período de redistribuição de umidade variou entre 11 e 19 dias.

Passado o período de redistribuição de umidade, as embalagens foram abertas e as amostras colocadas nas câmaras de carbonatação. No bloco 1, antes de iniciar o ensaio de carbonatação, de cada proporcionamento de materiais foi retirada uma fatia para verificar a existência de carbonatação, em função de não se ter utilizado a câmara de sazonalidade. A profundidade de carbonatação observada foi inferior ao erro de medição especificado pela RILEM (1988, p. 454), de cerca de 0,5mm, em todos os corpos-de-prova. No apêndice A são apresentadas as datas de início e o período de duração de cada procedimento deste tipo de sazonalidade. No apêndice B são apresentadas as massas após cura e ao final da etapa de secagem em sala

climatizada, conforme a metodologia baseada nos procedimentos empregados no NORIE, do bloco 1, a título de exemplo.

#### *4.4.1.1.2 Sazonamento conforme a RILEM*

A RILEM (1999), nas recomendações do TC 116-PCD, descreve os procedimentos para ensaios de permeabilidade do concreto como critério da sua durabilidade. Nessas recomendações, a parte “A” especifica o condicionamento de corpos-de-prova de concreto para medição da permeabilidade a gases e absorção capilar de água. A parte “B” trata da medição da permeabilidade ao gás do concreto segundo a RILEM – método Cembureau, e a parte “C” aborda a determinação da absorção capilar de água pelo concreto endurecido. Neste trabalho são seguidos os procedimentos da parte “A”. Apesar do método indicar o material (concreto) e a amostra a ser utilizada, nas limitações dessa parte “A” consta que os procedimentos podem ser aplicados a amostras de diferentes tamanhos e formas, concretos com composições especiais ou amostras retiradas de estruturas. Além disso, o procedimento é indicado para quaisquer ensaios que requeiram distribuição uniforme de umidade do material a ser ensaiado.

As recomendações seguem quatro etapas, que são detalhadas a seguir:

- a. determinação da concentração da umidade de equilíbrio;
- b. determinação da perda de massa necessária durante a pré-secagem;
- c. pré-secagem;
- d. fase de redistribuição da umidade.

#### a. determinação da concentração da umidade de equilíbrio

Nesta etapa, primeiro determina-se a quantidade total de água evaporável ( $W_e$ ). Para isso, ao final de cada período de cura, uma amostra de cada composição do material a ser ensaiado é seca em estufa a 105°C até que a diferença de massa observada seja menor que 0,5g entre

duas leituras consecutivas, num intervalo de 24 horas. O cálculo da quantidade total de água evaporável ( $W_e$ ) é dado pela equação 4.2:

$$W_e = m_o - m_d \quad (\text{equação 4.2})$$

Onde:

$W_e$  = quantidade total de água evaporável (g);

$m_o$  = massa do corpo-de-prova ao final da cura (g);

$m_d$  = massa do corpo-de-prova após secagem em estufa (g).

Em seguida, pode-se calcular a concentração da umidade evaporável ( $w_e$ ), pela equação 4.3:

$$w_e = \frac{W_e}{m_d} \quad (\text{equação 4.3})$$

Em segundo lugar é feita a determinação da concentração intermediária de equilíbrio da umidade. Através de um ensaio de dessorção, ao final da cura, uma outra amostra é cortada em fatias de  $\pm 5$ mm ou triturada de forma a obter pedaços de diâmetro equivalente, e é colocada em ambiente com umidade de  $75\pm 2\%$  e temperatura de  $20\pm 1^\circ\text{C}$ . Para este teste de dessorção, deve ser usada uma quantidade mínima de 500g do material. O material permanece em secagem até o equilíbrio de umidade com o ambiente controlado. Deve-se tomar cuidado para que não se perca parte do material durante as pesagens. Após o equilíbrio, o material é colocado em estufa a  $105^\circ\text{C}$  até a constância de massa, com diferença de 0,1g entre duas leituras consecutivas de 24 horas. A quantidade de água evaporável no equilíbrio ( $W_{e,75}$ ) é calculada pela equação 4.4:

$$W_{e,75} = m_{e,75} - m_d \quad (\text{equação 4.4})$$

Onde:

$W_{e,75}$  = quantidade de água de equilíbrio a  $75\pm 2\%$  de umidade relativa (g);

$m_{e,75}$  = massa de concreto no equilíbrio com  $75\pm 2\%$  de umidade relativa (g);

$m_d$  = massa de concreto seca (g).

Então, pode-se calcular a concentração da umidade de equilíbrio ( $w_{e,75}$ ), pela equação 4.5:

$$w_{e,75} = \frac{W_{e,75}}{m_d} \quad (\text{equação 4.5})$$

b. determinação da perda de massa necessária durante a pré-secagem

A perda de massa necessária durante a pré-secagem é calculada em função da massa original do corpo-de-prova, ao final da cura, pela equação 4.6:

$$\Delta m = \left( \frac{w_e - w_{e,75}}{1 + w_e} \right) m_o \quad (\text{equação 4.6})$$

Onde:

$\Delta m$  = massa perdida, calculada para cada composição de material a ser ensaiado (g);

$w_e$  = concentração da umidade evaporável;

$w_{e,75}$  = concentração da umidade de equilíbrio;

$m_o$  = massa do corpo-de-prova ao final da cura (g).

c. pré-secagem

A secagem das amostras a serem ensaiadas é acelerada a uma temperatura de 50°C em câmara ventilada, onde as amostras permanecem até perderem a massa especificada na etapa anterior. A pré-secagem segue até que a perda de água requerida seja alcançada, com precisão de 5%, conforme a equação 4.7:

$$\frac{\Delta m_{\text{obs}} - \Delta m_{\text{cal}}}{\Delta m_{\text{cal}}} < 0,05 \quad (\text{equação 4.7})$$

Onde:

$\Delta m_{\text{obs}}$  = variação de massa observada durante o ensaio (g);

$\Delta m_{\text{cal}}^{28}$  = variação de massa requerida, calculada para cada corpo-de-prova, de acordo com a equação 4.6 (g).

O monitoramento da perda de massa deve ser feito em pequenos intervalos de tempo, a fim de conhecer a velocidade dessa perda. De acordo com o material, forma e dimensões do corpo-de-prova, essa etapa pode durar horas ou semanas.

#### d. fase de redistribuição da umidade

Após a pré-secagem, as amostras são seladas<sup>29</sup> ou estocadas em pequenos recipientes, mantidos na temperatura de 50°C, no entanto não pode haver troca de umidade com o ambiente. Essa temperatura favorece a distribuição do gradiente de umidade axial no sentido de uma distribuição uniforme. Esta fase de distribuição deve ter uma duração mínima de 14 dias.

Passada essa fase, as amostras seladas devem ser levadas para o ambiente onde os ensaios serão realizados, com pelo menos 24 horas de antecedência. Este procedimento garante que a temperatura da amostra se equilibre com a do ambiente.

Durante o desenvolvimento do programa experimental desta pesquisa, parte das amostras foram sazoadas conforme os procedimentos descritos anteriormente.

Embora não esteja explícito no texto das recomendações da RILEM, entende-se que para a etapa que especifica o condicionamento de corpos-de-prova seja necessária uma

---

<sup>28</sup>  $\Delta m$  é o valor calculado para o corpo-de-prova utilizado na etapa preliminar, quando é feita a determinação da perda de massa necessária durante a pré-secagem e  $\Delta m_{\text{cal}}$  é o valor correspondente a cada um dos corpos-de-prova do ensaio, o que resulta em valores distintos.

<sup>29</sup> A RILEM não faz quaisquer referências sobre o tipo de embalagem que deve ser utilizada, nem como as mesmas devem ser seladas, para impedir a troca de umidade com o ambiente a 50°C. As embalagens utilizadas nesta pesquisa foram testadas preliminarmente.

moldagem prévia à moldagem das amostras que serão ensaiadas à carbonatação. Dessa forma, evita-se que as amostras que serviram para o condicionamento e as que serão ensaiadas à carbonatação tenham idades diferentes, o que interfere no grau de hidratação, porosidade do material e, conseqüentemente, no resultado final do ensaio.

Para determinação da quantidade de água a ser perdida pelas amostras que seriam submetidas ao ensaio de carbonatação na pré-secagem, foi realizada uma moldagem com condições idênticas às moldagens especificadas para os ensaios de carbonatação. Após cada período de cura submersa (7 e 28 dias), uma amostra de 40x40x160mm de cada proporcionamento foi seca superficialmente, pesada e colocada em estufa ventilada a 105°C para determinação da quantidade total de água evaporável ( $W_e$ ) e da concentração da umidade evaporável ( $w_e$ ). Outras duas amostras de cada proporcionamento foram trituradas e passadas nas peneiras de malhas 6,3 e 4,8mm. O material retido na peneira 6,3 foi novamente triturado, o retido na peneira 4,8 utilizado para o ensaio de desorção e o material passante pela 4,8 foi descartado. A classificação do material através dessas peneiras possibilitou que a amostra atingisse um diâmetro aproximado ao requerido para o ensaio (5mm). Ao invés de utilizar umidade relativa de 75±2%, adotou-se umidade relativa de 70±5%. Essa alteração foi feita em função da sala climatizada disponível, e também por ser o valor empregado em algumas pesquisas de carbonatação realizadas no NORIE (ABREU, 2004; KIRCHHEIM, 2003; KULAKOWSKI, 2002; entre outras). Após o equilíbrio a 70±5% de umidade e temperatura de 20±1°C, as amostras trituradas foram secas em estufa a 105°C, conforme o procedimento recomendado. Com os dados foi possível calcular a quantidade de água evaporável no equilíbrio ( $W_{e,70}$ ) e a concentração da umidade de equilíbrio ( $w_{e,70}$ ) para cada proporcionamento, em cada uma das idades de cura.

Embora os procedimentos de condicionamento tenham sido realizados para as duas idades de cura, ao aplicar os valores obtidos nas amostras a serem ensaiadas com cura de 28 dias, os dados do condicionamento referentes a esta idade não estavam concluídos. Então foram utilizados os valores determinados com 7 dias, para não perder todas as amostras do bloco 1 (cura de 28 dias). Quando os parâmetros de condicionamento aos 28 dias foram concluídos, fez-se a comparação com os de 7 dias e percebeu-se que a diferença de massa a ser perdida era inferior a 2,5%. Sendo que diferença obtida entre as duas condições foi bastante pequena, optou-se por utilizar apenas os dados obtidos para o condicionamento realizado após 7 dias de cura, para os quatro blocos de ensaios. Os dados para determinação e

o cálculo dos parâmetros da etapa de condicionamento, das duas idades de cura, encontram-se no apêndice C.

As argamassas utilizadas para os ensaios de carbonatação foram curadas por 7 ou 28 dias. Após a cura das amostras a serem ensaiadas, as mesmas foram secas superficialmente, pesadas e postas em estufa ventilada a  $50\pm 5^\circ\text{C}$ . A figura 4.6 ilustra as amostras dispostas para secagem na estufa. Calculou-se a massa a ser perdida ( $\Delta m$ ) por cada um dos corpos-de-prova, e depois realizado o monitoramento até atingir a massa requerida, com precisão de 5%. Esta etapa de pré-secagem teve duração de 6 a 32 dias, dependendo do tipo de cimento, relação a/c e do tempo de cura submersa. No apêndice D são apresentadas as massas após cura, o  $\Delta m$  calculado e a massa a ser atingida ao final da etapa de secagem em estufa, conforme os procedimentos da RILEM, do bloco 1, a título de exemplo.

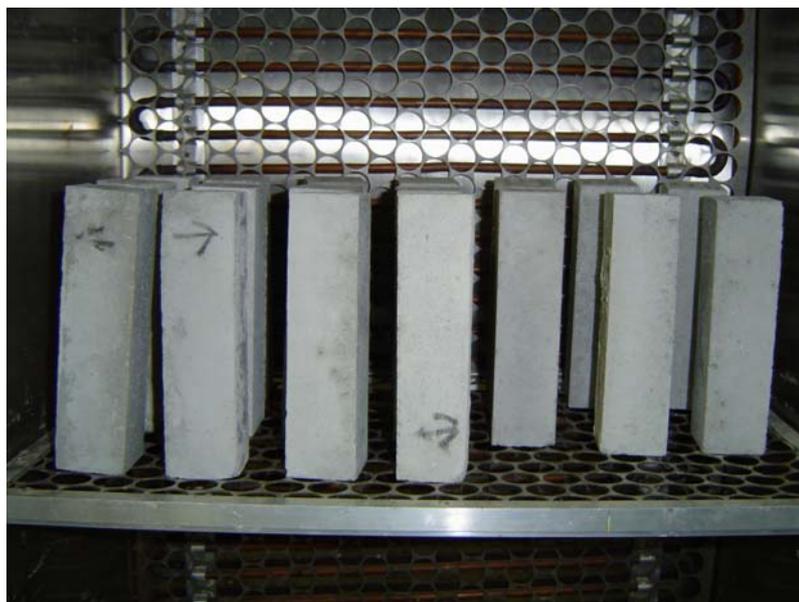


Figura 4.6: Disposição das amostras para secagem na estufa

Atendida a perda de massa desejada, as amostras foram seladas em embalagens<sup>30</sup> compostas por poliéster ( $17\text{g}/\text{m}^2$ ) + adesivo ( $3\text{g}/\text{m}^2$ ) + alumínio ( $21,6\text{g}/\text{m}^2$ ) + adesivo ( $3\text{g}/\text{m}^2$ ) + filme de polietileno ( $90\text{g}/\text{m}^2$ ), fechadas a quente. Já embaladas, as amostras foram novamente pesadas e então retornaram à estufa para a fase de redistribuição da umidade interna, permanecendo por um período entre 14 e 30 dias, dependendo do tempo de sazramento que estava sendo

<sup>30</sup> As embalagens empregadas nesse procedimento são diferentes daquelas empregadas no sazramento baseado na metodologia utilizada no NORIE, por serem provenientes de doação, em uma quantidade suficiente apenas para os corpos-de-prova que seguiram os procedimentos da RILEM, a  $50^\circ\text{C}$ . Outras informações podem ser consultadas no apêndice H.

analisado. Passado esse período, as amostras foram novamente pesadas para conferir se a massa permanecia constante. As figuras 4.7 e 4.8 ilustram um corpo-de-prova embalado após atingir a perda de massa preestabelecida, e as amostras embaladas em fase de redistribuição da umidade, respectivamente.



Figura 4.7: Corpo-de-prova embalado após atingir perda de massa desejada na estufa



Figura 4.8: Corpos-de-prova em fase de redistribuição da umidade na estufa

Antes do ensaio de carbonatação, as amostras foram levadas, ainda embaladas, para a sala climatizada ( $20\pm 1^\circ\text{C}$ ) onde os ensaios foram realizados, com pelo menos 24 horas de antecedência, para equilíbrio da temperatura. Em seguida, as embalagens foram abertas e os corpos-de-prova colocados nas câmaras de carbonatação.

No apêndice A são apresentadas as datas de início e o período de duração de cada procedimento deste tipo de sazramento.

#### 4.4.1.2 Ensaio de Carbonatação Acelerada

Os ensaios de carbonatação acelerada foram realizados em duas câmaras de carbonatação com percentuais de  $\text{CO}_2$  distintos. Ambas as câmaras permaneceram em sala climatizada com temperatura de  $20\pm 1^\circ\text{C}$  e umidade relativa de  $70\pm 5\%$  durante todo o período de ensaio.

A câmara com 6% de  $\text{CO}_2$  é a mesma utilizada por Kulakowski (2002) e Abreu (2004), no entanto, o percentual de  $\text{CO}_2$  utilizado pelas pesquisadoras foi de 5%. Devido a um ajuste nos equipamentos, os ensaios deste trabalho foram realizados com concentração de 6%. Esta câmara é feita com chapas de compensado resinado e a estrutura de bandejas em metal

vazado. A figura 4.9 ilustra o esquema de montagem da câmara. Maiores detalhes sobre a câmara de carbonatação de 6% podem ser obtidos em Kulakowski e Viecili (1997).

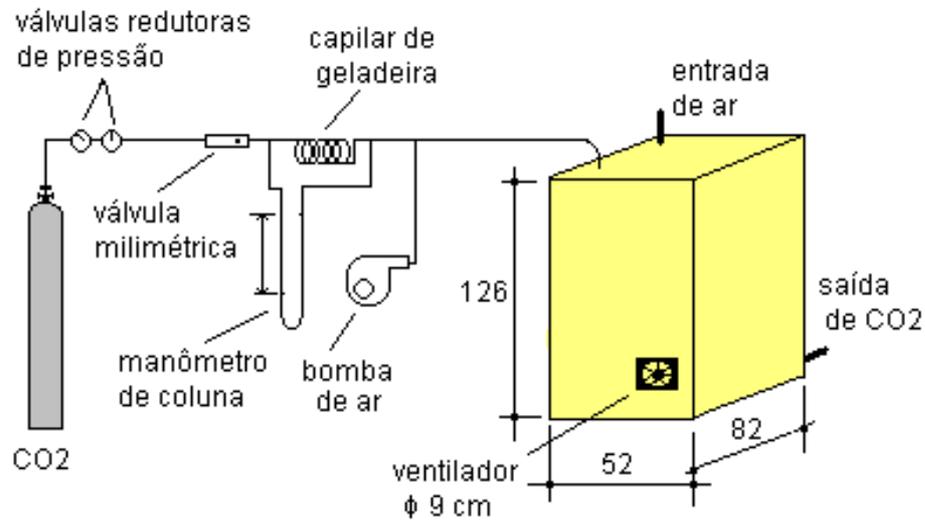


Figura 4.9: Esquema de montagem da câmara de carbonatação a 6% de CO<sub>2</sub> (Abreu, 2004)

A câmara originalmente construída sofreu pequenas alterações. Foram abertas quatro “janelas” em suas laterais para poder acompanhar a umidade relativa interna da câmara. Também foram instalados dois pequenos ventiladores na parte inferior, nos fundos, e mais dois na parte superior, na frente, para circulação do CO<sub>2</sub>. Além disso, a entrada do gás diluído, que era na parte superior, foi colocada na parte inferior, e o expurgo que era na parte inferior foi posto na parte superior. A figura 4.10 ilustra os ventiladores, e a figura 4.11, uma vista lateral com as janelas, da câmara de 6% de CO<sub>2</sub>.



Figura 4.9: Ventiladores da parte superior da câmara de 6% de CO<sub>2</sub>



Figura 4.11: Vista lateral da câmara de 6% de CO<sub>2</sub>

O ar que entra na câmara já está na concentração de 6% de CO<sub>2</sub>, a qual é controlada pela pressão medida com manômetro de coluna d'água, que é relacionada a vazão de CO<sub>2</sub>, e vazão da bomba de ar. A alimentação dessa câmara é contínua e foi interrompida apenas nos dias de medição da carbonatação.

A outra câmara utilizada é chamada de câmara saturada de CO<sub>2</sub>, pois a concentração de CO<sub>2</sub> no seu interior, foi sempre igual ou superior a 60%. A câmara é feita de acrílico e as bandejas internas em metal vazado. A mesma possui dois ventiladores na parte superior e mais dois na parte inferior, para circulação do gás. A entrada de CO<sub>2</sub> é feita na parte inferior e o expurgo, na parte superior. O volume da câmara saturada de CO<sub>2</sub> é de aproximadamente 245 litros, e sua alimentação não é contínua. Depois de fechar a câmara, a válvula do cilindro de CO<sub>2</sub> é aberta com vazão de 5 litros/min. A válvula da parte superior também fica aberta, para saída do ar que está dentro da câmara. Como o CO<sub>2</sub> é mais pesado que o ar, o mesmo vai completando o volume da câmara e “expulsando” o ar. Este procedimento, de substituição do ar por CO<sub>2</sub>, sempre teve duração mínima de 30 minutos, ou seja, pelo menos 61% do volume total da câmara era preenchido por CO<sub>2</sub>. Os corpos-de-prova consomem CO<sub>2</sub> durante as reações de carbonatação, o que diminui a sua concentração no interior da câmara, no entanto, deve também ser levado em consideração, o volume dos corpos-de-prova, o qual foi sempre igual ou superior a 27 litros. Após a troca do ar por CO<sub>2</sub>, as válvulas de saída e do cilindro de

CO<sub>2</sub> são fechadas e os ventiladores ligados. Este procedimento é realizado cada vez que a câmara é aberta para medição da carbonatação ou então a cada 7 dias. A figura 4.12 ilustra a câmara saturada de CO<sub>2</sub>.



Figura 4.12: Vista frontal da câmara saturada de CO<sub>2</sub>

A umidade relativa interna das câmaras foi registrada por higrômetros colocados em cada uma delas. Para manter a umidade relativa interna em torno dos 70%, em ambas as câmaras foi colocado um lastro de cloreto de sódio (NaCl). Em geral, a umidade registrada pelos higrômetros foi um pouco superior, variando entre 70% e 75%.

Antes das câmaras serem abertas, a alimentação é interrompida (câmara com 6% de CO<sub>2</sub>) e o CO<sub>2</sub> do interior retirado, injetando ar comprimido na parte superior e ligando a parte inferior com o meio externo. Esse procedimento evita a contaminação dos corpos-de-prova que estão em sazramento na sala climatizada, bem como de outros possíveis ensaios.

A cada medição, depois de abertas as câmaras, as amostras a serem medidas foram retiradas, devidamente identificadas e das mesmas, quebradas fatias de cerca de 20mm, com auxílio de uma prensa manual. Sobre as fatias foi aspergida solução de fenolftaleína a 1%, dissolvida em 70% de álcool etílico e 30% de água destilada. O restante das amostras foi devolvido às câmaras e reiniciada a alimentação. Os ventiladores internos de ambas permaneceram em funcionamento constante.

As medidas de carbonatação foram realizadas nas idades previstas neste programa, porém, em função de ajustes no cronograma, feriados e conveniência na abertura das câmaras, às vezes as medições tiveram diferenças de até 7 dias nas idades de medição, fato este que ocorreu para idades acima de 42 dias. Algumas misturas estavam completamente carbonatadas muito antes do término das medições previstas. Neste trabalho, foram consideradas as medições de carbonatação realizadas até 252 dias.

#### 4.4.1.3 Procedimentos para Análise dos Resultados

Todas as amostras fraturadas e aspergidas com a fenolftaleína foram fotografadas com uma câmera fotográfica digital. As fotos foram obtidas depois que a solução de fenolftaleína estava seca, ou seja, cerca de 1 hora. O procedimento da RILEM (1988) CPC-18, que descreve a metodologia a ser utilizada para obtenção da profundidade de carbonatação, especifica que a medida seja obtida após 24h da aspersão com fenolftaleína. No entanto, a coloração rosacarmim que a fenolftaleína apresenta, para a área não carbonatada das amostras, perde intensidade após esse período, o que dificulta a visualização para a medição.

As medidas de profundidade de carbonatação foram realizadas nas imagens digitais, com auxílio de um software<sup>31</sup> de análise de imagens. Kulakowski (2002, p. 58) também fez uso desse recurso para análise de parte de suas amostras de argamassas, submetidas à carbonatação. As vantagens observadas pela pesquisadora foram confirmadas neste trabalho:

- a) com o corpo-de-prova fotografado se pode realizar e conferir as medidas quantas vezes forem necessárias;
- b) os critérios para a análise, assim como as medidas propriamente ditas, ficam armazenados, permitindo sua conferência;
- c) a precisão das medidas é maior;
- d) as médias dos resultados podem ser melhoradas pela possibilidade de se realizar diversas medidas por face, ou pela determinação da média obtida pela integral da área carbonatada;

---

<sup>31</sup> O software utilizado foi o Carl Zeiss Vision (realise 3.0).

- e) os erros introduzidos pelo desgaste do operador, no uso do paquímetro, podem ser minimizados.

As imagens devem estar acompanhadas de uma escala, o que permite a calibração dos recursos utilizados. Além disso, deve-se procurar a maior planicidade da face de ruptura, minimizar as sombras e procurar enquadrar a imagem e a escala. Nem todas as amostras rompidas possuíam a planicidade desejada, no entanto, o efeito desse tipo de desvio não se mostrou importante no resultado final da medida, pois, comparando a mesma amostra, com e sem o desvio, as diferenças nos resultados foram menores que os erros de medição especificados pela RILEM (1988, p. 454), (cerca de 0,5mm).

Na medição, foram consideradas as duas laterais dos corpos-de-prova, ignorando as faces superior e inferior de moldagem, em função da dispersão existente na profundidade carbonatada nestas faces. As etapas para realização das medidas de cada imagem são as seguintes:

- a) abertura da imagem no programa de análise de imagens (figura 4.13);



Figura 4.13: Imagem digital aberta no programa de análise

- b) calibração dimensional das imagens, através da escala que acompanha a imagem;
- c) delimitação da área não carbonatada, seguindo os critérios de eliminar os cantos da amostra, por onde o  $\text{CO}_2$  penetra em duas direções e de modo que o

retângulo formado no centro da amostra compreenda apenas uma área não carbonatada, a qual seja a maior possível (figura 4.14);



Figura 4.14: Imagem com a área não carbonatada delimitada pelas linhas traço ponto, ponto

d) medição da área carbonatada em cada uma das laterais do corpo-de-prova, delimitada pelas linhas traçadas na figura 4.14, conforme ilustra a figura 4.15;

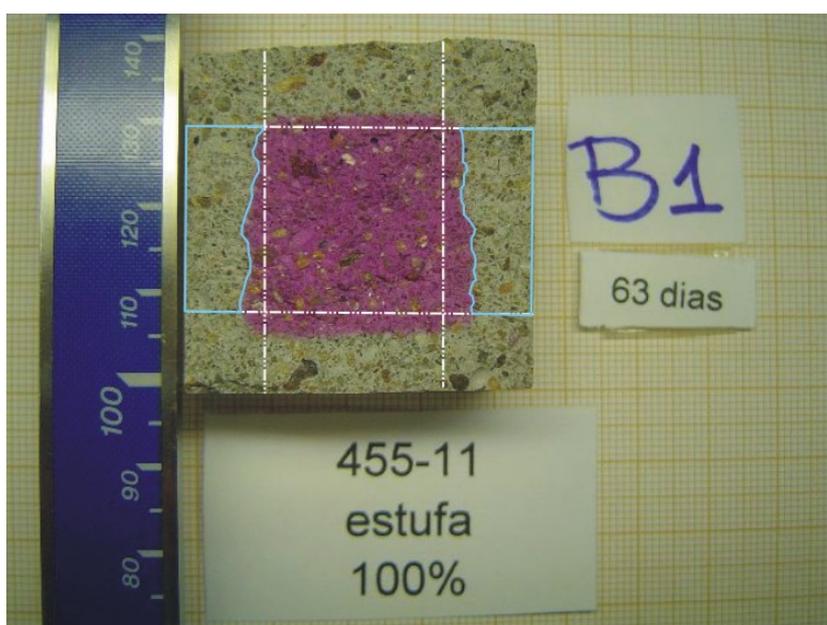


Figura 4.15: Imagem com delimitação das áreas carbonatadas em cada uma das laterais (linhas contínuas)

- e) medição da distância entre as duas delimitações do retângulo, conforme figura 4.16, para cálculo da profundidade de carbonatação média, através da divisão da área por essa distância;

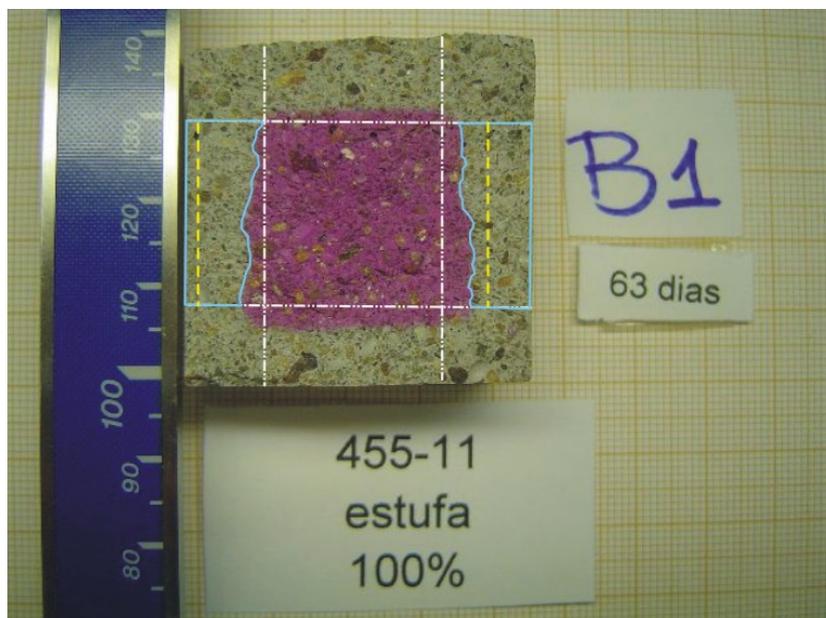


Figura 4.16: Imagem com medida da distância (linhas tracejadas), limitada pelas linhas traço, ponto, ponto

- f) medição da maior e menor profundidade de carbonatação em cada lateral (figura 4.17).

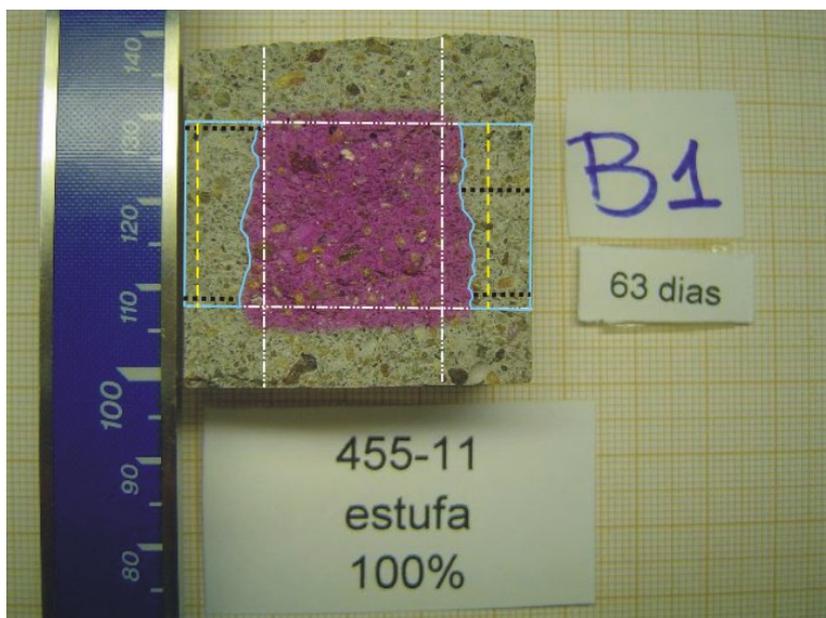


Figura 4.17: Imagem com medida da maior e menor profundidade de carbonatação para cada uma das laterais (linhas pontilhadas)

A utilização do programa para obtenção dos dados de carbonatação permite que vários pontos sejam medidos, como por exemplo, para encontrar o ponto de maior e menor profundidade de carbonatação, sem tornar a operação desgastante, evitando a inserção de erros acidentais.

Na análise dos resultados foram utilizadas as profundidades médias de carbonatação, que são obtidas dividindo a área da lateral, pela distância delimitada pelo retângulo (em linhas traço, ponto, ponto). Como o número de amostras por proporcionamento é de três, e em cada uma delas se obtêm dois resultados (duas laterais), foram totalizados seis resultados para cada mistura em cada idade de medição.

#### 4.4.2 Resistência à Compressão Axial

As amostras para o ensaio de resistência à compressão axial foram moldadas conforme a ABNT (1994)<sup>32</sup> nas prescrições da NBR 5738. Foram utilizados moldes metálicos para corpos-de-prova cilíndricos com dimensões de 100x200mm<sup>33</sup>, óleo mineral automotivo como desmoldante e adensamento manual, em duas camadas com 15 golpes cada. Ao término da moldagem, os moldes foram colocados na sala de cura úmida ( $UR \geq 95\%$  e temperatura de  $23 \pm 2^\circ\text{C}$ ), com seus topos protegidos, onde permaneceram por 24 horas, sendo então desmoldados.

Após retirados dos moldes, os corpos-de-prova foram colocados submersos em água saturada de cal, dentro da sala de cura, permanecendo nessas condições até suas respectivas idades de ensaio.

A resistência à compressão axial foi determinada aos 7, 28 e 63 dias de idade, e seguiu as recomendações da AMN (1997), NM 101. No dia da ruptura, cerca de duas horas antes da mesma, as amostras foram retiradas do tanque de cura e capeadas no topo e base com uma mistura de enxofre, negro de fumo e caulim.

---

<sup>32</sup> A moldagem seguiu as recomendações da ABNT (1994), NBR 5738. A norma em vigor a partir de dezembro de 2003, ABNT (2003), NBR 5738, para os moldes cilíndricos de 100x200mm, especifica adensamento em duas camadas com 12 golpes cada, e não mais 15 golpes conforme ABNT (1994).

<sup>33</sup> A dimensão de 100x200mm foi escolhida em função da elevada dispersão apresentada nos resultados de compressão de corpos-de-prova de 50x100mm ensaiados em etapa preliminar.

A prensa utilizada na ruptura é uma prensa microprocessada classe I<sup>34</sup>, com capacidade de 200 toneladas, e a velocidade de aplicação de carga foi programada conforme a especificação da AMN (1997), NM 101.

No capítulo seguinte são apresentados os resultados desses ensaios, e realizada a discussão em torno dos mesmos.

---

<sup>34</sup> A prensa ser classe I, indica que a precisão de leitura é menor que 0,05% do fundo de escala ou melhor que 0,5% do valor lido.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos ensaios realizados, bem como as considerações a respeito dos mesmos. O efeito das variáveis estudadas na carbonatação, foi verificado através da análise de variância (ANOVA)<sup>35</sup>, com um nível de confiança de 95%.

Para facilitar a identificação das misturas foi adotada a seguinte notação:

**140** = cimento CPI-S, relação a/c de 0,40;

**155** = cimento CPI-S, relação a/c de 0,55;

**170** = cimento CPI-S, relação a/c de 0,70;

**440** = cimento CPIV, relação a/c de 0,40;

**455** = cimento CPIV, relação a/c de 0,55;

**470** = cimento CPIV, relação a/c de 0,70;

**B1, B2, B3, B4** = bloco 1, bloco 2, bloco 3, bloco 4.

A seguir são apresentados os resultados do ensaio de carbonatação, e na seqüência, os de resistência à compressão axial.

### 5.1 CARBONATAÇÃO

Adicionalmente à notação citada acima, nos ensaios de carbonatação foi utilizada a notação apresentada a seguir:

**Csat** = tipo de secagem em sala climatizada, carbonatação em câmara saturada de CO<sub>2</sub>;

---

<sup>35</sup> O software utilizado para a análise de variância (ANOVA) foi o Statgraphics Plus 2.1.

**Esat** = tipo de secagem em estufa, carbonatação em câmara saturada de CO<sub>2</sub>;

**C6** = tipo de secagem em sala climatizada, carbonatação com 6% de CO<sub>2</sub>;

**E6** = tipo de secagem em estufa, carbonatação com 6% de CO<sub>2</sub>;

**(XX)** = tempo de exposição ao CO<sub>2</sub>.

Por exemplo, a notação B3-155-E6(28), indica que a amostra é do bloco 3, o cimento é o CPI-S, a relação a/c é igual a 0,55, a secagem foi realizada em estufa, a carbonatação foi com concentração de 6% de CO<sub>2</sub> e o resultado corresponde a um tempo de exposição ao CO<sub>2</sub> de 28 dias.

Convencionou-se chamar a profundidade de carbonatação de  $e_c$ . Embora a mesma tenha sido medida em várias idades de carbonatação, a idade para análise dos resultados foi fixada em 28 dias. Essa escolha é devida ao fato de que nessa idade, poucas combinações de variáveis apresentavam profundidades de carbonatação nulas ou então, amostras totalmente carbonatadas. As medidas realizadas nas outras idades serão utilizadas em trabalhos posteriores.

Os valores adotados para as amostras que estavam totalmente carbonatadas (B2-470E6, B4-470C6 e B4-470E6) foram calculados através da equação da linha de tendência que melhor se ajustou à nuvem de pontos existentes, para cada traço.

Como dito anteriormente, os ensaios de carbonatação foram realizados em quatro blocos. O tempo entre as moldagens foi calculado conforme os procedimentos, tamanho das câmaras de carbonatação e uma previsão do tempo de carbonatação. Esperava-se que a velocidade de carbonatação na câmara saturada de CO<sub>2</sub> fosse maior, o que faria que as amostras fossem retiradas após sua completa carbonatação. No entanto, o tempo necessário para a carbonatação superou o previsto, e quando as amostras do bloco 4 estavam prontas para o início do ensaio de carbonatação, não havia espaço suficiente na câmara saturada de CO<sub>2</sub>. Com isso, as amostras do bloco 4 foram carbonatadas somente na câmara com 6% de CO<sub>2</sub>.

Para completar a matriz de dados e poder realizar a análise de variância (ANOVA), os dados do bloco 4, ensaiados na câmara saturada de CO<sub>2</sub>, foram calculados por um modelo de regressão, gerado a partir dos resultados de profundidade de carbonatação média dos demais blocos. Como o objetivo deste modelo é de recuperar alguns dados (1/8 do total) e não de

modelá-los, fez-se uma regressão linear múltipla. O modelo gerado apresentou um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 91,6% e contempla apenas as variáveis e suas combinações que foram significativas. Para tornar a grandeza dos coeficientes dos fatores do modelo, equivalentes, as variáveis foram codificadas em valores entre -1 e 1. A equação 5.1 apresenta o modelo utilizado.

$$\begin{aligned}
 e_c = & 5,26 - 0,18 \times cura + 1,59 \times cim + 3,83 \times ac + 1,32 \times sec - 2,29 \times cam + \\
 & + 0,20 \times tem - 0,64 \times cura \times cim - 0,44 \times cura \times ac + 0,14 \times cura \times sec + \\
 & + 1,06 \times cura \times cam + 0,85 \times cim \times ac - 0,13 \times cim \times sec - 0,21 \times cim \times cam + \\
 & + 1,34 \times ac \times ac + 0,27 \times ac \times sec - 1,14 \times ac \times cam - 0,43 \times sec \times cam - \\
 & - 0,16 \times sec \times tem
 \end{aligned}
 \quad \text{(equação 5.1)}$$

Onde:

cura = tempo de cura submersa (7 dias=-1; 28 dias=1);

cim = tipo de cimento (CPI-S=-1; CPIV=1);

ac = relação a/c (0,40=-1; 0,55=0; 0,70=1);

sec = tipo de secagem (climatizada=-1; estufa=1);

cam = % de CO<sub>2</sub> (6%=-1; sat=1);

tem = tempo de secagem (todos juntos=-1; por traço=1).

Através do modelo da equação 5.1, foram calculados os dados do bloco 4 da câmara saturada de CO<sub>2</sub>. A figura 5.1 apresenta um esquema dos blocos de ensaio com os valores médios (calculados a partir de seis dados: três repetições e duas laterais de cada amostra) de  $e_c$ , aos 28 dias de exposição ao CO<sub>2</sub>.

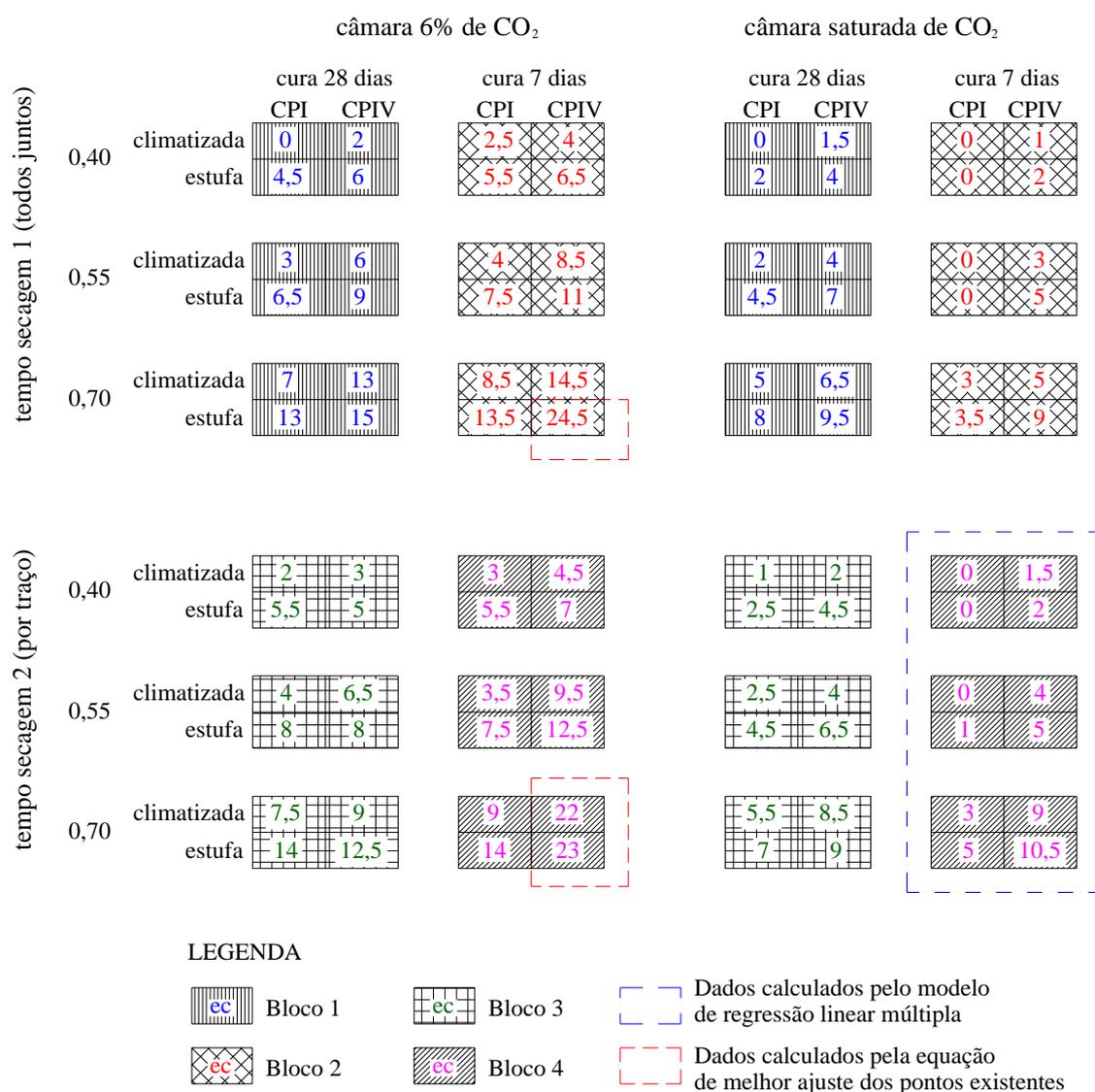


Figura 5.1: Esquema dos blocos de ensaio com os resultados de  $e_c$  médios

As células em destaque (contornadas) na figura 5.1, correspondem aos pontos que foram calculados pelo modelo de regressão (linhas traço, ponto), e aqueles em que as amostras já estavam totalmente carbonatadas aos 28 dias (linhas tracejadas). Os diferentes preenchimentos das células distinguem os quatro blocos de ensaio: linhas verticais = bloco 1; quadriculado inclinado = bloco 2; quadriculado vertical = bloco 3 e linhas inclinadas = bloco 4.

Somente os dados da câmara saturada de CO<sub>2</sub> do bloco 4, foram calculados pelo modelo de regressão, os demais dados foram obtidos das medições de  $e_c$ . Como dito anteriormente, cada conjunto de variáveis possui seis dados (três repetições e duas laterais de cada amostra), para

cada idade de medição. As tabelas 5.1 e 5.2 apresentam os dados de profundidade de carbonatação aos 28 dias, incluindo aqueles que foram recuperados.

Tabela 5.1: Resultados das medidas de profundidade de carbonatação média (mm), aos 28 dias de ensaio dos blocos 1 e 2

Identificação			Câmara 6% CO <sub>2</sub>				Câmara saturada CO <sub>2</sub>			
			Cura 28 dias		Cura 7 dias		Cura 28 dias		Cura 7 dias	
			CPI-S	CPIV	CPI-S	CPIV	CPI-S	CPIV	CPI-S	CPIV
Tempo de secagem – todos juntos	Relação a/c 0,40	climatizada	0,00	1,92	2,27	4,13	0,00	1,38	0,00	1,36
			0,00	2,32	2,67	4,37	0,00	1,80	0,00	0,74
			0,00	1,99	2,46	4,07	0,00	1,54	0,00	1,05
			0,00	1,66	2,51	4,26	0,00	1,87	0,00	1,05
			0,00	2,37	2,40	4,53	0,00	1,51	0,00	1,05
			0,00	2,10	1,96	3,90	0,00	1,83	0,00	1,05
		estufa	5,29	5,23	5,38	6,41	1,91	3,92	0,00	1,91
			4,51	6,24	5,47	6,65	2,16	3,91	0,00	2,36
			3,81	6,55	5,85	6,21	2,08	4,30	0,00	2,14
			4,58	6,15	4,69	7,00	2,53	3,73	0,00	2,14
			5,07	4,58	5,53	5,92	2,53	4,33	0,00	2,14
			3,62	5,74	4,60	6,05	1,85	4,38	0,00	2,14
	Relação a/c 0,55	climatizada	3,99	6,88	4,13	7,62	1,91	3,70	0,00	3,18
			2,62	6,73	3,90	8,11	3,19	4,31	0,00	3,23
			3,11	5,99	4,84	8,06	2,25	3,89	0,00	3,29
			3,20	5,86	3,65	8,54	2,08	4,30	0,00	3,11
			2,51	4,72	3,91	8,67	1,71	3,87	0,00	2,47
			3,00	5,82	4,26	8,80	1,89	5,17	0,00	3,02
		estufa	8,08	10,74	7,32	10,45	5,47	8,20	0,00	5,34
			7,62	10,25	7,26	11,16	6,52	5,39	0,00	6,02
			7,87	8,63	6,90	11,51	5,14	6,87	0,00	5,46
			8,04	8,17	8,55	11,60	3,94	6,48	0,00	4,97
			5,32	7,06	7,70	10,84	3,09	7,55	0,00	4,57
			6,36	8,53	7,64	11,08	2,04	7,68	0,00	4,21
Relação a/c 0,70	climatizada	6,85	12,73	6,69	12,39	5,40	7,20	3,67	6,06	
		6,83	13,08	7,76	14,07	4,80	6,17	3,26	5,71	
		7,18	13,73	10,28	17,20	5,03	6,18	2,74	5,23	
		5,44	13,84	8,67	14,65	4,57	6,87	2,98	4,88	
		8,25	10,74	8,40	13,71	4,41	5,95	3,00	5,88	
		7,90	13,04	10,28	13,71	5,66	6,13	2,57	4,87	
	estufa	15,00	14,05	12,86	24,43	9,33	9,77	4,81	8,89	
		14,86	12,16	13,14	24,43	6,78	10,02	4,81	9,48	
		13,00	15,27	13,44	24,43	9,11	9,16	4,81	10,95	
		11,76	13,81	14,00	24,43	7,98	8,68	4,81	9,27	
		11,31	17,28	13,62	24,43	8,03	8,10	4,81	6,77	
		12,55	17,14	12,86	24,43	7,89	9,84	3,54	7,27	

Tabela 5.2: Resultados das medidas de profundidade de carbonatação média (mm), aos 28 dias de ensaio dos blocos 3 e 4

Identificação			Câmara 6% CO <sub>2</sub>				Câmara saturada CO <sub>2</sub>			
			Cura 28 dias		Cura 7 dias		Cura 28 dias		Cura 7 dias	
			CPI-S	CPIV	CPI-S	CPIV	CPI-S	CPIV	CPI-S	CPIV
Tempo de secagem – por traço	Relação a/c 0,40	climatizada	2,91	3,95	2,69	4,96	0,94	2,30	0,00	1,50
			2,00	3,83	2,59	4,43	1,25	2,25	0,00	1,50
			0,99	2,49	3,02	4,23	1,10	2,36	0,00	1,50
			2,28	2,39	3,14	3,97	1,10	1,99	0,00	1,50
			1,03	2,76	2,60	4,22	1,10	2,27	0,00	1,50
			1,67	2,27	2,60	4,24	1,10	1,96	0,00	1,50
		estufa	5,91	4,66	6,33	7,45	3,11	5,30	0,00	1,86
			7,09	5,20	5,53	6,57	3,41	5,02	0,00	1,86
			5,56	4,53	5,69	6,50	1,38	4,70	0,00	1,86
			6,02	5,39	5,62	6,98	2,76	4,57	0,00	1,86
			4,54	4,81	4,86	6,56	1,45	3,68	0,00	1,86
			5,08	4,98	5,13	6,51	2,18	3,77	0,00	1,86
	Relação a/c 0,55	climatizada	4,19	7,24	4,38	9,48	2,95	3,72	0,00	3,88
			3,79	7,07	3,86	10,34	2,58	3,95	0,00	3,88
			4,44	5,63	2,87	8,80	2,28	4,68	0,00	3,88
			3,51	5,70	2,91	9,88	2,33	4,55	0,00	3,88
			3,30	6,09	3,79	9,58	2,20	3,65	0,00	3,88
			3,86	6,45	4,12	9,74	2,58	3,71	0,00	3,88
		estufa	8,08	8,10	7,37	13,11	4,40	6,17	0,99	4,78
			8,96	8,46	7,44	13,37	4,57	6,88	0,99	4,78
			7,48	5,21	7,75	11,33	4,47	7,40	0,99	4,78
			7,82	7,99	7,43	12,41	3,99	7,54	0,99	4,78
			8,46	9,30	6,87	12,65	4,36	6,03	0,99	4,78
			8,45	8,23	7,12	12,11	4,01	6,08	0,99	4,78
Relação a/c 0,70	climatizada	7,00	11,99	8,06	14,05	4,30	8,55	2,90	8,93	
		8,75	12,72	8,71	14,05	9,43	7,46	2,90	8,93	
		7,57	10,81	10,19	14,05	5,42	10,19	2,90	8,93	
		7,06	12,00	9,59	14,05	5,32	9,47	2,90	8,93	
		7,18	11,25	9,81	14,05	3,79	7,21	2,90	8,93	
		6,76	12,01	8,46	14,05	4,51	7,80	2,90	8,93	
	estufa	14,86	12,30	14,86	17,13	6,69	9,74	4,88	10,37	
		15,31	12,75	15,54	17,13	9,15	12,86	4,88	10,37	
		15,87	12,16	13,68	17,13	6,84	7,01	4,88	10,37	
		14,13	12,86	13,08	17,13	7,16	6,99	4,88	10,37	
		12,63	12,95	12,58	17,13	6,55	8,86	4,88	10,37	
		11,25	13,17	12,94	17,13	5,87	9,94	4,88	10,37	

O comportamento da profundidade de carbonatação média com relação ao tempo de exposição foi traçado até a idade de 28 dias, a mesma utilizada na análise de variância. Algumas amostras (B2-170-Esat(7,14,21,28); B2-470-Esat(7,14); B2-470-E6(28); B3-440-

C6(7,14); B3-155-Esat(14,21); B3-155-C6(7,14); B3-155-E6(14,21); B3-455-Esat(7); B3-170-Esat(14,21); B3-170-E6(14,21); B4-470-C6(28); B4-470E6(28)), apresentaram uma frente de carbonatação muito dispersa, como pode ser visualizado no exemplo da figura 5.2. Por essa razão, a profundidade de carbonatação destas amostras foi determinada pela equação da linha de tendência de melhor ajuste dos pontos (equação que apresentou maior  $R^2$ ). Estas equações constam no apêndice E. Para essa determinação, foram utilizadas todas as idades de exposição nas quais foi possível realizar a medição de  $e_c$ .



Figura 5.2: Amostra em que a frente de carbonatação não é bem definida

As figuras 5.3, 5.4, 5.5 e 5.6, ilustram o comportamento da profundidade de carbonatação média, com relação ao tempo de exposição para cada um dos blocos de ensaio. Os resultados individuais, da  $e_c$  de cada uma das idades (7, 14, 21 e 28 dias) utilizadas para traçar as curvas de carbonatação, encontram-se no apêndice F.

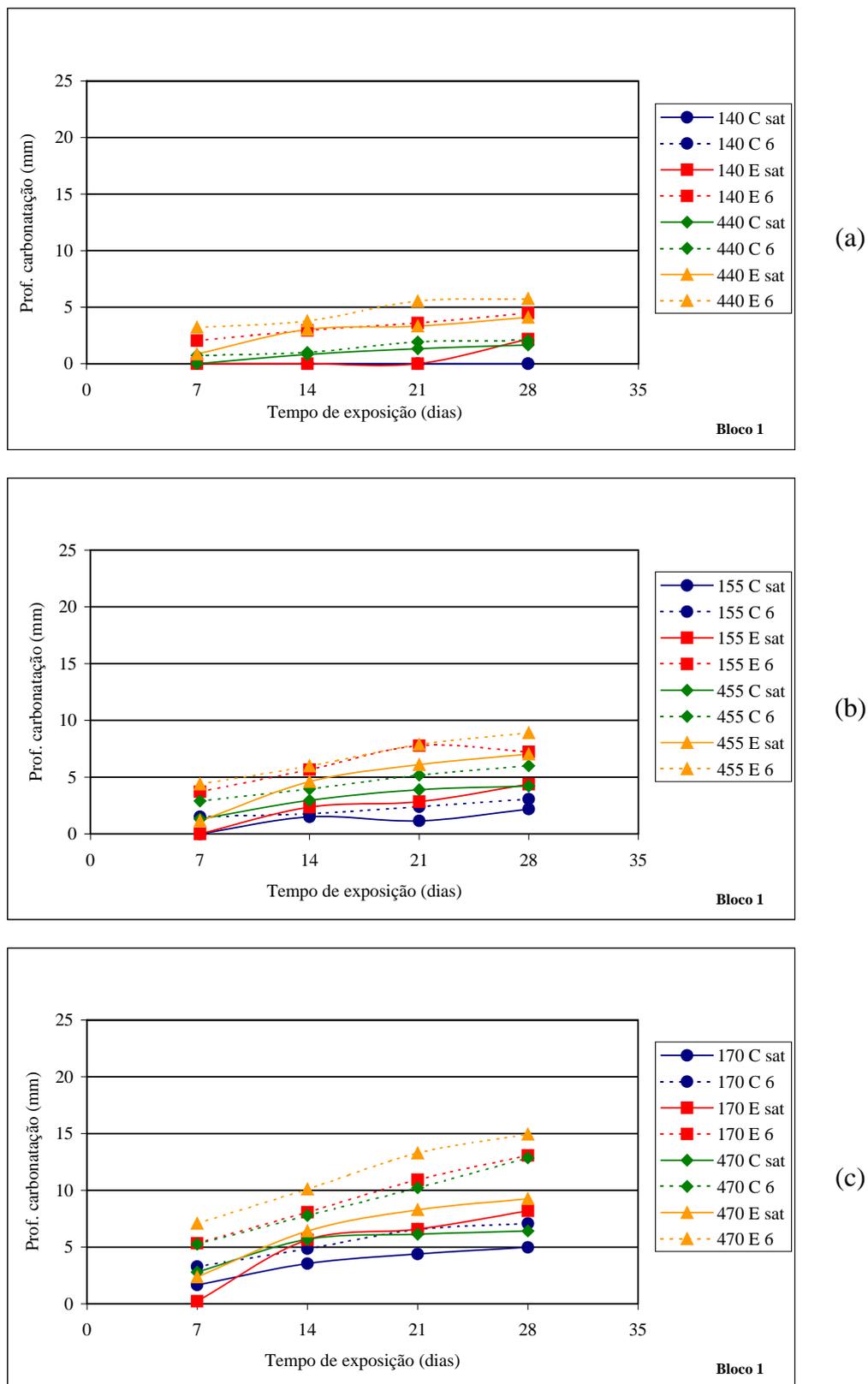


Figura 5.3: Valores de profundidade de carbonatação obtidos em função do tempo de exposição do bloco 1, para (a) relação  $a/c=0,40$ ; (b) relação  $a/c=0,55$  e (c) relação  $a/c=0,70$

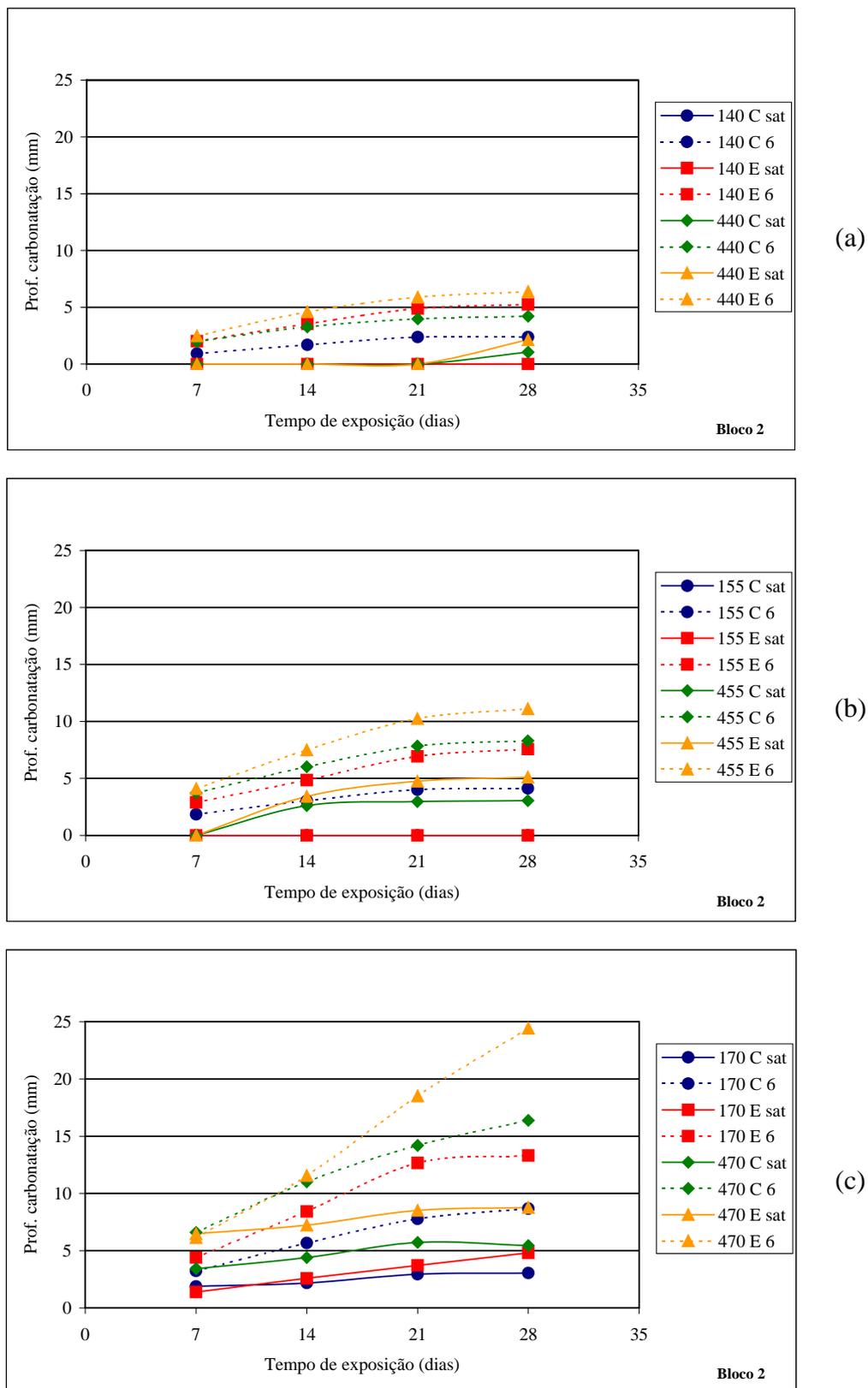


Figura 5.4: Valores de profundidade de carbonatação obtidos em função do tempo de exposição do bloco 2, para (a) relação  $a/c=0,40$ ; (b) relação  $a/c=0,55$  e (c) relação  $a/c=0,70$

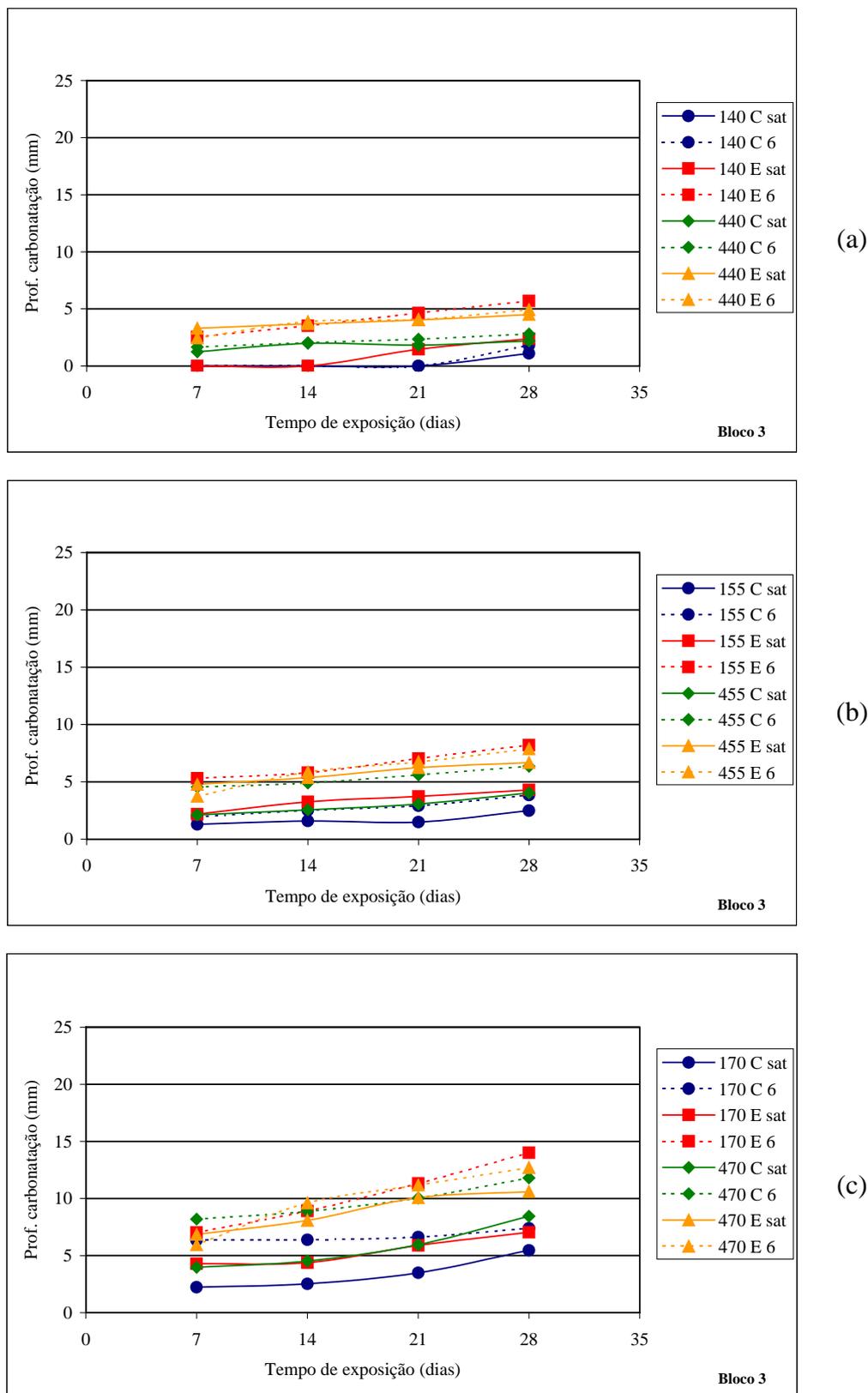


Figura 5.5: Valores de profundidade de carbonatação obtidos em função do tempo de exposição do bloco 3, para (a) relação  $a/c=0,40$ ; (b) relação  $a/c=0,55$  e (c) relação  $a/c=0,70$

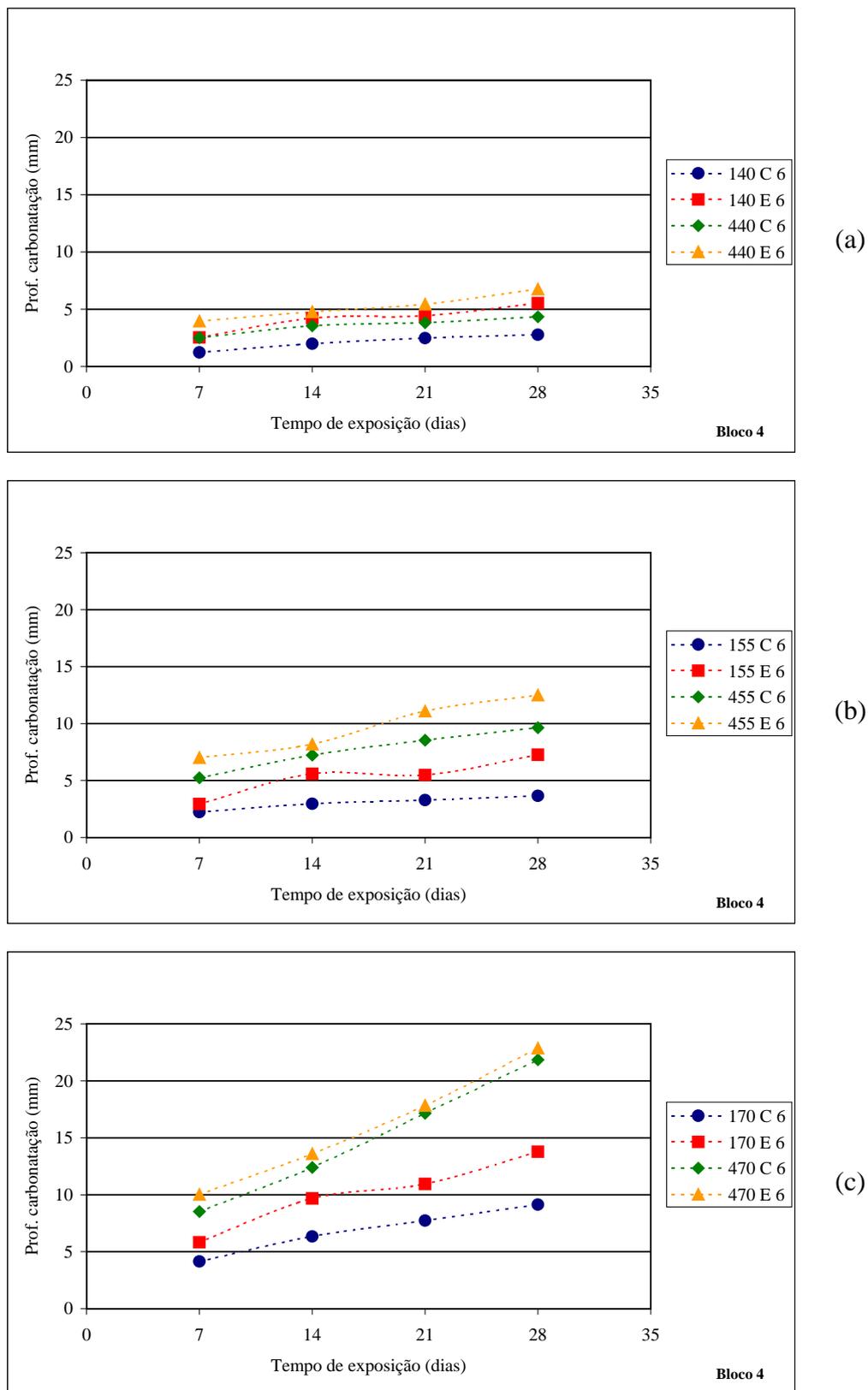


Figura 5.6: Valores de profundidade de carbonatação obtidos em função do tempo de exposição do bloco 4, para (a) relação  $a/c=0,40$ ; (b) relação  $a/c=0,55$  e (c) relação  $a/c=0,70$

De uma forma geral, as curvas de comportamento das figuras 5.3, 5.4, 5.5 e 5.6, indicam que a profundidade de carbonatação cresce com o aumento do tempo de exposição, como era esperado. Esse incremento na  $e_c$  é mais acentuado nas primeiras idades de exposição ao  $\text{CO}_2$ , principalmente na relação a/c mais elevada (0,70), tendendo a diminuir a inclinação da curva com relação ao eixo das abcissas, com o passar do tempo.

Uma análise mais apurada de cada um dos fatores envolvidos no estudo, foi realizada através da análise se variância (ANOVA), a qual é apresentada na tabela 5.3. Os dados utilizados nessa análise são os apresentados anteriormente, nas tabelas 5.1 e 5.2.

Tabela 5.3: Análise de variância dos resultados de carbonatação acelerada aos 28 dias de ensaio

Fatores	SQ	GDL	MQ	Teste F	Valor-p	Significância
tempo de cura submersa	22,61	1	22,61	12,77	0,0004	S
tipo de cimento	1427,80	1	1427,80	806,74	0,0000	S
relação a/c	5815,78	2	2907,89	1643,03	0,0000	S
tipo de secagem	982,59	1	982,59	555,18	0,0000	S
% de $\text{CO}_2$	2965,03	1	2965,03	1675,31	0,0000	S
tempo de secagem	28,55	1	28,55	16,13	0,0001	S
cura x cimento	224,89	1	224,89	127,07	0,0000	S
cura x relação a/c	102,54	2	51,27	28,97	0,0000	S
cura x tipo secagem	14,07	1	14,07	7,95	0,0050	S
cura x % de $\text{CO}_2$	620,53	1	620,53	350,61	0,0000	S
cura x tempo secagem	3,99	1	3,99	2,25	0,1340	NS
cimento x relação a/c	290,64	2	145,32	82,11	0,0000	S
cimento x tipo secagem	8,32	1	8,32	4,70	0,0306	S
cimento x % de $\text{CO}_2$	29,42	1	29,42	16,62	0,0001	S
cimento x tempo secagem	1,01	1	1,01	0,57	0,4512	NS
relação a/c x tipo secagem	33,29	2	16,64	9,40	0,0001	S
relação a/c x % de $\text{CO}_2$	545,67	2	272,83	154,16	0,0000	S
relação a/c x tempo secagem	3,64	2	1,82	1,03	0,3585	NS
tipo secagem x % de $\text{CO}_2$	113,50	1	113,50	64,13	0,0000	S
tipo secagem x tempo sec.	18,11	1	18,11	10,23	0,0015	S
% de $\text{CO}_2$ x tempo secagem	0,13	1	0,13	0,07	0,7899	NS
erro	969,87	548	1,77			
total	14221,9	575				

SQ = soma de quadrados; GDL = graus de liberdade; MQ = médias quadradas; Teste F = MQG/MQR (média quadrada do grupo/média quadrada do erro); valor-p = probabilidade, distribuição t de Student; significância: S = significativo e NS = não-significativo.

Como mostra a tabela 5.3, os efeitos isolados<sup>36</sup> de todos os fatores se mostraram estatisticamente significativos. O tempo de cura submersa e o tempo de secagem apresentaram uma significância muito pequena quando comparados aos demais fatores. O percentual de CO<sub>2</sub>, seguido da relação a/c, foram os fatores mais significativos. A seguir são discutidos estes efeitos isolados. A figura 5.7 ilustra o efeito isolado do tempo de cura submersa na profundidade de carbonatação.

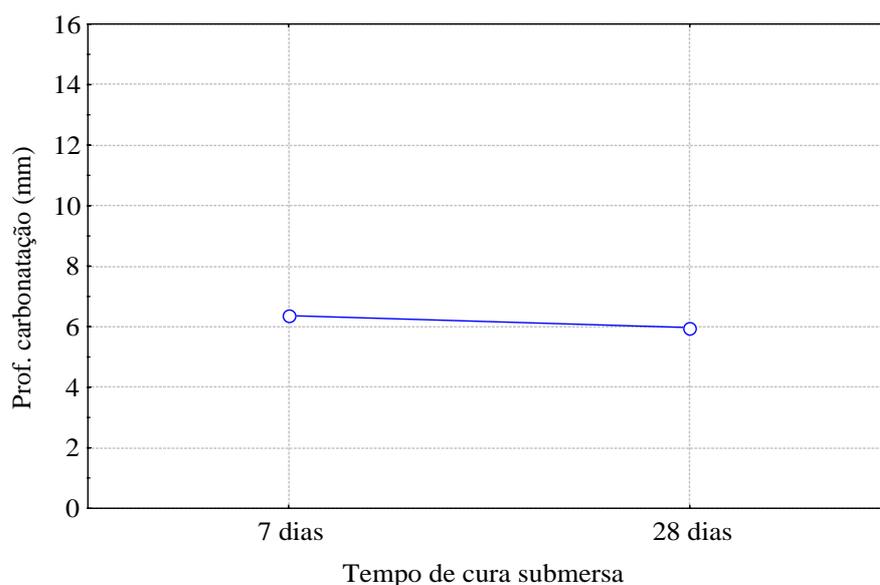


Figura 5.7: Efeito isolado do tempo de cura submersa na profundidade de carbonatação

A reta quase paralela ao eixo das abcissas da figura 5.7 indica que a  $e_c$  média com cura por 7 e 28 dias é praticamente a mesma, apresentando uma diferença de 0,4mm entre elas. Embora o tempo de cura tenha se mostrado significativo, esta significância é bastante fraca.

A razão do tempo de cura submersa ter sido estatisticamente pouco significativo pode ser função da metodologia adotada, o que permitiu aos corpos-de-prova com 7 dias de cura, um período de cura suplementar<sup>37</sup>, antes do início da carbonatação, fazendo com que os resultados se aproximassem dos resultados de 28 dias, diminuindo a importância do tempo de cura.

<sup>36</sup> O efeito isolado corresponde à média de todos os resultados empregados na análise (tabelas 5.1 e 5.2), isolando o fator que está sendo analisado.

<sup>37</sup> Ou seja, pelo fato de todas as amostras terem pelo menos 29 dias no início dos ensaios de carbonatação, o processo de hidratação pode ter tido continuidade até esta data, com a água existente na amostra, principalmente naquelas secas em sala climatizada, o que pode ter aproximado seus resultados com os obtidos pelas amostras curadas por 28 dias.

A comparação com outras pesquisas torna-se difícil, uma vez que os procedimentos de sazonalidade são diferentes, podendo afetar o resultado final. Mesmo sem a comparação direta dos valores obtidos, são apresentados os resultados de algumas pesquisas.

Ohga e Nagataki (1989, p. 282) carbonataram concretos curados em água por 7, 28 e 91 dias, e concluíram que a profundidade de carbonatação em proporção com a raiz do tempo, independe, entre outros fatores, da cura inicial. Os resultados encontrados por eles, contrariam o conhecimento difundido a respeito do tempo de cura inicial. Resultados semelhantes aos de Ohga e Nagataki são apresentados por Vaghetti (1999, p. 79), que curou seus corpos-de-prova em câmara úmida por 7 dias e depois os colocou em ambiente de laboratório até 28 ou 91 dias. O coeficiente de carbonatação foi maior para as amostras que seguiram para a carbonatação após 91 dias, ou seja, aumentando o tempo antes da exposição ao CO<sub>2</sub>, aumentou a carbonatação, o que mostra que um comportamento diferente do esperado. Nepomuceno (1992, p. 208) também chegou à conclusão que há tendência de despassivação mais rápida nos concretos curados por 7 dias que por 1 dia. O pesquisador explica que as amostras curadas por 7 dias têm mais água (no início do ensaio) que as curadas por 1 dia podendo favorecer a despassivação.

Estudando tempos de cura de 7 e 28 dias, Lopes (1999, p. 130) e Monteiro (1996, p. 116) observaram que as amostras curadas por 28 dias carbonatam menos que as curadas por 7 dias. Monteiro (1996, p. 116) destaca que a relação a/c menor (no caso, 0,40) foi a mais prejudicada pela diminuição do tempo de cura, o que contradiz Dal Molin (1995, p. 156) que ressalta que quanto maior a relação a/c, maiores devem ser os cuidados com a cura. Embora a carbonatação encontrada por Lopes e Monteiro tenha sido maior nas amostras curadas por menos tempo, não foi apresentada análise estatística para verificar a significância desse fator.

Balayssac et al. (1995, p. 92) estudaram tempos de cura de 1, 3 e 28 dias. Passando a cura de 1 para 28 dias, a profundidade de carbonatação reduziu pela metade após 18 meses de exposição. Os autores verificaram que quanto menor o consumo de cimento, menor pode ser o tempo de cura. Cabe ressaltar, que essa afirmação é válida para uma mesma relação a/c.

Há estudos que fazem combinações de tempos e tipos de cura (em água e ao ar). Lo e Lee (2002, p. 510) curaram amostras de concretos por 28 dias ao ar e em água e após 30 dias de exposição em 2% de CO<sub>2</sub> a profundidade de carbonatação das amostras curadas em água é 61% das curadas ao ar, após 3 meses a diferença é estável em 78%. Dhir et al. (1989, p. 138)

compararam o efeito de diferentes períodos de cura submersa com cura ao ar (UR de 55% e temperatura de 20°C) e constaram que a redução da cura inicial, de 4 dias para 1 dia, aumenta a profundidade de carbonatação em mais de 80% após 20 semanas de exposição (4% de CO<sub>2</sub>). Fattuhi (1988, p. 428), comparando cura submersa e ao ar, coloca que 28 dias de cura submersa correspondem a 17% da carbonatação das amostras curadas ao ar pelo mesmo período.

As considerações dos trabalhos citados acima, indicam que ainda há muito a ser estudado a respeito das formas e tempos de cura, quando relacionados com a carbonatação.

O efeito isolado do tipo de cimento na profundidade de carbonatação foi estatisticamente significativo e é ilustrado na figura 5.8.

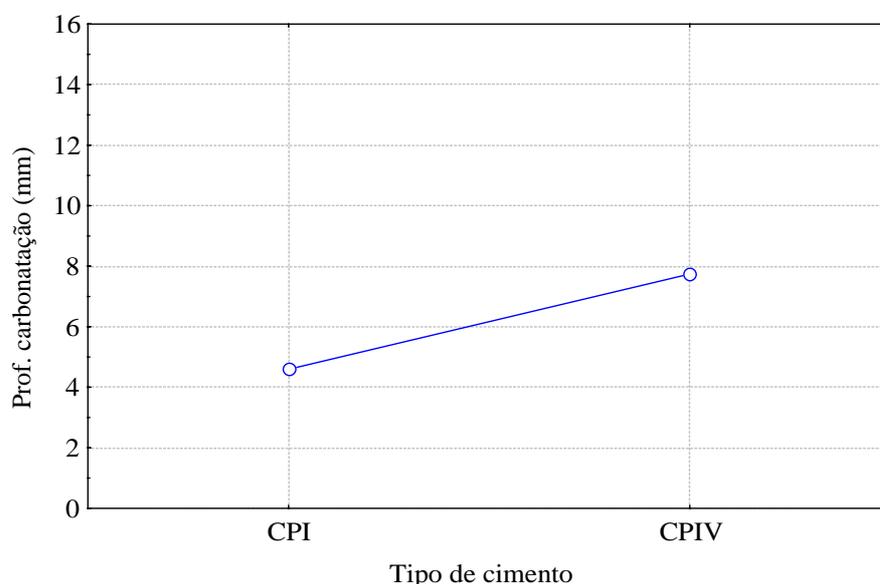


Figura 5.8: Efeito isolado do tipo de cimento na profundidade de carbonatação

A figura 5.8 mostra que a carbonatação média do CPI-S é de 4,60mm enquanto que do CPIV de 7,75mm, o que indica que as argamassas moldadas com CPIV carbonataram, em média, cerca de 1,68 vezes mais que as moldadas com CPI-S.

A literatura (BAUER, 1995, p. 192; BRANCA et al., 1993, p. 250; HAMADA, 1969, p. 347; ISAIA, 1995, p. 210; PAPADAKIS et al., 1992, p. 129; PAPADAKIS, 2000, p. 293; VAGHETTI, 1999, p. 69; VENQUIARUTO, 2002, p. 83, entre outros) coloca que os cimentos com adições pozolânicas geralmente proporcionam profundidades de carbonatação superiores aos cimentos sem essas adições, o que foi confirmado pelos resultados obtidos.

Conforme verificado na bibliografia consultada, item 3.3.2.1, isso ocorre porque a reserva alcalina é menor nos cimentos com menor quantidade de clínquer, e além disso, as reações pozolânicas ajudam a consumir o  $\text{Ca(OH)}_2$ .

Nos ensaios realizados por Isaia (1995, p. 208), todos traços com pozolanas carbonataram mais que os de referência para igual resistência. O autor coloca que as reações pozolânicas podem ter sido prejudicadas pelas reações de carbonatação e sugere que se utilizem períodos de cura mais dilatados, entre 60 e 90 dias, para que as reações de hidratação ocorram antes das de carbonatação.

Os resultados obtidos no presente estudo mais uma vez corroboraram o comportamento do tipo de cimento com relação a profundidade de carbonatação, o que parece ser de consenso no meio técnico.

A figura 5.9 ilustra o efeito isolado da relação a/c na profundidade de carbonatação, o qual foi estatisticamente significativo.

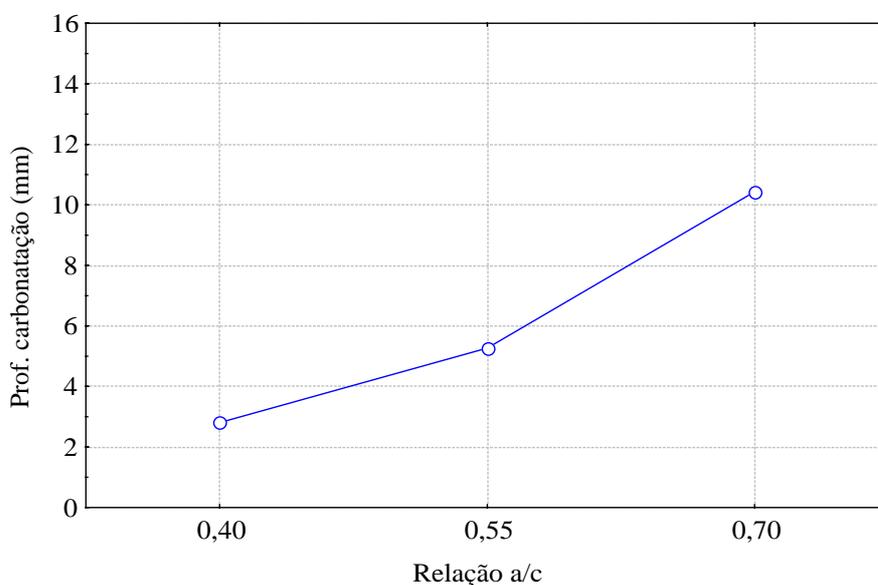


Figura 5.9: Efeito isolado da relação a/c na profundidade de carbonatação

O efeito da relação a/c já é bastante conhecido e como mostra a figura 5.9, seu efeito se mostrou estatisticamente significativo. Aumentando a relação a/c de 0,40 para 0,55, tem-se um incremento na profundidade de carbonatação em torno de 88%, no entanto, passando da relação a/c 0,55 para a relação a/c 0,70, esse aumento é de cerca de 98%. Quanto maior a

relação, maior a profundidade de carbonatação, independentemente de quaisquer outros fatores, sendo este comportamento de consenso e constatado por inúmeros pesquisadores (ABREU, 2004; BAUER, 1995, PAPADAKIS et al., 1991b; SEIDLER, 1999, entre outros).

Nos resultados encontrados por Kulakowski (2002, p. 100), a carbonatação foi desprezível para concretos e argamassas menos porosos (relação  $a/agl \leq 0,50$ ), mesmo após 126 dias de carbonatação acelerada. Da mesma forma, Venquiaruto (2002, p. 82) verificou que a carbonatação dos concretos com relação  $a/agl^{38}$  0,35, de diversas misturas (referência com CPV, com substituição de 25% do cimento por cinza volante e cinza de casca de arroz e 8% por sílica ativa), foi nula, após 84 dias de exposição ao  $CO_2$ .

No entanto, os resultados desta pesquisa mostraram que em algumas argamassas com relação  $a/c$  de 0,40 houve carbonatação após 28 dias de exposição ao  $CO_2$ , indicando que este comportamento pode estar relacionado com o tempo e tipo de cura (quando comparado com as pesquisas realizadas por Kulakowski (2002, p. 54) e Venquiaruto (2002, p. 55)) e forma de sazonalidade.

Na figura 5.10 é ilustrado o efeito isolado do tipo de secagem na profundidade de carbonatação, o qual foi estatisticamente significativo.

A figura 5.10 indica que as amostras que foram secas na estufa carbonataram cerca de 54% a mais que aquelas secas na sala climatizada. Este comportamento mostra que o tipo de secagem também se mostrou estatisticamente significativo, indicando que a secagem recomendada pela RILEM (1999) no TC 116-PCD propicia condições que favorecem a carbonatação. Embora ambos tipos de secagem (climatizada e estufa) tenham sido desenvolvidos para umidade relativa de  $70 \pm 5\%$ , a umidade interna das amostras, em função dos procedimentos de cada método, pode ter ficado diferente, alterando as condições de carbonatação. Esta diferença pode ser visualizada comparando a massa dos corpos-de-prova ao final dos procedimentos de sazonalidade, apresentadas nos apêndices B e D.

---

<sup>38</sup> Relação água/aglomerante. Como o emprego das pozolanas foi feito por substituição, a relação  $a/agl$  equivale à relação  $a/c$  deste trabalho.

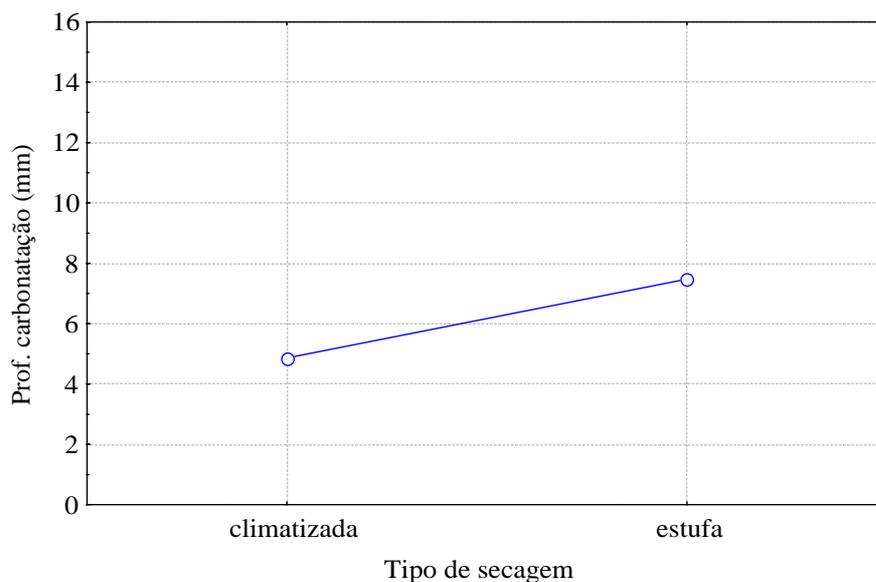


Figura 5.10: Efeito isolado do tipo de secagem na profundidade de carbonatação

Embora ainda não se tenha comprovação científica a respeito dessa diferença de massa, ao final do procedimento de secagem, supõem-se, que as argamassas secas em sala climatizada tenham formado uma quantidade maior de produtos de hidratação (favorecida pelo tipo de secagem) e/ou que a quantidade de água perdida até o equilíbrio tenha sido menor que aquela perdida pelas argamassas secas em estufa. Caso sejam verdadeiras, ambas as hipóteses contribuem para o fechamento dos poros, dificultando o acesso ao  $\text{CO}_2$  e em consequência, diminuindo a profundidade carbonatada.

Sarría (1997, p.79) mediu a umidade interna e externa de corpos-de-prova expostos em câmaras climatizadas com diferentes umidades e constatou que a umidade interna é sempre maior que a umidade relativa externa à amostra.

Sanjuán<sup>39</sup> (1992, apud BAUER, 1995, p. 121) enfatiza a necessidade de igualdade de umidade nos poros, através de um condicionamento. Bauer (1995, p. 122) coloca que geralmente se estabilizam as condições de umidade dos poros e não se uniformizam as umidades de diferentes séries. Para relações a/c diferentes, fica difícil alcançar condições equivalentes entre séries. Elevados teores de pasta, ou seja, elevados consumos de cimento, resultam em diminuição na  $I_{\text{corr}}$  (BAUER, 1995, p. 182). O autor atribui isso a menor eficiência da etapa de

<sup>39</sup> SANJUÁN, M. A. **Cálculo del período de iniciación de la corrosión de la armadura del horigón**. 1992. Tesis (Doctoral). Facultad de Ciências, Universidad Complutense de Madrid, Madrid-España, 1992.

secagem quando se tem maior volume de pasta, aumentando o volume de poros não atingidos pela secagem, influenciando na variação de massa. Em função disso, Nepomuceno (1992, p. 306) considera que o condicionamento parece ser um fator importante para caracterizar a resistência à carbonatação de diferentes materiais, já que a corrosão dependerá da quantidade de umidade disponível.

A figura 5.11 ilustra o efeito isolado do percentual de  $\text{CO}_2$  na profundidade de carbonatação, que se mostrou estatisticamente significativo. O efeito bastante significativo dos percentuais de  $\text{CO}_2$  utilizados foi um fator que causou surpresa, ainda mais pelo fato das amostras carbonatadas em câmara saturada de  $\text{CO}_2$  apresentarem profundidades de carbonatação inferiores às carbonatadas com 6%. A figura 5.11 mostra, que as amostras ensaiadas com 6% de  $\text{CO}_2$  carbonataram, em média, 2,16 vezes mais que aquelas ensaiadas em câmara saturada de  $\text{CO}_2$ , ou seja, mais que o dobro.

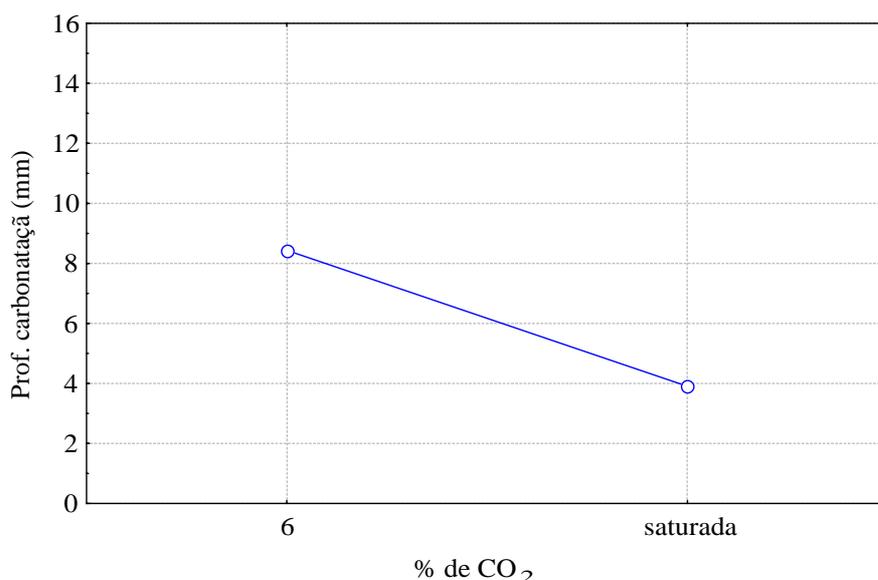


Figura 5.11: Efeito isolado do percentual de  $\text{CO}_2$  na profundidade de carbonatação

Abreu (2004, p. 82) analisou a carbonatação de concretos após 62 dias de exposição a percentuais de  $\text{CO}_2$  de 5% e próximo da saturação e constatou, que o fator isolado da concentração de  $\text{CO}_2$  não foi significativo. No entanto, em percentuais de 5%, as amostras carbonataram mais que na concentração próxima a saturação. O percentual de  $\text{CO}_2$  apresentou efeito significativo na microestrutura do concreto (através de ensaio de absorção), sendo que os concretos carbonatados com 5% de  $\text{CO}_2$  se apresentaram mais porosos (ABREU, 2004, p. 115).

O modelo do processo de carbonatação das estruturas de concreto armado, desenvolvido por Saetta e Vitaliani (2004, p. 576), foi por eles aplicado, em diferentes casos de estudo, para verificar como a variabilidade dos parâmetros envolvidos influenciam na taxa de iniciação da corrosão. Os pesquisadores chegaram à conclusão que um dos parâmetros que mais afeta a taxa de carbonatação é a concentração de  $\text{CO}_2$ . Saetta e Vitaliani (2004, p. 576) e Abreu (2004, p. 82) supõem, que, se a reação é rápida, a massa de  $\text{CaCO}_3$  produzida em um dado intervalo de tempo, coincide com a liberação de uma quantidade de água maior que aquela que a porosidade da matriz é capaz de expelir, no mesmo intervalo de tempo, e, alcançando condições de equilíbrio baixa a velocidade de propagação da frente de carbonatação. Saetta e Vitaliani, ainda colocam, que semelhantemente, a quantidade de  $\text{CO}_2$  consumida durante a reação pode ser maior que o gás que pode difundir através do concreto no mesmo intervalo de tempo, o que novamente retardaria o fenômeno. Em resumo, Saetta e Vitaliani e Abreu, consideram que ao aumentar excessivamente a concentração de  $\text{CO}_2$ , a velocidade de carbonatação é reduzida.

A ocorrência das condições anteriormente citadas poderia explicar o fato da profundidade de carbonatação em câmara saturada de  $\text{CO}_2$  ser menor que em 6%. No entanto, essas afirmações ainda necessitam de comprovação realizando análises de microestrutura antes de serem tomadas como verdadeiras.

Entretanto, Sanjuán e Olmo (2001, p. 951) realizaram ensaios em atmosferas com 5, 20 e 100% de  $\text{CO}_2$ , sendo que a profundidade de carbonatação foi maior nos corpos-de-prova carbonatados com percentual de 100%. Os pesquisadores calcularam os coeficientes de difusão do  $\text{CO}_2$ , e encontraram valores incomuns, na prática, para o percentual de 100%.

Em outro trabalho, comparando a perda de massa de pastas totalmente carbonatadas a 100% de  $\text{CO}_2$  e ao natural, por termogravimetria (TG), Kazmierczak e Lindenmeyer (1996, p. 410) constataram que a mesma é maior nos exemplares submetidos à carbonatação acelerada. Esse dado pode sugerir que em concentrações de  $\text{CO}_2$  mais elevadas, há maior quantidade de produtos da carbonatação ou que os cristais obtidos nesta condição são mais densos.

Alonso<sup>40</sup> (1986 apud ABREU, 2004, p. 36) explica que o excesso de  $\text{CO}_2$  baixando o pH da solução dos poros provoca dissolução do  $\text{CaCO}_3$ , formando bicarbonato de cálcio, que é mais

---

<sup>40</sup> ALONSO, C. **Estudio de la corrosion de armaduras en hormigón carbonatado**. 1986, 360f Tesis (Doctoral). Facultad de Ciências, Universidad Complutense de Madrid, Madrid-España, 1986.

solúvel. Roy et al. (1999, p. 603) e Nepomuceno (1992, p. 304) também dizem que altas concentrações podem gerar diferentes produtos, no entanto, Nepomuceno coloca que esse comportamento é o mesmo para diferentes materiais.

No presente trabalho, a frente de carbonatação das amostras submetidas a 6% de CO<sub>2</sub>, em geral, se mostrou mais definida, ou seja, apresentou maior facilidade de determinação da mesma, quando comparada com as amostras ensaiadas em câmara saturada de CO<sub>2</sub>. Esta observação também foi feita por Sanjuán e Olmo (2001, p. 951) e Abreu (2004, p. 85), que ressaltam que a carbonatação em ensaios acelerados, mas com percentuais de CO<sub>2</sub> menores (20 e 5%), apresentaram uma frente mais homogênea que em altos teores (100% e próximo a saturação de CO<sub>2</sub>).

A bibliografia que contempla ensaios de carbonatação acelerada, com diferentes percentuais de CO<sub>2</sub>, é bastante escassa. Não há consenso a respeito do comportamento da carbonatação, em ensaios acelerados, entre os trabalhos consultados (ABREU, 2004; SANJUÁN; OLMO, 2001) e os resultados obtidos na presente pesquisa. Desta forma, mais ensaios devem ser feitos para conhecer melhor o efeito de diferentes percentuais de CO<sub>2</sub>.

O efeito isolado do tempo de secagem na profundidade de carbonatação foi estatisticamente significativo e é apresentado na figura 5.12.

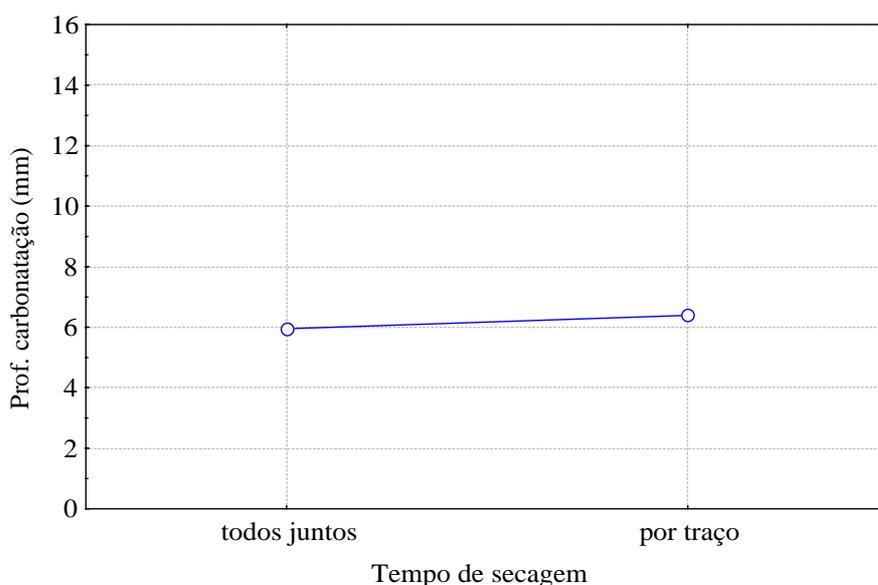


Figura 5.12: Efeito isolado do tempo de secagem na profundidade de carbonatação

Analisando a figura 5.12, é possível perceber que quando as amostras seguem para o ensaio acelerado de carbonatação logo após alcançarem as condições preestabelecidas (por traço), a profundidade de carbonatação é ligeiramente superior que quando todas as amostras iniciam o ensaio juntas. O tempo de secagem foi considerado estatisticamente significativo, no entanto, com uma significância mais fraca quando comparado a outros fatores. Além disso, apenas uma, das cinco interações com este fator, foi significativa. Com base nesses dados, pode-se considerar que o fator tempo de secagem possui pouco efeito prático e a forma com que as amostras seguem para o ensaio (idades iguais ou diferentes) praticamente não influenciam seus resultados.

Em geral, o período de tempo no qual as amostras seguiram para o ensaio de carbonatação acelerada após atingirem as condições preestabelecidas (por traço) foi um pouco inferior àquele no qual todas iniciaram o ensaio com a mesma idade. Os corpos-de-prova do bloco 3 iniciaram o ensaio de carbonatação até 19 dias antes do bloco 1 (mesma idade de cura submersa, igual a 28 dias), e do bloco 4 até 15 dias antes do bloco 2 (cura de 7 dias).

A seguir são ilustradas as interações de primeira ordem, que combinam duas variáveis, que se mostraram significativas na análise de variância. Na figura 5.13 é ilustrada a relação entre o tempo de cura submersa e o tipo de cimento na profundidade de carbonatação.

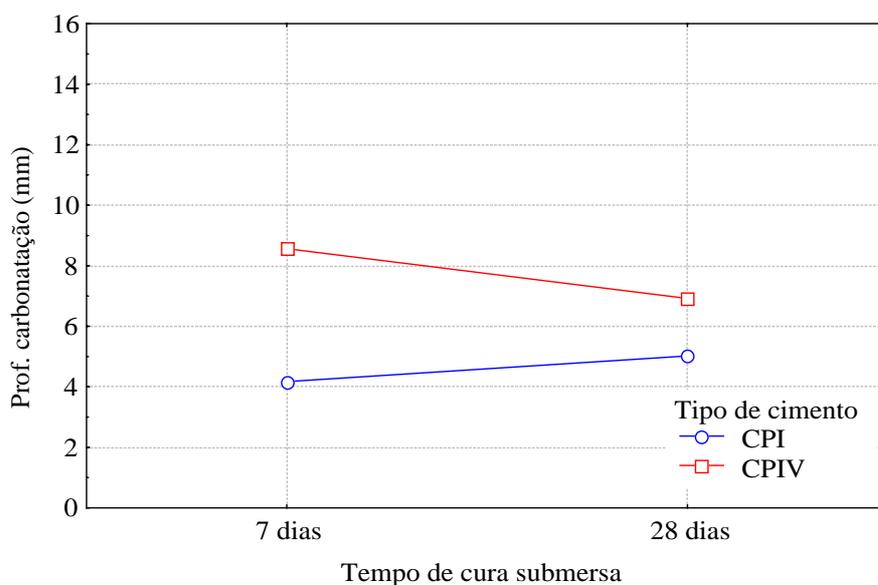


Figura 5.13: Interação entre o tempo de cura submersa e o tipo de cimento na profundidade de carbonatação

A figura 5.13 indica que a carbonatação foi afetada pelo tempo de cura inicial para o cimento CPIV, diminuindo com o aumento desse tempo (cerca de 21%), enquanto que para o cimento CPI-S, aumentando o tempo de cura, a carbonatação também aumenta (cerca de 20%). A maior influência do tempo de cura submersa na carbonatação é verificado aos 7 dias, sendo que os dois tipos de cimento diferem cerca de 2,05 vezes, enquanto que aos 28 dias essa diferença é de cerca de 1,38 vezes.

Ohga e Nagataki (1989, p. 282) constataram que o coeficiente de carbonatação de cimentos com cinza volante é mais afetado pela cura inicial que aqueles sem a pozolana. Balayssac et al. (1995, p. 92) estudaram tempos de cura de 1, 3 e 28 dias. A cura de 1 para 28 dias reduziu a profundidade de carbonatação pela metade após 18 meses de exposição, no entanto o efeito da cura dependeu do tipo de cimento, como encontrado nos resultados desta pesquisa.

Em uma primeira análise, o comportamento do cimento CPI-S parece ilógico. Observa-se, entretanto, uma forte influência dos corpos-de-prova submetidos à carbonatação em câmara saturada de  $\text{CO}_2$  neste comportamento, conforme visualizado na figura 5.14, que ilustra a relação entre o tempo de cura submersa e o percentual de  $\text{CO}_2$  na profundidade de carbonatação.

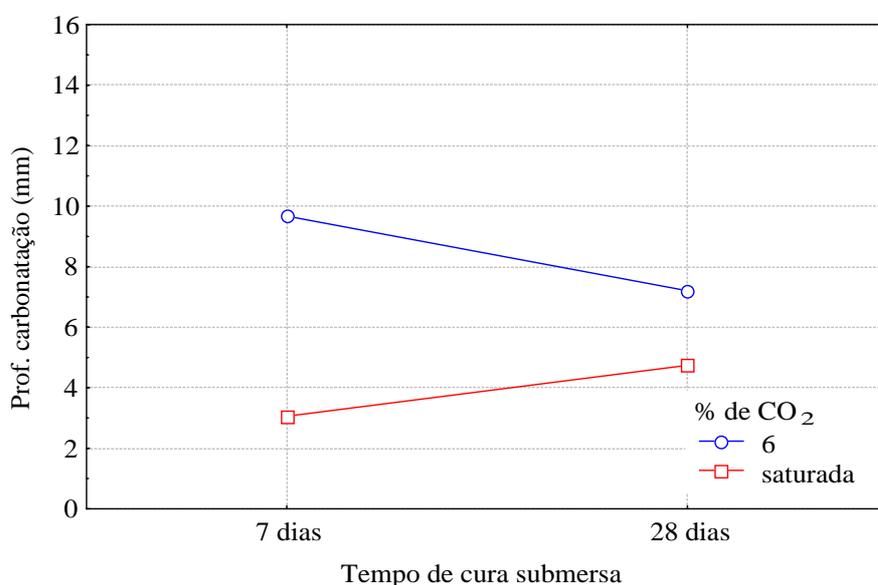


Figura 5.14: Interação entre o tempo de cura submersa e o percentual de  $\text{CO}_2$  na profundidade de carbonatação

A figura 5.14 indica a interação significativa entre o percentual de  $\text{CO}_2$  e o tempo de cura submersa, sendo que ao passar a cura de 7 para 28 dias, tem-se, em média, um decréscimo de

25% na profundidade de carbonatação, com 6% de  $\text{CO}_2$ , ao passo que em câmara saturada de  $\text{CO}_2$ , tem-se um acréscimo desse valor, em torno de 55%.

Analogamente ao ocorrido na interação representada na figura 5.13, apresentada anteriormente, a influência do percentual de  $\text{CO}_2$  é mais evidente na cura de 7 dias, onde a variação entre aos dois percentuais é de cerca de 6,61mm, enquanto na cura de 28 dias essa diferença fica em torno de 2,46mm.

Conforme a tabela 5.3, o valor do “teste F” da interação entre o tempo de cura submersa e o tipo de cimento é de 127,07, e da interação entre o tempo de cura submersa e o percentual de  $\text{CO}_2$ , é de 350,61. Comparando esses valores, verifica-se que a interação com o percentual de  $\text{CO}_2$  é 2,76 vezes mais forte, indicando que o comportamento do cimento CPI-S, da figura 5.13, foi mascarado pelo percentual de  $\text{CO}_2$ , como mostra a figura 5.15, que ilustra a interação de segunda ordem<sup>41</sup> entre o tempo de cura submersa, tipo de cimento e percentual de  $\text{CO}_2$  na profundidade de carbonatação.

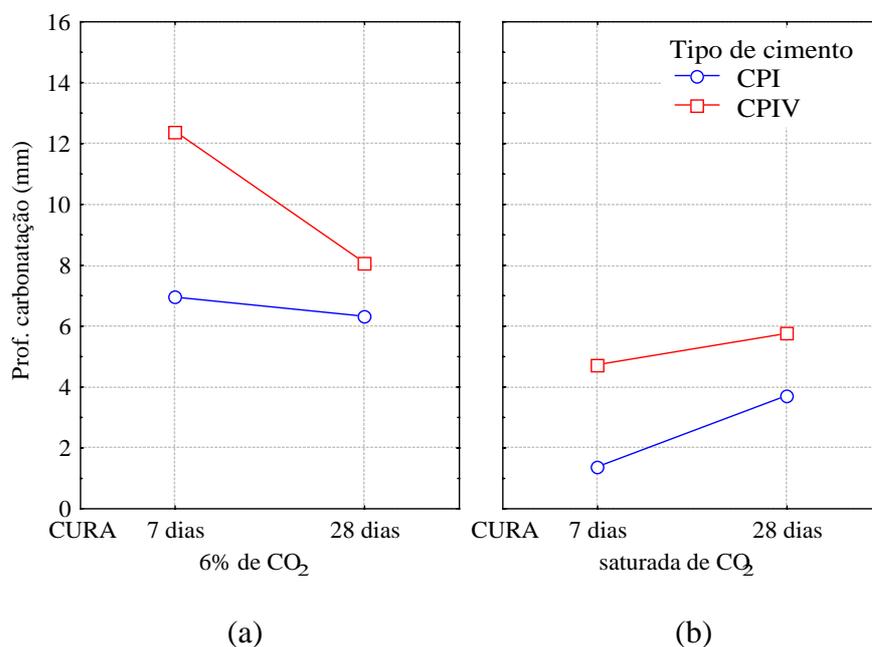


Figura 5.15: Interação entre o tempo de cura submersa e o tipo de cimento para: (a) 6% de  $\text{CO}_2$  e (b) câmara saturada de  $\text{CO}_2$ , na profundidade de carbonatação

<sup>41</sup> Na análise de variância, foram consideradas apenas as interações de primeira ordem (as que envolvem duas variáveis), sendo as demais, agregadas ao termo de erro. No entanto, a figura 5.15 auxilia no entendimento de outras duas interações.

A figura 5.15 confirma que o comportamento do CPI-S, com relação ao tempo de cura submersa, foi contrário ao esperado em função dos resultados de carbonatação ensaiadas em câmara saturada de  $\text{CO}_2$ . Analisando os resultados da câmara saturada de  $\text{CO}_2$  (figura 5.15 (b)), percebe-se que para os dois tipos de cimento a carbonatação foi maior quando a cura foi de 28 dias. Entretanto, isso não foi verificado na interação entre o tempo de cura e o tipo de cimento (figura 5.13), pois a diminuição na carbonatação do CPIV, ao passar a cura de 7 para 28 dias, é bastante relevante (decréscimo de cerca de 35%). Ainda, pode-se ressaltar que quando utilizado o percentual de  $\text{CO}_2$  mais baixo (6%), a profundidade de carbonatação decresce, para ambos os tipos de cimento, quando a cura passa de 7 para 28 dias, sendo o CPIV mais influenciado pelo tempo de cura submersa.

Na figura 5.16 é ilustrada a interação, estatisticamente significativa, entre o tempo de cura submersa e o tipo de secagem na profundidade de carbonatação.

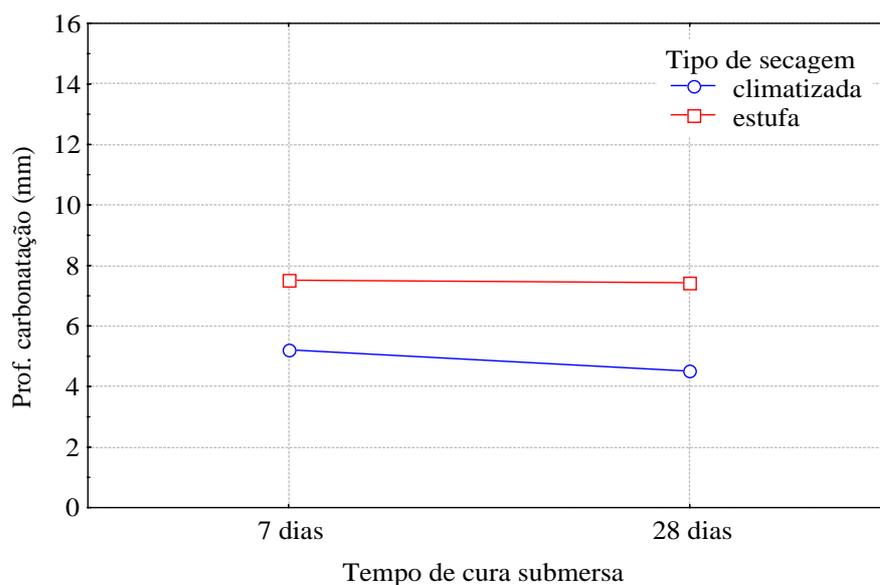


Figura 5.16: Interação entre o tempo de cura submersa e o tipo de secagem na profundidade de carbonatação

A reta da secagem em estufa da figura 5.16 é praticamente paralela ao eixo x, o que indica que quando a secagem é realizada em estufa, não há diferença entre curar as amostras por 7 ou 28 dias. Mas se a secagem for realizada em sala climatizada, tem-se uma redução média de 14% na profundidade de carbonatação, ao passar a cura de 7 para 28 dias.

As amostras que foram curadas por 28 dias precisaram, em geral, de mais tempo para atingir as condições preestabelecidas em cada tipo de secagem (o que pode ser verificado no

apêndice A). Isso está em concordância com Nepomuceno (1992, p. 306), que coloca que as amostras curadas por mais tempo retêm mais umidade e possuem uma porosidade menor. Além disso a hidratação é diferente e por isso a estrutura é mais porosa quanto menor for o tempo de cura.

A figura 5.17 ilustra a interação, estatisticamente significativa, entre o tipo de cimento e o tipo de secagem na profundidade de carbonatação.

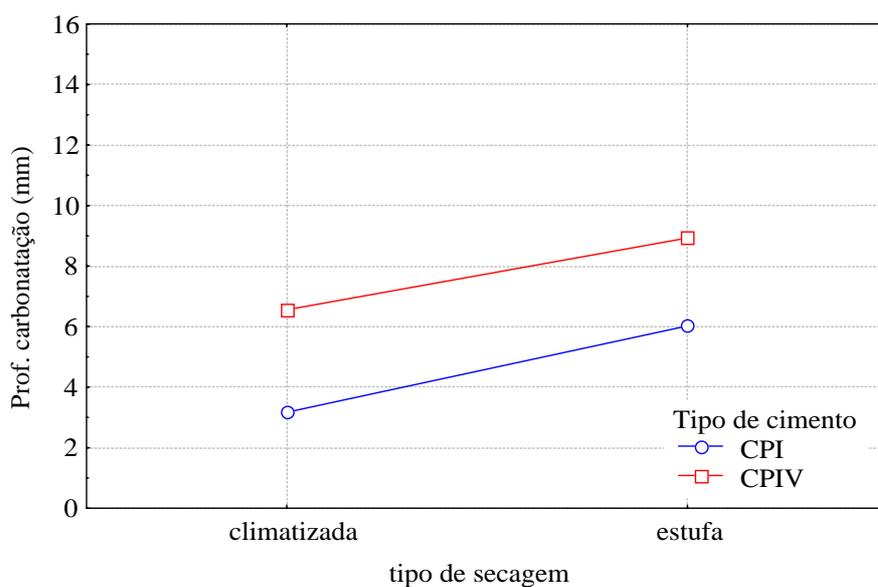


Figura 5.17: Interação entre o tipo de cimento e o tipo de secagem na profundidade de carbonatação

A inclinação das retas dos dois tipos de secagem, na figura 5.17, é praticamente igual, o que indica que para ambos os cimentos há um crescimento semelhante da profundidade de carbonatação quando o tipo de secagem passa da sala climatizada para a estufa. Esse comportamento caracteriza uma interação estatisticamente pouco significativa. Na secagem em sala climatizada, a diferença na  $e_c$  entre o CPI-S e o CPIV, é de 3,39mm, enquanto que na secagem em estufa, essa diferença é de 2,91mm.

A interação entre o tipo de cimento e o percentual de  $\text{CO}_2$  na profundidade de carbonatação, a qual foi significativa pela análise de variância, é apresentada na figura 5.18.

Da mesma forma que na figura 5.17, as retas dos dois tipos de cimento da figura 5.18 são quase paralelas, indicando que o comportamento dos dois cimentos é praticamente igual. Embora seja praticamente imperceptível pelo gráfico, a diferença entre os tipos de cimento é ligeiramente maior para o percentual de  $\text{CO}_2$  de 6%. A profundidade de carbonatação do

cimento CPI-S em câmara saturada de  $\text{CO}_2$  corresponde, apenas, a cerca de 38% da carbonatação do mesmo cimento, a 6% de  $\text{CO}_2$ . Para o cimento CPIV esse valor corresponde, em média, a 51% da carbonatação a 6% de  $\text{CO}_2$ .

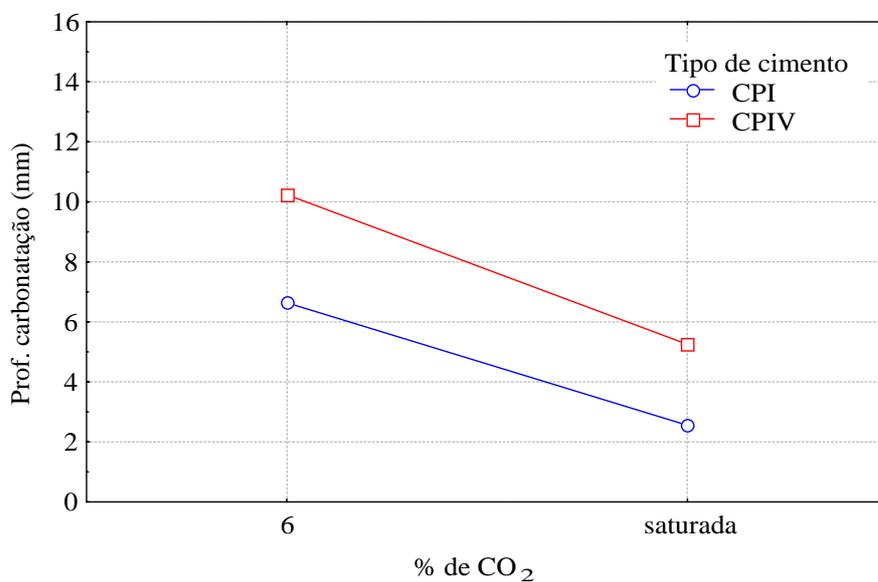


Figura 5.18: Interação entre o tipo de cimento e o percentual de  $\text{CO}_2$  na profundidade de carbonatação

Na figura 5.19 é apresentada a interação, estatisticamente significativa, entre o tempo de cura submersa e a relação a/c na profundidade de carbonatação.

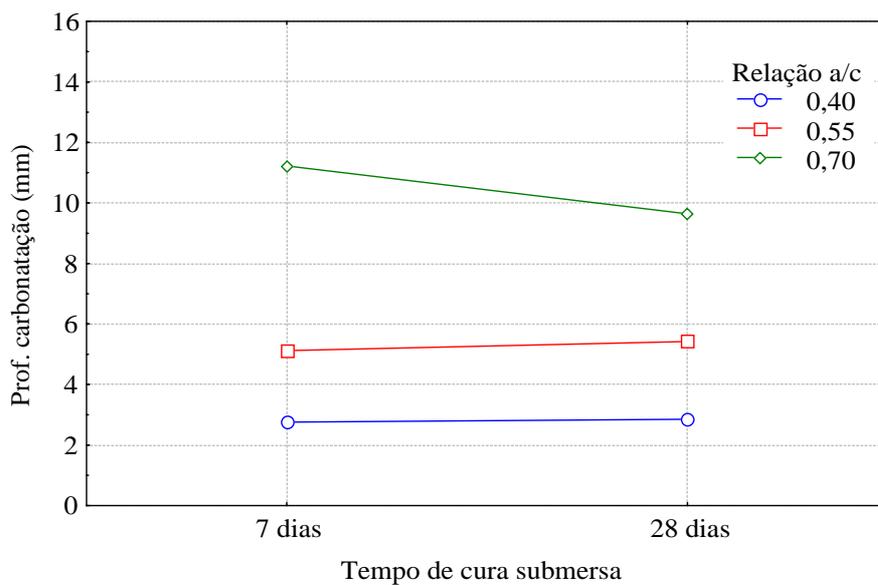


Figura 5.19: Interação entre o tempo de cura submersa e a relação a/c na profundidade de carbonatação

A figura 5.19 mostra que a  $e_c$  cresce com o aumento da relação  $a/c$ , como esperado. Entretanto, enquanto que para as relações  $a/c$  iguais a 0,40 e 0,55 o tempo de cura parece não exercer muita influência, para a relação  $a/c$  0,70, o incremento de 7 para 28 dias no tempo de cura promove uma diminuição média de 14% na  $e_c$ .

Esses resultados estão em concordância com Dal Molin (1995, p. 156), que concluiu que as relações  $a/c$  maiores são mais afetadas pela diminuição do tempo de cura, e contradizem Monteiro (1996, p. 116), que destaca que em seus ensaios, a relação  $a/c$  menor (no caso, 0,40) foi a mais prejudicada pela diminuição do tempo de cura.

A figura 5.20 mostra a interação entre o tipo de cimento e a relação  $a/c$  na profundidade de carbonatação, que conforme a análise estatística, se mostrou significativa.

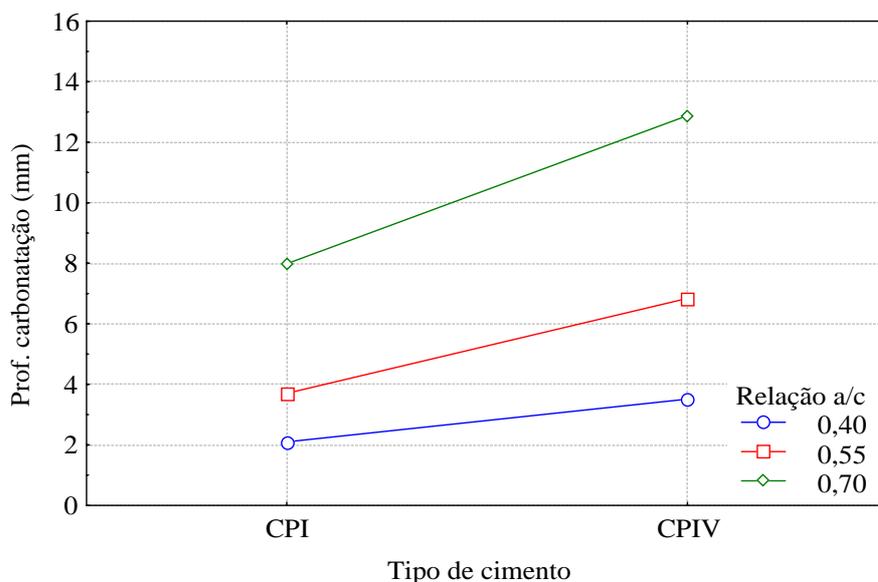


Figura 5.20: Interação entre o tipo de cimento e a relação  $a/c$  na profundidade de carbonatação

De acordo com o conhecimento já bem difundido do comportamento da relação  $a/c$ , o seu aumento implica num aumento de  $e_c$ , sendo que as diferenças desse aumento são mais visíveis no cimento CPIV.

Para um mesmo tipo de cimento, há um acréscimo mais relevante na  $e_c$ , ao passar de uma relação  $a/c$  0,55 para 0,70 (acrécimo de 4,28mm para CPI-S, e de 6,04mm para CPIV), quando comparado com a passagem de uma relação  $a/c$  0,40 para 0,55 (acrécimo de 1,60mm para CPI-S, e de 3,33mm para CPIV) .

A figura 5.21 ilustra a interação, estatisticamente significativa, entre o tipo de secagem e a relação a/c na profundidade de carbonatação.

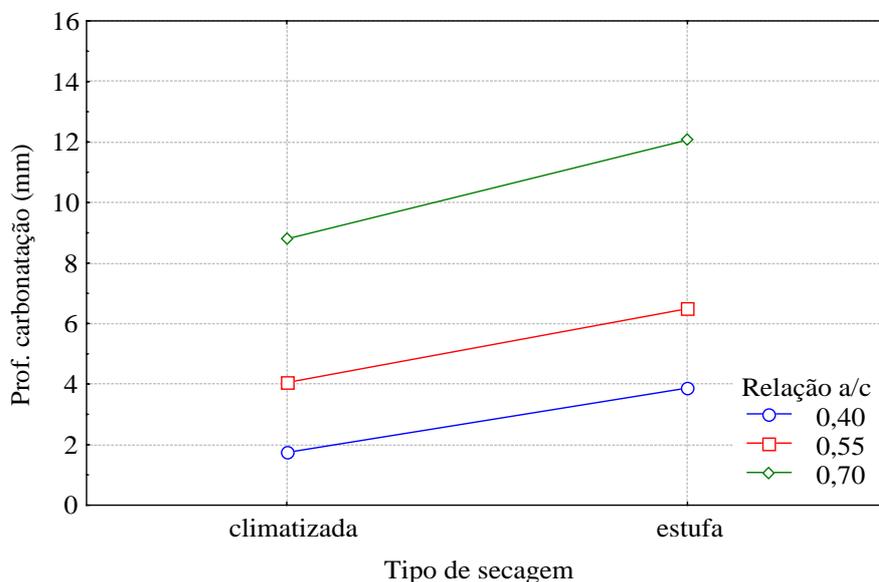


Figura 5.21: Interação entre o tipo de secagem e a relação a/c na profundidade de carbonatação

O comportamento das retas da figura 5.21 é análogo ao ilustrado na figura anterior (figura 5.20), porém com maior paralelismo entre as retas, indicando que essa interação possui uma significância menor. No caso do tipo de secagem, para a relação a/c 0,40, a  $e_c$  das amostras secas em estufa é 2,22 vezes maior que a  $e_c$  das que foram secas em sala climatizada, para a relação a/c 0,55 esse valor é 1,60 vezes maior, e para a relação a/c 0,70, 1,37 vezes maior.

Para um mesmo tipo de secagem, passar de uma relação a/c média (0,55), para uma relação a/c alta (0,70), implica num aumento mais substancial da  $e_c$ , quando comparado com o incremento de uma relação a/c baixa (0,40), para média (0,55).

A interação, estatisticamente significativa, entre o percentual de  $\text{CO}_2$  e a relação a/c na profundidade de carbonatação é apresentada na figura 5.22.

A figura 5.22 indica que para todas as relações a/c, a  $e_c$  em 6% de  $\text{CO}_2$  é maior que o dobro da  $e_c$  em câmara saturada de  $\text{CO}_2$ . As distâncias entre as diferentes relações a/c são maiores para o percentual de 6% de  $\text{CO}_2$ , especialmente quando se passa da relação a/c 0,55, para a relação a/c 0,70.

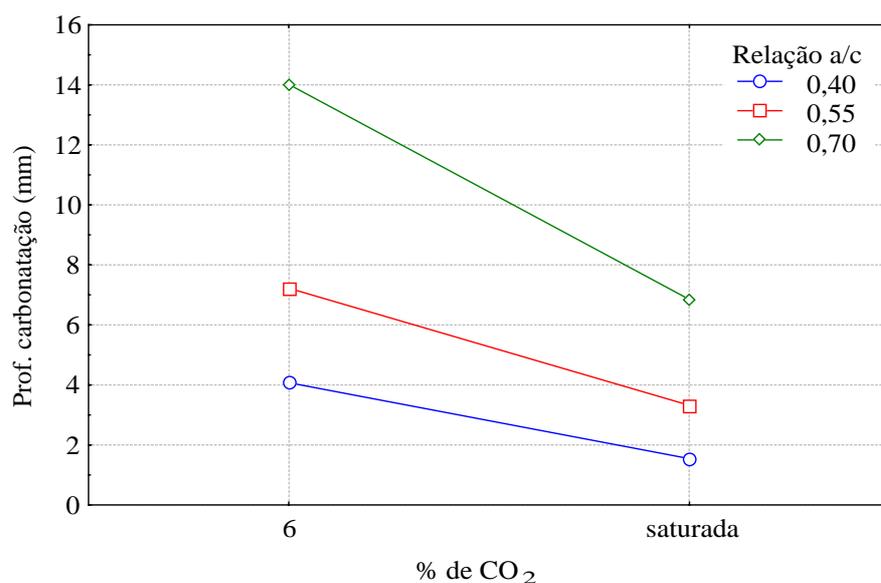


Figura 5.22: Interação entre o tipo de cimento e o percentual de CO<sub>2</sub> na profundidade de carbonatação

Na figura 5.23 é ilustrada a interação entre o tipo de secagem e o percentual de CO<sub>2</sub> na profundidade de carbonatação, a qual foi significativa na análise de variância.

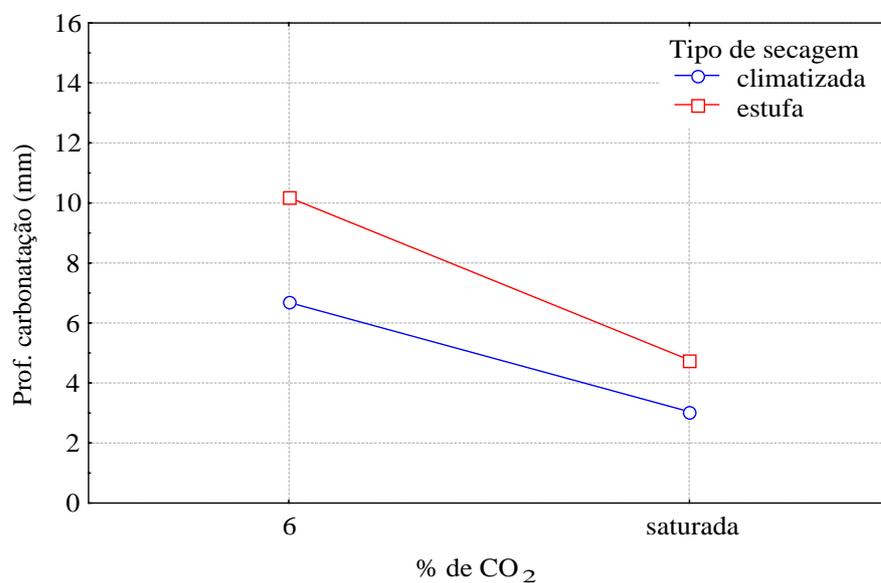


Figura 5.23: Interação entre o tipo de secagem e o percentual de CO<sub>2</sub> na profundidade de carbonatação

A profundidade de carbonatação para secagem em estufa é 2,14 vezes maior na câmara com 6% de CO<sub>2</sub> em relação a saturada de CO<sub>2</sub>, e para a secagem em sala climatizada, 2,20 vezes maior, conforme indicado na figura 5.23.

A figura 5.24 apresenta a interação, estatisticamente significativa, entre o tipo e o tempo de secagem na profundidade de carbonatação.

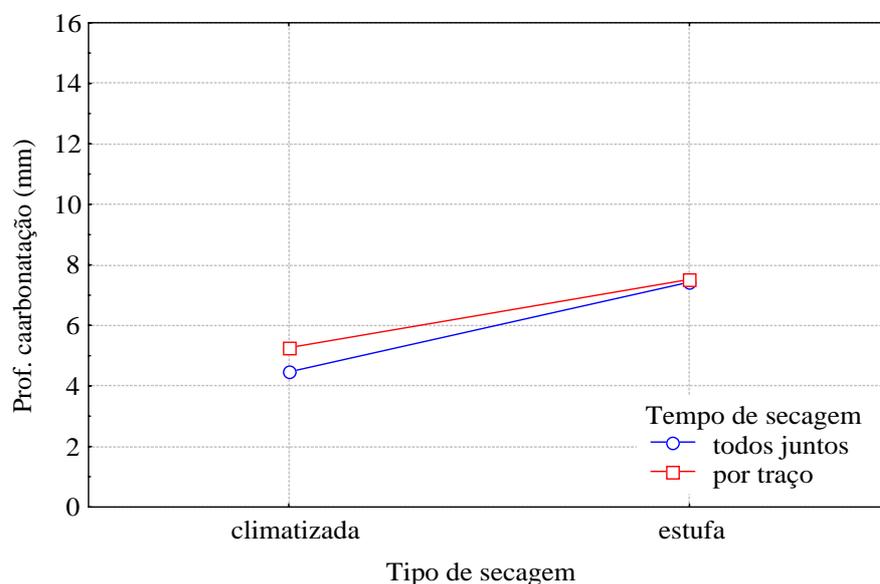


Figura 5.24: Interação entre o tipo e o tempo de secagem na profundidade de carbonatação

Entre as interações que envolvem o tempo de secagem, apenas aquela relacionada com o tipo de secagem, apresentada na figura 5.24, se mostrou estatisticamente significativa. A análise da figura 5.24 permite afirmar que, para a secagem em estufa, o tempo de secagem, não influencia a profundidade de carbonatação. Entretanto, quando a secagem é realizada na sala climatizada, iniciar o ensaio de carbonatação acelerada assim que as condições preestabelecidas são alcançadas leva a profundidades de carbonatação em torno de 18% superiores que iniciar o ensaio com amostras juntas.

Em resumo, os fatores que mais influenciaram na profundidade de carbonatação foram o percentual de  $\text{CO}_2$ , cujo comportamento causou certa surpresa, e a relação a/c, como já se esperava. Ainda que o tempo de cura submersa e o tempo de secagem se mostraram estatisticamente significativos, essa significância parece ter pouco efeito prático, uma vez que pequenas alterações nos valores obtidos podem fazer com que esses fatores deixem de ser significativos. O tipo de cimento e o tipo de secagem apresentaram significância intermediária com relação aos fatores já citados.

## 5.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

Os ensaios de resistência à compressão axial foram utilizados apenas como parâmetro de controle da execução das misturas, por isso não receberam tratamento estatístico. A tabela 5.4 apresenta a média de 3 repetições da resistência à compressão axial para cada bloco de moldagem e seus respectivos coeficientes de variação (CV)<sup>42</sup>. Os valores individuais de cada repetição são apresentados no apêndice G.

Tabela 5.4: Resultados médios da resistência à compressão axial dos quatro blocos, em cada idade de ruptura e seus coeficientes de variação

Bloco	Idade de ruptura (dias)	Médias da resistência à compressão axial ( $f_c$ ), em MPa e coeficiente de variação (CV), em %											
		140		155		170		440		455		470	
		$f_c$	CV	$f_c$	CV	$f_c$	CV	$f_c$	CV	$f_c$	CV	$f_c$	CV
Bloco 1	7	32,7	8,8	24,4	5,5	15,4	6,5	30,6	3,8	19,6	1,2	12,7	2,0
	28	37,7	13,1	29,3	0,2	18,9	4,9	38,0	20,2	29,4	5,4	20,9	3,4
	63	44,1	7,3	32,1	5,3	20,4	2,2	50,8	4,0	33,1	5,6	27,6	1,4
Bloco 2	7	32,3	0,6	22,8	4,3	15,9	1,8	29,1	1,6	18,6	1,4	12,4	9,5
	28	38,2	0,8	28,4	3,5	19,0	2,6	41,9	2,7	28,1	6,4	20,2	6,8
	63	42,9	0,7	30,3	3,3	19,6	4,1	50,5	3,8	36,7	4,3	26,9	1,4
Bloco 3*	7	31,7	22,1	23,4	1,8	16,0	4,1	25,9	1,4	19,5	0,4	12,5	3,5
	28	41,2	2,5	27,5	1,3	21,9	3,9	40,0	5,3	29,0	8,7	21,6	1,5
	63	40,9	7,0	29,2	2,3	21,7	1,4	44,6	3,8	33,9	1,1	28,2	3,9
Bloco 4	7	30,5	14,4	23,2	3,9	15,5	2,5	29,5	2,1	18,7	3,2	12,2	2,5
	28	34,6	16,0	29,1	2,3	18,2*	0,2	42,8	13,8	30,0	6,2	20,6*	2,2
	63	44,9	1,3	31,8	2,8	18,2*	1,9	49,7	5,0	37,9	3,8	26,0*	2,2

\* Médias a partir de duas repetições; CV = coeficiente de variação.

Os valores da tabela 5.4 mostram que aos 7 dias, o cimento CPI-S desenvolveu resistências maiores que o CPIV, aos 28 dias os valores foram praticamente os mesmos e, aos 63 dias, a resistência do CPIV passou a ser maior.

Com exceção de alguns pontos isolados (B1-140-28d; B1-440-28d; B3-140-7d; B4-140-7,28d; B4-440-28d), o coeficiente de variação da resistência à compressão axial das amostras foi

<sup>42</sup> O coeficiente de variação (CV) é obtido dividindo o desvio padrão, pela média dos resultados obtidos.

aceitável (<10,0%). A figura 5.25 ilustra a resistência à compressão axial média com relação ao tempo de ruptura, para os quatro blocos.

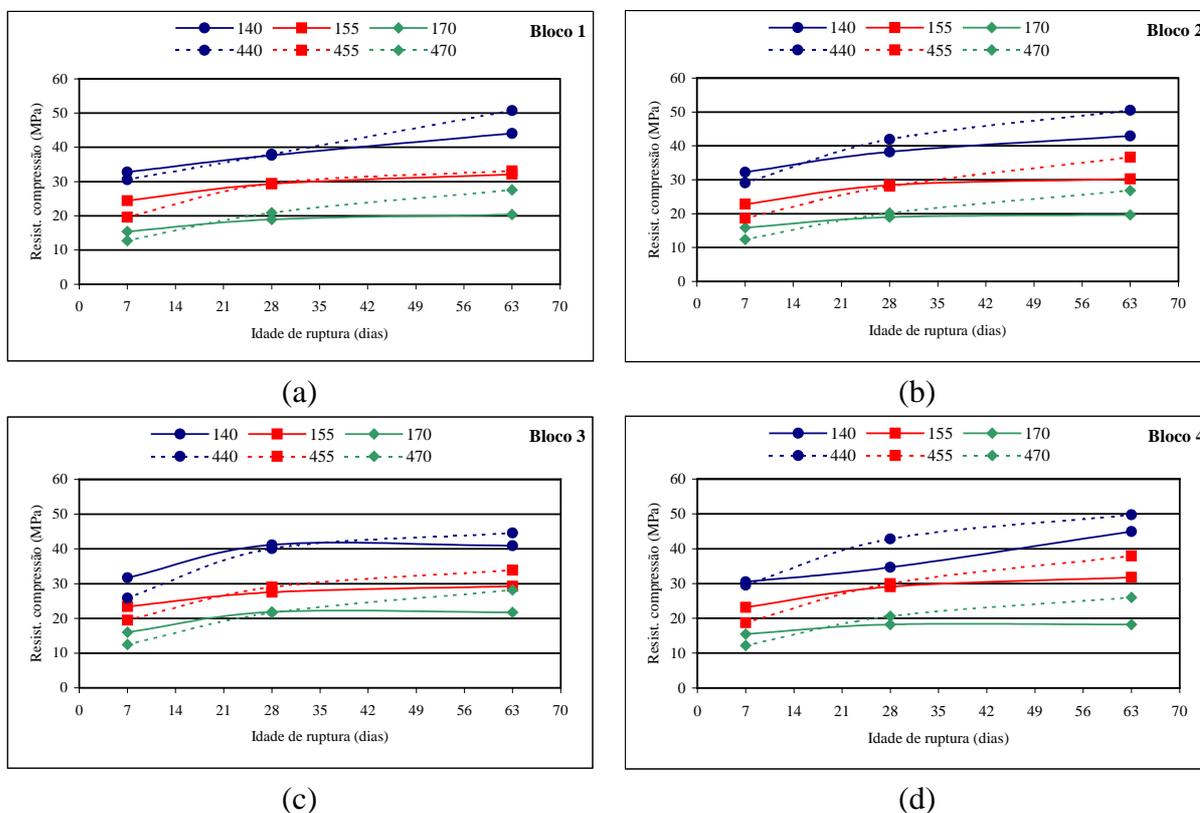


Figura 5.25: Resistência à compressão axial média com relação ao tempo de ruptura, (a) bloco 1, (b) bloco 2, (c) bloco 3 e (d) bloco 4

Como esperado, as curvas da figura 5.25, dos quatro blocos, mostram que a resistência à compressão axial aumenta com a idade de ruptura e diminui com a relação a/c. Com relação ao tipo de cimento, o aumento é mais acentuado para o CPIV, ao passar de 7 para 63 dias de ruptura, mostrando que o CPIV é mais influenciado pelo tempo de cura.

Entre os quatro blocos, a diferença na resistência à compressão axial é aleatória, sendo que os coeficientes de variação, apresentados na tabela 5.4, são bastante pequenos, salvo algumas exceções.

Os resultados obtidos estão dentro do esperado com relação a todas as variáveis (tipo de cimento, relação a/c, idade de ruptura). Isso indica que o ensaio pode ser considerado válido como parâmetro de controle da execução das argamassas.

No capítulo seguinte são feitas as considerações finais a respeito deste trabalho.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o objetivo de comparar alguns procedimentos utilizados para a realização de ensaios acelerados de carbonatação, neste trabalho foram estudadas argamassas moldadas com CPI-S e CPIV, relações água/cimento de 0,40, 0,55 e 0,70, curadas em água por 7 e 28 dias, que foram submetidas a ensaios de carbonatação acelerada. Após a cura, os corpos-de-prova foram expostos à secagem em sala climatizada ou estufa, por dois períodos distintos: um deles, até que todas as amostras atingissem as condições preestabelecidas, e no outro, até que cada traço alcançasse essas condições. Após essa etapa, foi iniciado o ensaio de carbonatação acelerada em câmaras com 6% e saturada de CO<sub>2</sub>.

Também foram realizados ensaios de resistência à compressão axial, aos 7, 28 e 63 dias, para verificar a qualidade de execução das misturas.

A influência de cada variável independente na profundidade de carbonatação, bem como suas interações de primeira ordem foram verificadas através da análise de variância, após 28 dias de exposição ao CO<sub>2</sub>. Os resultados levaram às conclusões apresentadas a seguir, lembrando que as mesmas são válidas para o intervalo de dados investigados.

### 6.1 CONCLUSÕES

#### 6.1.1 Com Relação aos Resultados de Profundidade de Carbonatação

##### a) Tempo de cura submersa

As argamassas curadas por 7 dias carbonataram cerca de 7% a mais que aquelas curadas por 28 dias. Esse efeito se mostrou estatisticamente significativo, embora sua significância tenha sido bastante fraca.

Na prática, essa significância parece não influenciar a profundidade de carbonatação, no entanto, a cura está muito atrelada a outros fatores, como o tipo de cimento, a relação a/c e,

principalmente, o percentual de  $\text{CO}_2$ . O resultado obtido também pode ter sido influenciado por uma cura suplementar durante o período de sazonalidade dos exemplares. A relação entre o tempo de cura submersa e os tipos de secagem foi estabelecida para a secagem em sala climatizada, todavia quando as amostras são secas em estufa, o tempo de cura submersa praticamente não altera a profundidade de carbonatação.

Quanto ao tipo de cura empregada (submersa), pode-se dizer que é de fácil execução, uma vez que não necessita de um ambiente especial (como uma sala de cura), porém, talvez não seja o mais adequado para os ensaios de carbonatação, em função do condicionamento requerido.

#### b) Tipo de cimento

Como já constatado na literatura consultada, o tipo de cimento que resulta em menor reserva alcalina, no caso o CPIV, desenvolveu profundidades de carbonatação, em média, 68% superiores às do CPI-S.

Relacionado a outros fatores, pode-se dizer que o cimento CPIV é mais afetado pela diminuição do tempo de cura submersa, que ambos apresentam comportamento semelhante com relação ao tipo de secagem, e que frente ao percentual de  $\text{CO}_2$ , as tendências se invertem, ou seja, a 6% de  $\text{CO}_2$ , a profundidade de carbonatação diminuiu com o aumento do tempo de cura, e em câmara saturada de  $\text{CO}_2$ , aumenta ao passar a cura de 7 para 28 dias.

#### c) Relação água/cimento

Os efeitos da relação  $a/c$  na profundidade de carbonatação já são bastante conhecidos no meio acadêmico, no entanto variações nesse fator se tornam necessárias a fim de traçar perfis de comportamento e verificação de sua validade em cada novo experimento.

Os resultados seguiram as tendências esperadas, apresentando profundidades de carbonatação crescentes com o aumento da relação  $a/c$ .

A relação  $a/c$  mais elevada (0,70) foi a mais influenciada pela mudança dos fatores analisados. Por exemplo, com relação ao tempo de cura submersa, as relações  $a/c$  0,40 e 0,55 praticamente não foram influenciadas pelo aumento do tempo de cura, enquanto que a relação  $a/c$  0,70, o aumento de 7 para 28 dias na cura, diminuiu, em média, 16% a profundidade de carbonatação.

#### d) Tipo de secagem

A revisão da literatura consultada mostrou que nem todas as pesquisas demonstram preocupação com o sazonalidade (tipo e tempo para estabilização da umidade interna dos corpos-de-prova), antes dos ensaios de carbonatação. Os resultados obtidos mostraram que a profundidade de carbonatação é bastante influenciada pelo tipo de secagem que é adotada. Embora não se tenha realizado a carbonatação sem a secagem prévia, ou seja, logo após a cura, é bastante óbvio que esta seria menor, em função da maior quantidade de água nos poros do material.

Com relação aos tipos de secagem empregados, os procedimentos recomendados pela RILEM resultaram em uma profundidade de carbonatação, em média, 54% superior àquela atingida pelos procedimentos usualmente utilizados no NORIE. Mesmo que essa diferença tenha sido bastante relevante, a tendência de comportamento de ambos os tipos de secagem é a mesma. Isto quer dizer que, independente do tipo de cimento e relação a/c, o avanço da frente de carbonatação é similar para as duas secagens, sendo diferente apenas a velocidade de avanço da frente de carbonatação. Com relação ao tempo de cura, como colocado anteriormente, a carbonatação, quando a secagem é realizada em estufa, não sofre influência desse fator, enquanto que quando a secagem é realizada em sala climatizada, é por ele alterada. Relacionados ao percentual de CO<sub>2</sub>, os resultados entre os dois tipos de secagem são mais próximos quando a carbonatação é realizada em câmara saturada de CO<sub>2</sub>. E da mesma forma que ocorre com o tempo de cura submersa, a profundidade de carbonatação é praticamente a mesma, para ambos tempos de secagem, quando a secagem é feita em estufa, ao passo que quando é realizada em sala climatizada, a carbonatação aumenta cerca de 18% quando não é adotado o mesmo tempo de secagem para todos os traços, mas um tempo de secagem diferente para cada traço.

#### e) Tempo de secagem

Nas pesquisas consultadas, o tempo em que os corpos-de-prova permanecem na etapa de secagem parece ser igual para todas as relações a/c. Isso pode fazer com que cada relação a/c fique com uma umidade diferente, ou no caso de esperar até que o último corpo-de-prova alcance o equilíbrio, uma hidratação maior daqueles que já haviam entrado em umidade constante antes. Não foi constatado nenhum trabalho que fizesse alguma comparação desse tipo, ou que mostrasse, de alguma forma, a influência de iniciar a carbonatação de todas as

amostras com a mesma idade, ou assim que cada traço adquirisse as condições preestabelecidas.

Neste estudo, o fator tempo de secagem se mostrou estatisticamente significativo, no entanto, os testes realizados indicam uma significância fraca. Da mesma forma que para o tempo de cura, parece que há pouco efeito prático, pois uma leve alteração dos dados já pode fazer com que o termo deixe de ser significativo.

Das interações que envolvem o tempo de secagem, apenas a relacionada com o tipo de secagem se mostrou significativa. Ainda assim, quando a secagem é realizada em estufa, o tempo de secagem praticamente não influencia os resultados da profundidade de carbonatação. Já quando a secagem é realizada em sala climatizada, há um aumento de 18% na profundidade de carbonatação quando as amostras iniciam o ensaio logo após alcançarem as condições de umidade preestabelecidas, o que fez com que a interação fosse significativa.

#### f) Percentual de CO<sub>2</sub>

Com relação aos percentuais de CO<sub>2</sub> utilizados nessa pesquisa, esperava-se que apresentassem efeito significativo, entretanto, este ter sido o fator estatisticamente mais significativo, foi algo que causou surpresa.

As profundidades de carbonatação a 6% de CO<sub>2</sub> foram, em média, 116% maiores que aquelas alcançadas em câmara saturada de CO<sub>2</sub>.

O comportamento dos exemplares carbonatados em câmara saturada de CO<sub>2</sub> foi muito distinto daquele a 6%. Os corpos-de-prova carbonatados em câmara saturada de CO<sub>2</sub> apresentaram, muitas vezes, comportamentos diferentes dos esperados, como por exemplo, com relação ao tempo de cura submersa em função do tipo de cimento.

### 6.1.2 Com Relação aos Resultados de Resistência à Compressão Axial

Os resultados do ensaio de compressão axial mostraram um comportamento perfeitamente coerente com o observado na bibliografia, comprovando que houve efetivo controle das misturas, o que as tornou adequadas aos propósitos deste estudo.

### 6.1.3 Com Relação à Forma de Medida da Profundidade de Carbonatação

A metodologia utilizada para obter os resultados de profundidade de carbonatação, através da análise de imagens digitais, mostrou-se adequada para este estudo. As medições que suscitaram dúvidas ou que precisaram ser conferidas puderam ser refeitas, sem qualquer perda de definição da frente de carbonatação, uma vez que as imagens ficaram armazenadas. Isso também possibilitou que a análise fosse feita com menor desgaste do operador, em relação à medição com paquímetro, que necessita ser feita no máximo cerca de 24 horas após a aspersão da fenolftaleína, sob o risco de perder definição da frente de carbonatação. Essa técnica de análise digital também permite que as imagens sejam resgatadas no futuro, para a realização de outras medidas, como do topo e base das amostras, que não foram consideradas nesse trabalho.

### 6.1.4 Considerações Finais Quanto aos Procedimentos

A influência de cada fator estudado foi verificada através da análise estatística realizada nesse trabalho. Da relação desses fatores, com os ensaios acelerados de carbonatação, conclui-se que:

- A secagem em sala climatizada sofre mais influência de outros fatores, como o tempo de cura e o tempo de secagem. Apesar de implicar em uma moldagem prévia, o que dispensa mais tempo, os procedimentos da RILEM permitem que seja diminuído o período de cura, praticamente compensando o tempo requerido no início do procedimento. O método da RILEM, ao propor o uso de estufa, pode apresentar diferenças com relação ao método do NORIE, onde acredita-se existir um tempo maior para cura complementar dos exemplares. A secagem baseada na metodologia proposta pelo NORIE é de execução mais simples, quando comparada com a proposta pela RILEM, em função dos procedimentos prévios requeridos por esta última. Apesar dos procedimentos recomendados pela RILEM serem mais trabalhosos, o método passa uma sensação maior de confiabilidade quanto às condições desejadas para o ensaio, de que as mesmas sejam efetivamente alcançadas;
- A fraca significância do tempo de secagem, somada a apenas uma interação significativa com o mesmo, permite dizer, que entre esses dois tempos de secagem, é indiferente qual deles é adotado. Com relação aos tempos de secagem adotados

(mesmo período para todos os corpos-de-prova, ou seja, a mesma idade, ou idades diferentes em função do traço), é mais fácil realizar a entrada dos corpos-de-prova nas câmaras de carbonatação, bem como as medições, de todos eles juntos, ao invés de ter que controlar, no caso deste estudo, seis datas diferentes para cada câmara;

- A utilização de percentuais elevados de CO<sub>2</sub> (câmara saturada de CO<sub>2</sub>) promovem profundidades de carbonatação menores, por exemplo, que 6% de CO<sub>2</sub>. Sugere-se fazer uso de percentuais menores (até cerca de 6%), pois, além de o teor saturado levar a profundidades de carbonatação inferiores, parece alterar seu comportamento. Cabe salientar que outros percentuais de CO<sub>2</sub> devem ser estudados, a fim de estabelecer o mais adequado. Já o consumo de CO<sub>2</sub>, depende do tipo de câmara. A câmara com 6% de CO<sub>2</sub> utilizada, apresentou um consumo maior, pelo fato da sua alimentação ser contínua;
- O tempo de cura a ser adotado para ensaios de carbonatação acelerada, depende do tipo secagem a ser utilizada. Se a secagem for realizada exclusivamente em estufa, a cura pode ser de 7 dias, sem prejudicar os resultados de profundidade de carbonatação, independente dos demais fatores, além de acelerar mais ainda a velocidade do ensaio. Embora a cura submersa seja de fácil realização, talvez não seja a mais adequada para os ensaios de carbonatação, uma vez que estes requerem um período prévio de secagem. Este período pode ser reduzido com o emprego de uma cura úmida ou mesmo com a combinação de períodos de cura úmida, e até submersa, com alguns dias de exposição em ambiente climatizado. Entretanto, todas estas sugestões ainda carecem de experimentos para comprovação de sua possível eficácia.

## 6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Visto que o presente estudo ficou limitado pelas variáveis propostas, e que durante a sua realização surgiram novos questionamentos, sugere-se o estudo:

- Dos compostos de carbonatação, gerados pela carbonatação acelerada com diferentes percentuais de CO<sub>2</sub>, a fim de verificar sua influência no processo;

- Da carbonatação com outros percentuais de CO<sub>2</sub> (por exemplo, de 1, 10, 30%), a fim de determinar até quais percentuais o comportamento é análogo aos encontrados nessa pesquisa;
- De relações entre carbonatação acelerada e carbonatação natural;
- Carbonatação de exemplares com diferentes tipos de cura e por maiores períodos (63 e 91 dias, por exemplo).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, A. G. **Estudo da corrosão da armadura induzida por carbonatação em concretos com cinza volante**. 2004. 212f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

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

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Manual of Concrete Practice**. Part 1 – 1991. Materials and General Properties of Concrete, Committee 201. Detroit, Michigan, 1991, 24p.

\_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. Part 1 – 1991. Materials and General Properties of Concrete, Committee 222. Detroit, Michigan, 1991, 11p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Annual Book of ASTM Standards**. Designation: C 150 –97a: Standard specification for Portland cement. 1998, v. 14.02.

\_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. Designation: E 632 –82 (reapproved 1996): Standard specification for Portland cement. 1998, v. 14.02.

ANDRADE, C.; ALONSO, C.; BACLE, B. Accelerated testing methodology for evaluating carbonation and chloride resistance of concrete coatings. In: FIP SYMPOSIUM, [s. ed.], 1988, Israel. **Proceedings...** Jerusalem, Sep 1988. p. 61-67.

ANDRADE, C. **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras**. Tradução e adaptação: Antônio Carmona e Paulo Helene. São Paulo: Pini, 1992. 104p.

ASOCIACIÓN MERCOSUR DE NORMALIZACIÓN. **NM 45:95**: Agregados: Determinação da massa unitária e dos espaços vazios. [s. l.], 1996.

\_\_\_\_\_. **NM 101:96**: Concreto: Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. [s. l.], 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 23**: Cimento Portland e outros materiais em pó: Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001.

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

\_\_\_\_\_. **NBR NM 248**: Agregados: Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5732**: Cimento Portland comum. Rio de Janeiro, 1991.

\_\_\_\_\_. **NBR 5736**: Cimento Portland pozolânico. Rio de Janeiro, 1991.

\_\_\_\_\_. **NBR 5738**: Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. **NBR 6118:2003**: Projeto de estruturas de concreto: Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 7215**: Cimento Portland: Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

\_\_\_\_\_. **NBR 9776**: Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do Frasco de Chapman. Rio de Janeiro, 1987.

\_\_\_\_\_. **NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecidos: Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 1995.

\_\_\_\_\_. **NBR 10786**: Concreto endurecido: Determinação do coeficiente de permeabilidade à água. Rio de Janeiro, 1989.

\_\_\_\_\_. **NBR 11580**: Determinação da água da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 1991.

\_\_\_\_\_. **NBR 11581**: Determinação dos tempos de pega do cimento. Rio de Janeiro, 1991.

ATIS, C. D. Accelerated carbonation and testing of concrete made with fly ash. **Construction and Building Materials**, 2002, 6p, (Article in press).

BAI, J.; WILD, S.; SABIR, B., B. Sorptivity and strength of air-cured and water-cured PC-PFA-MK concrete and the influence of binder composition on carbonation depth. **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 11, p. 1813-1821, Nov 2002.

BALAYSSAC, J. P.; DÉTRICHÉ, Ch. H.; GRANDET, J. Effects of curing upon carbonation of concrete. **Construction and Building Materials**, British, v. 9, n. 2, p. 91-95, 1995.

BAUER, E. **Avaliação comparativa da influência da adição de escória de alto-forno na corrosão das armaduras através de técnicas eletroquímicas**. 1995. 236f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

BRANCA et al. Combined effect of carbonation and chloride on corrosion of reinforcement in fly ash concrete. In: MALHOTRA, V. M. (ed) International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, 4<sup>th</sup>, 1992, Istanbul. **Proceedings...** Detroit, ACI, 1993. v. 1, p. 245-256 (SP-132).

CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras de concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas**. São Paulo: Pini; Goiânia, GO: Editora UFG, 1997. 237p.

COELHO, M. A. M. et al. Estudo da carbonatação e retração em concretos de alto desempenho com elevados teores de escória de alto-forno. In CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 44°, 2002, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte, 2002, 14p.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. **FIP Model Code 1990**. (Design Code). Lausanne, Switzerland, 1993.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. **PrEN 13295**: Carbonation Resistance (English Version). CEN/TC 104/SC 8 N 591, (Revised draft prepared by WG 2 for formal vote), France, feb 2000.

COUTINHO, A. S. **Fabrico e propriedades do betão**. 3ª ed. Vol. I. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, [s. n.], 1997.

CUNHA, A. M. Q.; HELENE, P. R. L. **Despassivação das armaduras de concreto por ação da carbonatação**. São Paulo: EPUSP, 2001. 13 p. + anexos. (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC/283).

DAL MOLIN, D. C. C. **Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com e sem adições de microssilica**. 1995. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

DHIR, R. K.; HEWLETT, P. C.; CHAN, Y. N. Near-surface characteristics of concrete: prediction of carbonation resistance. **Magazine of Concrete Research**, Dundee, UK, v. 41, n. 148, p. 137-143, 1989.

FATTUHI, N. I. Concrete carbonation as influenced by curing regime. **Cement and Concrete Research**, v. 18, n. 3, p. 426-430, May 1988.

FIGUEIREDO, C. R. **Estudo da carbonatação em estruturas de concreto armado em Brasília – Avaliação de pilares**. 2004. 218f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2004.

FORRESTER, J. A. Measurement of Carbonation. In: RILEM COLLOQUIUM ON CARBONATION OF CONCRETE **Proceedings...** [s.l., s.ed], 1976. Paper 2.1, 5p.

GERVAIS et al. The effects of carbonation and drying during intermittent leaching on the release of inorganic constituents from a cement-based matrix. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 1, p. 119-131, Jan 2004.

GOÑI, S.; GUERRERO, A. Accelerated carbonation of Friedel's salt in calcium aluminate cement paste. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 1, p. 21-26, Jan 2003.

HALL, C. Water sorptivity of mortars and concretes: a review. **Magazine of Concrete Research**, v. 41, n. 147, p. 51-61, Jun 1989.

HAMADA, M. Neutralization of concrete and corrosion of reinforcing steel. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THE CHEMISTRY OF CEMENT, 5<sup>th</sup>, 1968, Tokyo. **Proceedings...** Tokyo, 1969. v. III, part III, p. 343-369.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. 1993. 231f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

HELENE, P. R. L. **Corrosão em armaduras para concreto armado**. São Paulo: Pini: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1986. 47p.

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

HOUAISS, A.; VILLAR, M. S. **Dicionário Houaiss da língua portuguesa**. Elaborado no Instituto Houaiss de Lexicografia e Banco de Dados da Língua Portuguesa S/C Ltda. – Rio de Janeiro: Objetiva, 2001.

HOUST, Y. F.; SADOUKI, H.; WITTMANN, F. H. Influence of aggregate concentration on the diffusion of CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub>. In: INTERFACES IN CEMENTITIOUS COMPOSITES by RILEM International Conference, 1992, Toulouse. **Proceedings...** Toulouse, RILEM Proceedings 18, 1993.

HOUST, Y. F.; WITTMANN, F. H. Influence of porosity and water content on the diffusivity of CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> through hydrated paste. **Cement and Concrete Research**, v. 24, n. 6, p. 1165-1176, 1994.

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**. 1995. 280f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

ISAIA, G. C. **Carbonatação do concreto: uma revisão**. Departamento de Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1999.

ISHIDA, T.; MAEKAWA, K. Modeling of pH profile in pore water based on mass transport and chemical equilibrium theory. In: JSCE, 2000, Tokyo. **Proceedings...** Tokyo (Translation from Proceedings of JSCE, n. 648/V-47, May 2000). Disponível em: <<http://concrete.t.u-tokyo.ac.jp/en/demos/ducom/dutheory.html>>. acesso em: 18 ago. 2003.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO-6240**: Performance standards in building: contents and preservation. Genova, 1980, 2p.

JIANG, L.; LIN, B.; CAI, Y. A model for predicting carbonation of high-volume fly ash concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 30, n. 5, p. 699-702, May 2000.

JOHANNESSON, B.; UTGENANNT, P. Microstructural changes caused by carbonation of cement mortar. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n. 6, p. 925-931, May 2001.

JOHN, V.M.. **Cimentos de escória ativada com silicatos de sódio**. São Paulo, 1995. 112p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

KAZMIERCZAK, C. S. **Desempenho de alvenarias de materiais cerâmicos à penetração de água da chuva: uma análise de fatores condicionantes**. 1989. 127f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1989.

\_\_\_\_\_. **Contribuição para a análise da eficiência de películas aplicadas sobre estruturas de concreto armado com o objetivo de proteção contra a carbonatação**. 1995. 168f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

KAZMIERCZAK, C. S.; LINDENMEYER, Z. Comparação entre metodologias para a determinação da profundidade de carbonatação em argamassas. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON HIGH-PERFORMANCE CONCRETE, AND PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES, [s. ed.], 1996, Florianópolis. **Proceedings...** Florianópolis, 1996. p. 402-413.

KIRCHHEIM, A. P. **Concreto de cimento Portland branco estrutural: avaliação da carbonatação e absorção capilar**. 2003. 169f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

KOBAYASHI, K.; UNO, Y. Influence of alkali on carbonation of concrete, part I - Preliminary tests with mortar specimens. **Cement and Concrete Research**, v. 19, n. 5, p. 821-826, Sep 1989.

KULAKOWSKI, M. P. **Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas compostos com adição de sílica ativa**. 2002. 199f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Minas e Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

KULAKOWSKI, M. P.; VIECILI, F. **Manual de montagem e operação de câmara de carbonatação acelerada**. Porto Alegre; NORIE-CPGEC-UFRGS, 1997. 12p. \*\* (Relatório Interno).

LARANJEIRAS, A. C. R.; HELENE, P. R. L. **Durabilidade das estruturas de concreto armado e garantia de qualidade dos projetos**. 1993. /datilografado/.

LEAL, U. Afinal, o que é a norma de desempenho?. **Téchne**, São Paulo, ano 12, n. 86, p. 32-36, maio. 2004.

LO, Y.; LEE, H. M. Curing effects on carbonation of concrete using a phenolphthalein indicator and Fourier-transform infrared spectroscopy. **Building and Environment**, v. 37, n. 5, p. 507-514, May 2002.

LOPES, A. N. M. **Avaliação comparativa de concretos com e sem sílica ativa para resistências entre 50 e 65 MPa**. 1999. 170f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 1999.

MARTYS, N. S.; FERRARIS, C. F. Capillary transport in mortars and concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 27, n. 5, p. 747-760, 1997.

MEHTA, P. K. Durability of concrete - Fifty years of progress? In: Durability of Concrete Second International Conference, Montreal, 1991. **Proceedings...** [s.l.], ACI, 1991, p. 1-31 (SP-126).

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 1994. 581p.

MENG, B. Calculation of moisture transport coefficients on the basis of relevant pore structure parameters. **Materials and Structures**. v. 27, n. 167, p. 125-134, 1994.

MEYER, A. Investigations on the carbonation of concrete. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THE CHEMISTRY OF CEMENT, 5<sup>th</sup>, Tokyo, 1968. **Proceedings...** Tokyo, 1969. v. III, p. 394-401. (Supplementary Paper III – 52).

MONTEIRO, E. C. B. **Estudo da capacidade de proteção de alguns tipos de cimentos nacionais, em relação à corrosão de armaduras sob a ação conjunta de CO<sub>2</sub> e íons cloretos**. 1996. 138f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 1996.

NAGATAKI, S.; OHGA, H. Combined effect of carbonation and chloride on corrosion of reinforcement in fly ash concrete. In: MALHOTRA, V. M. (ed) International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, 4<sup>th</sup>, 1992, Istanbul. **Proceedings...** Detroit, ACI, 1993. v. 1, p. 227-244. (SP-132).

NAKAMURA, J. NBR 6118: a da durabilidade. **Téchne**, São Paulo, ano 12, n. 86, p. 24-30, maio. 2004.

NEPOMUCENO, A. A. **Comportamiento de los morteros de reparacion frente la carbonatacion y a la penetracion de cloruros en estructuras de hormigon armado dañadas por corrosion de armaduras. Estudio mediante la tecnica de resistencia de polarizacion**. 1992. 394f. Tesis (doctoral) - Escuela Tecnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad politecnica de Madrid, Madrid-España, 1992.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. Tradução: Salvador E. Giammusso. 2ªed. rev. atual., São Paulo: Pini, 1997. 828p.

OHGA, H.; NAGATAKI, S. Prediction of carbonation depth of concrete with fly ash. In: FLY ASH, SILICA FUME, SLAG AND NATURAL POZZOLANS IN CONCRETE, [s.ed.], 1989, Detroit. **Proceedings...** Detroit, ACI, 1989, v. 1, p. 275-294: (SP-114).

PAPADAKIS, V. G.; VAYENAS, C. G.; FARDIS, M. N. Reaction engineering approach to the problem of concrete carbonation. **AIChE Journal**. v. 35, n. 10, p. 1639-1650, Oct 1989.

\_\_\_\_\_. Fundamental concrete carbonation model and application to durability of reinforced concrete. In: DURABILITY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS, [s.ed.], 1990, Brighton. **Proceedings...** London, BRE, 1991a. p. 27-38.

\_\_\_\_\_. Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation. **ACI Materials Journal**. n. 88, p. 363-373, Jul-Aug 1991b.

\_\_\_\_\_. Hydration and carbonation of pozzolanic cements. **ACI Materials Journal**. n. 89, p. 119-130, Mar-Apr 1992.

PAPADAKIS, V. G. Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress. **Cement and Concrete Research**, v. 30, n. 2, p. 291-299, Feb 2000.

PATEL, R. G. et al. Influence of curing at different relative humidities upon compound reactions and porosity in Portland cement paste. **Materials and Structures**. n. 21, p. 192-197, 1988.

PARROT, L. J. **A review of carbonation in reinforced concrete**. Wexham Springs, Cement and Concrete Association. 1986, 69p.

REUNION INTERNATIONALE DE LABORATOIRES D'ESSAIS ET MATERIAUX.  
CPC11.1: Absorption of water by concrete by immersion. 2 ed. (RILEM Recommendations CPC11.1, TC14-CPC). **Materials and Structures**, v. 7, n. 40, 1982a, 1p.

\_\_\_\_\_. CPC11.2: Absorption of water by concrete by capillarity. 2 ed. (RILEM Recommendations CPC11.2, TC14-CPC). **Materials and Structures**, v. 7, n. 40, 1982b, 2p.

\_\_\_\_\_. CPC11.3: Absorption of water by concrete by immersion under vacuum. 3 ed. (RILEM Recommendations CPC11.3, TC14-CPC). **Materials and Structures**, v. 12, n. 69, 1984, 2p.

\_\_\_\_\_. CPC13.2: Test for permeability of porous concrete. (RILEM Recommendations CPC13.2, TC14-CPC). **Materials and Structures**, v. 12, n. 69, 1979, 2p.

REUNION INTERNATIONALE DE LABORATOIRES D'ESSAIS ET MATERIAUX.  
CPC-18: Measurement of hardened concrete carbonation depth. (RILEM Recommendations CPC-18). **Materials and Structures**, [s. n.], p. 453-455, 1988.

\_\_\_\_\_. TC 116-PCD: Permeability of concrete as a criterion of its durability: tests for gas permeability of concrete. (RILEM Recommendation TC 116-PCD). **Materials and Structures**, v. 32, p. 174-179, Apr 1999.

ROY, S. K.; POH, K. B.; NORTHWOOD, D. O. Durability of concrete – accelerated carbonation and weathering studies. **Building and Environment**, v/n. 34, p. 597-606, 1999.

SAETTA, A. V.; SCHREFLER, B. A.; VITALIANI, R. V. 2 – D Model for carbonation and moisture / heat flow in porous materials. **Cement and Concrete Research**, v. 25, n.8, p. 1703-1712, Dec 1995.

SAETTA A. V.; VITALIANI, R. V. Investigation and numerical modeling of carbonation process in reinforced concrete structures. Part I: Theoretical formulation. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 4, p. 571-579, Apr 2004.

SANJUÁN, M. A.; OLMO, C. del. Carbonation resistance of one industrial mortar used as a concrete coating. **Building and Environment**, v. 36, n. 8, p. 949-953, Oct 2001.

SARRÍA, J. J. **Efecto de los parâmetros ambientales en la velocidad de corrosión Del acero embebido en el hormigón. Incidência de la fisuración del recubrimiento.** 1997. 243f. Tesis (Doctoral) – Universidad Politécnica de Madrid, Madrid-España, 1997.

SEIDLER, N. **Efeito de adições pozolânicas na alcalinidade e consumo de hidróxido de cálcio durante a hidratação e carbonatação de materiais cimentícios.** 1999. 139f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

SILVA, P. F. A. **Durabilidade das estruturas de concreto aparente em atmosfera urbana.** São Paulo: Pini, 1995. 152p.

SMOCZYK, H. G. Discussion of principal paper of carbonation of concrete by Hamada. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THE CHEMISTRY OF CEMENT, 5<sup>th</sup>, 1968, Tokyo. **Proceedings...** Tokyo, 1969. v. III, part III, p. 369-384.

SMOCZYK, H. G. Physical and chemical phenomena of carbonation. In: RILEM COLLOQUIUM ON CARBONATION OF CONCRETE, [s. ed], 1976. **Proceedings...** 1976. Paper 1.1, 10p.

TUUTTI, K. **Corrosion of steel in concrete.** 1982. 469f. Tese (Doutorado). Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm.

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

VAN GERVEN, T. et al. Influence of carbonation and carbonation methods on leaching of metals from mortars. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 1, p. 149-156, Jan 2004.

VENQUIARUTO, S. D. **A influência da finura e do teor de adições minerais na carbonatação do concreto.** 2002. 135f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2002.

VIEIRA, F.M.P. **Contribuição ao estudo da corrosão de armaduras em concretos com sílica ativa.** Porto Alegre, 2002. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Minas e Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

WOLF, J. **Estudo sobre a durabilidade de concretos de alta resistência com adições de microssílica.** 1991. 145f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1991.

WOLF, J.; DAL MOLIN, D. C. C. Carbonatação de argamassas e concretos: Fatores intervenientes. In: SIMPÓSIO SOBRE PATOLOGIA DAS EDIFICAÇÕES: PREVENÇÃO E RECUPERAÇÃO. **Anais...** Porto Alegre: UFRGS, 1989. p. 118-133.

YING-YU, L.; QUI-DONG, W. The mechanism of carbonation of mortars and the dependence of carbonation on pore structure. In: CONCRETE DURABILITY, [s. ed.], 1987, Detroit. **Proceedings...** Detroit, ACI, 1987. p. 1915-1943 (SP-100).

**APÊNDICE A – Data de início e período de duração, de cada etapa dos procedimentos que antecederam os ensaios acelerados de carbonatação**

Relação das datas e duração de algumas etapas do programa experimental

Ident.	Moldagem (A)	Início sec. (B)	B-A dias	Fim sec. (C)	C-B dias	Fim redist. (D)	D-C dias	Início carb. (E)	E-B dias	
Bloco 1	140 C	06/10/03	03/11/03	28	04/12/03	31	15/12/03	11	15/12/03	70
	140 E	06/10/03	03/11/03	28	13/11/03	10	10/12/03	27	15/12/03	70
	155 C	07/10/03	04/11/03	28	04/12/03	30	15/12/03	11	15/12/03	69
	155 E	07/10/03	04/11/03	28	10/11/03	6	10/12/03	30	15/12/03	69
	170 C	08/10/03	05/11/03	28	04/12/03	29	15/12/03	11	15/12/03	68
	170 E	08/10/03	05/11/03	28	12/11/03	7	10/12/03	28	15/12/03	68
	440 C	06/10/03	03/11/03	28	05/12/03	32	15/12/03	10	15/12/03	70
	440 E	06/10/03	03/11/03	28	21/11/03	18	10/12/03	19	15/12/03	70
	455 C	07/10/03	04/11/03	28	04/12/03	30	15/12/03	11	15/12/03	69
	455 E	07/10/03	04/11/03	28	25/11/03	21	10/12/03	15	15/12/03	69
	470 C	08/10/03	05/11/03	28	04/12/03	29	15/12/03	11	15/12/03	68
	470 E	08/10/03	05/11/03	28	18/11/03	13	10/12/03	22	15/12/03	68
Bloco 2	140 C	24/11/03	01/12/03	7	23/12/03	22	07/01/04	15	07/01/04	44
	140 E	24/11/03	01/12/03	7	15/12/03	14	05/01/04	21	07/01/04	44
	155 C	25/11/03	02/12/03	7	23/12/03	21	07/01/04	15	07/01/04	43
	155 E	25/11/03	02/12/03	7	12/12/03	10	05/01/04	24	07/01/04	43
	170 C	27/11/03	04/12/03	7	23/12/03	19	07/01/04	15	07/01/04	41
	170 E	27/11/03	04/12/03	7	10/12/03	6	05/01/04	26	07/01/04	41
	440 C	24/11/03	01/12/03	7	19/12/03	18	07/01/04	19	07/01/04	44
	440 E	24/11/03	01/12/03	7	12/12/03	11	05/01/04	24	07/01/04	44
	455 C	25/11/03	02/12/03	7	19/12/03	17	07/01/04	19	07/01/04	43
	455 E	25/11/03	02/12/03	7	10/12/03	8	05/01/04	26	07/01/04	43
	470 C	26/11/03	03/12/03	7	19/12/03	16	07/01/04	19	07/01/04	42
	470 E	26/11/03	03/12/03	7	10/12/03	7	05/01/04	26	07/01/04	42
Bloco 3	140 C	09/12/03	06/01/04	28	30/01/04	24	13/02/04	14	13/02/04	66
	140 E	09/12/03	06/01/04	28	14/01/04	8	28/01/04	14	29/01/04	51
	155 C	10/12/03	07/01/04	28	30/01/04	23	13/02/04	14	13/02/04	65
	155 E	10/12/03	07/01/04	28	16/01/04	9	02/02/04	17	03/02/04	55
	170 C	11/12/03	08/01/04	28	04/02/04	27	18/02/04	14	18/02/04	69
	170 E	11/12/03	08/01/04	28	19/01/04	11	02/02/04	14	03/02/04	54
	440 C	09/12/03	06/01/04	28	30/01/04	24	13/02/04	14	13/02/04	66
	440 E	09/12/03	06/01/04	28	05/02/04	30	20/02/04	15	26/02/04	79
	455 C	10/12/03	07/01/04	28	04/02/04	28	18/02/04	14	18/02/04	70
	455 E	10/12/03	07/01/04	28	09/02/04	33	25/02/04	16	26/02/04	78
	470 C	11/12/03	08/01/04	28	04/02/04	27	18/02/04	14	18/02/04	69
	470 E	11/12/03	08/01/04	28	05/02/04	28	20/02/04	15	26/02/04	77
Bloco 4	140 C	26/01/04	02/02/04	7	26/02/04	24	13/03/04	16	11/03/04	45
	140 E	26/01/04	02/02/04	7	10/02/04	8	25/02/04	15	26/02/04	31
	155 C	27/01/04	03/02/04	7	26/02/04	23	11/03/04	14	11/03/04	44
	155 E	27/01/04	03/02/04	7	10/02/04	7	25/02/04	15	26/02/04	30
	170 C	28/01/04	04/02/04	7	26/02/04	22	11/03/04	14	11/03/04	43
	170 E	28/01/04	04/02/04	7	10/02/04	6	25/02/04	15	26/02/04	29
	440 C	26/01/04	02/02/04	7	26/02/04	24	11/03/04	14	11/03/04	45
	440 E	26/01/04	02/02/04	7	13/02/04	11	27/02/04	14	02/03/04	36
	455 C	27/01/04	03/02/04	7	26/02/04	23	11/03/04	14	11/03/04	44
	455 E	27/01/04	03/02/04	7	16/02/04	13	01/03/04	14	02/03/04	35
	470 C	28/01/04	04/02/04	7	26/02/04	22	11/03/04	14	11/03/04	43
	470 E	28/01/04	04/02/04	7	12/02/04	8	27/02/04	15	02/03/04	34

**APÊNDICE B – Massa após cura e ao final da secagem em sala climatizada,  
conforme a metodologia baseada nos procedimentos do NORIE, do bloco 1,  
a título de exemplo**

Massa após cura e massa atingida ao final do período de secagem em sala climatizada, para o bloco 1

Ident.	m <sub>o</sub>	m <sub>f</sub>	Ident.	m <sub>o</sub>	m <sub>f</sub>	Ident.	m <sub>o</sub>	m <sub>f</sub>
140-01	593,1	583,7	155-01	593,9	578,9	170-01	581,7	560,0
140-02	597,2	587,5	155-02	580,0	564,8	170-02	584,5	562,9
140-03	609,4	599,8	155-03	580,9	565,4	170-03	586,3	565,0
140-04	605,0	593,9	155-04	590,5	575,4	170-04	581,9	560,3
140-05	609,7	598,7	155-05	582,3	567,1	170-05	581,4	559,8
140-06	616,5	605,7	155-06	586,9	572,0	170-06	574,1	552,7
140-07	588,3	578,9	155-07	584,6	570,0	170-07	576,5	555,0
140-08	588,6	579,1	155-08	591,3	576,0	170-08	581,8	560,0
140-09	592,3	582,9	155-09	595,3	580,3	170-09	577,8	556,8
140-19	602,4	593,6	155-19	585,0	570,2	170-19	577,1	555,6
140-20	600,4	591,3	155-20	590,1	575,3	170-20	576,1	554,5
140-21	591,5	582,4	155-21	591,3	576,8	170-21	583,9	562,6
140-22	601,0	590,9	155-22	594,7	579,1	170-22	584,8	562,7
140-23	607,1	596,7	155-23	599,2	583,8	170-23	586,8	564,3
140-24	597,8	587,6	155-24	587,5	572,1	170-24	581,0	559,5
140-25	601,9	592,4	155-25	588,8	573,5	170-25	582,6	559,8
140-26	600,7	591,3	155-26	585,6	569,9	170-26	584,0	560,7
140-27	609,0	599,4	155-27	586,4	570,7	170-27	573,4	551,1
440-01	583,8	573,5	455-01	583,4	565,0	470-01	576,5	552,3
440-02	588,4	578,2	455-02	587,6	569,0	470-02	568,5	545,2
440-03	580,8	570,9	455-03	583,6	565,4	470-03	567,4	544,3
440-04	603,7	592,3	455-04	580,7	563,1	470-04	569,3	544,9
440-05	604,7	593,6	455-05	592,2	573,9	470-05	574,3	548,8
440-06	598,4	587,5	455-06	582,2	564,2	470-06	568,7	543,3
440-07	595,4	585,2	455-07	583,2	565,7	470-07	583,6	560,4
440-08	596,5	586,6	455-08	579,5	562,0	470-08	576,3	552,5
440-09	590,0	579,9	455-09	575,9	557,9	470-09	569,9	546,7
440-19	587,8	577,3	455-19	577,5	559,4	470-19	574,2	550,0
440-20	589,8	579,3	455-20	581,3	563,7	470-20	573,0	548,6
440-21	588,5	578,3	455-21	580,4	562,9	470-21	567,7	543,8
440-22	585,4	574,5	455-22	582,6	565,3	470-22	577,0	551,5
440-23	590,1	579,5	455-23	576,1	558,5	470-23	568,8	544,6
440-24	587,0	576,3	455-24	582,0	564,3	470-24	575,1	549,0
440-25	609,7	598,7	455-25	588,5	570,7	470-25	588,8	563,9
440-26	604,5	593,4	455-26	583,1	565,1	470-26	574,6	549,6
440-27	598,8	587,8	455-27	587,8	569,6	470-27	580,8	555,6

m<sub>o</sub> = massa do corpo-de-prova, ao final do período de cura submersa, em (g);

m<sub>f</sub> = massa do corpo-de-prova, ao final do período de secagem em sala climatizada, em (g);

**APÊNDICE C – Parâmetros da etapa de condicionamento, conforme  
recomendações da RILEM (1999), no TC 116-PCD**

Parâmetros da etapa de acondicionamento, conforme  
recomendações da RILEM, para cura de 7 dias

Ident.	$m_o$ (g)	$m_{d(1)}$ (g)	$W_e$ (g)	$w_e$	$m_{e,70}$ (g)	$m_{d(2)}$ (g)	$W_{e,70}$ (g)	$w_{e,70}$	$\Delta m$ (g)
140	607,9	556,3	51,60	0,0928	730,5	702,5	28,00	0,0399	29,4272
155	598,8	547,6	51,20	0,0935	749,1	726,8	22,30	0,0307	34,3983
170	584,7	533,9	50,80	0,0951	699,6	684,5	15,10	0,0221	39,0222
440	588,8	535,4	53,40	0,0997	651,9	632,2	19,70	0,0312	36,7164
455	582,0	527,2	54,80	0,1039	660,0	646,8	13,20	0,0204	44,0408
470	579,5	528,1	51,40	0,0973	614,2	605,9	8,30	0,0137	44,1658

Parâmetros da etapa de acondicionamento, conforme  
recomendações da RILEM, para cura de 28 dias

Ident.	$m_o$ (g)	$m_{d(1)}$ (g)	$W_e$ (g)	$w_e$	$m_{e,70}$ (g)	$m_{d(2)}$ (g)	$W_{e,70}$ (g)	$w_{e,70}$	$\Delta m$ (g)
140	582,0	532,4	49,60	0,0932	769,3	729,9	39,40	0,0540	20,8610
155	584,9	536,9	48,00	0,0894	748,1	718,4	29,70	0,0413	25,8035
170	581,4	535,1	46,30	0,0865	686,4	664,2	22,20	0,0334	28,4150
440	572,1	520,3	51,80	0,0996	791,8	748,1	43,70	0,0584	21,4069
455	586,0	534,0	52,00	0,0974	687,5	662,3	25,20	0,0380	31,6817
470	576,3	526,0	50,30	0,0956	694,6	670,8	23,80	0,0355	31,6375

$m_o$  = massa do corpo-de-prova no fim da cura, em (g);

$m_{d(1)}$  = massa do corpo-de-prova após secagem em estufa (a 105°C), em (g);

$W_e$  = quantidade total de água evaporável, em (g);

$w_e$  = concentração da umidade evaporável, (adimensional);

$m_{e,70}$  = massa do material triturado, após equilíbrio na sala climatizada (temperatura de 20°C e umidade relativa de 70%), em (g);

$m_{d(2)}$  = massa do material triturado após secagem em estufa (a 105°C), em (g);

$W_{e,70}$  = quantidade de água de equilíbrio a 70±5% de umidade relativa, em (g);

$w_{e,70}$  = concentração de umidade de equilíbrio, (adimensional);

$\Delta m$  = massa a ser perdida pelo corpo-de-prova a ser ensaiado, em (g).

**APÊNDICE D – Massa após cura,  $\Delta m$  calculado e massa a ser atingida ao final de secagem em estufa, conforme os procedimentos da RILEM, do bloco 1, a título de exemplo**

Massa após cura,  $\Delta m$  e massa a ser atingida para B1-140 e B1-440

Ident.	$m_o$	$\Delta m$	$m_o$ (B1)	$\Delta m$ (B1)	$m_o$ (B1) - $\Delta m$ (B1)
140-10	607,9	29,4272	595,8	28,8415	567,0
140-11	607,9	29,4272	603,6	29,2190	574,4
140-12	607,9	29,4272	596,0	28,8511	567,1
140-13	607,9	29,4272	606,3	29,3497	577,0
140-14	607,9	29,4272	598,4	28,9673	569,4
140-15	607,9	29,4272	592,6	28,6866	563,9
140-16	607,9	29,4272	601,7	29,1271	572,6
140-17	607,9	29,4272	595,5	28,8269	566,7
140-18	607,9	29,4272	597,8	28,9383	568,9
140-28	607,9	29,4272	593,8	28,7446	565,1
140-29	607,9	29,4272	594,8	28,7931	566,0
140-30	607,9	29,4272	597,8	28,9383	568,9
140-31	607,9	29,4272	610,6	29,5579	581,0
140-32	607,9	29,4272	606,8	29,3740	577,4
140-33	607,9	29,4272	594,2	28,7640	565,4
140-34	607,9	29,4272	605,4	29,3062	576,1
140-35	607,9	29,4272	601,5	29,1174	572,4
140-36	607,9	29,4272	608,7	29,4659	579,2
440-10	588,8	36,7164	595,0	37,1030	557,9
440-11	588,8	36,7164	604,4	37,6892	566,7
440-12	588,8	36,7164	597,0	37,2277	559,8
440-13	588,8	36,7164	600,8	37,4647	563,3
440-14	588,8	36,7164	601,0	37,4772	563,5
440-15	588,8	36,7164	602,5	37,5707	564,9
440-16	588,8	36,7164	583,6	36,3921	547,2
440-17	588,8	36,7164	593,6	37,0157	556,6
440-18	588,8	36,7164	585,6	36,5169	549,1
440-28	588,8	36,7164	595,3	37,1217	558,2
440-29	588,8	36,7164	589,1	36,7351	552,4
440-30	588,8	36,7164	586,4	36,5667	549,8
440-31	588,8	36,7164	596,1	37,1716	558,9
440-32	588,8	36,7164	599,5	37,3836	562,1
440-33	588,8	36,7164	587,8	36,6540	551,1
440-34	588,8	36,7164	594,5	37,0718	557,4
440-35	588,8	36,7164	579,7	36,1489	543,6
440-36	588,8	36,7164	599,0	37,3525	561,6

$m_o$  = massa do corpo-de-prova, utilizado na determinação dos parâmetros para condicionamento, no fim da cura, em (g);

$\Delta m$  = massa a ser perdida pelo corpo-de-prova com massa igual a  $m_o$ , em (g);

$m_o$  (B1) = massa do corpo-de-prova do bloco 1, no fim da cura, em (g);

$\Delta m$  (B1) = massa a ser perdida pelo corpo-de-prova do bloco 1, em (g);

$m_o$  (B1) -  $\Delta m$  (B1) = massa a ser atingida pelo corpo-de-prova do bloco 1, em (g).

Massa após cura,  $\Delta m$  e massa a ser atingida para B1-155 e B1-455

Ident.	$m_o$	$\Delta m$	$m_o$ (B1)	$\Delta m$ (B1)	$m_o$ (B1) - $\Delta m$ (B1)
155-10	598,8	34,3983	589,2	33,8468	555,4
155-11	598,8	34,3983	590,4	33,9158	556,5
155-12	598,8	34,3983	578,0	33,2034	544,8
155-13	598,8	34,3983	585,1	33,6113	551,5
155-14	598,8	34,3983	583,5	33,5194	550,0
155-15	598,8	34,3983	584,3	33,5653	550,7
155-16	598,8	34,3983	592,9	34,0594	558,8
155-17	598,8	34,3983	588,9	33,8296	555,1
155-18	598,8	34,3983	585,3	33,6228	551,7
155-28	598,8	34,3983	587,5	33,7492	553,8
155-29	598,8	34,3983	580,7	33,3585	547,3
155-30	598,8	34,3983	576,8	33,1345	543,7
155-31	598,8	34,3983	579,4	33,2839	546,1
155-32	598,8	34,3983	585,6	33,6400	552,0
155-33	598,8	34,3983	574,9	33,0254	541,9
155-34	598,8	34,3983	599,4	34,4328	565,0
155-35	598,8	34,3983	591,5	33,9789	557,5
155-36	598,8	34,3983	595,5	34,2087	561,3
455-10	582,0	44,0408	581,3	43,9878	537,3
455-11	582,0	44,0408	582,5	44,0786	538,4
455-12	582,0	44,0408	583,6	44,1619	539,4
455-13	582,0	44,0408	588,4	44,5251	543,9
455-14	582,0	44,0408	583,7	44,1694	539,5
455-15	582,0	44,0408	567,8	42,9663	524,8
455-16	582,0	44,0408	591,0	44,7218	546,3
455-17	582,0	44,0408	580,8	43,9500	536,9
455-18	582,0	44,0408	580,6	43,9349	536,7
455-28	582,0	44,0408	577,7	43,7154	534,0
455-29	582,0	44,0408	576,5	43,6246	532,9
455-30	582,0	44,0408	575,6	43,5565	532,0
455-31	582,0	44,0408	590,6	44,6916	545,9
455-32	582,0	44,0408	590,8	44,7067	546,1
455-33	582,0	44,0408	586,6	44,3889	542,2
455-34	582,0	44,0408	582,0	44,0408	538,0
455-35	582,0	44,0408	581,8	44,0257	537,8
455-36	582,0	44,0408	588,9	44,5629	544,3

$m_o$  = massa do corpo-de-prova, utilizado na determinação dos parâmetros para condicionamento, no fim da cura, em (g);

$\Delta m$  = massa a ser perdida pelo corpo-de-prova com massa igual a  $m_o$ , em (g);

$m_o$  (B1) = massa do corpo-de-prova do bloco 1, no fim da cura, em (g);

$\Delta m$  (B1) = massa a ser perdida pelo corpo-de-prova do bloco 1, em (g);

$m_o$  (B1) -  $\Delta m$  (B1) = massa a ser atingida pelo corpo-de-prova do bloco 1, em (g).

Massa após cura,  $\Delta m$  e massa a ser atingida para B1-170 e B1-470

Ident.	$m_o$	$\Delta m$	$m_o$ (B1)	$\Delta m$ (B1)	$m_o$ (B1) - $\Delta m$ (B1)
170-10	584,7	39,0222	567,5	37,8743	529,6
170-11	584,7	39,0222	583,6	38,9488	544,7
170-12	584,7	39,0222	582,3	38,8620	543,4
170-13	584,7	39,0222	569,1	37,9811	531,1
170-14	584,7	39,0222	586,1	39,1156	547,0
170-15	584,7	39,0222	579,7	38,6885	541,0
170-16	584,7	39,0222	574,6	38,3481	536,3
170-17	584,7	39,0222	574,2	38,3214	535,9
170-18	584,7	39,0222	572,4	38,2013	534,2
170-28	584,7	39,0222	570,0	38,0411	532,0
170-29	584,7	39,0222	582,8	38,8954	543,9
170-30	584,7	39,0222	590,3	39,3959	550,9
170-31	584,7	39,0222	574,7	38,3548	536,3
170-32	584,7	39,0222	571,1	38,1146	533,0
170-33	584,7	39,0222	576,3	38,4616	537,8
170-34	584,7	39,0222	574,5	38,3415	536,2
170-35	584,7	39,0222	576,1	38,4482	537,7
170-36	584,7	39,0222	579,3	38,6618	540,6
470-10	579,5	44,1658	571,0	43,5180	527,5
470-11	579,5	44,1658	570,6	43,4875	527,1
470-12	579,5	44,1658	572,1	43,6018	528,5
470-13	579,5	44,1658	587,1	44,7450	542,4
470-14	579,5	44,1658	572,7	43,6475	529,1
470-15	579,5	44,1658	572,4	43,6247	528,8
470-16	579,5	44,1658	570,4	43,4723	526,9
470-17	579,5	44,1658	568,5	43,3275	525,2
470-18	579,5	44,1658	576,7	43,9524	532,7
470-28	579,5	44,1658	572,8	43,6552	529,1
470-29	579,5	44,1658	573,0	43,6704	529,3
470-30	579,5	44,1658	576,8	43,9600	532,8
470-31	579,5	44,1658	567,9	43,2817	524,6
470-32	579,5	44,1658	558,6	42,5729	516,0
470-33	579,5	44,1658	567,0	43,2131	523,8
470-34	579,5	44,1658	573,1	43,6780	529,4
470-35	579,5	44,1658	577,8	44,0362	533,8
470-36	579,5	44,1658	577,9	44,0439	533,9

$m_o$  = massa do corpo-de-prova, utilizado na determinação dos parâmetros para condicionamento, no fim da cura, em (g);

$\Delta m$  = massa a ser perdida pelo corpo-de-prova com massa igual a  $m_o$ , em (g);

$m_o$  (B1) = massa do corpo-de-prova do bloco 1, no fim da cura, em (g);

$\Delta m$  (B1) = massa a ser perdida pelo corpo-de-prova do bloco 1, em (g);

$m_o$  (B1) -  $\Delta m$  (B1) = massa a ser atingida pelo corpo-de-prova do bloco 1, em (g).

**APÊNDICE E – Equações utilizadas para o cálculo de algumas  
profundidades de carbonatação**

Amostras cujas profundidades de carbonatação foram calculadas pela equação de melhor ajuste dos pontos existentes, e suas respectivas equações

<b>Identificação da amostra</b>	<b>Equação utilizada para cálculo da <math>e_c</math></b>
B2-170-Esat(7,14,21,28)	$e_c = 0,2424 \cdot t^{0,8965}$
B2-470-Esat(7,14)	$e_c = 5,8067 \cdot \exp^{0,0157 \cdot t}$
B2-470-E6(28)	$e_c = 0,0077 \cdot t^2 + 0,5992 \cdot t + 1,6148$
B3-440-C6(7,14)	$e_c = -0,0002 \cdot t^2 + 0,0586 \cdot t + 1,2565$
B3-155-Esat(14,21)	$e_c = 0,0001 \cdot t^2 + 0,0641 \cdot t + 2,3418$
B3-155-C6(7,14)	$e_c = -0,0003 \cdot t^2 + 0,0863 \cdot t + 1,3727$
B3-155-E6(14,21)	$e_c = 1,6551 \cdot t^{0,4753}$
B3-455-Esat(7)	$e_c = 0,00006 \cdot t^2 + 0,0898 \cdot t + 4,151$
B3-170-Esat(14,21)	$e_c = -0,0011 \cdot t^2 + 0,2537 \cdot t + 1,0439$
B3-170-E6(14,21)	$e_c = 1,8529 \cdot t^{0,5945}$
B4-470-C6(28)	$e_c = 0,6329 \cdot t + 4,124$
B4-470-E6(28)	$e_c = 0,6427 \cdot t + 4,8693$

Onde:

$e_c$  = profundidade de carbonatação (mm);

$t$  = tempo de exposição (dias);

exp = função expoente.

**APÊNDICE F – Valores médios da profundidade de carbonatação aos 7,  
14, 21 e 28 dias de exposição ao CO<sub>2</sub>**

Valores médios das profundidades de carbonatação do bloco 1

Ident.	Tempo exposição (dias)	$e_c$ (mm)	Ident.	Tempo exposição (dias)	$e_c$ (mm)	Ident.	Tempo exposição (dias)	$e_c$ (mm)
140 C sat	7	0,00	155 C sat	7	0,00	170 C sat	7	1,66
	14	0,00		14	1,50		14	3,55
	21	0,00		21	1,15		21	4,39
	28	0,00		28	2,18		28	4,98
140 E sat	7	0,00	155 E sat	7	0,00	170 E sat	7	0,23
	14	0,00		14	2,36		14	5,64
	21	0,00		21	2,84		21	6,58
	28	2,18		28	4,37		28	8,19
140 C 6	7	0,00	155 C 6	7	1,51	170 C 6	7	3,29
	14	0,00		14	1,78		14	4,85
	21	0,00		21	2,39		21	6,55
	28	0,00		28	3,07		28	7,08
140 E 6	7	2,05	155 E 6	7	3,72	170 E 6	7	5,34
	14	2,95		14	5,66		14	8,07
	21	3,60		21	7,77		21	10,93
	28	4,48		28	7,22		28	13,08
440 C sat	7	0,00	455 C sat	7	1,31	470 C sat	7	2,80
	14	0,82		14	2,96		14	5,68
	21	1,33		21	3,89		21	6,14
	28	1,66		28	4,21		28	6,42
440 E sat	7	0,86	455 E sat	7	1,14	470 E sat	7	2,37
	14	3,03		14	4,60		14	6,41
	21	3,32		21	6,10		21	8,28
	28	4,10		28	7,03		28	9,26
440 C 6	7	0,74	455 C 6	7	2,90	470 C 6	7	5,26
	14	1,00		14	3,96		14	7,78
	21	1,93		21	5,17		21	10,22
	28	2,06		28	6,00		28	12,86
440 E 6	7	3,21	455 E 6	7	4,39	470 E 6	7	7,09
	14	3,78		14	5,98		14	10,10
	21	5,54		21	7,87		21	13,28
	28	5,75		28	8,90		28	14,95

Valores médios das profundidades de carbonatação do bloco 2

Ident.	Tempo exposição (dias)	$e_c$ (mm)	Ident.	Tempo exposição (dias)	$e_c$ (mm)	Ident.	Tempo exposição (dias)	$e_c$ (mm)
140 C sat	7	0,00	155 C sat	7	0,00	170 C sat	7	1,88
	14	0,00		14	0,00		14	2,17
	21	0,00		21	0,00		21	2,94
	28	0,00		28	0,00		28	3,04
140 E sat	7	0,00	155 E sat	7	0,00	170 E sat	7	1,39
	14	0,00		14	0,00		14	2,58
	21	0,00		21	0,00		21	3,71
	28	0,00		28	0,00		28	4,81
140 C 6	7	0,92	155 C 6	7	1,85	170 C 6	7	3,23
	14	1,69		14	3,04		14	5,67
	21	2,38		21	4,01		21	7,78
	28	2,38		28	4,12		28	8,68
140 E 6	7	2,01	155 E 6	7	2,90	170 E 6	7	4,40
	14	3,54		14	4,85		14	8,43
	21	4,89		21	6,93		21	12,67
	28	5,25		28	7,56		28	13,32
440 C sat	7	0,00	455 C sat	7	0,00	470 C sat	7	3,43
	14	0,00		14	2,61		14	4,40
	21	0,00		21	2,96		21	5,72
	28	1,05		28	3,05		28	5,44
440 E sat	7	0,00	455 E sat	7	0,00	470 E sat	7	6,48
	14	0,00		14	3,42		14	7,23
	21	0,00		21	4,75		21	8,52
	28	2,14		28	5,10		28	8,77
440 C 6	7	1,99	455 C 6	7	3,73	470 C 6	7	6,60
	14	3,28		14	6,02		14	11,02
	21	3,98		21	7,84		21	14,20
	28	4,21		28	8,30		28	16,39
440 E 6	7	2,48	455 E 6	7	4,10	470 E 6	7	6,13
	14	4,59		14	7,50		14	11,56
	21	5,89		21	10,24		21	18,52
	28	6,37		28	11,11		28	24,43

Valores médios das profundidades de carbonatação do bloco 3

Ident.	Tempo exposição (dias)	$e_c$ (mm)	Ident.	Tempo exposição (dias)	$e_c$ (mm)	Ident.	Tempo exposição (dias)	$e_c$ (mm)
140 C sat	7	0,00	155 C sat	7	1,30	170 C sat	7	2,23
	14	0,00		14	1,59		14	2,53
	21	0,00		21	1,50		21	3,49
	28	1,10		28	2,49		28	5,46
140 E sat	7	0,00	155 E sat	7	2,18	170 E sat	7	4,29
	14	0,00		14	3,26		14	4,38
	21	1,46		21	3,73		21	5,89
	28	2,38		28	4,30		28	7,04
140 C 6	7	0,00	155 C 6	7	1,96	170 C 6	7	6,35
	14	0,00		14	2,52		14	6,39
	21	0,00		21	2,92		21	6,62
	28	1,81		28	3,85		28	7,39
140 E 6	7	2,54	155 E 6	7	5,32	170 E 6	7	7,03
	14	3,53		14	5,80		14	8,90
	21	4,64		21	7,04		21	11,32
	28	5,70		28	8,21		28	14,01
440 C sat	7	1,24	455 C sat	7	2,12	470 C sat	7	3,97
	14	1,98		14	2,57		14	4,52
	21	1,83		21	3,07		21	5,96
	28	2,19		28	4,04		28	8,45
440 E sat	7	3,30	455 E sat	7	4,78	470 E sat	7	6,86
	14	3,69		14	5,37		14	8,08
	21	4,03		21	6,24		21	10,07
	28	4,51		28	6,68		28	10,60
440 C 6	7	1,66	455 C 6	7	4,55	470 C 6	7	8,19
	14	2,04		14	4,90		14	8,87
	21	2,35		21	5,61		21	10,04
	28	2,80		28	6,36		28	11,80
440 E 6	7	2,44	455 E 6	7	3,74	470 E 6	7	5,94
	14	3,89		14	5,85		14	9,60
	21	4,07		21	6,74		21	11,17
	28	4,93		28	7,88		28	12,70

Valores médios das profundidades de carbonatação do bloco 4

Ident.	Tempo exposição (dias)	$e_c$ (mm)	Ident.	Tempo exposição (dias)	$e_c$ (mm)	Ident.	Tempo exposição (dias)	$e_c$ (mm)
140 C sat	7	-	155 C sat	7	-	170 C sat	7	-
	14	-		14	-		14	-
	21	-		21	-		21	-
	28	-		28	-		28	-
140 E sat	7	-	155 E sat	7	-	170 E sat	7	-
	14	-		14	-		14	-
	21	-		21	-		21	-
	28	-		28	-		28	-
140 C 6	7	1,23	155 C 6	7	2,23	170 C 6	7	4,15
	14	1,99		14	2,96		14	6,35
	21	2,47		21	3,28		21	7,73
	28	2,77		28	3,66		28	9,14
140 E 6	7	2,53	155 E 6	7	2,94	170 E 6	7	5,83
	14	4,22		14	5,59		14	9,68
	21	4,44		21	5,48		21	10,95
	28	5,53		28	7,26		28	13,78
440 C sat	7	-	455 C sat	7	-	470 C sat	7	-
	14	-		14	-		14	-
	21	-		21	-		21	-
	28	-		28	-		28	-
440 E sat	7	-	455 E sat	7	-	470 E sat	7	-
	14	-		14	-		14	-
	21	-		21	-		21	-
	28	-		28	-		28	-
440 C 6	7	2,51	455 C 6	7	5,24	470 C 6	7	8,53
	14	3,55		14	7,23		14	12,40
	21	3,83		21	8,54		21	17,15
	28	4,34		28	9,64		28	21,85
440 E 6	7	3,96	455 E 6	7	7,01	470 E 6	7	10,02
	14	4,77		14	8,19		14	13,60
	21	5,44		21	11,09		21	17,84
	28	6,76		28	12,50		28	22,87

**APÊNDICE G – Resultados da resistência à compressão axial dos quatro blocos de ensaio, aos 7, 28 e 63 dias**

Resultados da resistência à compressão axial dos quatro blocos de ensaios

Bloco	Idade ruptura (dias)	Médias da resistência à compressão axial ( $f_c$ ), em MPa					
		140	155	170	440	455	470
Bloco 1	7	35,24	25,03	15,77	30,43	19,45	12,87
		29,57	25,41	16,21	31,82	19,87	12,83
		33,43	22,90	14,30	29,49	19,50	12,41
	28	32,14	29,35	17,90	44,00	30,63	21,69
		41,60	29,22	19,27	40,58	27,63	20,30
		39,23	29,32	19,65	29,35	30,06	20,68
	63	46,10	34,02	20,51	51,81	33,61	27,13
		45,80	31,52	19,89	52,02	31,02	27,79
		40,40	30,80	20,74	48,44	34,61	27,82
Bloco 2	7	32,47	22,97	15,80	29,35	18,37	11,35
		32,11	21,80	15,62	28,53	18,65	13,66
		32,18	23,76	16,19	29,32	18,91	12,11
	28	38,11	28,03	19,41	40,91	28,56	19,69
		38,54	29,57	18,46	41,68	26,14	19,11
		37,98	27,74	19,18	43,15	29,63	21,71
	63	42,62	31,42	19,89	48,30	36,14	27,20
		43,23	29,59	18,74	51,88	35,41	26,47
		42,89	29,86	20,30	51,31	38,44	26,90
Bloco 3	7	26,75	23,10	16,51	26,13	19,56	12,78
		36,64	23,70	15,57	25,61	19,45	12,17
		-	-	-	-	-	-
	28	41,91	27,28	21,26	38,53	30,78	21,40
		40,45	27,79	22,47	41,54	27,22	21,86
		-	-	-	-	-	-
	63	38,87	29,72	21,50	45,77	34,18	27,37
		42,91	28,75	21,93	43,37	33,66	28,94
		-	-	-	-	-	-
Bloco 4	7	34,40	22,23	15,05	29,41	18,17	12,21
		31,24	24,04	15,60	30,14	19,36	12,53
		25,75	23,29	15,81	28,93	18,63	11,91
	28	29,92	28,32	18,22	36,33	30,03	20,29
		33,22	29,50	18,17	47,97	28,12	20,93
		40,75	29,41	-	44,09	31,82	-
	63	44,95	31,53	17,97	50,38	39,42	26,37
		45,46	32,76	18,47	46,96	37,77	25,57
		44,32	31,00	-	51,81	36,56	-

**APÊNDICE H – Dados de alguns equipamentos e materiais, e seus respectivos fornecedores**

- **Argamassadeira**

Descrição:

Misturador forçado de eixo horizontal marca CONSOLID, mod. MH-80, para mistura de argamassas industrializadas. Capacidade total de 80 L (4 sacos) e produção estimada em 30 ciclos/hora ou 1,5 m<sup>3</sup>/h. Acionamento por motorreductor tipo coroa e pinhão, com motor elétrico de 3CV (2,2 kW) 220/380V. Chave elétrica liga-desliga. Grelha superior basculante com rasga-saco para abertura de embalagens. Comporta de descarga inferior acionada por alavanca manual. Eixo de mistura maciço com 4 pás justapostas e 2 raspadores laterais para perfeita homogeneização, apoiado sobre mancais de alumínio com buchas de nylon e vedação por retentores de borracha e graxa em ambas laterais do tanque. Pés tubulares com dois rodízios de borracha maciça e altura dimensionada par acesso com carrinho de mão. Equipamento fabricado em aço carbono com pintura em esmalte sintético nas cores laranja e azul.

Fornecedor:

Polimaq Dist. Const. Ltda

Praça Walter Schultz, 42 – Porto Alegre – RS

Fone: (51) 3340-6300

- **Seladora**

Descrição:

Equipamento de soldar plásticos, marca Araújo.

Fabricante:

Fone: (51) 3348-4226

[www.maquinasaraujo.com.br](http://www.maquinasaraujo.com.br)

Fornecedor:

Ferramentas Gerais S.A.

Rua Voluntários da Pátria, 3223 - Navegantes – Porto Alegre – RS

Fone: (51) 3358-1077

- **Embalagens**

Descrição:

Embalagens utilizadas para o procedimento da RILEM. Estas embalagens são empregadas para embalar café em pó, à vácuo. Sua composição consiste em: poliéster (17g/m<sup>2</sup>) + adesivo (3g/m<sup>2</sup>) + alumínio (21,6g/m<sup>2</sup>) + adesivo (3g/m<sup>2</sup>) + filme de polietileno (90g/m<sup>2</sup>).

Fornecedor:

Chellmar Embalagem Moderna Ltda

Rua Bento Gonçalves, 4798, sala 309 – Porto Alegre – RS

Fone: (51) 3336-9545