

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA CARBONATAÇÃO DO  
CONCRETO COM ADIÇÃO DE SÍLICA ATIVA EM  
AMBIENTE NATURAL E ACELERADO**

**Edna Possan**

Porto Alegre  
setembro 2004

**EDNA POSSAN**

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA CARBONATAÇÃO DO  
CONCRETO COM ADIÇÃO DE SÍLICA ATIVA EM  
AMBIENTE NATURAL E ACELERADO**

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

Porto Alegre  
setembro 2004

POSSAN, Edna

Contribuição ao estudo da carbonatação do concreto com adição de sílica ativa em ambiente natural e acelerado / Possan, Edna – Porto Alegre: PPGEC/UFRGS, 2004.

153p.

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 Malin e Jairo José de Oliveira Andrade.

1. carbonatação 2. sílica ativa 3. ensaios de degradação 4. durabilidade 5. previsão de vida útil

I. Contribuição ao estudo da carbonatação do concreto com adição de sílica ativa em ambiente natural e acelerado.

CCAA2

**EDNA POSSAN**

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA CARBONATAÇÃO DO  
CONCRETO COM ADIÇÃO DE SÍLICA ATIVA EM  
AMBIENTE NATURAL E ACELERADO**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 24 de setembro de 2004

Prof<sup>a</sup>. Denise Carpena Coitinho Dal Molin  
Dra. pela EPUSP/USP  
orientadora

Prof. Jairo José de Oliveira Andrade  
Dr. pela UFRGS  
orientador

Prof. Américo Campos Filho  
Coordenador do PPGEC/UFRGS

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Claudio de Souza Kazmierczak (UNISINOS)**  
Dr. pela Universidade de São Paulo

**Prof<sup>a</sup>. Aguida Gomes de Abreu**  
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho (UFRGS)**  
PhD. pela Universidade de Ledees

*Dedico este trabalho  
a meus queridos pais,  
Adair e Helena Possan*

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus que me conferiu a capacidade desta conquista.

A professora Denise Dal Molin, pela orientação competente e principalmente incentivo e amizade dispensados na elaboração deste trabalho.

A Jairo Andrade, pela co-orientação, amizade e otimismo demonstrados desde o início desta dissertação.

Ao professor Ribeiro pela grande ajuda na modelagem dos resultados.

Ao NORIE, núcleo de pesquisa de muita competência e integração, do qual tive a honra de fazer parte. Aos colegas do NORIE, pela camaradagem e aos professores pela oportunidade de aprimorar meus conhecimentos e aprendizado.

Aos colegas do grupo de pesquisa de materiais Aguida, Aline, Alexandre, Ana Paula, Bernardo, Cristiane, Daniel, Elaine, Geilma, Lucilia, Marcelo, Maria Tereza, Natália, Sandro e Simone, pelo companheirismo e apoio recebido.

A Elaine Moreira e Simone Venquiaruto, presentes em todos os momentos, valeu pela amizade, otimismo, colaboração, dedicação e carinho. A Aline Morales, pelas inúmeras sugestões e amizade.

A Helenize, Flávia e Fernanda Moscarelli, pela amizade e companheirismo, os nossos bate-papos foram inspirações de grandes idéias.

A minha irmã Flaviane, que sempre me apoiou, compreendeu e ajudou, a qual teve a experiência de morar comigo durante todo o mestrado aturando meus devaneios e crises, valeu pela paciência.

A meu irmão Edison e a mana Adriana, sempre confiantes e otimistas elevavam meu espírito em todos os momentos.

A meus amados pais Adair e Helena, razão de minha existência e principais responsáveis por essa conquista, obrigada por tudo.

Aos amigos do Paraná, Andrea, Simone, Fabio, Leila, Jorge, Telma, Jackeline, Vanessa, Sakamoto... pelo carinho o apoio.

A Carlos Alberto Demoliner pela grande amizade, atenção, credibilidade e otimismo dedicado. Por tudo isso é que lhe admiro e lhe adoro cada dia mais.

A Carlos Roberto de Toledo Leonardo, amigo de longa data, que muito colaborou para a continuidade de meus estudos, pela credibilidade, confiança e segurança.

As iniciadoras deste projeto, Fernanda e Marlova, que muito corroboraram para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao CNPq e a CAPES, pela bolsa de estudos e a Universidade Federal do Rio Grande do Sul, por ter concedido a oportunidade de realizar um curso de pós-graduação.

A todos, muito obrigada.

*“Resplandecente é a Sabedoria, e a sua beleza é inalterável: os que a amam, descobrem-na facilmente, os que a procuram encontram-na, ela antecipa-se aos que a desejam”.*

*(Sab, 6, 12-13)*

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	11
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	14
<b>RESUMO</b> .....	16
<b>ABSTRACT</b> .....	17
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	18
1.1 OBJETIVOS.....	21
1.2 DEFINIÇÃO DAS LIMITAÇÕES DA PESQUISA.....	22
1.3 DELINEAMENTO DA PESQUISA.....	23
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	24
<b>2 DURABILIDADE DO CONCRETO</b> .....	26
2.1 DEGRADAÇÃO DO CONCRETO.....	30
2.2 CARBONATAÇÃO DO CONCRETO.....	32
2.2.1 Generalidades.....	32
2.2.2 Fatores que Influenciam a Profundidade de Carbonatação.....	35
2.2.2.1 Características ambientais e condições de exposição.....	35
2.2.2.2 Características do concreto.....	41
2.3 ENSAIOS DE DURABILIDADE.....	45
2.3.1 Ensaio ao Natural.....	47
2.3.2 Ensaio Acelerado.....	49
2.3.3 Coeficientes de Carbonatação e de Aceleração.....	51
<b>3 PREVISÃO DE VIDA ÚTIL</b> .....	61
3.1 GENERALIDADES.....	61

3.2 ABORDAGENS PARA PREVISÃO DE VIDA ÚTIL .....	65
3.3 MODELOS DE PREVISÃO .....	68
<b>4 METODOLOGIA DA PESQUISA .....</b>	<b>74</b>
4.1 GENERALIDADES .....	74
4.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL .....	76
4.2.1 Variáveis de Análise .....	77
4.2.2 Planejamento dos Experimentos .....	78
4.2.3 Materiais .....	79
4.2.3.1 Agregados .....	79
4.2.3.2 Cimento .....	80
4.2.3.3 Sílica Ativa .....	82
4.2.3.4 Aditivo .....	83
4.2.3.5 Água .....	83
4.2.4 Proporcionamento dos Materiais .....	83
4.2.5 Confeção dos Corpos-de-prova .....	85
4.2.6 Ensaio .....	87
4.2.6.1 Ensaio de profundidade de carbonatação acelerado .....	87
4.2.6.2 Ensaio de profundidade de carbonatação natural .....	89
4.2.7 Ensaio Complementares .....	90
4.2.7.1 Resistência à compressão axial .....	90
4.2.7.2 Reconstituição parcial de traço de concreto endurecido .....	90
4.2.8 Caracterização do Ambiente de Exposição .....	94
<b>5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>100</b>
5.1 CARBONATAÇÃO ACELERADA DO CONCRETO .....	101

5.2 CARBONATAÇÃO NATURAL DO CONCRETO .....	109
5.3 COEFICIENTES DE CARBONATAÇÃO E ACELERAÇÃO .....	114
5.3.1 Determinação dos Coeficientes de Carbonatação .....	114
5.3.2 Determinação dos Coeficientes de Aceleração .....	121
5.3.3 Aplicação do Coeficiente de Aceleração.....	124
5.3.4 Coeficientes de Carbonatação e Aceleração: Visão Geral .....	126
5.3.4.1 Discussão a partir do modelo ajustado para os dados experimentais .....	126
5.3.4.2 Discussão a partir do modelo da raiz quadrada do tempo .....	127
5.4 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL.....	131
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>139</b>
6.1 CONCLUSÕES.....	139
6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	144
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>145</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: delineamento do projeto de pesquisa .....	23
Figura 2: representação esquemática da difusão do CO <sub>2</sub> .....	33
Figura 3: efeito da umidade no coeficiente de difusão do CO <sub>2</sub> .....	34
Figura 4: influência do teor de CO <sub>2</sub> no coeficiente de carbonatação .....	36
Figura 5: profundidade de carbonatação em relação a umidade relativa e o teor de CO <sub>2</sub> .....	38
Figura 6: efeito das condições de exposição na carbonatação – modelo .....	40
Figura 7: influência da cura na profundidade de carbonatação .....	43
Figura 8: relação entre a profundidade de carbonatação (100% de CO <sub>2</sub> ) e a resistência à compressão dos concretos aos 28 dias .....	44
Figura 9: síntese dos problemas enfrentados na aplicação de ensaios ao natural.....	49
Figura 10: resultados dos ensaios de curta duração e de longa duração para diferentes tipos de concreto.....	55
Figura 11: ajuste da curva para a carbonatação com CO <sub>2</sub> de 0,03% .....	56
Figura 12: profundidade de carbonatação obtida por ensaios acelerados e ao natural.....	58
Figura 13: vida útil das estruturas de concreto .....	62
Figura 14: modelo de vida útil para estruturas atacadas pela corrosão de armaduras.....	63
Figura 15: conceituação de vida útil das estruturas de concreto armado tendo como referência o fenômeno de corrosão das armaduras .....	64
Figura 16: estrutura do projeto de Dal Molin et al. ....	75
Figura 17: representação esquemática do desenvolvimento do projeto .....	75
Figura 18: detalhe do projeto de Dal Molin et al.....	76
Figura 19: difratograma da sílica ativa .....	83
Figura 20: consumo de cimento referente à relação água/aglomerante e o teor de adição de sílica ativa .....	84
Figura 21: esquema simplificado da câmara de sazonalidade.....	86
Figura 22: corpos-de-prova em ambiente natural de degradação – estacionamento da Escola de Engenharia/UFRGS.....	86
Figura 23: representação esquemática dos ensaios de durabilidade.....	87

Figura 24: representação esquemática da câmara de carbonatação acelerada.....	88
Figura 25: esquema de produção e exposição dos corpos-de-prova para o ensaio de carbonatação acelerado .....	88
Figura 26: pontos de medição da profundidade de carbonatação.....	89
Figura 27: representação esquemática da técnica de reconstituição de traço.....	91
Figura 28: reconstituição de traço de concreto endurecido, amostra: (a) calcinada; (b) em solução de ácido clorídrico; (c) lavagem; (d) seca em estufa .....	92
Figura 29: umidade relativa do ar registrada na região metropolitana de Porto Alegre durante a realização do ensaio de degradação por carbonatação não acelerado .....	95
Figura 30: precipitação pluviométrica registrada na região metropolitana de Porto Alegre durante a realização do ensaio de degradação por carbonatação não acelerado .....	95
Figura 31: temperatura registrada na região metropolitana de Porto Alegre durante a realização do ensaio de degradação por carbonatação não acelerado .....	96
Figura 32: elementos do clima de Porto Alegre, período de 1916 a 1988 .....	97
Figura 33: carbonatação dos concretos – comportamento observado (obs) e previsto (prev) – nomenclatura: ex: 80-00 – 80 representa relação a/agl de 0,8 e 00 o teor de adição de 0% .....	105
Figura 34: influência da interação entre a relação água/aglomerante e o teor de sílica ativa na profundidade de carbonatação do concreto.....	106
Figura 35: influência da interação entre o teor de adição de sílica ativa e a relação água/aglomerante na profundidade de carbonatação do concreto .....	108
Figura 36: aspecto das amostras carbonatadas em ambiente natural.....	110
Figura 37: influência do teor de adição de sílica ativa na carbonatação do concreto ao longo do tempo.....	113
Figura 38: linearização das curvas de carbonatação – ensaio acelerado com 9 semanas de exposição ao CO <sub>2</sub> : mistura com a/agl 0,80: (a) 0% de sílica ativa; (b) 10% de sílica ativa; (c) 20% de sílica ativa.....	115
Figura 39: linearização das curvas de carbonatação – ensaio acelerado com 14 semanas de exposição ao CO <sub>2</sub> : mistura com a/agl 0,80: (a) 0% de sílica ativa; (b) 10% de sílica ativa; (c) 20% de sílica ativa.....	115
Figura 40: coeficientes de carbonatação – ensaio acelerado: mistura com a/agl 0,80 com 0, 10 e 20% de adição de sílica ativa .....	116
Figura 41: linearização das curvas de carbonatação – ensaio acelerado com 14 semanas de exposição ao CO <sub>2</sub> : mistura com a/agl 0,60: (a) 5% de sílica ativa; (b) 15% de sílica ativa .....	118

Figura 42: estimativa da profundidade carbonatada para uma vida útil de 100 anos em função de $k_{carb}$ .....	119
Figura 43: relação da carbonatação acelerada e natural .....	122
Figura 44: tempo necessário para que a carbonatação acelerada atinja a profundidade total de cobrimento de armadura (15 mm).....	124
Figura 45: representação do tempo correspondente do ensaio acelerado para o natural para que a profundidade de carbonatação seja de 15 mm .....	125
Figura 46: ensaio acelerado – profundidade de carbonatação observada para as misturas com relação a/agl 0,60 e 0,80 .....	126
Figura 47: representação genérica do comportamento do concreto perante à ação do CO <sub>2</sub> em função do tempo de exposição .....	128
Figura 48: influência da interação entre a relação água/aglomerante e o teor de sílica ativa na resistência à compressão axial aos 28 dias .....	134
Figura 49: influência da interação entre o teor de adição de sílica ativa e a relação a/agl na resistência à compressão axial aos 28 dias .....	134
Figura 50: influência da interação entre a relação água/aglomerante e o teor de sílica ativa na resistência à compressão axial aos 180 dias .....	135
Figura 51: influência da interação entre o teor de adição de sílica ativa e a relação a/agl na resistência à compressão axial aos 180 dias .....	135
Figura 52: influência da interação entre a relação a/agl e o teor de sílica ativa na resistência à compressão axial aos 28 e 180 dias .....	136
Figura 53: influência da adição de sílica ativa na carbonatação e na resistência à compressão axial dos concretos .....	137

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: períodos de realização dos ensaios .....	58
Tabela 2: coeficientes de relação da profundidade de carbonatação.....	72
Tabela 3: variáveis de análise do projeto de pesquisa.....	77
Tabela 4: matriz experimental dos ensaios acelerados.....	78
Tabela 5: matriz experimental dos ensaios ao natural.....	79
Tabela 6: características físicas do agregado miúdo .....	80
Tabela 7: características físicas do agregado graúdo.....	80
Tabela 8: caracterização química do cimento.....	81
Tabela 9: caracterização física do cimento.....	81
Tabela 10: caracterização química da sílica ativa .....	82
Tabela 11: caracterização física da sílica ativa.....	82
Tabela 12: propriedades do aditivo superplastificante .....	83
Tabela 13: traço dos concretos .....	84
Tabela 14: abatimento de tronco de cone (mm) .....	85
Tabela 15: amostras submetidas à técnica de reconstituição de traço.....	93
Tabela 16: traços de concreto reconstituídos.....	93
Tabela 17: ANOVA do modelo para estimativa da profundidade de carbonatação .....	102
Tabela 18: parâmetros dos fatores analisados para estimativa da profundidade de carbonatação.....	102
Tabela 19: profundidade de carbonatação observada (mm) <sup>a</sup> .....	104
Tabela 20: profundidade de carbonatação resultante do modelo (mm).....	104
Tabela 21: profundidade de carbonatação (mm) – ensaio ao natural .....	111
Tabela 22: profundidade de carbonatação média (mm) – ensaio acelerado.....	112
Tabela 23: profundidade de carbonatação média (mm) – ensaio ao natural .....	112
Tabela 24: coeficientes de carbonatação (mm) – ensaio acelerado.....	116
Tabela 25: resistência à compressão dos concretos (MPa): dados observados aos 28 e 180 dias.....	131

Tabela 26: ANOVA do modelo para a estimativa da resistência à compressão axial.....	132
Tabela 27: parâmetros dos fatores analisados para estimativa da resistência à compressão axial.....	132
Tabela 28: resistência à compressão axial dos concretos (MPa): dados previstos aos 28 e 180 dias .....	133

## RESUMO

POSSAN, E. Contribuição ao estudo da carbonatação do concreto com adição de sílica ativa em ambiente natural e acelerado. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Devido à preocupação com a durabilidade das estruturas de concreto armado surgiram novas linhas de pesquisa destacando-se, dentre elas, a previsão de vida útil. Estes estudos deram origem a diversos modelos que tentam estabelecer o comportamento do concreto quando exposto a ambientes agressivos durante um determinado período. Existem várias maneiras de se modelar este comportamento: com base em resultados obtidos em experiências anteriores; a partir de ensaios de degradação acelerados; por métodos determinísticos e probabilísticos ou estocásticos. A estimativa de vida útil das estruturas de concreto empregando dados de ensaios acelerados é recomendada pela ASTM E-632 (1996) desde que estes sejam correlacionados com resultados de ensaios não acelerados ou naturais. A correlação entre estes ensaios possibilita a determinação dos coeficientes de aceleração, os quais expressam o número de vezes em que o ensaio acelerado representa o fenômeno de degradação natural. Dentro deste contexto o presente trabalho avalia a carbonatação do concreto com e sem adição de sílica ativa exposto a degradação natural e acelerada, verificando também a influência do teor desta adição e da relação água/aglomerante na carbonatação. Em paralelo foram determinados os coeficientes de carbonatação ( $k_c$ ) e de aceleração ( $\alpha_a$ ). Os concretos estudados possuem relação água/aglomerante de 0,30; 0,35; 0,45; 0,60 e 0,80 e teor de adição de 0; 5; 10; 15 e 20%. A carbonatação natural das amostras foi avaliada após 7 anos de exposição ao CO<sub>2</sub>, tendo como ambiente de degradação a cidade de Porto Alegre, RS. Os dados de carbonatação acelerada foram obtidos aos 7, 28, 63 e 98 dias de exposição ao CO<sub>2</sub> com concentração de 5%, temperatura de 25°C e umidade relativa (UR) de 70%. Para o ensaio acelerado, baseado em análise estatística por meio de regressão múltipla não-linear, os resultados apontaram que a adição de sílica ativa em dosagens com relação água/aglomerante elevada aumenta a profundidade de carbonatação do concreto. Para a relação água/aglomerante de 0,80 com 0 e 20% de adição de sílica ativa, os coeficientes de aceleração obtidos foram de 31,15 e 35,49, respectivamente.

Palavras-chave: carbonatação; ensaios de degradação; previsão de vida útil; sílica ativa.

## ABSTRACT

POSSAN, E. Contribuição ao estudo da carbonatação do concreto com adição de sílica ativa em ambiente natural e acelerado. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

New researches has been appeared with the concern of reinforced concrete structures durability, standing out the service life prediction. These studies creates some models that establish the concrete performance when exposed to an aggressive environment. There are several ways to modeling this performance: with results obtained in previous tests; with accelerated degradation tests; or deterministic and stochastic methods. The concrete structures service life prediction using short term test data are recommended by ASTM E-632 (1996) since these are correlated with long term test results. The correlation among these tests makes possible the acceleration coefficient determination, which express how the accelerated tests represents the natural degradation phenomenon. In this sense, this work evaluate the concrete carbonation with and without silica fume exposed to natural and accelerated test, verifying the influence of silica fume tenor in this material and water – binder ratio in the carbonation. In addition to this, were determined the carbonation ( $k_c$ ) and acceleration coefficients ( $\alpha_a$ ). The concretes studied has a 0,30; 0,35; 0,45; 0,60 and 0,80 water-binder ratio and 0; 5; 10; 15 and 20% addition tenor. The samples natural carbonation was analyzed after 7 years of CO<sub>2</sub> exhibition from Porto Alegre city environment degradation. The accelerated carbonation data were obtained in 7, 28, 63 and 98 days of CO<sub>2</sub> exhibition with 5% concentration, temperature of 20°C and humidity of 60%. In accelerated tests, based on statistical analysis through nonlinear estimation multiple regression, the results showed that the silica fume addition in high water-binder ratio mixtures increases the concrete carbonation depth. For water-binder ratio 0,80 with silica fume addition of 0 and 20%, the acceleration coefficients obtained were 31,15 and 35,49, respectively.

Key-words: carbonation, accelerated test, service life prediction, silica fume.



## 1 INTRODUÇÃO

A degradação prematura das estruturas de concreto armado, e a conseqüente redução de desempenho, é um problema freqüente em todo o mundo. Esta deterioração, manifestada principalmente pela corrosão das armaduras, ocorre devido ao envelhecimento precoce das estruturas existentes. Pesquisas referentes à durabilidade tentam classificar os mecanismos de deterioração do concreto (ASTM E 632, 1996; MEHTA e GERWICK, 1982; NEVILLE, 1997; AİTCIN, 2000), com a finalidade de estabelecer modelos de previsão e obter o comportamento do concreto ao longo do tempo. O conhecimento deste comportamento permite que sejam estabelecidos parâmetros de projeto que visam a durabilidade, bem como fazer estimativas da vida útil da edificação.

No Brasil, devido à sua difusão como material de construção, o concreto armado está presente em grande parte das estruturas. A preferência por este material está relacionado à facilidade de produção, à boa resistência à compressão, à liberdade de criação arquitetônica, ao baixo custo de produção e à durabilidade. A capital Federal, Brasília, é um exemplo desta liberdade de forma que as estruturas de concreto armado propiciam.

No início do desenvolvimento e utilização do concreto armado, as estruturas eram projetadas utilizando principalmente o bom senso e a experiência profissional, sendo a consideração da durabilidade completamente subjetiva. Neste período, segundo Ho e Lewis (1988) a principal característica controlada do concreto era a resistência à compressão, que durante muito tempo foi tida como fonte única e segura das especificações de projeto.

Com o advento de novas tecnologias, registraram-se grandes avanços na teoria das estruturas e na tecnologia do concreto, que permitiram a construção de edificações cada vez mais esbeltas e econômicas. Com o progresso industrial e o crescimento das cidades, e conseqüentemente com o aumento da poluição urbana, os elementos estruturais passaram a ficar expostos a ambientes extremamente desfavoráveis. E, passados alguns anos, as estruturas, que eram no início consideradas com longa ou quase infinita vida útil, começaram a apresentar níveis de degradação superior aos desejados, caracterizando o envelhecimento precoce. Essa deterioração foi agravada pela constante mudança no tipo e qualidade dos materiais de construção, e em especial, do cimento. Esta problemática ocasionou uma

mudança de paradigma, pois se constatou que as estruturas interagiam com o meio onde estavam inseridas e somente o parâmetro de resistência à compressão era insuficiente para o controle da durabilidade do concreto.

Ainda começou-se a entender e a valorizar a importância econômica do problema, como mostram Mehta e Monteiro (1994, p.120), onde em países industrialmente desenvolvidos estima-se que 40% do total dos recursos da indústria de construção sejam destinados ao reparo ou manutenção das estruturas existentes.

Desta maneira, iniciaram-se estudos de durabilidade procurando identificar os mecanismos de deterioração das estruturas, englobando a caracterização dos meios agressivos e a determinação das características de durabilidade do concreto. Verificou-se que a dosagem, o teor e o tipo de adições, a relação água/aglomerante, o tipo de cimento, o tipo e a duração da cura e o ambiente de exposição exercem grande influência na durabilidade.

As características de durabilidade do concreto, normalmente, são obtidas por intermédio de ensaios em laboratório. Estes resultados, em geral, são oriundos de testes acelerados, caracterizados como de curta duração, que nem sempre representam as condições existentes na estrutura real. Diversos pesquisadores utilizam estes ensaios para estimar a durabilidade do concreto (HO e LEWIS, 1987; HELENE, 1993; LIMA, 1999; HOUST e WITTMANN, 2002; VIEIRA, 2003; entre outros). A ASTM E 632 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 1996) recomenda a utilização destes ensaios para a previsão de vida útil, desde que sejam correlacionados com resultados obtidos em estruturas existentes ou testes de degradação natural, também denominados de não acelerados.

A determinação destas correlações, denominada coeficiente de aceleração ( $\alpha_a$ ), é de fundamental importância na modelagem e previsão de vida útil. Estes coeficientes possibilitam uma maior aproximação das estimativas e, conseqüentemente, um aumento da confiabilidade. Também podem ser utilizados como ferramenta de tomada de decisão gerencial, quando inclusos no projeto, auxiliando na análise de rentabilidade econômica e na seleção das intervenções de manutenção, inspeção e reparo.

A fim de modelar o comportamento do concreto, nas últimas décadas, foram desenvolvidas muitas pesquisas que contribuíram na geração de vários modelos destinados à previsão de vida útil das estruturas de concreto armado, dentre os quais destacam-se os apresentados por

Hamada (1969), Tuutti (1982), Papadakis, Vayenas e Fardis (1989), Parrot (1991), Andrade (2001), entre outros.

Os modelos para a previsão de vida útil de estruturas, em geral, buscam representar a penetração dos agentes agressivos através do concreto, principalmente no que se refere à carbonatação e à penetração de íons cloreto. Segundo Andrade e Dal Molin (2003), tais modelos apresentam algumas restrições como: representar apenas uma parte do fenômeno; restringir a sua aplicação a situações determinadas e, para as formulações mais sofisticadas, observa-se que há uma dificuldade na resolução das mesmas e na obtenção dos parâmetros requeridos.

A literatura aponta muitos modelos matemáticos que podem ser empregados para a estimativa da profundidade de carbonatação do concreto (HAMADA, 1969; SMOLCZYK, 1969; PAPADAKIS, VAYENAS e FARDIS, 1989; PARROT, 1991; JIANG, LIN e CAI, 2000). Porém, devido a dificuldade de obtenção de alguns parâmetros referentes às características das edificações, necessários para a utilização nos modelos, observa-se uma grande complexidade de aplicação dos mesmos para estimar com confiança a vida útil de estruturas existentes.

Esses modelos geralmente apresentam duas abordagens: uma determinística e outra probabilística ou estocástica. Os modelos deterministas consideram os valores máximos de profundidade carbonatada. Os estocásticos são desenvolvidos considerando que existe uma probabilidade de ocorrência dos principais fatores que afetam o fenômeno e a profundidade de carbonatação, que pode ser estimada considerando a variabilidade inerente do processo.

Na grande maioria, estes modelos são desenvolvidos com base em resultados de corpos-de-prova moldados em laboratório, que representam condições diferenciadas das realmente encontradas nas estruturas reais. Com relação à carbonatação do concreto, Figueiredo (2004, p.3) argumenta que os ensaios de avaliação do fenômeno geralmente são realizados em condições aceleradas em laboratório, não avaliando as condições de exposição às quais as edificações estarão de fato submetidas, nem os teores de CO<sub>2</sub> reais existentes no ambiente de exposição destas estruturas.

Alguns progressos foram feitos nas décadas passadas, buscando o entendimento dos vários mecanismos de deterioração do concreto. Porém, a previsão da vida útil de estruturas de concreto sob condições rigorosas de serviço ainda não pode ser feita com modelos

matemáticos devido à dificuldade de determinação dos fatores que regem as condições naturais (LI e CHAU, 2004).

Face a tais considerações, vale ressaltar que os estudos de previsão de vida útil para estruturas de concreto, em específico os que tentam correlacionar os ensaios de degradação acelerados e natural, ainda são recentes e escassos, justificando assim o desenvolvimento desta pesquisa.

O grupo de pesquisas do Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação (NORIE) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) possui uma base de dados oriundos de ensaios de durabilidade acelerados em concreto, que podem ser correlacionados com dados de ensaios de longa duração ou não acelerados, a fim de determinar os coeficientes de aceleração para a modelagem e previsão de vida útil das estruturas. Com base nesta consideração, este trabalho contempla a análise de parte dos dados dos ensaios acelerados de carbonatação em concreto realizados pelos pesquisadores do NORIE<sup>1</sup>, através da determinação dos coeficientes de aceleração de dosagens de concreto com e sem sílica ativa com relação água/aglomerante variada.

## 1.1 OBJETIVOS

O objetivo principal desta pesquisa é a avaliação comparativa entre o desempenho de concretos com e sem adição de sílica ativa submetidos ao ensaio de carbonatação natural e acelerado.

Em decorrência do objetivo principal, são propostos os seguintes objetivos secundários:

- a) elaboração de um modelo matemático que represente o fenômeno de carbonatação em condição acelerada para os concretos estudados;
- b) determinação dos coeficientes de aceleração entre os ensaios de carbonatação acelerado e o natural;
- c) determinação dos coeficientes de carbonatação dos concretos estudados expostos em ambiente acelerado e natural;

---

<sup>1</sup> Dados oriundos dos projetos de Dal Molin et al.(1997) e de Kulakowski (2002).

- d) verificação da influência da relação água/aglomerante na carbonatação do concreto;
- e) avaliação da influência do teor de sílica ativa na carbonatação dos concretos em estudo;
- f) verificação da influência reação entre a resistência à compressão do concreto na profundidade de carbonatação nos concretos estudados.

## 1.2 DEFINIÇÃO DAS LIMITAÇÕES DA PESQUISA

Como primeira limitação de pesquisa destaca-se o ambiente urbano de exposição das amostras empregadas no ensaio natural. Estas foram expostas à degradação na cidade de Porto Alegre, RS, sendo que, os resultados deste trabalho são válidos para ambientes com características de climatologia e agressividade ambiental semelhante ao da realização desta pesquisa.

Outra limitação da pesquisa é quanto ao cimento, à sílica ativa e as relações água/aglomerante empregados no programa experimental de Dal Molin et al. (1997) a partir do qual se deu esta pesquisa. A fim de verificar a influência da adição de sílica ativa, o referido programa foi desenvolvido com cimento CPV ARI. Este cimento foi escolhido por ser isento de adições pozolânicas e conter no máximo 5 % de adições carbonáticas. A sílica ativa foi adicionada ao concreto nos teores de 0, 5, 10, 15 e 20%, em relação à massa de cimento. Quanto às relações água/aglomerante, para o ensaio acelerado empregou-se 0,30; 0,40; 0,45; 0,60 e 0,80 e para o ensaio natural 0,30; 0,45 e 0,80.

Na execução dos experimentos, as condições de aceleração descritas no programa experimental, por representarem as condições de um ambiente específico de estudo, também impõem limitação a esta pesquisa.

### 1.3 DELINEAMENTO DA PESQUISA

A Figura 1 apresenta o fluxograma de delineamento da pesquisa. Observa-se, no delineamento, que a revisão de literatura abrange todas as etapas do projeto, subsidiando com informações técnicas o programa experimental e a análise de resultados.

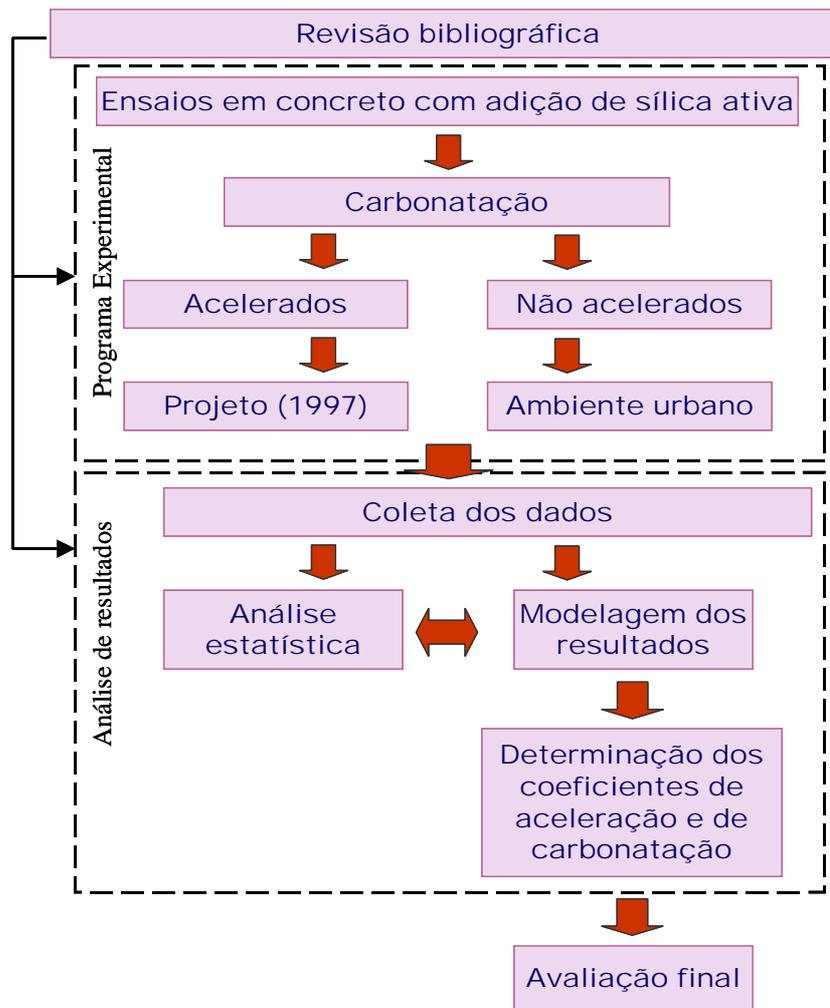


Figura 1: delineamento do projeto de pesquisa

Para a elaboração deste trabalho, optou-se pela estratégia de pesquisa analítica, que se deu a partir de dados experimentais obtidos por Dal Molin et al (1997). Assim, na fase denominada **pesquisa experimental**, os ensaios acelerados foram realizados em 1997, por outros pesquisadores, sendo que, o ensaio não acelerado (natural), que teve início no mesmo ano, foi realizado especificamente para esta pesquisa conferindo assim, em parte, um programa experimental.

A fase de pesquisa analítica engloba a **análise dos resultados**. Realizada com base em ferramentas estatística, em especial, regressão não linear, com o propósito de se modelar os resultados obtidos na pesquisa experimental. A partir dos modelos, para o fenômeno da carbonatação, fizeram-se as correlações entre os ensaios de degradação acelerados e ao natural para, finalmente, determinar os coeficientes de aceleração e de carbonatação dos concretos em estudo.

#### 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

A dissertação está estruturada em seis capítulos, sendo o capítulo inicial dedicado à introdução do tema, descrevendo a importância e os objetivos que motivaram a realização desta pesquisa, bem como as limitações e o delineamento do trabalho.

Na revisão de literatura, o segundo capítulo destina-se ao tema relativo à durabilidade do concreto armado, onde são descritos os aspectos de degradação do concreto bem como os principais procedimentos de ensaios para essa estimativa. Este capítulo também contempla a carbonatação do concreto e seus efeitos, destacando-se os fatores de maior influência no processo. Finalmente, são citados os principais estudos referentes à carbonatação das estruturas de concreto, discutindo as metodologias adotadas na realização dos testes de degradação acelerados e ao natural, a fim de justificar a importância da determinação dos coeficientes de aceleração para previsão de vida útil.

No que se refere à previsão de vida útil das estruturas de concreto, a revisão de literatura apresentada no capítulo 3, engloba os diferentes meios utilizados para essa determinação, apresentando também os principais modelos referentes à carbonatação do concreto.

O programa experimental, que deu origem aos dados utilizados na pesquisa analítica, é apresentado no capítulo 4, onde são descritos as variáveis de análise, os materiais utilizados, os procedimentos e as metodologias dos ensaios e a caracterização do ambiente de exposição.

O capítulo 5 consiste na apresentação e análise dos resultados obtidos no estudo experimental. Utilizando-se procedimentos estatísticos, principalmente análise de variância, são verificados os principais fatores de influência na carbonatação do concreto, bem como o modelo matemático que representa o fenômeno. Com base no modelo de comportamento dos

concretos frente à carbonatação são determinados os coeficientes de aceleração e, a partir do modelo convencional da raiz quadrada do tempo, são determinados os coeficientes de carbonatação. Este capítulo também é reservado ao estudo da resistência à compressão dos concretos, sendo determinado o modelo matemático que representa o conjunto de dados.

O capítulo 6 abrange as considerações finais referentes à avaliação comparativa de concretos, com e sem sílica ativa, carbonatados em ambiente natural e acelerado. Também são discutidos os aspectos relativos à determinação dos coeficientes de aceleração e de carbonatação e da influência da adição de sílica ativa, da relação água/aglomerante e da resistência à compressão na carbonatação do concreto. Finalmente, são registradas as sugestões para futuros trabalhos.

## 2 DURABILIDADE DO CONCRETO

A preocupação com a durabilidade do concreto teve início na década de 70, quando as estruturas, que até então eram consideradas “eternas” ou de vida útil infinita, começaram a apresentar deterioração precoce. Esse fato fez com que a durabilidade fosse vista como assunto principal de pesquisa, promovendo o desenvolvimento de diversos estudos e definições referentes ao tema, principalmente no final dos anos 80 e 90 (JOHN, 1987; HELENE, 1993; SILVA FILHO, 1994; NIREKI, 1996, CEB 238, 1997; entre outros).

As primeiras definições relativas à durabilidade dos concretos geralmente caracterizavam-se pela forma simplista, confundindo o conceito de durabilidade com vida útil. Segundo Aitcin (2000, p.539), em termos gerais, a expressão durabilidade do concreto é usualmente empregada para caracterizar a resistência do concreto ao ataque de agentes agressivos físicos e químicos. A natureza, a intensidade e os mecanismos implicados em cada um desses diversos ataques podem variar consideravelmente, e essa é a razão pela qual a expressão durabilidade do concreto é entendida como muito vaga.

Segundo o ACI 201 (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 1991 p.2), durabilidade do concreto de cimento Portland é definida como a capacidade deste resistir à ação das intempéries, ataques químicos, abrasão ou qualquer outro processo de deterioração. Um concreto será durável se conservar sua forma original, qualidade e capacidade de utilização quando exposto à ação ambiental e uso.

A recomendação japonesa para previsão de vida útil de estruturas, citada por Nireki (1996), conceitua durabilidade como a habilidade de uma edificação, suas partes componentes, ou materiais, de resistir à ação de agentes de degradação durante um período de tempo. No entanto, o autor comenta de uma forma simplista que, para uma edificação convencional, inserida num ambiente normal e com materiais tradicionais, não é muito difícil prever a durabilidade, baseando-se somente em experiências anteriores. Porém, se o ambiente for modificado ou se utilizar materiais não convencionais, não se consegue fazer a previsão realista da vida útil desta edificação.

Já a norma brasileira para projeto de estruturas de concreto, a NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003, p.13), com relação às exigências de durabilidade, descreve que:

as estruturas de concreto devem ser projetadas e construídas de modo que sob as condições ambientais previstas na época do projeto e quando utilizadas conforme preconizado em projeto conservem suas segurança, estabilidade e aptidão de serviço durante o período correspondente à sua vida útil.

Na definição da norma brasileira nota-se a inserção do ambiente de exposição e das especificações de projeto e suas implicações na durabilidade durante a vida útil da estrutura.

Em relação à durabilidade das estruturas de concreto, o CEB-FIB 203 (COMITE EURO INTERNACIONAL DU BETON, 1990) relata que estas devem ser projetadas, construídas e operadas de tal forma que, sob condições ambientais esperadas, mantenham sua segurança, funcionalidade e aparência aceitável, durante um período de tempo, implícito ou explícito, sem requerer altos custos para manutenção e reparo. Segundo Andrade (1997, p.10) “tal definição pode ser considerada a mais completa, por levar em consideração todos os aspectos relacionados à durabilidade durante a vida útil prevista das edificações, levando-se em consideração a ação do meio ambiente”.

Com base nestas definições, a durabilidade pode ser considerada como um parâmetro relativo às propriedades intrínsecas dos materiais que compõem uma estrutura, sendo o mesmo afetado pelas características do ambiente onde estará inserida a estrutura, pelas condições de utilização, segurança e intervenções de manutenção e reparo. Conforme Amaral Filho (1991), Helene (1993) e Mehta (1994), a durabilidade de uma estrutura de concreto deve ser vista de maneira sistêmica, envolvendo: o projeto da estrutura; a execução e a tecnologia do concreto. Segundo Amaral Filho (1991), cada parte deve satisfazer as suas exigências peculiares de qualidade, pois se qualquer um destes itens apresentar deficiência técnica, certamente o conjunto da estrutura será afetado, mesmo que as outras partes tenham tido desempenho adequado. O CEB 238 (COMITE EURO INTERNACIONAL DU BETON, 1997, p.14) enfoca a importância funcional e econômica da consideração da durabilidade ainda na fase de projeto, onde a preocupação com a durabilidade posterior à entrega do empreendimento gera um incremento de custo, além de apresentar grande dificuldade de análise.

Mehta e Gerwick (1996), tentando definir os fatores intervenientes na durabilidade de uma edificação, propõem que os seguintes requisitos devem ser atendidos para que uma estrutura de concreto seja durável, conforme sua especificação e destino:

- a) projeto estrutural e detalhamento de projeto;
- b) seleção dos materiais constituintes da mistura;
- c) dosagem do concreto;
- d) lançamento, adensamento e cura;

No projeto, a preocupação com a durabilidade pode ocasionar muitos benefícios, principalmente no que se refere à determinação da vida útil requerida. Esta atenção com a vida útil da edificação corrobora para que não sejam construídas estruturas que se tornam obsoletas em um curto espaço de tempo e, para que se possam programar, com economia, as intervenções de manutenção e reparo. Um fator de tomada de decisão na etapa de projeto, que reflete diretamente na durabilidade, é a definição da espessura de cobertura. Para o concreto armado, a qualidade e a espessura de cobertura do concreto são fatores de grande importância, pois a camada superficial do concreto é que protege a armadura dos agentes agressivos, através da formação de uma película passivadora de característica alcalina, desempenhando assim, um papel crítico na durabilidade. Helene (1993, p.49) discute a importância do cobertura frente à corrosão das armaduras, e explica que a velocidade de corrosão será função da maior ou menor mobilidade de íons através do concreto de cobertura. Assim, a cinética e o controle da corrosão são predominantemente determinados pelas características deste cobertura. Aïtcin (2000, p.456) reforça a influência do cobertura da armadura na durabilidade, pois este apresenta composição e microestrutura diferente do interior do concreto, devido ao arranjo menos denso dos agregados e à maior concentração de pasta de cimento hidratado. Este efeito é denominado de efeito parede.

Para o ACI 365 (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2000, p.4), uma estrutura de concreto projetada para ser durável requer a consideração de dois fatores: as condições de exposição e as recomendações de projeto com relação aos agentes agressivos físicos e químicos. A influência das condições de exposição, ou severidade do ambiente, pode ser minimizada pela adequada dosagem do concreto (resistência mecânica, água/cimento e

consumo de cimento) ou pela definição de detalhes construtivos, como o cobrimento da armadura.

Segundo Toralles Carbonari e Carbonari (1998, p.61), a durabilidade do concreto está associada a várias propriedades deste material, como a permeabilidade, resistência à abrasão, resistência ao ataque químico (sulfatos, cloretos), resistência aos ciclos de gelo-degelo e resistência aos sais. Mehta (1993) relata que é ponto consensual que a permeabilidade do concreto é o ponto chave para a durabilidade.

Pelo fato da relação água/aglomerante representar o parâmetro real que reflete a compacidade do concreto e a sua permeabilidade aos agentes agressivos, Aïtcin (2000, p.543) enfoca que a redução desta relação é uma condição necessária para obter um concreto durável, mas, que infelizmente, não é suficiente. Segundo o autor, outros fatores podem afetar a durabilidade, em particular os detalhes construtivos, o lançamento, as condições de cura e o ambiente de exposição.

A durabilidade do concreto depende muito da facilidade com que as substâncias agressivas possam ingressar e se deslocar no seu interior (HELENE, 1993; SAETTA, SCHREFLER e VITALIANI, 1993). Procurando mostrar a alta variabilidade das propriedades que norteiam a durabilidade do concreto, Helene (1997) relata que, sob mesmas condições, o coeficiente de carbonatação (que expressa a rapidez da difusão do gás carbônico no concreto) pode variar de 0,1 cm/ano<sup>0,5</sup> para concretos de 60 MPa a 1,0 cm/ano<sup>0,5</sup> para concretos de 15MPa. Nota-se que, enquanto a resistência à compressão quadruplicou o coeficiente de difusão do concreto alterou 10 vezes e a vida útil cerca de 100 vezes, mantido o mesmo cobrimento e condições de exposição. O estudo conclui que a durabilidade, e conseqüentemente a vida útil de uma estrutura, não aumenta na mesma proporção que a resistência à compressão do concreto, e que estes fatores estão nitidamente ligados aos mecanismos de transporte de íons, gases e líquidos.

Aranha (1994) ressalta que a ocorrência dos danos das estruturas de concreto se deve, principalmente, ao efeito combinado da agressividade ambiental com os problemas de natureza estrutural, juntamente com o emprego de práticas executivas inadequadas durante as diversas etapas do processo construtivo. Para Sentler (1987, p.81) a durabilidade das estruturas de concreto armado depende das condições de carregamento e da ação dos agentes agressivos no ambiente de exposição, ou então, da sinergia dos dois. Para solucionar problemas provenientes desta degradação é indispensável compreender o comportamento da

estrutura, o ambiente de exposição em que está inserida e as condições de carregamento impostas durante a vida útil (MAEKAWA; ISHIDA e KISHI, 2003, p.91).

O estudo da durabilidade das estruturas de concreto requer uma aproximação multidisciplinar baseado nas propriedades físicas e químicas dos materiais. Em específico, a durabilidade depende da habilidade do concreto em resistir à penetração de agentes agressivos e de proteger a armadura nele inserida (SAETTA, SCHREFLER e VITALIANI, 1993). Assim, em síntese, pode-se dizer que a durabilidade engloba desde a qualidade do concreto, (materiais constituintes, definições de projeto e execução), as condições naturais do ambiente de exposição que a estrutura está inserida, as operações de manutenção e reparo até as condições de uso que a edificação está submetida durante sua vida útil.

## 2.1 DEGRADAÇÃO DO CONCRETO

Para Nepomuceno (1992, p.5), o principal mecanismo de deterioração das estruturas é a interação do meio ambiente com o concreto. Esta interação ocorre através da penetração de agentes agressivos pelos poros do concreto. Em ordem decrescente de importância, os principais mecanismos de degradação do concreto são a corrosão das armaduras, ação do gelo-degelo em climas frios, os efeitos físico-químicos decorrentes da interação entre a pasta de cimento hidratada e da agressividade do meio ambiente e os efeitos físico-químicos decorrentes de fenômenos internos, como a reação álcali-agregado (MEHTA, 1993). Na prática, a degradação do concreto raramente é devida a uma causa única. Geralmente, em estágios avançados de deterioração do material, mais de um fenômeno deletério está em ação (MEHTA e MONTEIRO, 1994, p.121).

Segundo Silva Filho (1994, p.30), a cinética dos mecanismos de degradação é diretamente governada pela possibilidade de acesso e movimentação de água, carreando os agentes agressivos para o interior do concreto. Em sólidos porosos, a água é a causa de muitos processos físicos e químicos de degradação, pois age como veículo de transporte de íons agressivos. A penetração de gases, água ou íons se dá principalmente através da porosidade da pasta de cimento hidratada, da zona de transição ou das microfissuras.

Os mecanismos que governam a entrada destes agentes agressivos para o interior do concreto são denominados de mecanismos de transporte. Cada mecanismo depende do fluxo e

concentração local da substância penetrante, condições ambientais, estrutura dos poros do concreto, raio dos poros ou abertura das microfissuras, grau de saturação dos poros e temperatura (KROPP e HILSDORF, 1995, p.05).

Existem vários mecanismos de transporte de água, gases e íons no concreto, segundo o CEB 183 (COMITE EURO INTERNACIONAL DU BETON, 1992, p.3). Dentre estes destacam-se a difusão, a sucção capilar e a penetração de água sob pressão.

O mecanismo de difusão, no que se refere à movimentação de íons, está associado principalmente à penetração de íons cloreto e sulfatos. Com relação aos gases, este mecanismo é de fundamental importância no desenvolvimento de carbonatação e de corrosão das armaduras, por envolver, respectivamente, a difusão de gás carbônico e oxigênio (SILVA FILHO, 1994 p.39).

A difusão de gases, em específico gás carbônico e oxigênio, tem grande importância na durabilidade, e conseqüentemente na vida útil das estruturas, principalmente no estudo da corrosão das armaduras. Como citam vários autores, a corrosão é tida como principal causa da degradação das estruturas de concreto armado (TUUTTI, 1982; DAL MOLIN, 1988; HELENE, 1993; ANDRADE, 1997; BROOMFIELD, 1998; entre outros). A armadura pode perder a proteção oferecida pelo concreto (despassivação), por meio da ação de elementos agressivos originários de fontes externas, que atuam sobre o concreto, reduzindo a alcalinidade ou quebrando a película protetora (HELENE, 1993, p.92). Um dos principais iniciadores da corrosão é a carbonatação do concreto, amplamente estudada por muitos pesquisadores (BAKKER, 1988; NEPOMUCENO, 1992; KAZMIERCZAK, 1995; HOUST e WITTMANN, 2002; entre outros).

Frente à importância da qualidade do concreto e dos diversos fatores que interferem na durabilidade das estruturas, o próximo item é reservado à degradação do concreto focando o fenômeno de carbonatação. Também são citados os principais ensaios utilizados para a estimativa da durabilidade.

## 2.2 CARBONATAÇÃO DO CONCRETO

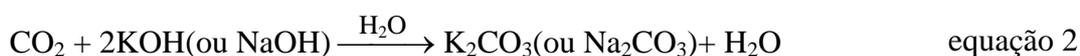
### 2.2.1 Generalidades

A carbonatação é um fenômeno físico-químico oriundo das reações de gases ácidos do ambiente com os produtos alcalinos do concreto. A alcalinidade do concreto é conferida principalmente pela presença do hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), de sódio ( $\text{NaOH}$ ) e de potássio ( $\text{KOH}$ ), dissolvidos ou precipitados no concreto endurecido.

Essa alcalinidade pode ser reduzida ao longo do tempo pela penetração de  $\text{CO}_2$  no interior do concreto. Segundo Helene (1993, p.99-100):

a penetração do gás carbônico no concreto dá-se preponderantemente por um mecanismo de difusão. (...). Portanto, na maioria dos casos trata-se de gradientes de concentração de  $\text{CO}_2$ . Influirá a concentração de  $\text{CO}_2$  no ambiente externo, junto à estrutura, comparativamente à concentração de  $\text{CO}_2$  nos poros capilares do concreto de cobrimento das armaduras.

O  $\text{CO}_2$ , ao penetrar no concreto, reage com os hidróxidos, especialmente com o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , que se apresenta em maior quantidade. A reação do  $\text{CO}_2$  com os hidróxidos ocorre conforme as reações simplificadas mostradas nas equações 1 e 2.



A consequência desta reação resulta na redução do pH do concreto, que normalmente apresenta valor igual ou superior a 12,5. Após as reações o pH é reduzido para um valor igual ou inferior a 9 (BAKKER, 1988, p.25). A carbonatação inicia a partir da superfície, avançando progressivamente para o interior do concreto, formando uma “frente de

carbonatação<sup>2</sup>”. O avanço da frente de carbonatação está diretamente relacionado com a facilidade que o  $\text{CO}_2$  encontra para difundir-se no interior do concreto.

Essas reações ocorrem em fase aquosa, preponderantemente pela difusão do  $\text{CO}_2$  pela interface das películas de ar e água. A Figura 2 apresenta os possíveis estados de difusão de gases nos poros do concreto. Segundo Bakker (1988, p.29), quando o concreto não apresenta água nos poros, Figura 2 (a), a difusão do  $\text{CO}_2$  ocorre normalmente, porém ele permanece na forma de gás e não reage com os compostos do cimento hidratado. Já nos poros totalmente saturados, Figura 2 (b), a carbonatação praticamente não ocorre devido à reduzida taxa de difusão do  $\text{CO}_2$  na água. A difusão deste gás através da água é 4 ordens de grandeza mais lenta do que através do ar (NEVILLE, 1997, p.496). Porém, quando os poros estão parcialmente saturados, Figura 2 (c), a difusão do  $\text{CO}_2$  é facilitada e com a água existente nos poros, se tem a condição mais favorável para o desenvolvimento das reações de carbonatação com os compostos da pasta de cimento hidratada e, portanto, a situação de maior risco para a despassivação da armadura (BAKKER, 1988, p.29).

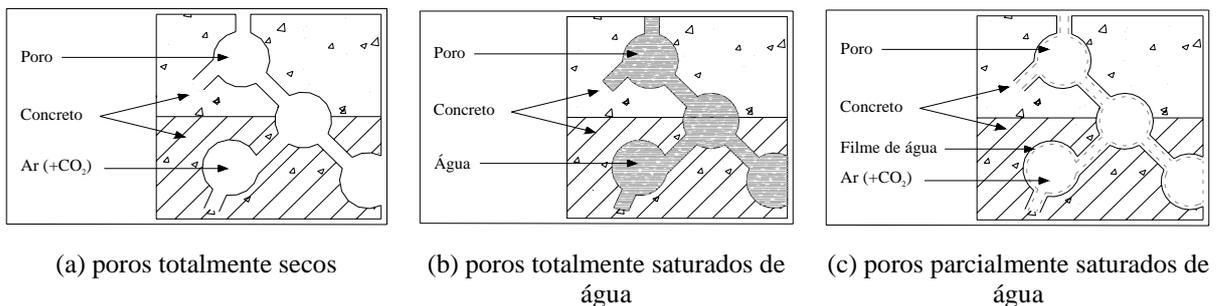


Figura 2: representação esquemática da difusão do  $\text{CO}_2$  (BAKKER, 1988, p.29)

A influência da umidade relativa dos poros do concreto no coeficiente de difusão do  $\text{CO}_2$  é representada graficamente por Steffens, Dinkler e Ahrens (2002), como mostra a Figura 3.

<sup>2</sup> A frente de carbonatação é a zona que separa duas regiões de pH distintos, sendo uma não carbonatada (pH de aproximadamente 12) e outra carbonatada (pH inferior a 9).

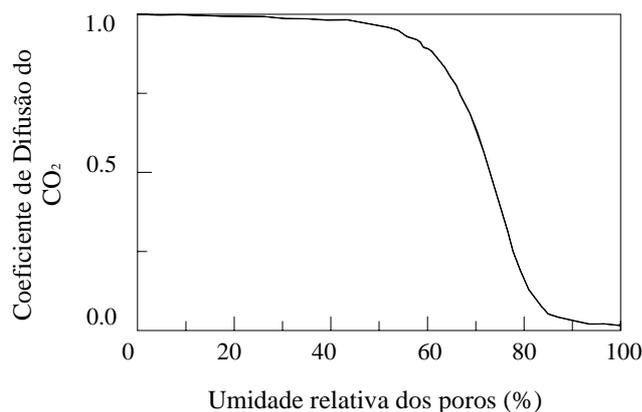


Figura 3: efeito da umidade no coeficiente de difusão do CO<sub>2</sub> (STEFFENS, DINKLER e AHRENS, 2002, p.936)

O coeficiente de difusão decresce consideravelmente quando a umidade relativa dos poros excede 60%. Para umidade relativa dos poros superior a 82% o coeficiente de difusão do CO<sub>2</sub>, em relação ao concreto seco, cai para 10%. Desta forma, a molhagem das partes de uma estrutura pela água da chuva afeta significativamente o tempo necessário para o desenvolvimento da frente de carbonatação (STEFFENS, DINKLER e AHRENS, 2002, p.939). Segundo Bentz (2000), o coeficiente de difusão também é influenciado pela adição de sílica ativa, sendo no mínimo 15 vezes menor para concretos com 10% de adição, o que aumenta substancialmente a vida útil frente à carbonatação de concretos expostos a ambientes agressivos. Em estudo com pasta de cimento, com e sem adição de sílica ativa, Malhotra et al. (1994) relatam que o coeficiente de difusão da pasta de controle após a adição de sílica ativa foi reduzido de 1.0 para 0,25. Para Saetta, Schrefler e Vitaliani (1993), estudos de carbonatação devem, necessariamente, ser associados a estudos de porosidade, uma vez que a penetração do CO<sub>2</sub> é basicamente controlada pela estrutura de poros do material e pela umidade relativa dos poros.

A carbonatação do concreto é um processo lento, apresentando velocidade decrescente (NEVILLE, 1997, p.496). Inicialmente, a profundidade de carbonatação aumenta com grande rapidez, prosseguindo mais lentamente e tendendo assintoticamente a uma profundidade máxima (atenuação). Bakker (1988, p.25) coloca que, sob o ponto de vista termodinâmico, considerando uma situação de equilíbrio ideal, a carbonatação prosseguiria até o consumo total do hidróxido de cálcio, carbonatando totalmente o concreto. Porém, a rede de poros que se modifica ao longo do tempo em função da precipitação dos carbonatos, forma uma barreira física, limitando a velocidade de carbonatação do concreto.

Essa tendência ao estacionamento do fenômeno pode ser explicada pela hidratação crescente do cimento, que aumenta, gradativamente, a compacidade do concreto, além da deposição dos próprios produtos decorrentes da carbonatação, principalmente o carbonato de cálcio, ( $\text{CaCO}_3$ ) que colmatam os poros superficiais, dificultando ao longo do tempo a penetração de  $\text{CO}_2$  para o interior do concreto (HELENE, 1986, p.9).

## 2.2.2 Fatores que Influenciam a Profundidade de Carbonatação

Fatores como relação água/aglomerante, condições de cura, grau de hidratação, quantidade e tipo de cimento, concentração de  $\text{CO}_2$  no ambiente, quantidade de água, temperatura, quantidade de álcalis na pasta de cimento hidratada e presença de fissuras influenciam a taxa de carbonatação do concreto (HOUST e WITTMANN, 2002). Para Neville (1997, p.498), a carbonatação depende ainda da pressão de penetração do agente agressivo e umidade relativa. Uomoto e Yakada (1993) relatam que o fenômeno também sofre influência da concentração de  $\text{CO}_2$  e das condições de exposição (umidade, temperatura). Liang, Qu e Liang (2002, p.128) descrevem que a carbonatação do concreto é um fenômeno predominantemente de difusão que é influenciado, principalmente, pela qualidade do concreto e pelas condições de exposição. Deste modo, com o intuito de abranger os principais fatores de interferência na carbonatação do concreto, os próximos itens contemplam os aspectos referentes às características do ambiente de exposição e da qualidade do concreto.

### 2.2.2.1 Características ambientais e condições de exposição

As **características ambientais** determinantes para que ocorra o fenômeno de difusão são a **concentração de  $\text{CO}_2$** , a **temperatura** e a **umidade relativa do ar**. A carbonatação é diretamente proporcional à temperatura e à concentração de  $\text{CO}_2$ .

A **concentração de  $\text{CO}_2$**  na atmosfera, segundo Kazmierczak (1995, p.17), exerce grande influência na velocidade da carbonatação em estruturas de concreto. Considera-se que a difusão do gás carbônico pelos poros deste material segue os princípios da primeira lei de Fick, segundo a qual a difusão do  $\text{CO}_2$  pelos poros do concreto se dá na razão direta do gradiente de concentração deste gás. Segundo Neville (1997, p.495), a ação do  $\text{CO}_2$  ocorre

mesmo em ambientes onde a concentração desse gás na atmosfera é muito baixa, como é o caso de ambientes rurais, onde o teor de  $\text{CO}_2$  é aproximadamente de 0,03% em volume. O autor faz referência a concentrações típicas de outros ambientes como, por exemplo, em ambiente de laboratório não ventilado, o teor de  $\text{CO}_2$  pode superar 0,1% e em grandes cidades, pode-se chegar até 0,3%, sendo que em alguns casos excepcionais pode-se atingir 1%. Kazmierczak (1995, p.18) relata que os diferentes teores de  $\text{CO}_2$ , encontrados naturalmente na atmosfera, relacionam-se diretamente com a velocidade de carbonatação, mas não alteram o seu mecanismo físico-químico.

Uomoto e Takada (1993), verificando a influência do teor de  $\text{CO}_2$  no avanço da frente de carbonatação, submeteram espécimes de concreto a concentrações de  $\text{CO}_2$  de 0,07% (ambiente natural interno), 1% e 10% (teste acelerado), sob temperatura e umidade controlados ( $T=20^\circ\text{C}$  e  $UR=55\%$ ). Conforme o gráfico da Figura 4, para as relações água/cimento estudadas, o aumento do teor de  $\text{CO}_2$  elevou a velocidade de carbonatação dos concretos.

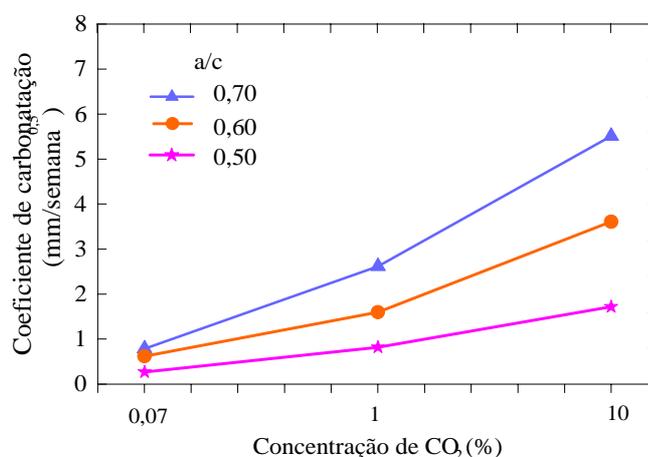


Figura 4: influência do teor de  $\text{CO}_2$  no coeficiente de carbonatação (UOMOTO e TAKADA, 1993)

Observa-se que para concretos com maior relação água/cimento (maior porosidade), o efeito da concentração de  $\text{CO}_2$  no aumento da carbonatação é mais pronunciado, fato também observado por Nischer (1984 apud Nepomuceno, 1992, p.28).

O efeito da **temperatura** na velocidade de penetração da frente de carbonatação, em ensaios acelerados, não é expressivo, sob temperaturas usuais. Entretanto, apesar da pequena influência na velocidade de carbonatação, deve-se considerar que a temperatura exerce grande

influência na taxa de corrosão da armadura, não podendo ser desprezada na estimativa de durabilidade de uma estrutura em concreto armado (KAZMIERCZAK, 1995, p.22). Com relação à corrosão das armaduras, Nepomuceno (1992, p.18) destaca que temperaturas mais elevadas podem aumentar a velocidade de corrosão, mas por outro lado reduzir a condensação interna.

Pequenas variações de temperatura têm pouca influência sobre a carbonatação, porém temperaturas elevadas aumentam a velocidade de carbonatação, a menos que o efeito de secagem exceda o efeito da temperatura (NEVILLE, 1997, p.498). Kazmierczak (1995, p.15) explica que, após a umidade interna do concreto entrar em equilíbrio com o meio, as variações de umidade e temperatura irão influenciar diretamente na existência de vapor ou na saturação dos poros capilares e, conseqüentemente, na velocidade de carbonatação. Para ambientes protegidos da chuva, Andrade, Sarría e Alonso (1999) observaram que a temperatura é o principal fator de influência na definição da umidade relativa interna do concreto.

A **umidade relativa** afeta a carbonatação, sendo que em condições de baixa umidade, a carbonatação será menor, porque não haverá água para dissolver o CO<sub>2</sub>. Como já discutido, em condições de saturação de água dos poros, a carbonatação também será menor, porque a difusão de CO<sub>2</sub> é muito pequena (PARROT, 1987). Papadakis, Vayenas e Fardis (1991a, p.1334) destacam que a umidade é fator chave para o processo de carbonatação.

O concreto absorve com facilidade a umidade do ambiente, mas em compensação seca lentamente. Quando a umidade externa é constante, chega-se a estabelecer um equilíbrio entre o conteúdo de umidade do interior do concreto e a umidade relativa ambiental. Porém, quando a umidade exterior oscila, o interior do concreto não pode acompanhar as trocas com a mesma velocidade. Conseqüentemente só a camada externa da estrutura é que mantém equilíbrio com a UR exterior (FIGUEIREDO, 2004, p.40).

Ceukelaire e Nieuwenburg (1993, p.442) avaliaram a influência da umidade relativa na profundidade de carbonatação de concretos, com relação água/aglomerante de 0,60, produzidos com cimento composto com escória de alto forno. Para tal, após a desmoldagem, os corpos-de-prova (100x100x100 mm) foram curados por 6 dias em ambiente com umidade relativa de 90% e temperatura de 20 °C. Durante a cura os corpos-de-prova ficaram expostos à concentração de CO<sub>2</sub> do ambiente natural. Nos ensaios, os parâmetros considerados foram temperatura constante de 20°C, 6 faixas de umidade relativa variando de 40 a 90%, com

incrementos de 10% e concentrações de CO<sub>2</sub> de 10 e 0,03%, simulando uma atmosfera enriquecida e uma natural, respectivamente. Os autores verificaram que, para os dois teores de CO<sub>2</sub>, a carbonatação atingiu profundidade máxima na umidade relativa de aproximadamente 50% (Figura 5).

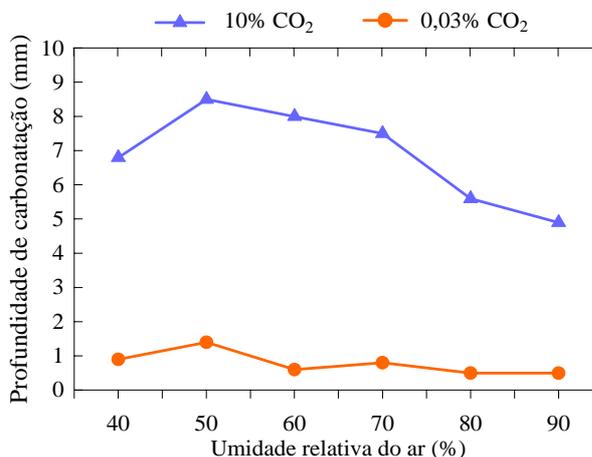


Figura 5: profundidade de carbonatação em relação a umidade relativa e o teor de CO<sub>2</sub> (CEUKELAIRE e NIEUWENBURG, 1993, p.444)

Roy, Poh e Northwood (1999) investigaram a carbonatação acelerada de concretos com diversas classes de resistência, com relações água/aglomerante entre 0,55 e 0,80, concentração de CO<sub>2</sub> de 6% e umidades relativas de 52%, 64%, 75%, 84% e 92%. Os resultados indicaram que, para todas as classes de resistência analisadas, houve aumento na profundidade de carbonatação com o incremento de umidade de 52% para 75%. Porém, para umidades relativas superiores a 84% a profundidade carbonatada foi menor que a observada no intervalo de 52 e 75%.

Conclui-se que no caso específico da carbonatação, a difusão do CO<sub>2</sub> ocorrerá quando os poros estiverem parcialmente cheios de água, o que corresponde à umidade relativa na faixa de 50 a 75% (PARROT, 1987; CEUKELAIRE e NIEUWENBURG, 1993, NEVILLE, 1997).

As **condições de exposição** das estruturas de concreto, segundo o CEB 238 (COMITE EURO-INTERNACIONAL DU BETON, 1997, p.17-18) podem ser caracterizadas em **clima regional, local e micro clima**. O **clima regional** refere-se ao clima da região onde a estrutura está inserida. É representado por dados de temperatura do ar e da água, da quantidade de íons cloreto e umidade relativa do ar e precipitação. O **clima local** é relativo ao entorno da estrutura e leva em consideração o local específico da construção. É representado pelo teor de

CO<sub>2</sub> da atmosfera local e pela intensidade e direção do vento. O **nível micro** é referente às condições climáticas na superfície do concreto, sofre influência da exposição à chuva (protegido ou desprotegido), radiação solar, contato com o solo, umidade, entre outros.

A **condição de exposição** que uma estrutura pode estar inserida (ambiente interno, externo, protegido ou desprotegido da chuva) apresenta grande influência na carbonatação dos concretos. Houst e Wittmann (2002, p.1929) relatam que, geralmente, se admite que concretos expostos ao ar livre, protegidos da chuva, carbonatam mais rapidamente do que concretos desprotegidos. Isso se deve ao fechamento dos poros pela água da chuva.

Uma estrutura de concreto exposta à incidência periódica da chuva, devido à saturação dos poros e a conseqüente dificuldade da difusão do CO<sub>2</sub>, tem a frente de carbonatação impedida de avançar, como explica Neville (1997, p.498):

em uma mesma edificação, feita com um mesmo concreto, pode haver consideráveis variações na profundidade de carbonatação a uma mesma idade: as paredes mais expostas à chuva terão uma profundidade de carbonatação menor, assim como as superfícies inclinadas que podem ser lavadas pela chuva; o mesmo se aplica às paredes que podem ser completamente secas devido à insolação.

Em um estudo em argamassas, Okochi et al. (2000, p.2937) observaram que a carbonatação é mais intensa nas amostras protegidas da chuva do que nas expostas. Barker e Matthews (1994) verificaram que concretos armazenados em ambiente de laboratório, com UR de 65% e temperatura de 20°C, carbonatam com maior velocidade do que os armazenados ao ar livre (protegidos da chuva), sendo que estes apresentam redução de 40% na profundidade de carbonatação quando comparados aos concretos dispostos em recinto fechado. Meyer (1969, p.400) representou graficamente, como pode ser verificado na Figura 6, a influência do ambiente de exposição do concreto na carbonatação.

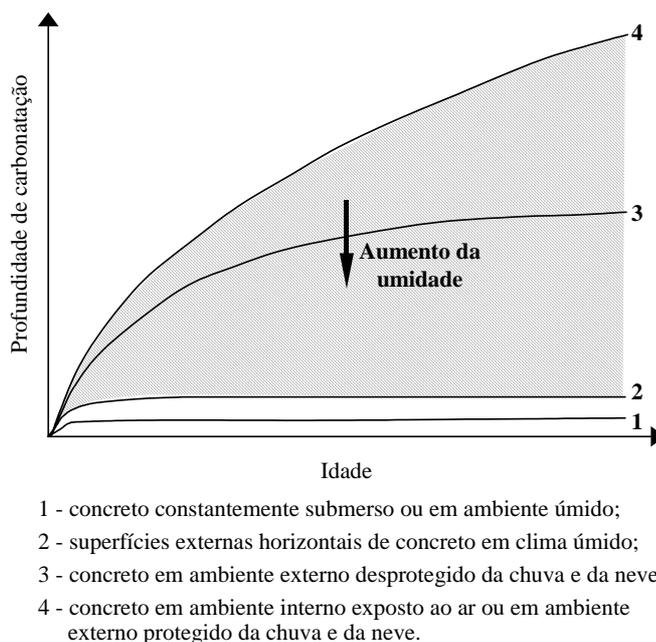


Figura 6: efeito das condições de exposição na carbonatação – modelo (MEYER, 1969, p.400)

Para amostras expostas ao ambiente natural de degradação, Ho e Lewis (1987, p.493) obtiveram diferentes resultados de profundidade de carbonatação, sendo que os corpos-de-prova dispostos na vertical carbonataram mais que os inclinados a 45°. Os autores salientam que as amostras inclinadas receberam 540 mm de chuva, enquanto que os espécimes dispostos verticalmente somente 40 mm. Logo, a correlação entre resultados de ensaios acelerados e ensaios ao natural é fortemente dependente das condições de exposição.

Com relação à correlação de resultados entre ensaios de carbonatação acelerados e naturais, em trabalho realizado no Brasil, Isaia, Vagheti e Gastaldini (2001, p.2) relatam que o teor de umidade de equilíbrio em que as medidas da profundidade de carbonatação aceleradas são realizadas afeta essa comparação, visto que os ensaios naturais também podem estar afetados por condições ambientais diversas tais como: exposição interna, externa abrigada ou externa desabrigada, diminuindo a profundidade de carbonatação da primeira em direção a última pois, na condição interna, a umidade relativa se mantém quase todo tempo dentro da faixa de carbonatação máxima (50-80%), enquanto que, nas externas, as variações higrométricas dos poros são influenciadas pelas secagens e molhagens sucessivas.

### 2.2.2.2 Características do concreto

As características do concreto apresentam grande influência na carbonatação, dentre as quais, Kazmierczak (1995, p. 23) destaca a **composição química do cimento**, o **traço especificado** e a **qualidade da execução**. Ressalta-se ainda a influência das **propriedades mecânicas** na carbonatação do concreto.

O avanço da frente de carbonatação é inversamente proporcional à reserva alcalina disponível na matriz da pasta de cimento hidratada, que por sua vez é função da **composição química do cimento**, do teor de hidróxido de cálcio e dos álcalis presentes (MEYER, 1969, p.399). Normalmente, o cimento Portland comum apresenta 64% de óxido de cálcio e 0,5-1,5% de óxido de sódio e potássio, sendo que o cimento com adição de escória pode apresentar um teor de 44% de óxido de cálcio, reduzindo a quantidade de álcalis disponíveis para a carbonatação (BAKKER, 1988, p.30).

Concretos produzidos com cimentos com adições pozolânicas, apesar destas propiciarem o refinamento dos poros e dos grãos, aumentando a sinuosidade dos capilares e diminuindo a permeabilidade, apresentam profundidades de carbonatação superiores às obtidas em concretos de cimento Portland comum. Isso ocorre pois prepondera o efeito da diminuição da reserva alcalina, devido à redução do teor de álcalis quando a sílica reage com o  $\text{Ca(OH)}_2$ , pela reação pozolânica. Isso resulta em frentes de carbonatação mais velozes para os concretos com adições (ISAIA, 1999, p.9). Por outro lado, Papadakis (2000) afirma que a influência da cinza volante e da sílica ativa no aumento da profundidade de carbonatação no concreto é válida para os casos em que as adições minerais são empregadas como substituição ao cimento. Jiang, Lin e Cai (2000) descrevem que, apesar dos resultados conflitantes no que se refere à carbonatação em concretos com cinza volante, normalmente a presença desta pozolana implica em maior profundidade de carbonatação. Com relação à adição de sílica ativa, Vieira (2003, p.198) relata que, segundo análises estatísticas realizadas em seu estudo, isoladamente esta adição não apresenta efeito significativo, sendo a sua influência na profundidade de carbonatação determinada pela relação água/aglomerante.

Com relação ao **traço especificado**, Kazmierczak (1995, p.23) relata que a composição do concreto define a porosidade, a difusibilidade, a absorção e a permeabilidade da pasta endurecida e, portanto, reflete na velocidade de penetração da frente da carbonatação.

Relatos de várias pesquisas indicam que a carbonatação é fortemente influenciada pela relação água/aglomerante ou água/cimento do concreto (MEYER, 1968; TUUTTI, 1982; HO e LEWIS, 1987, BAUER, 1995; VIEIRA, 2002, KULAKOWSKI, 2003, entre outros). Nestes trabalhos verifica-se que existe uma forte relação entre a profundidade de carbonatação e a relação água/aglomerante, indicando assim que o controle do tamanho e interconectividade dos poros é muito importante para regular o aumento ou a redução da frente de carbonatação.

A porosidade capilar também apresenta grande importância na carbonatação. Helene (1993, p.103) relata que “está provado que via de regra um aumento na porosidade do concreto conduz a um aumento da permeabilidade e difusibilidade dos gases no concreto”. Mehta e Monteiro (1994) e Bauer (1995) relatam que a relação água/aglomerante influencia a profundidade de carbonatação do concreto, visto que esta está diretamente ligada à porosidade da pasta de cimento hidratada, sendo que, quanto maior o volume de poros, maior será a facilidade do acesso de  $\text{CO}_2$  no interior do concreto. Segundo Mehta e Monteiro (1994, p.124) na pasta de cimento hidratada, o fluxo de água ocorre entre os poros capilares interconectados e essa interconexão é diretamente ligada à relação água/cimento e ao grau de hidratação do cimento.

Em trabalho realizado em concreto com adição de sílica ativa, Kulakowski (2002) aponta a existência de uma região crítica no comportamento dos concretos frente à carbonatação, delimitada pela existência de um intervalo de relações a/agl (0,45 e 0,50). Abaixo desta zona de água/aglomerante limite, a carbonatação é regida principalmente pela porosidade da matriz cimentante, conferida pelo teor de água, sendo que o teor de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  e o pH, nestes níveis de relação a/agl, apresentam pouca influência na carbonatação. Para intervalos acima das relações a/agl da região limite, as características químicas passam a exercer um efeito significativo na profundidade de carbonatação, e o consumo de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  nas reações pozolânicas promovidas pela sílica ativa são favoráveis à carbonatação. Vieira (2003) também observou a existência desta região crítica limite em torno da relação a/agl 0,50, abaixo da qual a profundidade de carbonatação pode ser considerada tecnicamente desprezível para concretos com e sem adição de sílica ativa. Silva (2002) explica que o aumento da profundidade de carbonatação, em concretos de elevada relação água/aglomerante e com adição de sílica ativa, é decorrente da redução da quantidade de hidróxido de cálcio presente no composto agravado pelo desenvolvimento das reações pozolânicas.

A **qualidade da execução** é primordial para a carbonatação e está diretamente relacionada às etapas de lançamento, adensamento e, principalmente, cura do concreto. Segundo Helene (1993, p.112), a cura do concreto afeta majoritariamente as condições de hidratação dos primeiros milímetros superficiais. Desta forma, a aparente desvantagem dos cimentos com adições, de menores reservas alcalinas, pode ser grandemente minimizada por uma boa e prolongada cura úmida.

Thomas e Matthews (1992), avaliando o efeito da cura na carbonatação de concretos, durante um período de 4 anos, constataram influência significativa na redução da profundidade de carbonatação para concretos curados em tempos mais elevados, como é mostrado na Figura 7.

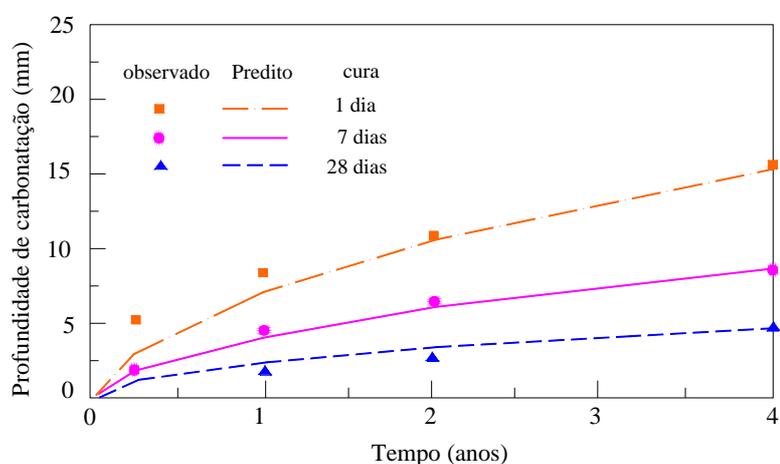


Figura 7: influência da cura na profundidade de carbonatação (THOMAS e MATTHEWS, 1992)

Como se observa na figura supracitada, a cura é de grande importância para o avanço da carbonatação do concreto ao longo do tempo. Meyer (1968), Ho e Lewis (1987) e Uomoto e Takada (1993) também relatam a existência de uma influência significativa entre o avanço da carbonatação e o tempo de cura, principalmente nos primeiros dias de hidratação da pasta.

No que se refere ao efeito das **propriedades mecânicas** na carbonatação do concreto, Huang e Yang (2002, p.16) descrevem que a profundidade de carbonatação (para um teor de CO<sub>2</sub> de 100%) decresce com o incremento da resistência à compressão axial do concreto, como é mostrado na Figura 8. Os resultados foram obtidos em concretos convencionais com relação a/agl de 0,48 e 0,58 e em concretos auto-adensáveis (a/agl 0,36 e 0,40), ambos

produzidos com adição de escória. Fattuhi<sup>3</sup> e Wierig<sup>4</sup> apud Huang e Yang (2002, p.16) relatam que a profundidade de carbonatação decresce com a elevação da resistência à compressão para todos os tipos de concreto, mas estas relações dependem do tipo de cimento empregado e das condições de cura.

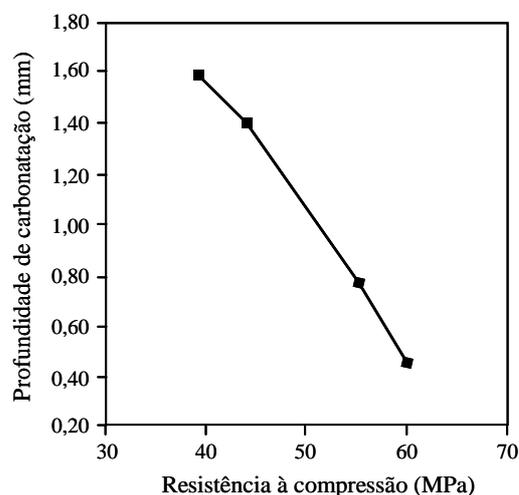


Figura 8: relação entre a profundidade de carbonatação (100% de CO<sub>2</sub>) e a resistência à compressão dos concretos aos 28 dias (CHI, HUANG e YANG, 2002, p.16)

Vieira (2003, p.193), também verificando o comportamento da resistência à compressão e da profundidade de carbonatação<sup>5</sup> para concretos com diferentes teores de adição de sílica ativa (0, 10 e 20%) constatou, para um mesmo teor de adição, um comportamento inversamente proporcional entre a profundidade de carbonatação e a resistência à compressão. Fazendo a comparação entre diferentes teores de adição, a profundidade de carbonatação passa a ser proporcional à resistência, ou seja, embora a sílica ativa aumente a resistência à compressão, verifica-se uma maior profundidade de carbonatação nos concretos com adição. Salienta-se que o aumento da profundidade de carbonatação observado para relações água/aglomerante menores do que 0,5 não é significativo frente ao acréscimo de resistência de 12% obtido com a adição de 10% de sílica ativa.

<sup>3</sup> FATTUHI N.J. Carbonation of concrete as affected by mix constituents and initial water curing period. **Materials of Constructions**. vol. 19, no. 110, 1986, p. 131-136.

<sup>4</sup> WIERIG H.J. Longtime studies on the carbonation of concrete under normal outdoor exposure. In: **Proceedings of the RILEM**, Hannover University, 1984, p. 239-249.

<sup>5</sup> Ensaio realizado com teor de CO<sub>2</sub> superior a 50%, UR em torno de 90% e Temperatura de 23 ± 2°C.

## 2.3 ENSAIOS DE DURABILIDADE

Diversas abordagens referentes às questões da durabilidade do concreto são descritas na literatura. A durabilidade de um material geralmente é referenciada de forma comparativa com um outro material, apresentando caráter qualitativo. Uma maneira de se fazer essa estimativa de forma quantitativa é através de elaboração de ensaios de durabilidade. Silva Filho (1994, p.24) divide os ensaios de durabilidade em três grandes grupos e relata que, de forma geral, os melhores resultados de ensaios vêm da consorciação dos três grupos. Com isto, busca-se identificar as grandezas que interferem de forma decisiva no processo agressivo, investigando seu comportamento, e procurando correlacionar os resultados obtidos com as observações provenientes da análise de estruturas reais. Segundo o autor os ensaios de durabilidade podem ser divididos em:

- a) **ensaios em laboratório:** tentam reproduzir o efeito do ambiente sobre a estrutura, simulando o mecanismo de agressão sob condições controladas;
- b) **ensaios acelerados:** buscam, em ambiente de laboratório, acelerar o processo de degradação por meio da utilização de um ambiente mais agressivo que o natural;
- c) **ensaios microestruturais:** voltados para o estudo da estrutura dos materiais que sofrem os processos de degradação. Aproximam-se do enfoque da ciência dos materiais, onde, por meio de um conhecimento profundo da microestrutura, se busca aferir as propriedades macroscópicas do material.

Pela dificuldade de simular em laboratório a combinação das condições de longa duração atuantes na estrutura real, a maior parte do conhecimento sobre os processos físico-químicos responsáveis pela degradação do concreto vem de estudos de casos de estruturas em campo (MEHTA e MONTEIRO, 1994, p.121).

Segundo Sentler (1987), a maioria dos ensaios de durabilidade avalia um simples parâmetro de estudo, sem considerar a possível interação com outras características do material. O autor sugere que, para representar as características ao longo do tempo de um material, sejam elaborados ensaios a longo prazo.

John (1987, p.51) relata que existem basicamente duas fontes de dados para o estudo da durabilidade de uma estrutura: ensaios de envelhecimento natural e ensaios de envelhecimento acelerados.

Como a durabilidade está relacionada com o desempenho ao longo do tempo de um determinado material, num determinado ambiente, sob determinadas condições de serviço, a estimativa da durabilidade de novos materiais é de difícil formulação (AİTCIN, 2000, p.540). Quanto se trata de estudar materiais ou componentes de características novas, ou de materiais tradicionais em ambientes não comuns, é necessário recorrer a métodos de ensaios de envelhecimento acelerado, de maneira a simular a experiência do material em uso (JOHN, 1987, p.51).

Para novos tipos de concretos, Aİtcin (2000, p.540) relata que a durabilidade pode ser estimada usando ensaios acelerados que já foram normalizados. Salienta, ainda, que as condições de laboratório representam razoavelmente as condições de campo, e que somente o mecanismo destrutivo é acelerado. Outra maneira de se estimar a durabilidade é usar o concreto em estruturas e escala natural, temporárias ou experimentais. O emprego destes concretos em pequenos projetos também pode ser uma alternativa, visto que os riscos financeiros não são muito significativos, e por meio da experiência e da confiança ganhas na adequação do material, ele pode ser utilizado em obras cada vez mais elaboradas. Whiting (1984<sup>6</sup> apud Aİtcin, 2000, p.541) apresenta uma outra abordagem, a qual consiste no estudo de ruína de materiais similares ou correlatos, sob carga de serviço e ambientes normais, com o objetivo de entender os mecanismos do processo de ruína.

Dentre as diferentes formas possíveis de se estimar as características de durabilidade do concreto apontadas pela literatura, no capítulo seguinte será discutida com maior ênfase a abordagem de ensaios de degradação ao natural e acelerados.

---

<sup>6</sup> WHITING, D. In situ measurements of the permeability of concrete to chloride ions. **ACI SP-82**, p. 501-524, 1984.

### 2.3.1 Ensaios ao Natural

Os **ensaios ao natural**, também denominados de ensaios não acelerados, de campo ou de longa duração, têm como princípio básico a exposição de amostras de concreto em ambiente de degradação natural, conforme o uso a que se destina, em ambiente protegido ou desprotegido das intempéries. Para a carbonatação do concreto, a condição de exposição das amostras, como descrito no item 2.2.2.1, tem grande influência nos dados coletados, sendo que os ensaios de degradação ao natural, em ambientes internos, tendem a apresentar maiores profundidades de carbonatação.

Atualmente, a crescente preocupação com a durabilidade e necessidade da previsão da vida útil das estruturas mobilizou muitas áreas de estudo e vários grupos de pesquisa, do Brasil e do exterior, tomaram a iniciativa da criação de estações de campo para a verificação da degradação das estruturas de concreto expostas a diferentes condições ambientais. A evolução da degradação destes espécimes é monitorada ao longo do tempo, a fim de correlacionar os dados com a degradação apresentada em ensaios acelerados e também com estruturas reais. No Brasil há um projeto denominado DURACON<sup>7</sup> que visa caracterizar a durabilidade de concretos expostos em condições ambientais reinantes na Iberoamérica<sup>8</sup>. A caracterização será baseada na exposição de corpos-de-prova com e sem armadura, com relação água/aglomerante de 0,65 e 0,45, degradados em, no mínimo, duas atmosferas distintas, sendo uma marinha e outra urbana, em cada país ibero-americano participante.

Na etapa brasileira, em princípio, serão implantadas 4 estações de envelhecimento natural, em localidades com diferentes condições ambientais, localizadas em Goiânia (GO)<sup>9</sup>, Natal (RN)<sup>10</sup>, Rio Grande (RS)<sup>11</sup> e São Paulo (SP)<sup>12</sup>. Segundo Sato (2004), no Brasil, este projeto é pioneiro, mas nos países desenvolvidos, trabalhos neste campo são realizados há mais de duas décadas. O projeto tem orçamento e previsão de duração de 4 anos e tem como objetivo correlacionar a durabilidade do concreto com as características do meio ambiente. Como resultado, prevê a definição de mapas de agressividade às estruturas de concreto armado, tendo em vista o

---

<sup>7</sup> Influência da ação do meio ambiente na durabilidade do concreto: Projeto DURACON, Brasil.

<sup>8</sup> Da qual fazem parte os seguintes países: Argentina, Brasil, Chile, Colômbia, Cuba, Espanha, México, Peru, Portugal, Uruguai e Venezuela.

<sup>9</sup> Atmosfera urbana, pouco poluída, com baixa umidade relativa e temperaturas elevadas o ano todo.

<sup>10</sup> Atmosfera marinha e temperaturas elevadas o ano todo.

<sup>11</sup> Atmosfera marinha, temperaturas amenas e períodos de frio.

<sup>12</sup> Atmosfera urbana, extremamente poluída, com as estações do ano bem definidas.

fenômeno de corrosão das armaduras. Até o presente momento, o início da exposição dos corpos-de-prova à degradação natural não foi principiado.

A realização de ensaios de longa duração (ao natural) é extremamente importante, porém apresenta grandes dificuldades de execução devido às variáveis espaciais e temporais implícitas nos mesmos (ANDRADE, 1997, p.16).

Comparados aos ensaios acelerados, os ensaios ao natural oferecem algumas vantagens e desvantagens. Dentre as vantagens, destacam-se a interação real com o meio agressivo, a exposição às intempéries e a possibilidade de avaliação da degradação devido ao efeito sinérgico dos agentes agressivos. Como desvantagens do emprego destes ensaios, John (1987, p.56) destaca:

- a) os componentes e os materiais não são testados na configuração de uso, fato que dificulta a correlação com as condições reais de serviço;
- b) não consideram os fatores de uso e a sinergia entre estes e os fatores ambientais;
- c) não representam a variação das condições de exposição, sendo difícil prever a vida útil de uma população de estruturas.

Pode-se adicionar ainda as desvantagens referentes ao longo período de tempo necessário para a realização dos ensaios e obtenção dos resultados, as mudanças do ambiente de exposição ao longo do tempo e as alterações nas características dos materiais devido à evolução tecnológica.

O quadro da Figura 9 apresenta uma síntese da problemática verificada durante a execução de um ensaio de durabilidade ao natural e a realidade (verificada em estruturas existentes), mostrando que os resultados obtidos devem ser interpretados com critério, evitando-se generalizações.

Os ensaios de durabilidade ao natural, por exigirem um tempo elevado para a realização e obtenção de resultados, no passado foram pouco empregados pelos pesquisadores, havendo carência de literatura na área. Porém, nos últimos anos, a crescente preocupação com a durabilidade das estruturas de concreto armado, aliada à necessidade de conhecer

sua interação com o meio ambiente, vem gerando estudos que buscam estabelecer as relações encontradas entre os dados de laboratório e os encontrados em obras reais (DURACON, 2002).

<b>Fator de análise</b>	<b>Realidade</b>	<b>Ensaio ao natural</b>
Produto	População de produto	Amostra
	Produtos montados	Produtos isolados
	Mão-de-obra real	Mão-de-obra ideal
Agente	Intensidade variável	Intensidade fixa ou variável
	Incidência de fatores de uso	Fatores de uso desconsiderados
Método de avaliação	Fenômeno real	Fenômeno simplificado ou real
	Medida real	Medida real ou a interpretar

Figura 9: síntese dos problemas enfrentados na aplicação de ensaios ao natural (JOHN, 1987, p.57)

Um dos ensaios considerados até o presente momento como o mais longo teste de envelhecimento em condições naturais, abrangeu um estudo em corpos-de-prova com mais de 100 anos de idade submetidos a condições severas de exposição (atmosfera marinha). Os resultados oriundos deste experimento mostram que, apesar do período de tempo decorrido, a microestrutura dos espécimes mudava continuamente, com a formação de diversos componentes na pasta e a dissolução de outros (SAKAI, 1996<sup>13</sup> apud ANDRADE, 1997, p.16).

### 2.3.2 Ensaio Acelerados

Os **ensaios acelerados** em concreto simulam um processo de degradação natural, com intensidade superior à esperada em condições normais de serviço. Geralmente são desenvolvidos em laboratório, tendo como principal objetivo reduzir o tempo necessário para que ocorra a deterioração do concreto devido a algum processo de degradação específico. Esses processos de degradação são simulados a taxas superiores às encontradas em ambiente natural, normalmente, com condições de umidade relativa e temperatura controlada. Segundo CIB/RILEM (1983), neste tipo de ensaio, a degradação de um componente é intencionalmente acelerada a taxas acima das esperadas em serviço.

<sup>13</sup> SAKAI, K. Long-term performance concrete in a marine environment. In: Odd. E. Gjörv Symposium on Concrete for Marine Structures. **Proceedings...** New Brunswick, 1996, p.35-53.

Por exemplo, para o fenômeno de carbonatação do concreto, devido à baixa concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera, o processo de carbonatação natural ocorre lentamente, sendo fundamental para viabilizar estudos de durabilidade a elaboração de ensaios acelerados que possam reproduzir o fenômeno em um tempo reduzido.

Os ensaios de envelhecimento acelerados são divididos, conforme seus objetivos, em dois grupos (NIREKI, 1980):

- a) avaliação da durabilidade relativa do material sob certas condições, não considerando a relação entre as condições de envelhecimento e as condições de uso;
- b) avaliação da durabilidade sob certas condições de aceleração da degradação, considerando o **fator de aceleração**<sup>14</sup> em relação às condições de uso.

Segundo John (1987), os ensaios acelerados que avaliam a durabilidade relativa do concreto formam a grande maioria dos ensaios até hoje desenvolvidos. Estes ensaios possibilitam, em condições idênticas de exposição, a comparação dos resultados do concreto ensaiado com os resultados de um concreto padrão. Já os que consideram o fator de aceleração em relação às condições de uso visam fornecer uma estimativa de vida útil, pois relacionam, por meio do fator de aceleração, a degradação apresentada em laboratório (acelerada) com a esperada de campo (não acelerada). Contudo, conforme a ASTM E - 632 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS, 1996), a relação entre tais fatores raramente é simples, pois tanto a complexidade existente entre as formas de degradação que ocorrem na prática quanto a conseqüente dificuldade de se modelar tal comportamento em laboratório são condicionantes do sucesso dessa linha de investigação.

O CSTC/IC-IB/SECO (1979) sintetiza os problemas de confiabilidade enfrentados em ensaios de durabilidade acelerados, traduzidos na forma de discordâncias entre a situação real e a simulada por ensaios acelerados. Na primeira situação destacam-se, principalmente, o produto (no caso a estrutura e a mão-de-obra) e as interações entre os agentes agressivos e suas intensidades, pois se trata de um fenômeno de degradação real. No segundo caso são contestados o produto (no caso o corpo-de-prova e a mão-de-obra especializada) e os agentes

---

<sup>14</sup>Fator de aceleração: relação da degradação acelerada e não acelerada. O item 2.3.3 descreve estes coeficientes traduzindo-os como coeficientes de aceleração.

agressivos que, por sua vez, são isolados, com intensidade fixa e normalmente superior a real resultando na reprodução de um fenômeno de degradação simplificado.

Na correlação da realidade com a tentativa de simulação acelerada do fenômeno agressivo, nota-se a existência de diferenças expressivas entre as duas situações, mostrando que, antes do início de um ensaio de degradação acelerada, deve-se verificar se o comportamento dessa simulação reflete a magnitude do fenômeno real.

É importante ressaltar que são necessários cuidados na extrapolação dos resultados dos ensaios acelerados para condições reais de exposição, não somente porque a carbonatação das estruturas é fortemente influenciada pelo teor de umidade do concreto, que em condições reais de exposição é especialmente afetada pela molhagem por chuvas e secagem por insolação e vento, mas também porque as altas concentrações de CO<sub>2</sub> dos ensaios acelerados distorcem os fenômenos (NEVILLE, 1997, p.502). Segundo Isaia, Vaghetti e Gastaldini (2001), nos ensaios com o objetivo de acelerar as reações de carbonatação, as pesquisas de laboratório empregam câmaras condicionadas com atmosfera rica em gás carbônico, com concentrações de CO<sub>2</sub> que variam entre 1% a 100%. Este fato denota a falta de padronização dos ensaios o que, conseqüentemente, dificulta a correlação dos resultados de pesquisas da área. Outros intervenientes para a simulação do ensaio de carbonatação são a variação dos períodos de cura e o ambiente a que os concretos são submetidos antes da realização do ensaio.

Por outro lado, entre as vantagens apresentadas na utilização dos ensaios acelerados destacam-se o rígido controle do ambiente de exposição e a precisão da tomada de medidas, devido à possibilidade de utilização de equipamentos sofisticados no monitoramento. Para John (1987, p.55) esse tipo de método é insubstituível, já que seu uso é um imperativo para estudos de durabilidade de materiais novos.

### 2.3.3 Coeficientes de Carbonatação e de Aceleração

Primeiramente, define-se que o **coeficiente de carbonatação** ( $k_c$ ) é a relação da profundidade carbonatada de um concreto em função da raiz quadrada do tempo de exposição ao CO<sub>2</sub>, expresso, normalmente, em mm/ano<sup>0,5</sup> ou mm/semanas<sup>0,5</sup>. Já o **coeficiente de aceleração** ( $\alpha_c$ ) é adimensional e expressa o número de vezes que o ensaio acelerado representa a degradação

natural, sendo relativo aos concretos estudados e às condições de exposição impostas nos dois procedimentos de ensaio.

O estudo da carbonatação em estruturas de concreto armado, elaborando ensaios de degradação acelerados e ao natural, vem sendo realizado por pesquisadores de vários países, (HAMADA, 1969; HO e LEWIS, 1987; DHIR, HEWLETT e CHAN, 1989; KAZMIERCZAK, 1995; LIMA, 1999; ISAIA, VAGHETTI e GASTALDINI, 2001, entre outros). A maioria dos trabalhos busca somente a determinação dos **coeficientes de carbonatação** ( $k_c$ )<sup>15</sup>, obtidos com base na equação da raiz quadrada do tempo, onde cada mistura e procedimento de ensaio (acelerado e natural) apresenta um coeficiente. Dentre os trabalhos pesquisados, poucos fazem referência ao tema ou buscam a determinação dos **coeficientes de aceleração** ( $\alpha_c$ ), destacando os esforços de HAMADA (1969), HO e LEWIS (1987) e CEUKELAIRE e NIEUWENBURG (1993).

A preocupação com a durabilidade das estruturas de concreto armado expostas ao ambiente natural de degradação por carbonatação, bem como os primeiros trabalhos na área, tiveram início no Japão em 1907, quando o Dr. Riki Sano iniciou um estudo que englobava a verificação da corrosão das armaduras despassivadas por carbonatação, com e sem inibidores de corrosão, inseridas em diferentes concretos expostos em distintas atmosferas. Hamada (1969, p.345), apresentando os dados coletados pelo Dr. Riki Sano, após 20 anos de exposição, aplicou a equação simplificada representativa da primeira lei de Fick<sup>16</sup>, para a estimativa da profundidade de carbonatação ao longo do tempo. O pesquisador encontrou, para um concreto com relação água/cimento de 0,60, um **coeficiente de carbonatação** ( $k_c$ ) de 7,2 mm/ano<sup>0,5</sup>.

Em estudo preliminar da carbonatação acelerada e ao natural de concreto com altos teores de pozolana, Isaia, Vagheti e Gastaldini (2001) realizaram ensaios acelerados em corpos-de-prova de concreto condicionados em câmara de carbonatação com teor de CO<sub>2</sub> de 10% após 4, 8, 12 e 16 semanas e, de carbonatação ao natural, com corpos-de-prova expostos ao ambiente de laboratório por um período de 2 anos, fazendo medições após 6, 12 e 24 meses. A relação entre os coeficientes de carbonatação dos ensaios acelerados e ao natural foi, em

---

<sup>15</sup> Os coeficientes de carbonatação também são apresentados na literatura como “ $k_{CO_2}$ ” ou somente “ $k$ ”.

<sup>16</sup> A primeira lei de Fick ou lei da difusão (Adolph Fick, fisiologista alemão, 1856) estabelece que para um processo de difusão molecular unidimensional, o fluxo de massa de um soluto é proporcional ao gradiente de sua concentração. Para a carbonatação do concreto, a equação  $e_c = k \cdot t^{1/2}$  (abordada com maior ênfase no item 3.3) é uma forma simplificada desta lei.

média, para concretos com até 25% de pozolanas, de  $1,0 \text{ mm/semana}^{0,5} = 1,0 \text{ mm/ano}^{0,5}$ . Para concretos com teores elevados de pozolanas (50%), os coeficientes de carbonatação obtidos dos ensaios acelerados apresentam valores 3,6 vezes maiores que os dos ensaios de carbonatação ao natural ( $1,0 \text{ mm/semana}^{0,5} = 3,6 \text{ mm/ano}^{0,5}$ ). Os autores ressaltam que os resultados obtidos sofreram influência da porosidade do concreto, do teor de pozolana e do tipo de ensaio. Para Isaia (1999, p.16), a variação das taxas utilizadas nos ensaios de carbonatação influi no resultado final, de modo que as conclusões encontradas, quando se emprega determinada concentração de  $\text{CO}_2$ , são restritas àquelas condições de ensaio. Outro fator que dificulta essa correlação são as alterações referentes aos procedimentos de cura das amostras, pois segundo Vagheti, Isaia, e Gastaldini (2001, p.1) o efeito da cura em concretos produz uma série de influências nas propriedades micro e macroestruturais. Estas propriedades estão associadas ao mecanismo de transporte de fluídos através dos poros ou das fissuras, bem como ao conteúdo de água dos mesmos, interferindo na durabilidade do material.

Com relação à determinação dos coeficientes de carbonatação, além dos trabalhos acima citados, destacam-se os estudos elaborados por Roy (1999), Venquiaruto (2002), Vagheti (1999), Uomoto e Takada (1993), Isaia (1995) e Figueiredo (2004), entre outros.

A maior dificuldade na correlação dos dados e determinação dos **coeficientes de aceleração** de testes de degradação natural e acelerado está atrelada à grande variabilidade dos resultados e à falta de padronização dos procedimentos das duas abordagens de ensaio. A variabilidade dos resultados, em geral, é decorrente das alterações climáticas do ambiente de exposição e das constantes mudanças dos materiais constituintes do concreto. As pesquisas elaboradas tentando correlacionar estes ensaios empregam na carbonatação acelerada diferentes teores de  $\text{CO}_2$ , temperatura e umidade relativa variadas, tempo de cura e de sazonalidade distintos ou as vezes inexistentes, diferentes dimensões e formas das amostras, entre outros fatores que afetam o fenômeno de carbonatação. Por outro lado, os ensaios de degradação natural são realizados em diferentes ambientes, com fatores climatológicos não controláveis, sofrendo influência das variações de temperatura, umidade relativa, precipitação, radiação solar, teor de  $\text{CO}_2$ , ciclos de molhagem e secagem e tipo de exposição (protegido ou desprotegido da chuva). Alguns destes fatores que interferem no ensaio natural são de difícil obtenção, principalmente no que se refere à concentração de  $\text{CO}_2$  da atmosfera, a qual geralmente não é monitorada pelas estações de controle da qualidade do ar ou de meteorologia. Verdú (1963) salienta que existe uma grande dificuldade em encontrar relação entre os ensaios acelerados e

o comportamento do concreto na realidade, sendo freqüente a necessidade de recorrer a ensaios de longa duração em condições totalmente reais por ser muito difícil de reproduzi-las em laboratório. Com relação à representatividade dos ensaios, Kazmierczak (1995, p.18) relata que diversos pesquisadores afirmam que os resultados de ensaios de carbonatação acelerados com a utilização de teores elevados de CO<sub>2</sub> apresentam ótima correlação com os resultados de longa duração, com concentrações normais de CO<sub>2</sub> (YING-YU e QUI-DONG, 1987<sup>17</sup>; PAPADAKIS, FARDIS e VAYENAS, 1992<sup>18</sup>; ANDRADE, et al., 1988<sup>19</sup>, todos citados por KAZMIERCZAK, 1995, p.18).

Hamada (1969, p.346), utilizando uma câmara de carbonatação com concentração de dióxido de carbono de 15%, efetuou estudos em alguns traços de concreto, correlacionando os resultados de 1, 6 e 12 meses de ensaio acelerado, com os resultados obtidos em 0,5, 1 e 6,5 anos de exposição ao natural. O pesquisador encontrou boas correlações entre os resultados, concluindo que o ensaio de carbonatação acelerado representa adequadamente o fenômeno, equivalendo, aproximadamente, a uma aceleração de 40 vezes do processo de degradação natural.

Na Austrália, Ho e Lewis (1987), em um estudo de carbonatação de concretos com e sem adição de cinza volante, encontraram, para a idade de 1 ano de exposição ao natural, a correlação equivalente a uma semana em câmara de carbonatação com concentração de CO<sub>2</sub> de 4±0,5%, com UR de 50% e temperatura de 23°C. Os pesquisadores apresentam o coeficiente de correlação dos dados após um ano de ensaio natural e uma semana de ensaio acelerado, como é mostrado na Figura 10. Pelo diagrama, existe correlação entre os ensaios realizados em curtos períodos de tempo com os ensaios naturais de longos intervalos de tempo, mostrando que o comportamento do fenômeno de carbonatação foi reproduzido no ensaio acelerado.

---

<sup>17</sup> YING-YU, L.; QUI-DONG, W. The mechanism of carbonation of mortars and the dependence of carbonation on pore structure. In: CONCRETE DURABILITY, Detroit, 1987. **Proceedings...** Detroit, ACI, 1987. p. 1915-43.

<sup>18</sup> PAPADAKIS, V. G.; FARDIS, M. N.; VAYENAS, C. G. Hydration and carbonation of pozzolanic cements. **ACI Materials Journal**, n. 89, p.119-130, 1992.

<sup>19</sup> ANDRADE, C.; ALONSO, C.; BACLE, B.; RODRIGUEZ, J. Accelerated testing methodology for evaluating carbonation and chloride resistance of concrete coatings. In: FIP SUMPOSIUM, Israel, 1988. **Proceedings...** Jerusalem, s.ed., p.61-67.

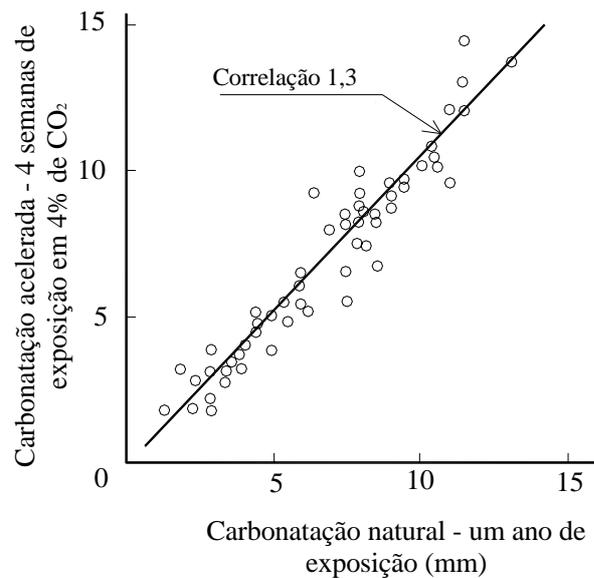


Figura 10: resultados dos ensaios de curta duração e de longa duração para diferentes tipos de concreto (HO & LEWIS, 1987, p.493)

Em outro trabalho, Ho e Lewis (1988, p.859) relatam que a estimativa da carbonatação dos concretos em estruturas reais ou em testes acelerados vem sendo empregada em diversas pesquisas (DHIR, JONES e MUNDAY, 1985<sup>20</sup>; HO e LEWIS, 1987<sup>21</sup>; CURRIE, 1987<sup>22</sup>). Estas pesquisas indicam que os resultados de carbonatação acelerada  $C_a$  podem ser correlacionados com os resultados de exposição natural  $C_n$ , considerando-se os fatores  $\alpha$  e  $\beta$ , conforme a equação 3.

$$C_a = \alpha \cdot \beta \cdot C_n \quad \text{equação 3}$$

O fator  $\alpha$  correlaciona a diferença da concentração de CO<sub>2</sub> entre a câmara acelerada<sup>23</sup> e a do laboratório, em iguais condições de umidade relativa e temperatura. O fator  $\beta$  correlaciona as condições de exposição do ambiente de laboratório (interna) com a natural (externa). Ho e Lewis (1987) determinaram um  $\alpha$  de 7,2 para UR de 50% e temperatura de 20°C. O valor

<sup>20</sup> DHIR, R.K.; JONES, M.R.; MUNDAY, J.G.L. **Concrete**. 19(10), 32, 1985.

<sup>21</sup> HO, D.W.S.; LEWIS, R.K. Durability of Building. **Materials**. v. 4, 241, 1987.

<sup>22</sup> CURRIE, R.J. Carbonation depths in structural-quality concrete. **Building Resistance**. Establishment Report, Garston, v. 19, 1987.

<sup>23</sup> O autor faz referência à concentração de CO<sub>2</sub> de 4%.

apropriado de  $\beta$ , obtido através de ensaio de carbonatação natural, no momento da publicação do artigo, ainda estava sendo determinado, mas com um ano de ensaio natural, os autores citam que a carbonatação foi cerca de 30 a 55% menor que a de concretos similares em ambiente de laboratório.

O estudo da carbonatação de concretos produzidos com cimento composto com escória de alto forno e a correlação de profundidade carbonatada ao longo do tempo, para diferentes teores de  $\text{CO}_2$ , foi estudada por Ceukelaire e Nieuwenburg (1993, p.442). Os pesquisadores realizaram ensaios de carbonatação em câmara climatizada, com temperatura de  $20^\circ\text{C}$  e UR de 90%, contendo os teores de  $\text{CO}_2$  de 10% (atmosfera saturada) e 0,03% (atmosfera natural). As idades de exposição ao  $\text{CO}_2$ , com concentração de 0,03%, de 333, 392 e 575 dias, conferiram uma profundidade de carbonatação média de 3,3; 3,5 e 4,1 mm, respectivamente. Para o teor de  $\text{CO}_2$  de 10% a profundidade de carbonatação foi aferida aos 21 dias correspondendo a 4,9 mm. Empregando a equação simplificada da raiz quadrada do tempo ( $e_c=k.t^{1/2}$ ), os autores encontraram, com o ajuste dos pontos de carbonatação, para o teor de  $\text{CO}_2$  de 0,03%, um valor de “ $k^{24}$ ” igual a 0,176, como mostra a Figura 11.

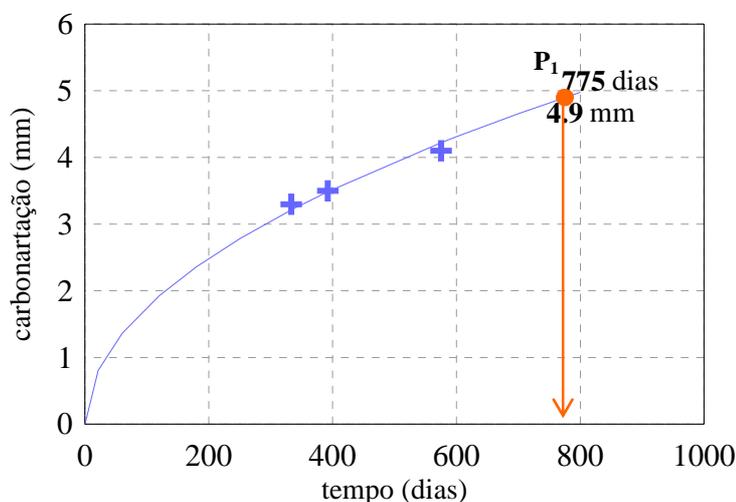


Figura 11: ajuste da curva para a carbonatação com  $\text{CO}_2$  de 0,03% (CEUKELAIRE e NIEUWENBURG, 1993, p.446)

A partir do valor de “ $k$ ” os autores fizeram a extrapolação da curva de ajuste dos pontos de carbonatação encontrados no ensaio com teor de  $\text{CO}_2$  de 0,03%. Deste modo, foi então calculado o tempo hipotético necessário para que se atingisse a profundidade de carbonatação

<sup>24</sup> Coeficiente de carbonatação.

de 4,9 mm. Tal profundidade foi encontrada após 21 dias de ensaio acelerado com teor de CO<sub>2</sub> de 10%. Na Figura 11 o ponto  $P_1$  destaca que, para condições de exposição ao CO<sub>2</sub> de 0,03% (concentração normal), a profundidade de carbonatação de 4,9 mm seria alcançada em 775 dias.

Essa dedução é relativa, além de ser baseada no ajuste de apenas três pontos os quais estão susceptíveis a pequenos erros. A extrapolação destes dados para ambientes com condições ambientais reais, sujeitos à ação do vento, chuva, variação da umidade relativa e temperatura requer cautela (CEUKELAIRE e NIEUWENBURG, 1993, p.446).

Kazmierczak (1995) estudou a relação da velocidade de carbonatação do ensaio acelerado e ao natural, em corpos-de-prova confeccionados com argamassa e armazenados em câmara de sazonalidade até o alcance do equilíbrio da umidade interna dos concretos com a umidade da câmara de carbonatação. Para essa determinação, os corpos-de-prova de degradação ao natural foram expostos no ambiente do laboratório, com temperatura de  $20\pm 2^\circ\text{C}$  e UR entre 70 e 80%. Os resultados mostram que um tempo de exposição ao CO<sub>2</sub> de 180 minutos é equivalente a 365 dias de exposição ao natural. O autor afirma que a velocidade de crescimento da frente de carbonatação do ensaio acelerado, em corpos-de-prova de argamassas submetidos a teores muito elevados de CO<sub>2</sub> (até 100%), apesar das alterações geradas na estrutura interna da pasta carbonatada decorrentes da alta velocidade das reações, apresenta uma ótima correlação (em torno de 99%) com exemplares protegidos da chuva e expostos ao ar (com teores de CO<sub>2</sub> na ordem de 0,03% a 0,1%).

Procurando avaliar o desempenho da adição de escória de alto forno na durabilidade dos concretos quanto à degradação por carbonatação e correlacionar os resultados com os ensaios acelerados e ao natural, Lima (1999) optou pela utilização de ensaios acelerados em câmara de carbonatação conforme especificações da RILEM/CPC – 18 (1984) durante um período de oito semanas. Para os ensaios ao natural, a pesquisadora manteve os corpos-de-prova em ambiente de laboratório por um ano, na cidade de Barcelona, Espanha. Os resultados obtidos neste trabalho mostraram que existe certa diferença no progresso da carbonatação dos testes acelerados e os ao natural. Porém, o trabalho não aponta os coeficientes de aceleração entre os ensaios.

Os resultados apresentados por Lima (1999), reproduzidos na Figura 12, mostram a tendência de comportamento entre os dois procedimentos de ensaios, indicando que o ensaio acelerado empregado representa o fenômeno de degradação por carbonatação.

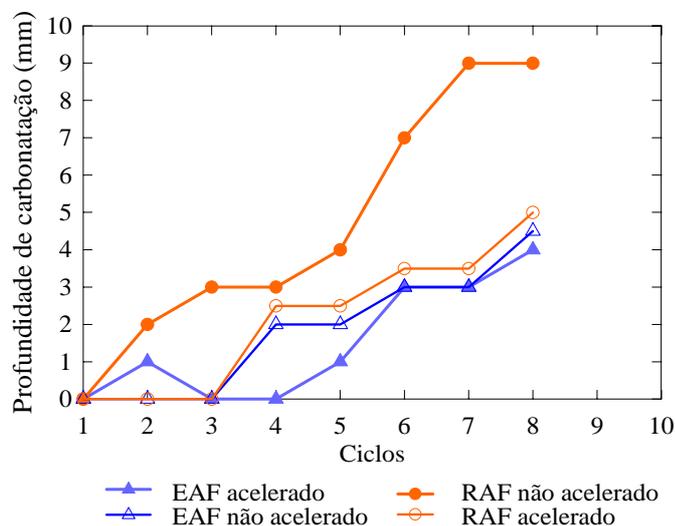


Figura 12: profundidade de carbonatação obtida por ensaios acelerados e ao natural (baseado em LIMA, 1999)

As nomenclaturas EAF e RAF são referentes aos concretos produzidos com escória como agregado miúdo e como agregado graúdo, respectivamente. Os ciclos representam a idade em que foram efetuadas as medidas de profundidade de carbonatação, conforme é mostrado na Tabela 1.

Tabela 1: períodos de realização dos ensaios

(ciclos)	Ensaio de degradação	
	acelerado	ao natural
	(dias)	(dias)
1	7	0
2	14	7
3	21	28
4	28	90
5	35	135
6	42	180
7	49	240
8	56	365

A ASTM E-632 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 1996) relata que a determinação dos coeficientes de aceleração entre os danos oriundos dos ensaios de

degradação ao natural e dos acelerados não é uma tarefa simples. A dificuldade da obtenção desta correlação está relacionada à complexidade existente entre as formas de degradação que ocorrem no ambiente natural e à grande dificuldade de modelar este comportamento em laboratório. Para Li e Chau (2004), com a determinação da relação entre o processo de degradação natural e acelerado, os ensaios de durabilidade acelerados podem prover a base para a determinação da previsão da vida útil das estruturas de concreto.

O ACI 365 (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2000, p.18) enfatiza a importância da determinação da correlação entre os ensaios acelerados e ao natural, e apresenta uma formulação para a obtenção do coeficiente de aceleração<sup>25</sup>, conforme mostra a equação 4.

$$\alpha_c = \frac{R_{AT}}{R_{LT}} \quad \text{equação 4}$$

Onde:

$\alpha_c$  = fator de aceleração.

$R_{AT}$  = taxa de degradação obtida em ensaios acelerados (*AT – accelerated test*).

$R_{LT}$  = taxa de degradação obtida em ensaios ao natural de serviço (*AL – long-term*).

Se a relação entre as taxas é não-linear, recomenda-se a modelagem matemática do mecanismo de degradação para estabelecer esta relação (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, ACI 365, 2000, p.18).

A formulação acima proposta é simples, porém devido à dificuldade de obtenção das taxas de degradação acelerada e natural, a determinação dos coeficientes de aceleração não pode ser encarada como uma tarefa de fácil realização.

Utilizando a simulação de Monte Carlo<sup>26</sup>, Ramezani pour, Tarighat e Miyamoto (2003, p.152) modelaram os resultados de profundidade de carbonatação acelerada fazendo a calibração do modelo com dados de carbonatação de campo. Devido ao crescente interesse de pesquisas na área de gerenciamento de sistemas, os autores afirmam que o programa desenvolvido pode

---

<sup>25</sup> O ACI 365 (2000) denomina estes coeficientes como fator de aceleração.

<sup>26</sup> O método de Monte Carlo é um método de amostragem artificial utilizado na solução de experimentos aleatórios onde se tem conhecimento das distribuições de probabilidade das variáveis envolvidas (PULIDO et al., 1992).

ajudar na fase de projeto na determinação da espessura de cobrimento, na tomada de decisão para métodos de reparo e na previsão probabilística da frente de carbonatação do concreto. Também pode ser usado nas teorias de confiabilidade para encontrar a probabilidade de falha em um determinado tempo futuro. Os autores colocam que a modelagem da carbonatação do concreto para inserção na fase de projeto exige a introdução de modelos de previsão simples, mas com potencialidade estrutural e de durabilidade.

Na literatura pesquisada não foram encontrados estudos referentes à determinação de coeficientes de aceleração para a degradação do concreto com adição de sílica ativa. Tal fato aponta uma lacuna nesta área de conhecimento, a qual deve ser explorada a fim de se conseguir uma maior aproximação entre ensaios acelerados e ao natural, contribuindo ainda para a previsão de vida útil das estruturas de concreto armado.

## 3 PREVISÃO DE VIDA ÚTIL

### 3.1 GENERALIDADES

A definição de vida útil é apresentada em vários trabalhos (JOHN, 1987; ACI 201, 1991; HELENE, 1993; SILVA FILHO, 1994; ANDRADE, 1997; NBR 6118, 2003, entre outros). Helene (1993, p.48) define como o período de tempo no qual a estrutura é capaz de desempenhar as funções para as quais foi projetada. Uma definição mais abrangente é apresentada por Brandão e Pinheiro (1999, p.13) onde vida útil é definida como o período de tempo durante o qual a estrutura mantém condições satisfatórias de uso, preenchendo as finalidades para as quais foi projetada, sem a necessidade de manutenção dispendiosa. O comitê do ACI 365 (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2000, p.2) define a vida útil de uma estrutura ou material componente como o período de tempo decorrido após a instalação (ou no caso do concreto, lançamento) durante o qual todas as propriedades excedem os valores mínimos aceitáveis com manutenção rotineira.

Em definição mais recente, a NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003), no item 6.2, define vida útil de projeto como o período de tempo durante o qual se mantêm as características das estruturas de concreto, desde que atendidos os requisitos de uso e manutenção prescritos pelo projetista e pelo construtor, bem como de execução dos reparos necessários decorrentes de danos acidentais. A referida norma ressalta que o conceito de vida útil aplica-se à estrutura como um todo ou às suas partes. Assim, determinadas partes ou componentes das estruturas podem merecer consideração especial com valor de vida útil diferente do todo.

Nota-se que, nas definições, está inserida a variável "tempo" ou "período". Deste modo, a vida útil de uma estrutura permite quantificar e mensurar (em anos) a expectativa de duração de um determinado empreendimento ou de suas partes.

A aplicabilidade das formulações propostas para correlacionar os fatores que influenciam na previsão de vida útil está diretamente associada à efetiva validação das mesmas com

resultados oriundos de análise de fenômenos reais (ANDRADE, 2001 p.15). O autor também salienta que a curva de predição de vida útil das estruturas não pode ser considerada de uma maneira simplista, em virtude da grande quantidade de fatores intervenientes nos processos de degradação. Mehta (1994) apresenta a curva de comportamento de uma estrutura frente à vida útil, propondo a abordagem ilustrada na Figura 13.

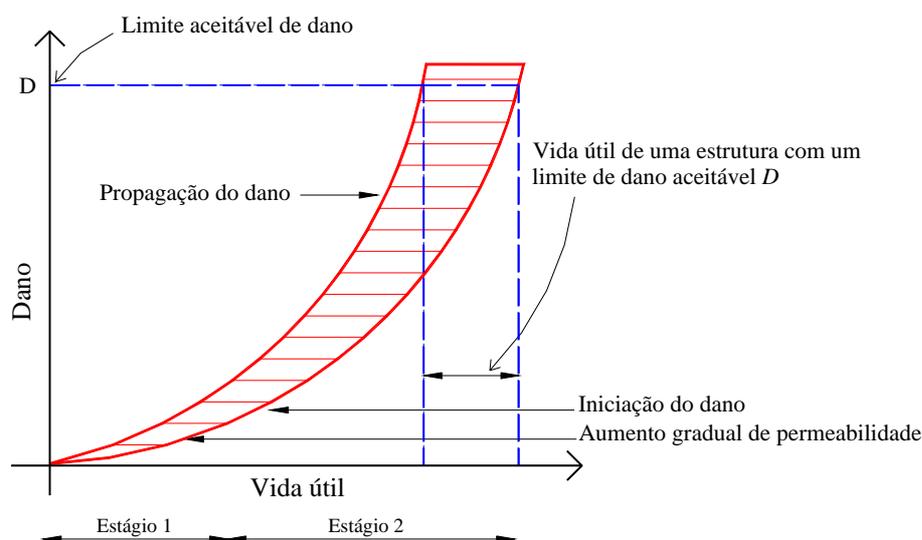


Figura 13: vida útil das estruturas de concreto (MEHTA, 1994, p.30)

Segundo Mehta (1994, p.20) a vida útil de uma estrutura não pode ser descrita como tendo uma forma linear, onde há clara tendência de comportamento. Segundo o modelo proposto, o concreto permanecerá em perfeito estado, enquanto a permeabilidade do mesmo permanecer baixa (AÏTCIN, 1994, p. 86). Devido ao efeito das condições ambientais, de carregamento e da interação dos mesmos com a estrutura do concreto, os agentes de degradação penetram no seu interior, dando início aos processos de deterioração. Em função da quantidade considerável de efeitos que tais processos possam causar, o comportamento de degradação de uma estrutura estaria melhor representado pela área hachurada da Figura 13.

No que se refere à corrosão das armaduras das estruturas de concreto, Ahmad (2003) faz uma revisão dos principais mecanismos, técnicas de monitoramento e metodologias utilizadas para a previsão de vida útil das estruturas. O autor separa os principais fatores que afetam a corrosão das armaduras no concreto em fatores externos e internos. Os primeiros incluem principalmente as condições ambientais, tal como a disponibilidade de oxigênio e umidade na superfície do aço, a umidade relativa do ar e a temperatura, a penetração de gases e íons agressivos e ação bacteriana. Os fatores internos incluem parâmetros de qualidade do aço e do

concreto, quantidade e composição do cimento, qualidade dos agregados, da água de mistura e da água de cura, proporcionamento dos materiais, relação água/cimento, dimensão dos agregados, práticas construtivas, espessura de cobrimento da armadura, composição química e estrutura do aço.

Muitos pesquisadores realizam trabalhos com o intuito de estabelecer curvas de comportamento ao longo do tempo das estruturas de concreto. Um dos principais focos dos trabalhos está relacionado à corrosão de armaduras (TUUTTI, 1982; BROOMFIELD, 1998; NEPOMUCENO, 1992; HELENE, 1993; BAUER, 1995). A maioria dos modelos de previsão leva em consideração o modelo apresentado por TUUTTI (1982), mostrado na Figura 14.

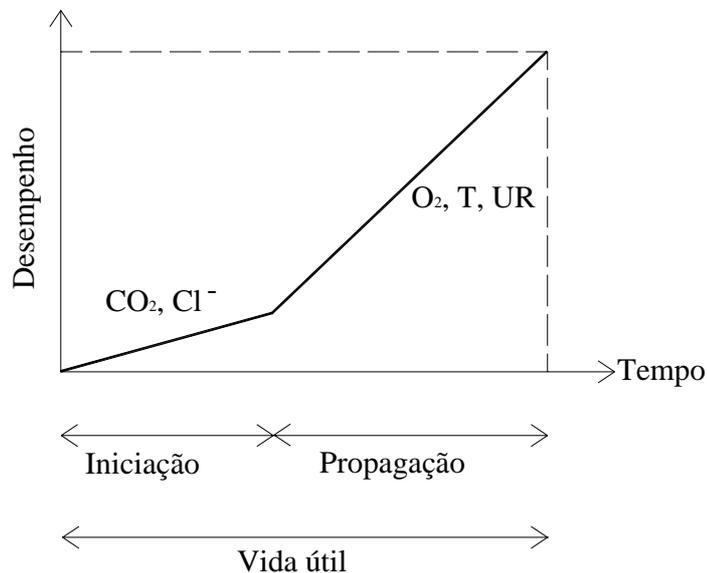


Figura 14: modelo de vida útil para estruturas atacadas pela corrosão de armaduras (TUUTTI, 1982)

Tal modelo considera que a degradação das estruturas ocorre basicamente em dois períodos:

- a) **período de iniciação:** corresponde ao intervalo de tempo necessário para que os agentes agressivos penetrem através do cobrimento do concreto até atingirem as armaduras. Durante esta fase não há perda da funcionalidade das estruturas, mas alguma barreira de proteção foi quebrada devido à penetração de agentes agressivos no interior dos elementos. Como exemplo, pode-se destacar o avanço da frente de carbonatação, penetração de cloretos, o acúmulo de sulfatos e a lixiviação do concreto;

- b) **período de propagação:** nesta fase os fenômenos de degradação agem efetivamente, promovendo diversas manifestações patológicas nas estruturas.

Helene (1993, p.50) adaptou o modelo clássico apresentado por TUUTTI (1982) para definir de forma objetiva as diferentes fases da vida útil das estruturas de concreto armado atacadas por corrosão das armaduras, como é mostrado na Figura 15.

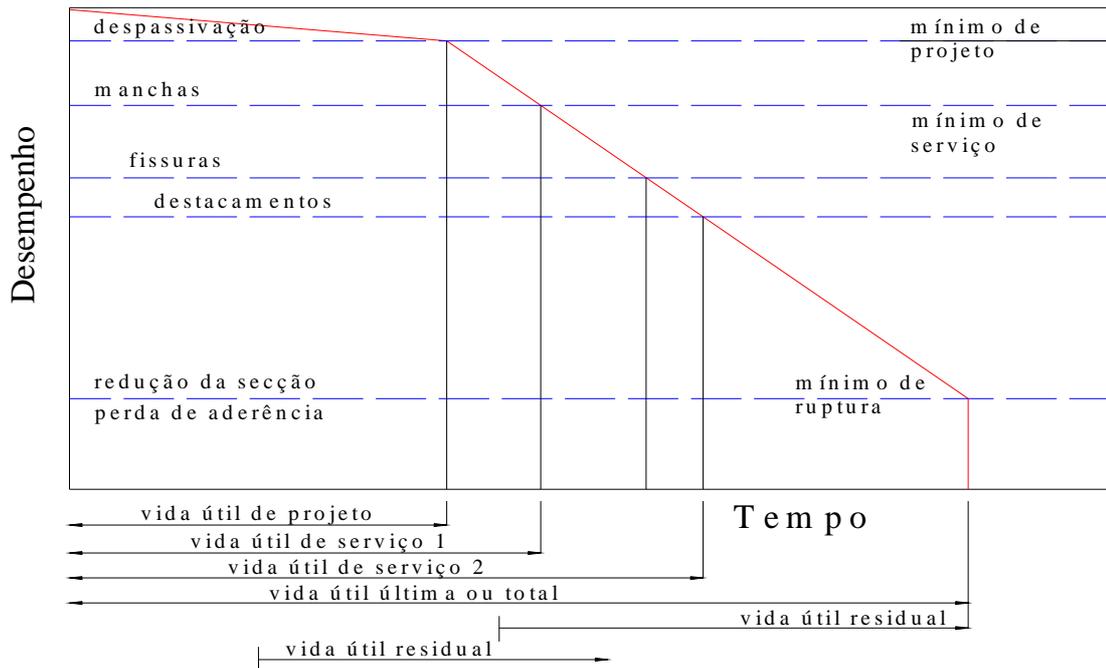


Figura 15: conceituação de vida útil das estruturas de concreto armado tendo como referência o fenômeno de corrosão das armaduras (HELENE, 1993, p.50)

Conforme o modelo apresentado, a vida útil de uma estrutura de concreto armado atacada pela corrosão das armaduras pode ser dividida em três fases distintas:

- a) **vida útil de projeto:** corresponde ao período de tempo necessário para que ocorra a despassivação da armadura;
- b) **vida útil de serviço ou utilização:** é o período em que aparecem manchas de corrosão ou ocorrem fissuras no concreto de cobrimento;
- c) **vida útil última ou total:** corresponde ao período de tempo que vai até a ruptura ou colapso parcial ou total da estrutura.

O ACI 365 (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2000, p.2) considera que a vida útil final ou última de uma estrutura ou elemento de concreto armado pode ser estimada quando:

- a) a segurança estrutural estiver comprometida devido à degradação dos materiais ou a capacidade de carga exceder as consideradas em projeto;
- b) os materiais apresentarem degradação severa (como corrosão das armaduras);
- c) os custos de manutenção excederem os custos de construção;
- d) a estrutura se apresentar obsoleta (no campo estético ou funcional);
- e) a capacidade funcional da estrutura não atender à demanda (por exemplo, um estádio de futebol).

### 3.2 ABORDAGENS PARA PREVISÃO DE VIDA ÚTIL

Atualmente, encontram-se diversas formulações para a previsão da vida útil das estruturas. Porém tem-se dificuldade na validação destas propostas, fato justificável pelo número de variáveis que envolvem o processo. Os modelos de deterioração podem ser classificados, em função da forma que foram desenvolvidos, em modelos empíricos e modelos analíticos. Os modelos empíricos são baseados em dados provenientes de ensaios em laboratório ou dados reais provenientes de inspeções. Os modelos analíticos estão baseados no ajuste de equações, em função de dados obtidos em inspeções, e na grande maioria são baseados na segunda lei de Fick, a qual considera hipóteses adicionais, e pode ser empregada na forma de equação matemática.

A vida útil de uma estrutura pode ser estimada por meio da utilização dos métodos de análise de durabilidade. Segundo Helene (1997) existem quatro métodos de previsão de vida útil de estruturas de concreto: com base em experiências anteriores, ensaios acelerados, métodos determinísticos e métodos estocásticos ou probabilistas. Embora sejam tratados separadamente, segundo o ACI 365 (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2000, p.18), freqüentemente os mesmos são usados em combinação.

A metodologia mais simplista é a que tem como princípio básico o acúmulo de experiência e conhecimento na área que pode ser classificada como semiquantitativa, sendo um método

com pouca fundamentação teórica, pois se baseia apenas na análise de resultados anteriores. A antiga NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1986) propunha os valores de cobrimentos mínimos baseados neste método.

A previsão de vida útil baseada em experiências anteriores se tornou possível pelo acúmulo de conhecimento e experiência adquiridos na elaboração de testes de campo e de laboratório. Este método emprega conhecimentos empíricos e heurísticos, a qual gerou grandes contribuições para a formação da base das normas de concreto (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, ACI 365, 2000, p.18). Porém, com os avanços tecnológicos, que freqüentemente inserem novos materiais no mercado construtivo, e com o aumento da severidade do ambiente natural, as aproximações de vida útil baseadas nesta abordagem são de difícil realização e podem levar a incoerências.

Em 1978, a ASTM E-632 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 1996) introduziu o método de previsão com base em ensaios acelerados, cuja prática consiste na definição do problema, elaboração de pré-teste, realização do ensaio e interpretação e análise dos dados. Esse método, segundo Helene (1997), tem melhor aplicação em estudos de produtos orgânicos e é de difícil aplicação em projetos de estruturas de concreto. Entretanto, o ACI 365 (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2000, p.18) relata que estes testes, se bem projetados, executados e interpretados, podem ajudar na previsão de desempenho e vida útil do concreto.

A previsão da vida útil através de métodos deterministas baseia-se nos mecanismos de transportes de gases, massa e íons através dos poros do concreto. Estes métodos consideram a qualidade do concreto e o caminho que o agente agressivo deve percorrer até chegar à armadura, iniciando a deterioração.

Um enfoque recente de previsão de vida útil pode ser feito utilizando-se métodos estocásticos ou probabilistas, tendo como premissa que a vida útil de uma estrutura não pode ser precisamente estimada devido ao elevado número de fatores que envolvem o processo de produção e degradação do concreto. Para tal, admitem-se distribuições normais ou Gaussianas para as ações agressivas e log-normal ou normal para as resistências da estrutura. Os princípios de confiabilidade são similares aos princípios clássicos de introdução dos coeficientes de segurança no projeto de estruturas de concreto. Andrade (2001, p.2) argumenta que as técnicas de confiabilidade devem ser aplicadas à previsão de vida útil das estruturas de concreto armado, principalmente em função do nível de aleatoriedade

característico de uma grande parte dos fatores envolvidos. Verificando a influência da sílica ativa na previsão da vida útil das estruturas de concreto armado através das técnicas de confiabilidade, Andrade e Dal Molin (2002) concluem que, sem uma análise probabilística, fica muito difícil estabelecer um valor adequado da VUMP<sup>27</sup> de uma estrutura que estará inserida em uma determinada condição ambiental.

No que se refere aos métodos de previsão de vida útil, Cabral, Andrade e Dal Molin (2000) avaliaram sistemas de reparo em concreto armado em estruturas atacadas por corrosão e destacam que:

não existe ainda um método amplamente consagrado no meio científico para se prever com uma adequada confiabilidade a vida útil de um elemento de concreto armado. Em função do sinergismo existente entre as diversas formas de degradação e as características macro e microscópicas do concreto, qualquer tentativa de modelagem oferece apenas valores comparativos entre grupos de materiais analisados, que podem ser empregados para a tomada de decisão na escolha para o uso de uma situação específica. Além disso, os dados coletados são oriundos de ensaios acelerados, onde a generalização dos resultados para situações reais de uso devem ser revestidos de uma análise mais cuidadosa.

Para tanto, ensaios de durabilidade estão sendo realizados no sentido de entender os mecanismos de deterioração e sua ação dentro das estruturas de concreto. Como resultado, vários modelos de previsão de vida útil foram estabelecidos nos últimos anos. Esses modelos possibilitaram um avanço no entendimento do comportamento do concreto armado ao longo do tempo. No entanto, determinados modelos e formulações ainda são complexos, específicos e de validade discutível.

Para o aprimoramento destes modelos, são necessários estudos específicos sobre o comportamento das estruturas de concreto armado, no que se refere a mecanismos de transportes de íons e gases, envelhecimento e influência das características do concreto. Além disso, a criação de uma base de dados de ensaios acelerados e a determinação de coeficientes de aceleração podem contribuir para melhorar as estimativas de vida útil das estruturas.

Saetta e Vitaliani (2004) relatam que é necessário assegurar uma vida útil adequada para as estruturas de concreto armado ainda na fase de projeto. Porém, a dificuldade de projetar uma nova estrutura para uma dada vida útil, ou de prever a vida útil de uma estrutura existente, só pode ser superada considerando a interação entre o material da estrutura (exemplo,

---

<sup>27</sup> Vida útil média de projeto.

concreto e aço) e o meio ambiente. Uma tarefa extremamente dependente das características dos materiais e das condições de exposição.

Tecnicamente, segundo Saetta, Schrefler e Vitaliani (1995, p.1711), para a corrosão da armadura, a vida útil de uma estrutura de concreto pode ser prevista por meio de modelos matemáticos, onde os principais fatores de influência são a espessura e a qualidade do cobrimento do concreto e as condições ambientais. Com relação ao emprego destes modelos, os autores sugerem, para as estruturas existentes, uma avaliação das condições de segurança utilizando os modelos de previsão do fenômeno de degradação ao longo do tempo para planejar intervenções de manutenção e reparo. Para estruturas novas, os modelos de previsão podem ser utilizados ainda na fase de projeto, por meio da simulação da evolução do fenômeno de degradação, podendo oferecer subsídios para a determinação de uma mistura de concreto capaz de garantir a vida útil de serviço especificada no projeto.

### 3.3 MODELOS DE PREVISÃO

Segundo Bauer (1995, p.60), existem muitos modelos com o objetivo de equacionar a velocidade de carbonatação do concreto. Observa-se o uso de um grande número de fatores e coeficientes específicos para determinados materiais, dispostos em certas condições climáticas, o que torna difícil a obtenção de modelos com utilização geral.

Com relação aos modelos para previsão de vida útil em estruturas de concreto armado, Mehta (1994, 18) relata que a modelagem dos parâmetros intervenientes nas diversas formulações é difícil de ser realizada, em virtude da complexidade existente entre as formas de deterioração. Segundo o autor existem três elementos chaves que devem ser levados em consideração no momento de se tentar estabelecer um modelo confiável para predição da vida útil das estruturas: uma definição precisa do material (concreto); uma devida caracterização do meio ambiente e um arquivo de dados de resultados de ensaios acelerados de durabilidade. O autor ressalta ainda que os ensaios acelerados disponíveis atualmente são inadequados para prever o comportamento das estruturas de concreto observado em campo.

Com relação à carbonatação do concreto, os modelos que descrevem o fenômeno podem ser separados em dois grupos; os que estimam a profundidade média e os que estimam um valor

máximo de carbonatação, levando em conta uma certa probabilidade de ser alcançado (SILVA, 1998).

A estimativa da profundidade de carbonatação dos concretos pode ser efetuada pela equação convencional da raiz quadrada do tempo<sup>28</sup>, que é uma simplificação da primeira lei de Fick, mostrada na equação 5.

$$e_c = k\sqrt{t} \quad \text{equação 5}$$

Onde:

$e_c$  = profundidade de carbonatação;

$k$  = coeficiente de carbonatação, que depende da difusividade do  $\text{CO}_2$ <sup>29</sup>, do gradiente de concentração do  $\text{CO}_2$ <sup>30</sup> e da quantidade retida de  $\text{CO}_2$ , em  $\text{mm/ano}^{1/2}$ ;

$t$  = tempo decorrido.

Caso a estrutura apresente carbonatação inicial, pode ser empregado o modelo da equação 6, adaptado por HO e LEWIS (1987).

$$e_c = e_0 + k\sqrt{t} \quad \text{equação 6}$$

Onde:

$e_c$  = profundidade de carbonatação;

$e_0$  = profundidade de carbonatação inicial;

$k$  = coeficiente de carbonatação;

$t$  = tempo de exposição.

O modelo da raiz quadrada do tempo não pode ser generalizado e aplicado em condições diferentes da origem dos resultados (PAPADAKIS, VAYENAS e FARDIS, 1991b, p.363).

<sup>28</sup> Modelo de estimativa da profundidade de carbonatação proposto por: KONDO, R.; DAIMON, M.; AKIBA, T. (1968). Mechanism and kinetics of carbonation in hardened concrete. International Symposium on the Chemistry of Cement, 5<sup>th</sup>, vol.3, Tokyo, p. 402-408.

<sup>29</sup> Que depende do grau de umidade dos poros do concreto, ou seja, varia em função da umidade relativa do ambiente.

<sup>30</sup> É a quantidade de  $\text{CO}_2$  que reagiu com produtos alcalinos da hidratação do cimento Portland formando carbonatos. Para concretos de mesma permeabilidade e porosidade da pasta submetidos ao mesmo gradiente de pressão ou concentração de  $\text{CO}_2$ , quanto maior a reserva alcalina, menor a profundidade de carbonatação.

Essa expressão não se aplica com condições variáveis de exposição. Se a superfície do concreto for exposta à umidade variável, com molhagem periódica, a velocidade de carbonatação é reduzida devido à difusão mais lenta do CO<sub>2</sub> pelos poros saturados da pasta de cimento. Por outro lado, partes protegidas de uma estrutura, como relatado anteriormente, carbonatam com maior velocidade que as expostas à ação da chuva, visto que com a molhagem, teoricamente, se reduz significativamente a velocidade de carbonatação. Helene (1993, p.100) ressalta que, para interiores, nos quais as condições ambientais permanecem praticamente constantes, esse modelo tem representado bem a realidade. No entanto, para ambientes exteriores, a profundidade de carbonatação efetivamente encontrada tem sido inferior ao previsto pelo modelo da equação 5.

A maioria dos modelos de previsão do avanço da carbonatação ao longo do tempo é baseada nesta teoria (KROPP e HILSDORF, 1995, p.101). Porém, os autores descrevem que para concretos com idades mais avançadas, a profundidade de carbonatação observada muitas vezes é menor que a prevista pelo modelo que relaciona a  $\sqrt{t}$ . Smolczyk (1969, p.369) cita que a equação da raiz quadrada do tempo é uma aproximação da profundidade de carbonatação, a qual se torna adequada para fins de extrapolação somente após um longo período de carbonatação, ou seja, para concretos mais velhos. Guimarães (2000, p.62) concorda com Smolczyk (1969) e relata que esse modelo só apresenta boa precisão após 10 anos de degradação natural da estrutura, sugerindo que, para períodos inferiores, o expoente de  $t$  pode diferir de  $\frac{1}{2}$ .

Smolczyk (1969, p.372) relata que essa relação pode não trazer bons resultados em situações onde algumas propriedades do concreto agregam maior importância, como por exemplo, a variação da porosidade em relação ao grau de hidratação do cimento e ao teor de umidade do concreto. Desta forma, o autor propõe que a carbonatação em função do tempo seja obtida pela equação 7. A formulação proposta por Smolczyk (1969) é baseada no modelo apresentado na equação 5, porém considera que a profundidade de carbonatação do concreto é função  $\sqrt[n]{t}$ , onde o expoente de  $t$  pode ser diferente de  $\frac{1}{2}$ .

$$e_c = k \cdot \sqrt[n]{t - t_0} \quad \text{equação 7}$$

Onde:

$e_c$  = profundidade de carbonatação;

$k$  = coeficiente de carbonatação ( $\text{mm/ano}^{0,5}$ );

$t$  = tempo de exposição (anos);

$t_0$  = idade inicial da estrutura (anos);

$n$  = parâmetro que depende do tipo de cimento, geralmente próximo de 1,7 para cimentos Portland comum e de 2,0 para cimentos Portland de alto forno.

SMOLCZYK (1969, p.372) relata que a inclusão do tempo  $t_0$  na formulação permite que o modelo de estimativa de profundidade de carbonatação seja empregado em estruturas já existentes, desde que se conheça a idade da mesma.

Hamada (1969, p.354) apresenta o modelo para estimativa de profundidade de carbonatação mostrado na equação 8, que é complementado pelas equações 9 e 10.

$$t = \frac{k}{R^2} \cdot e_c^2 \quad \text{equação 8}$$

$$k = \frac{0,3(1,15 + 3ac)}{(ac - 0,25)^2} \quad \text{equação 9}$$

$$R = r_c \cdot r_a \cdot r_s \quad \text{equação 10}$$

Onde:

$t$  = tempo de exposição (anos);

$e_c$  = profundidade de carbonatação (cm);

$k$  = coeficiente em função da relação água/cimento do concreto;

$ac$  = relação água/cimento

$R$  = coeficiente tabelado que depende do tipo de cimento ( $R_c$ ), tipo de agregado ( $R_a$ ) e ação do agente na superfície ( $R_s$ ).

Tabela 2 apresenta os coeficientes ( $r_c$ ), ( $r_a$ ) e ( $r_s$ ) necessários para a utilização nas equações acima, determinados por Hamada (1969).

Tabela 2: coeficientes de relação da profundidade de carbonatação

Tipo de cimento	Cimento Portland		Cimento Portland com escória de alto forno		Cimento Portland pozolânico	Cimento Portland com 20% cinza volante c
	Comum	Alta resistência inicial	Escória 30 - 40%	Escória 60%		
$(r_c)$	1	0,6	1,4	2,2	1,7	1,9
Tipo de Agregado	Areia de rio		Areia de rio, brita de pedra-pomes		areia e brita de pedra-pomes	Cinza (fina, grossa)
$(r_a)$	1		1,2		2,9	3,3
Superfície-agente ativo	Normal (sem aditivo)		Incorporador de ar		Redutor de água (plastificante)	
$(r_s)$	1		0,6		0,4	

Fonte: Hamada (1969, p.354).

Jiang, Lin e Cai (2000, p.700) apresentam um modelo de estimativa da profundidade de carbonatação, considerando que os fatores principais que afetam a carbonatação do concreto são o tipo e quantidade de aglomerante, a relação água/aglomerante, o grau de hidratação, a concentração de CO<sub>2</sub> e a umidade relativa. Tal modelo é mostrado na equação 11.

$$e_c = 839 \cdot (1 - UR)^{1,1} \sqrt{\frac{\frac{W}{r_c C} - 0,34}{r_{hd} r_c C}} \cdot C_0 \sqrt{t} \quad \text{equação 11}$$

Onde:

$e_c$  = profundidade de carbonatação (mm);

$UR$  = umidade relativa;

$W$  = quantidade de água (kg/m<sup>3</sup>);

$C$  = consumo de cimento (kg/m<sup>3</sup>);

$C_0$  = concentração de CO<sub>2</sub> (%);

$r_c$  = coeficiente que depende do tipo de cimento;

$r_{hd}$  = coeficiente do grau de hidratação;

$t$  = tempo de exposição (dias).

Com relação aos modelos de previsão da profundidade de carbonatação, Kazmierczak (1995, p.27) destaca que os mesmos apresentam utilização restrita e:

a observação do comportamento de estruturas antigas demonstra que dificilmente as profundidades de carbonatação previamente estimadas são atingidas. Os modelos propostos geralmente não contemplam adequadamente o efeito da saturação dos poros pela incidência direta da chuva ou das variações do grau de saturação, devido às oscilações sazonais de umidade relativa do ar e temperatura, nem as variações da concentração de CO<sub>2</sub> existentes ao longo do tempo. Em consequência, a estimativa da frente de carbonatação através desses modelos normalmente é superior à real.

Com base na literatura consultada, pode-se afirmar que existe uma certa dificuldade na aplicação dos modelos para estimativa da profundidade de carbonatação, os quais, em sua grande maioria, devido às simplificações, não refletem a intensidade do fenômeno real. Já os que evitam estas simplificações apresentam parâmetros de difícil determinação ou onerosa obtenção. De modo geral, os modelos também não contemplam a correlação de resultados de ensaios acelerados com os resultados de ensaios ao natural ou com a situação real, fato que os torna de utilidade e validade discutível.

Assim, considerando que o estudo da carbonatação do concreto em bases adequadas pode vir a gerar contribuições pertinentes ao desenvolvimento ou aprimoração dos modelos de previsão de vida útil, os próximos capítulos descrevem o programa experimental do trabalho. Em seqüência, apresenta-se a análise dos resultados do estudo de concretos com e sem adição de sílica ativa submetidos ao ensaio de carbonatação acelerado e natural.

## 4 METODOLOGIA DA PESQUISA

A estimativa de vida útil das estruturas de concreto armado também pode ser obtida por meio de ensaios acelerados correlacionados com ensaios de degradação ao natural, através da determinação de coeficientes de aceleração. Tais coeficientes possibilitam essa aproximação utilizando apenas ensaios de degradação acelerados, pois demandam um tempo menor de execução, viabilizando economicamente sua realização. Neste item se descreve a metodologia empregada para a contribuição ao estudo da carbonatação de concretos com e sem adição de sílica ativa submetidos a ensaios de degradação acelerados e ao natural.

### 4.1 GENERALIDADES

Para a elaboração deste trabalho foram utilizados dados de ensaios acelerados de carbonatação, oriundos do projeto de pesquisa de DAL MOLIN et al. (1997), vinculado ao Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação (NORIE) da Universidade Federal do Rio Grande de Sul (UFRGS). Com início no ano de 1996, o projeto abrange um amplo estudo relacionado à durabilidade de concretos produzidos com cimento Portland de alta resistência inicial, o CP V ARI, com e sem adição de sílica ativa.

O programa experimental foi definido no início do projeto de Dal Molin et al. (1997), com a finalidade de verificar a influência da adição de sílica ativa no fenômeno de iniciação e propagação da corrosão de armaduras por carbonatação do concreto e penetração de íons cloreto e, contemplou ensaios de campo (não acelerados) e de laboratório (acelerados), como é mostrado no fluxograma da Figura 16.

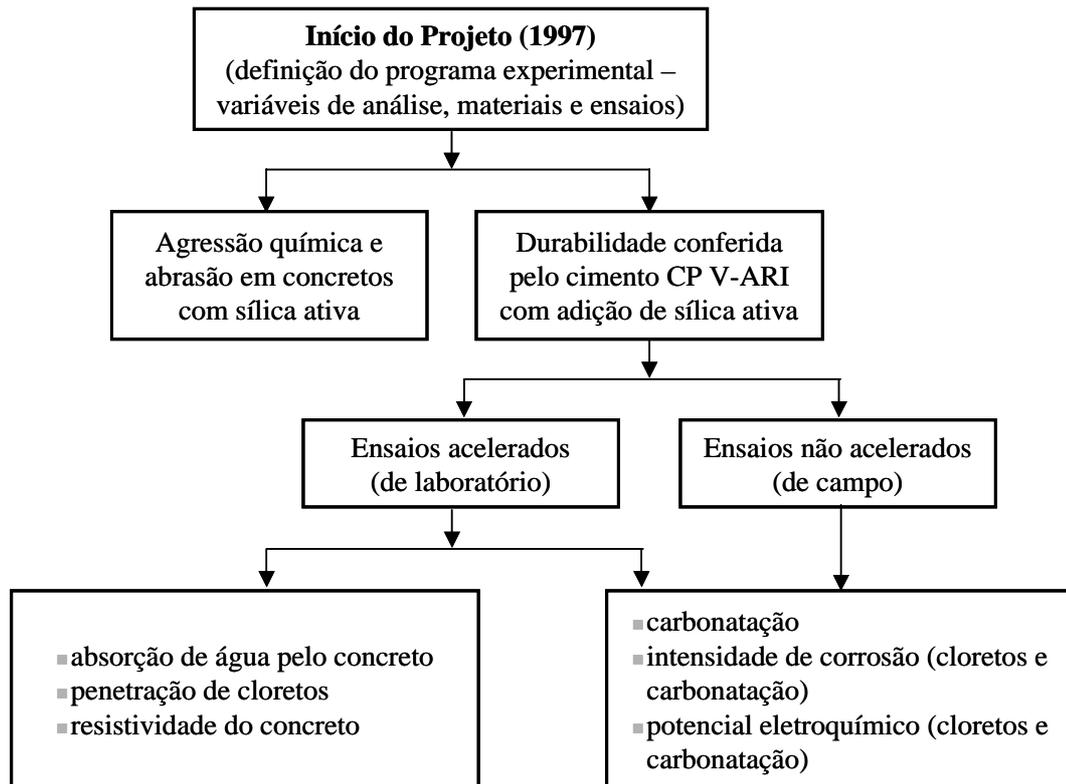
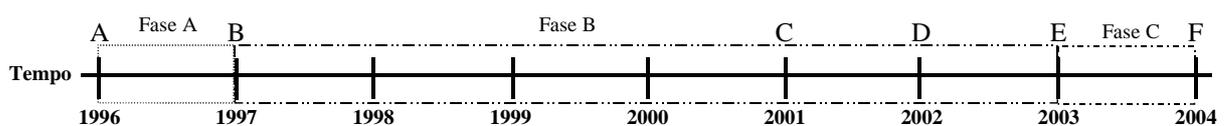


Figura 16: estrutura do projeto de Dal Molin et al. (1997)

Dentre as contribuições deste projeto destacam-se as pesquisas realizadas por Tessari (2001), Kulakowski (2002) e Vieira (2003). A Figura 17 apresenta as fases de desenvolvimento do projeto.



**A** - Início do projeto, ensaios de agressão química e abrasão.

**B** - Confeção das amostras para a exposição ao ambiente de degradação natural, execução dos ensaios acelerados.

**C** - Dissertação Tessari.

**D** - Tese Kulakowski.

**E** - Tese Vieira.

**F** - Determinação dos coeficientes de correlação para iniciação da corrosão por carbonatação.

**Fase A** - elaboração do programa experimental, definição das variáveis dependentes e independentes, definição e caracterização dos materiais empregados nos concretos, definição dos traços e ensaios de durabilidade. Execução dos ensaios acelerados de durabilidade para iniciação de corrosão por carbonatação (Kulakowski, 2002) e para propagação da corrosão por íons cloreto e carbonatação (Vieira, 2003).

**Fase B** - desenvolvimento dos ensaios, participação em eventos e geração de publicações.

**Fase C** - resultados dos ensaios de durabilidade não acelerados.

Figura 17: representação esquemática do desenvolvimento do projeto

O programa experimental descrito faz parte do projeto de Dal Molin et al. (1997) abrangendo o estudo da carbonatação não acelerada para o ambiente de baixa agressividade. A Figura 18 mostra em maior detalhe as etapas do projeto.

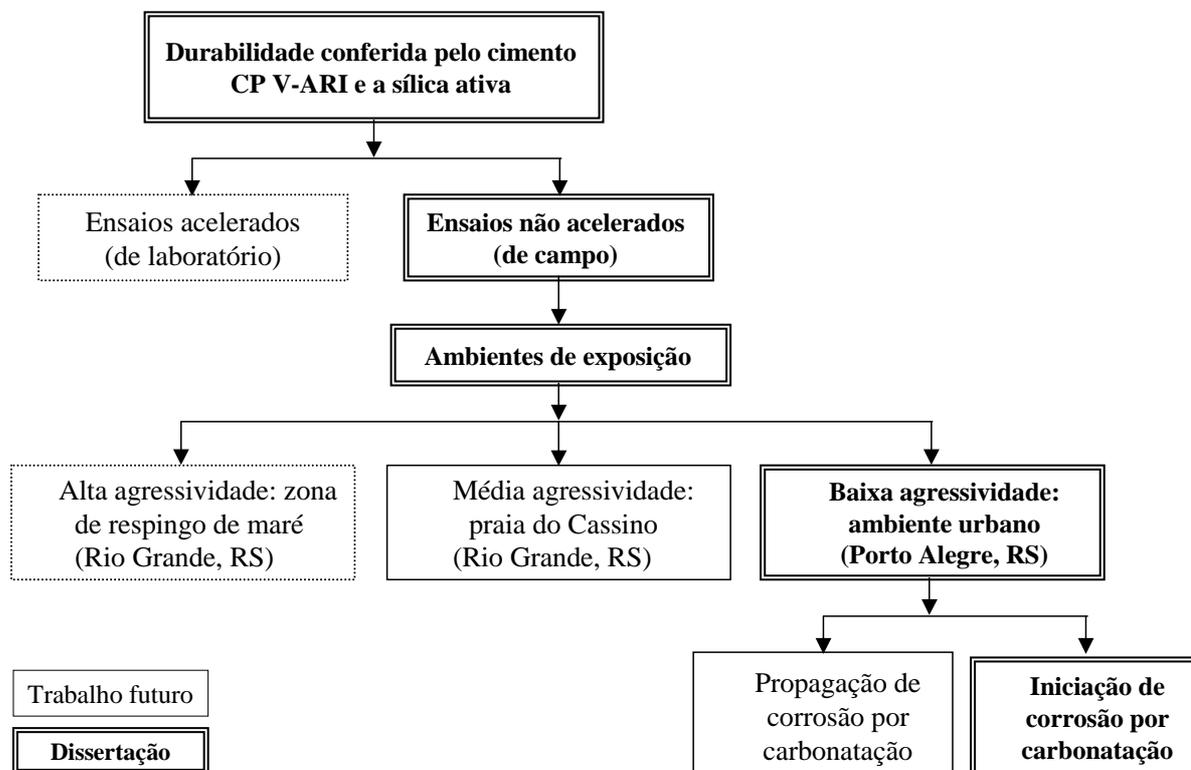


Figura 18: detalhe do projeto de Dal Molin et al. (1997)

## 4.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Este trabalho contempla o estudo da carbonatação acelerada e natural para o processo de iniciação de corrosão das armaduras por carbonatação do concreto. Para tal, produziu-se um número de amostras excedentes para a execução dos ensaios de durabilidade acelerados (profundidade de carbonatação). Estas amostras foram expostas ao ambiente natural urbano, para a verificação da degradação ao longo tempo e posterior correlação destes dados com os obtidos nos ensaios de laboratório (acelerado). Os corpos-de-prova expostos à degradação natural possuem as mesmas dimensões que os utilizados nos ensaios acelerados e foram moldados simultaneamente, seguindo os mesmos parâmetros de controle.

Os corpos-de-prova que foram submetidos às condições naturais de exposição tiveram como ambiente agressivo o estacionamento da Escola de Engenharia, nas proximidades do laboratório do NORIE<sup>31</sup>, na cidade de Porto Alegre, Rio Grande do Sul. O tempo de exposição dos corpos-de-prova no ambiente de degradação urbano, desprotegido da chuva, foi de aproximadamente 7 anos.

Durante este período a identificação inicial dos corpos-de-prova foi parcialmente perdida, necessitando recorrer à técnica de reconstituição parcial de traço de concreto no estado endurecido a fim de caracterizar e reclassificar algumas amostras.

#### 4.2.1 Variáveis de Análise

As variáveis foram definidas em variáveis controláveis, não controláveis e fixas, como é mostrado na Tabela 3.

Tabela 3: variáveis de análise do projeto de pesquisa

Variáveis	Ensaio acelerado			Ensaio ao natural		
	controlável		fixa	controlável		fixa
	sim	não		sim	não	
Ambiente de exposição			x		x	
Precipitação			x		x	
Relação água/aglomerante	x			x		
Temperatura			x		x	
Tipo de cimento			x			x
Teor de adição	x			x		
Agregados			x			x
Teor de CO <sub>2</sub>			x		x	
Tipo de adição			x			x
Tipo e duração de cura			x			x
Umidade relativa			x		x	

As variáveis controláveis são comuns para os dois procedimentos de ensaio. Para o ensaio acelerado, são controlados 5 níveis de relação água/aglomerante (0,30; 0,35; 0,45; 0,60 e 0,80) e de sílica ativa (0; 5; 10; 15 e 20%). Já para o ensaio ao natural são controlados 3 níveis de relação água/aglomerante (0,30; 0,45 e 0,80) e de sílica ativa (0; 10 e 20%). O tipo de cimento, o tipo de adição, os agregados e o tipo e duração da cura são variáveis fixas nas duas

<sup>31</sup> Núcleo Orientado para a Inovação a Edificação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, localizado na rua Osvaldo Aranha, nº 99, Centro, Porto Alegre, RS.

abordagens de ensaio. No ensaio acelerado também foram fixadas as variáveis relativas ao ambiente de exposição, à precipitação (que é inexistente), à temperatura, ao teor de CO<sub>2</sub> e à umidade relativa. No ensaio natural estas variáveis são não controláveis.

#### 4.2.2 Planejamento dos Experimentos

O projeto para a realização dos ensaios acelerados foi realizado através de um fracionamento estatístico (projeto fatorial cruzado), conforme mostrado na Tabela 4. O projeto fatorial cruzado, para os ensaios acelerados, foi realizado de forma completa, com duas repetições.

As variáveis deste projeto foram a relação água/aglomerante (0,30; 0,35; 0,45; 0,60 e 0,80) e o teor de adição de sílica ativa (0; 5; 10; 15 e 20%). Para cada dosagem foram moldados dois corpos-de-prova, um de cada betonada, a fim de minimizar os erros de moldagem (o erro fica notado pela discrepância entre os resultados das duas amostras).

Tabela 4: matriz experimental dos ensaios acelerados

		<b>Relação água/aglomerante</b>				
<b>Sílica Ativa (%)</b>	<b>0,30</b>	<b>0,35</b>	<b>0,45</b>	<b>0,60</b>	<b>0,80</b>	
0	x		x		x	
5		x		x		
10	x		x		x	
15		x		x		
20	x		x		x	

Para a realização dos ensaios ao natural, realizou-se um novo fracionamento do projeto supracitado que permite verificar a influência das variáveis com a mesma representatividade de um projeto completo. A matriz que representa as misturas analisadas no ensaio de degradação não acelerado é mostrada na Tabela 5.

Tabela 5: matriz experimental dos ensaios ao natural

<b>Relação água/aglomerante</b>					
<b>Sílica Ativa (%)</b>	<b>0,30</b>	<b>0,35</b>	<b>0,45</b>	<b>0,60</b>	<b>0,80</b>
0	x				x
5					
10			x		
15					
20	x				x

As variáveis selecionadas para a realização do ensaio de degradação não acelerado, cujos dados serão comparados com os de degradação acelerada, foram a relação água/aglomerante (0,30; 0,45 e 0,80) e o teor de adição de 0; 10 e 20%. De maneira análoga aos ensaios acelerados, foram realizadas duas repetições para cada combinação de variáveis.

### 4.2.3 Materiais

Para o desenvolvimento deste projeto de pesquisa, os materiais selecionados foram definidos segundo as diretrizes adotadas no projeto de DAL MOLIN et al. (1997).

#### 4.2.3.1 Agregados

O agregado miúdo empregado no programa experimental foi a areia quartzosa de origem natural, proveniente do rio Guaíba, Porto Alegre, RS. Como é mostrado na Tabela 6, esse agregado foi caracterizado conforme prescrições da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 7211 (1982).

Tabela 6: características físicas do agregado miúdo

<b>Peneira abertura (mm)</b>	<b>% Média retida</b>	<b>% Média retida acumulada</b>
4,8	0	0
2,4	5	5
1,2	9	14
0,6	21	35
0,3	48	83
0,15	17	100
<0,15	0	100
Dimensão máxima característica (mm)		4,8
Módulo de finura		2,39
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )		2,62
Graduação (zona)		2 (fina)

Como agregado graúdo utilizou-se brita de origem basáltica, caracterizado segundo prescrições da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR NM<sup>32</sup> 248 (2003). A Tabela 7 apresenta as características físicas do agregado.

Tabela 7: características físicas do agregado graúdo

<b>Peneira abertura (mm)</b>	<b>% Média retida</b>	<b>% Média retida acumulada</b>
19,0	7	7
12,5	57	64
9,5	29	93
6,3	5	98
4,8	1	99
<4,8	1	100
Dimensão máxima característica (mm)		25
Módulo de finura		7,01
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )		3,08
Graduação (zona)		Brita 1

#### 4.2.3.2 Cimento

Como o programa experimental visa avaliar a influência da adição de sílica ativa nos concretos, foi empregado o Cimento Portland de Alta Resistência Inicial, CP V-ARI, por ser

<sup>32</sup> Norma Mercosul.

um cimento isento de adições pozolânicas<sup>33</sup>. A caracterização física e química do cimento estão apresentadas na Tabela 8 e na Tabela 9, respectivamente.

Tabela 8: caracterização química do cimento<sup>34</sup>

<b>Características químicas</b>	<b>%</b>
SiO <sub>2</sub>	18,20
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,90
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,10
MgO	1,46
CaO	61,30
Na <sub>2</sub> O	0,20
K <sub>2</sub> O	0,89
SO <sub>3</sub>	3,59
PF	2,50
RI	0,45

Tabela 9: caracterização física do cimento<sup>35</sup>

<b>Propriedades físicas</b>	<b>Resultados</b>	
Módulo de sílica	2,54	
Módulo de alumina	1,53	
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	3,12	
Índice de finura (%)	0,13	
Superfície específica Blaine (m <sup>2</sup> /kg)	452,00	
Água de pasta de consistência normal (%)	28,15	
Tempo de pega - início (min)	142,00	
Tempo de pega - fim (min)	234,00	
Expansão a frio (cm)	0,00	
Expansão a quente (cm)	0,00	
Resistência à compressão (MPa)	1 dia	23,83
	3 dias	38,57
	7 dias	43,85
	28 dias	51,43

<sup>33</sup> O cimento CP V ARI, por norma, apresenta no máximo 5% de adições carbonáticas.

<sup>34</sup> Laboratório de Fluorescência de Raios-x do Instituto de Geociências da UFRGS.

<sup>35</sup> Fornecida pelo produtor.

#### 4.2.3.3 Sílica Ativa

A sílica ativa empregada é do tipo não densificada, oriunda de Tucuruí, PA. As características químicas e físicas são apresentadas na Tabela 10 e na Tabela 11, respectivamente.

Tabela 10: caracterização química da sílica ativa<sup>36</sup>

Características químicas	%
SiO <sub>2</sub>	94,00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,05
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,07
MgO	0,55
CaO	0,33
Na <sub>2</sub> O	0,20
K <sub>2</sub> O	1,28
Perda ao Fogo	3,01

Tabela 11: caracterização física da sílica ativa<sup>37</sup>

Propriedades físicas	Resultados
Umidade	0,90
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,20
Densidade aparente	0,34
pH	7,90
% resíduo na peneira 45 µm	2,78
Superfície específica BET (m <sup>2</sup> /kg)	20780
Diâmetro equivalente a 10% de massa acumulada (µm)	<0,20
Diâmetro equivalente a 50% de massa acumulada (µm)	0,25
Diâmetro equivalente a 90% de massa acumulada (µm)	1,40

No Laboratório de difratometria de raios-x do CPEGq – Centro de Estudos em Petrologia e Geoquímica da UFRGS, utilizando a técnica de difração de raios-X (DRX), fez-se a caracterização da estrutura morfológica da sílica ativa utilizando um Difratorômetro marca SIEMENS, modelo D5000, tipo KRISTALOFLEX de radiação CuK $\alpha$ , corrente de 30 mA e voltagem de 40kV. O difratograma de raios-x da sílica ativa, onde se verifica o halo amorfo, caracterizando o espectro da sílica ativa com estrutura amorfa, é apresentado na Figura 19.

<sup>36</sup> Fornecido pelo produtor.

<sup>37</sup> Massa específica realizada no Laboratório do NORIE; análise de superfície específica realizada no Laboratório de Materiais Cerâmicos da UFRGS; granulometria realizada no Instituto de Pesquisas Tecnológicas o IPT.

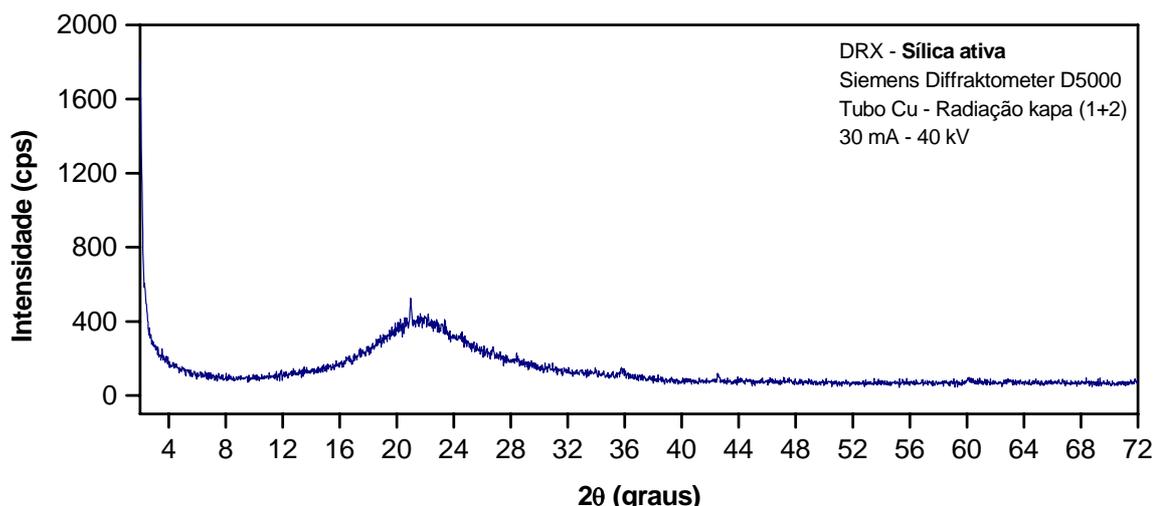


Figura 19: difratograma da sílica ativa

#### 4.2.3.4 Aditivo

Para atingir a consistência desejada de  $70 \pm 10$  mm, foi necessário, em algumas misturas, o emprego do aditivo superplastificante a base de naftaleno sulfonado, com densidade média de  $1,05 \text{ g/cm}^3$ , cujas propriedades, fornecidas pelo fabricante, estão apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12: propriedades do aditivo superplastificante

Propriedade	Resultado
Massa específica	$1,21 \text{ g/cm}^3$
Teor de cloreto	Zero
Ar incorporado	$< 2\%$
Teor de álcalis	$< 72,0 \text{ g de Na}_2\text{O/l}$

#### 4.2.3.5 Água

Proveniente da rede de abastecimento de água potável da concessionária local.

#### 4.2.4 Proporcionamento dos Materiais

A dosagem dos concretos foi realizada por Dal Molin et al. (1997) utilizando o método de dosagem do IPT/EPUSP descrito por Helene e Terzian (1992), cujo teor de argamassa foi determinado e fixado em 46%. Os traços obtidos são mostrados na Tabela 13.

Tabela 13: traço dos concretos

Traço	Relação a/ag <sup>a</sup>	Sílica ativa (%) <sup>b</sup>	Materiais para uma betonada (g)					
			Cimento	Agregado		Água	Sílica ativa	Aditivo (g-%)
				miúdo	graúdo			
1:0,56:1,83*	0,30	0	10.929	6.120	20.000	3.224	-	83,5-0,76
1:0,56:1,83	0,30	10	10.929	6.12	20.000	3.523	1.093	103-0,94
1:0,56:1,83*	0,30	20	10.929	6.120	20.000	3.869	2.186	138-1,26
1:0,88:2,21	0,35	5	9.050	7.964	20.000	3.279	453	44,2-0,49
1:0,88:2,21	0,35	15	9.050	7.964	20.000	3.591	1.358	61,2-0,68
1:1,53:2,97	0,45	0	6.734	10.303	20.000	3.030	-	-
1:1,53:2,97*	0,45	10	6.734	10.303	20.000	3.296	673	28,6-0,42
1:1,53:2,97	0,45	20	6.734	10.303	20.000	3.596	1.347	54,5-0,81
1:2,50:4,11	0,60	5	4.866	12.165	20.000	3.040	243	-
1:2,50:4,11	0,60	15	4.866	12.165	20.000	3.358	730	8-0,16
1:3,80:5,63*	0,80	0	3.552	13.499	20.000	2.842	-	23-0,65
1:3,80:5,63	0,80	10	3.552	13.499	20.000	3.106	355	14,7-0,41
1:3,80:5,63*	0,80	20	3.552	13.499	20.000	3.410	710	8-0,23

\*Traços comuns para o ensaio de carbonatação acelerado e natural.

<sup>a</sup> Relação água/aglomerante = (água + 0,6\*aditivo)/(cimento + sílica ativa).

<sup>b</sup> Teor de adição de sílica ativa em relação à massa de cimento.

A Figura 20 apresenta o gráfico do consumo de cimento dos concretos em função da relação água/aglomerante e do teor de adição de sílica ativa.

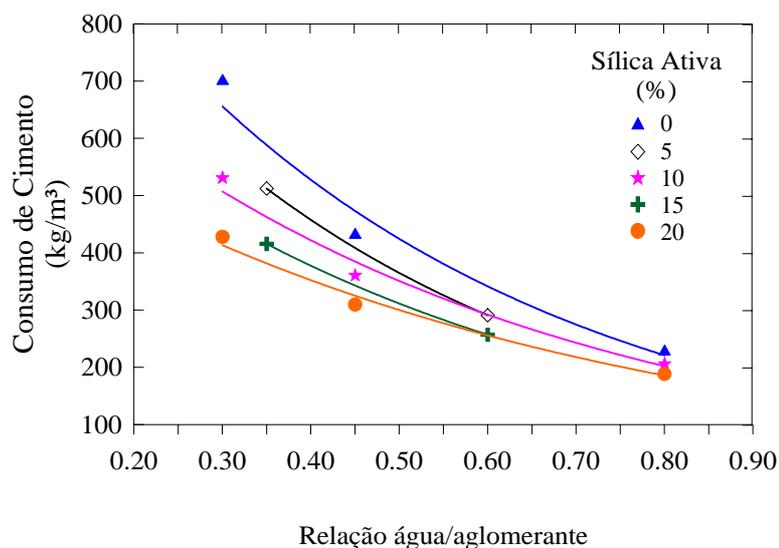


Figura 20: consumo de cimento referente à relação água/aglomerante e o teor de adição de sílica ativa

Conforme especificações da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR NM 67 (1998) foi determinado o abatimento de tronco de cone, fixo em  $70 \pm 15$  mm. Os valores de abatimento obtidos, para as duas betonadas de cada traço, são mostrados na Tabela 14.

Tabela 14: abatimento de tronco de cone (mm)

Relação água/aglomerante	Sílica Ativa (%)				
	0	5	10	15	20
0,30	62		65		50
	64		45		67
0,35		55		54	
		50		40	
0,45	67		45		52
	72		66		73
0,60		53		49	
		50		55	
0,80	50		45		62
	45		50		92

Fonte: Dal Molin et al. (1999)

#### 4.2.5 Confeccção dos Corpos-de-prova

Para a realização do ensaio de profundidade de carbonatação foram moldados corpos-de-prova prismáticos com dimensões de 100x100x300 mm, permitindo obter várias fatias de aproximadamente 30 mm para a medição da profundidade de carbonatação em várias idades.

A confeccção dos espécimes, para o ensaio acelerado e para o natural, foi efetuada conforme prescrições da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 5738 (2003), sendo que, após 24 horas, foram desmoldados e submetidos à cura úmida, durante 14 dias, com umidade relativa de 95% e temperatura de 23°C. A fim de impedir a entrada de CO<sub>2</sub> durante a etapa de cura úmida, os corpos-de-prova destinados ao ensaio acelerado<sup>38</sup> foram embalados e lacrados com duas camadas de filme PVC, com cuidado para evitar a existência de ar na interface plástico/corpo-de-prova. Após este período as amostras foram dispostas em câmara de sazramento (figura 21), localizada no mesmo ambiente da câmara de

<sup>38</sup> A etapa de sazamentos foi desnecessária para os corpos-de-prova submetidos ao ensaio não acelerado, visto que, no ambiente natural de exposição a umidade relativa, a precipitação, o teor de CO<sub>2</sub> e a temperatura são variáveis não controladas durante o ensaio.

carbonatação, com umidade e temperatura controladas, até atingirem constância de massa de 0,1% entre duas pesagens consecutivas.

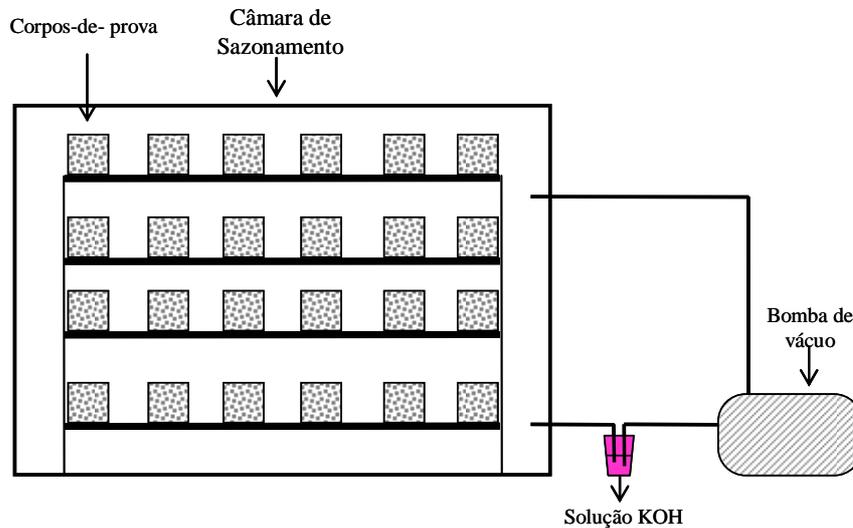


Figura 21: esquema simplificado da câmara de sazonalização (KULAKOWSKI, 2002, p.58)

A câmara de sazonalização é equipada com uma bomba de vácuo que permite uma circulação de ar constante no interior da mesma. O ar é filtrado em uma solução de hidróxido de potássio (KOH) com capacidade de reter o  $\text{CO}_2$  existente na atmosfera.

Os corpos-de-prova referentes ao ensaio de carbonatação natural, permaneceram em ambiente de laboratório até a idade de 28 dias, para então serem submetidos à degradação natural. A figura 22 mostra o local onde as amostras ficaram expostas.



Figura 22: corpos-de-prova em ambiente natural de degradação – estacionamento da Escola de Engenharia/UFRGS

#### 4.2.6 Ensaio

A avaliação da durabilidade dos concretos frente à carbonatação engloba as seguintes etapas:

- a) realização de ensaio de carbonatação acelerado;
- b) realização de ensaio de carbonatação ao natural;
- c) realização de ensaios auxiliares de reconstituição de traço de concreto endurecido e de resistência à compressão axial.

A Figura 23 apresenta o desenho esquemático dos ensaios em concreto que foram realizados no programa experimental.

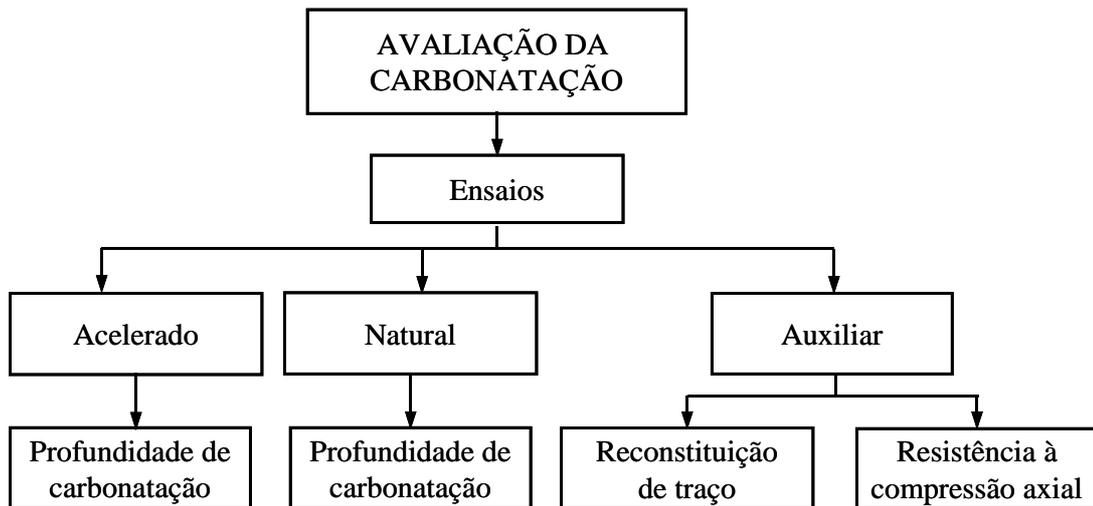


Figura 23: representação esquemática dos ensaios de durabilidade

##### 4.2.6.1 Ensaio de profundidade de carbonatação acelerado

A simulação do ambiente de degradação por carbonatação foi realizada por Kulakowski (2002). A pesquisadora utilizou uma câmara de carbonatação acelerada, conforme é mostrado na Figura 24, com concentração de 5% de CO<sub>2</sub>; umidade de 70±5% e temperatura de 25±2°C.

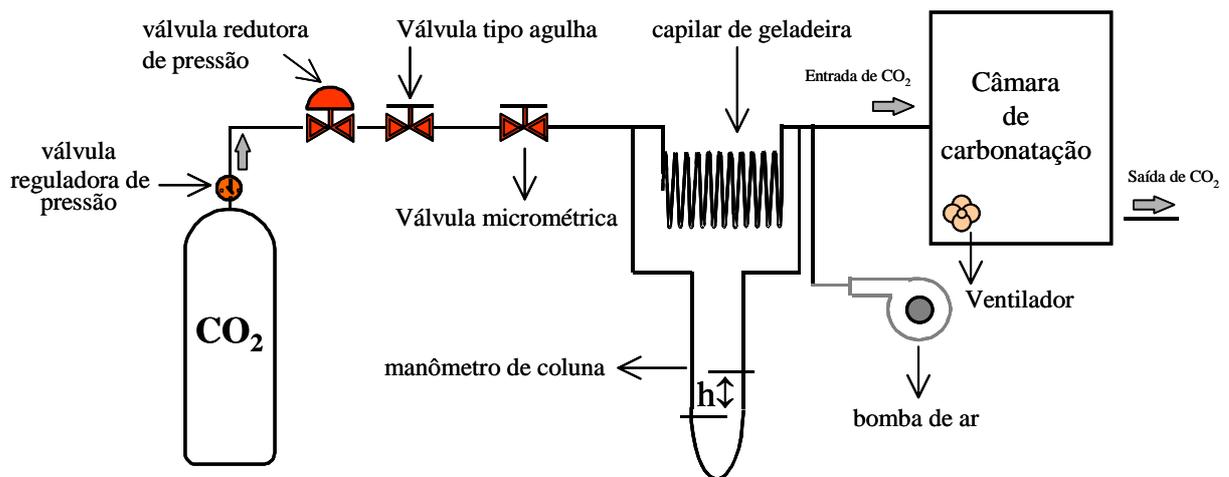


Figura 24: representação esquemática da câmara de carbonatação acelerada (adaptada de KULAKOWSKI, 2002, p.54)

As medidas de carbonatação foram realizadas, conforme especificações da RILEM – CPC 18 (1988), por meio do emprego do indicador químico fenolftaleína em quatro idades de exposição ao  $\text{CO}_2$  (7, 28, 63 e 98 dias) que representam, respectivamente, as idades de ensaio de 35, 56, 91 e 126 dias. A Figura 25 mostra os períodos obedecidos na realização do ensaio, que vão desde a moldagem até a última data de exposição ao  $\text{CO}_2$  dos corpos-de-prova.

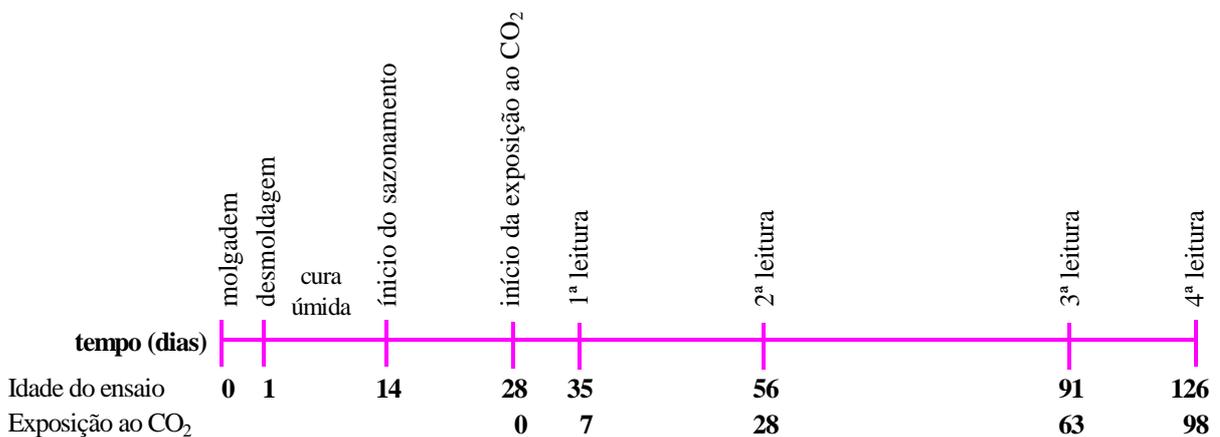


Figura 25: esquema de produção e exposição dos corpos-de-prova para o ensaio de carbonatação acelerado

Após cada etapa de ensaio, as amostras tiveram o topo selado com parafina a fim de evitar a entrada de  $\text{CO}_2$  nessa direção.

#### 4.2.6.2 Ensaio de profundidade de carbonatação natural

Para efeito comparativo dos resultados no ensaio de carbonatação natural, repetiu-se a metodologia de medição da profundidade carbonatada adotada durante a realização dos ensaios acelerados.

A profundidade de carbonatação dos corpos-de-prova foi determinada com a idade de 7 anos, segundo prescrições da RILEM – CPC 18 (1988). Para a realização deste ensaio foi utilizada a técnica de aspersão com solução à base de fenolftaleína (indicador de pH) contendo 1% do material dissolvido em 70% de álcool etílico e 30% de água.

Os corpos-de-prova prismáticos foram fraturados em prensa para obtenção de fatias a fim de realizar a medição da profundidade carbonatada após a aspersão com solução de fenolftaleína. Na face fraturada da amostra fez-se a aspersão com a solução de fenolftaleína. Após aproximadamente 20 minutos realizaram-se as medições com o auxílio de um paquímetro digital com precisão de 0,01 mm. Foram efetuadas 5 medidas de profundidade de carbonatação por face do corpo-de-prova, nos pontos mostrados na Figura 26. A profundidade carbonatada das amostras foi considerada como sendo a média ponderada da profundidade carbonatada de cada face.

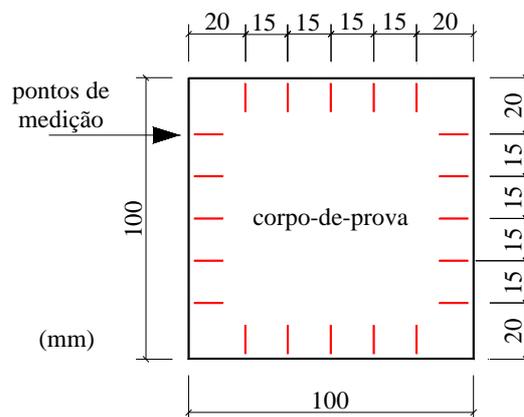


Figura 26: pontos de medição da profundidade de carbonatação

A superfície fraturada dos corpos-de-prova, após a retirada das fatias, foi selada com resina epóxi, a fim de evitar a entrada de CO<sub>2</sub> por esta face. Após o término do ensaio e selagem do topo dos corpos-de-prova, as amostras foram novamente expostas ao ambiente de degradação de origem para realização de ensaios futuros.

## 4.2.7 Ensaios Complementares

Foram realizados os ensaios complementares de resistência à compressão axial e reconstituição de traço de concreto endurecido.

### 4.2.7.1 Resistência à compressão axial

O ensaio de resistência à compressão do concreto foi realizado por Dal Molin et al. (1997) nas idades de 28 e 180 dias em conformidade com a NBR 5739 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1994).

### 4.2.7.2 Reconstituição parcial de traço de concreto endurecido

Devido à perda de identificação de algumas amostras expostas em ambiente de degradação natural, se fez necessário a realização do ensaio complementar de reconstituição de traço de concreto endurecido. Devido à inexistência de uma norma específica para a realização deste ensaio, utilizou-se o método desenvolvido pela Fundação de Ciência e Tecnologia – CIENTEC<sup>39</sup>. Outras técnicas de reconstituição de traço (IPT – Boletim 25, 1940; ASTM C 1084/1992; Método DIN 52170; Método BS – 1881: Parte 12) são descritas por Quarticioni (1998), sendo que a maioria delas apresenta grande complexidade de execução. Figueiredo (2004, p.147) utilizou a técnica de reconstituição de traço descrita pelo IPT<sup>40</sup> (Boletim 25, 1940) adaptado pela ABCP<sup>41</sup> (procedimento de ensaio PO-GT-3016, 2000<sup>42</sup>), a qual consiste em uma análise quantitativa por meio do emprego de várias técnicas analíticas. O autor relata que o método apresenta algumas limitações, principalmente as relativas à dificuldade em se obter os teores exatos dos constituintes da argamassa na análise química, em função da presença de adições.

---

<sup>39</sup> FUNDAÇÃO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA – CIENTEC. Metodologia de reconstituição de traço de concreto endurecido. Procedimento de laboratório (metodologia não publicada).

<sup>40</sup> Instituto de Pesquisas Tecnologias.

<sup>41</sup> Associação Brasileira de Cimentos Portland.

<sup>42</sup> INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLOGIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – IPT. Reconstituição de traço de concreto e argamassa. São Paulo, Publicação 103 – Boletim 25, 1940, p. 75-84.

A técnica do CIENTEC foi escolhida visto ser de fácil realização, não exigindo instalações de laboratório e equipamentos sofisticados. O método é largamente utilizado pelo CIENTEC, porém há carência de publicações técnicas sobre o emprego do método.

Para a execução da método de reconstituição de traço, primeiramente, obteve-se uma amostra do concreto, de preferência em torno de 0,50 kg. A amostra foi calcinada a uma temperatura de 700°C durante 1 hora, com incremento de temperatura de 250°C/hora. Após a calcinação e resfriamento das amostras determinou-se a massa inicial ( $M_i$ ). Assim que a massa foi obtida, a amostra foi imersa em solução de ácido clorídrico, com concentração de 20%. Aguardou-se o tempo necessário para que o término das reações ou para que o ácido dissolvesse a amostra. Assim que os materiais constituintes do concreto desagregaram, a amostra foi lavada com água corrente em peneira de malha quadrada de abertura de 0,075mm.

Com a amostra lavada, o material retido na peneira foi seco em estufa com temperatura de aproximadamente 100°C. Após o material adquirir constância de massa, determinou-se a massa final ( $M_f$ ). Com base na NBR 6502 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1980), a metodologia empregada considera como aglomerante (cimento e adições) o material passante na peneira de abertura de 0,075mm e como agregado (miúdo e graúdo) o material retido nesta peneira. A Figura 27 apresenta um desenho esquemático da metodologia empregada para a reconstituição do traço.

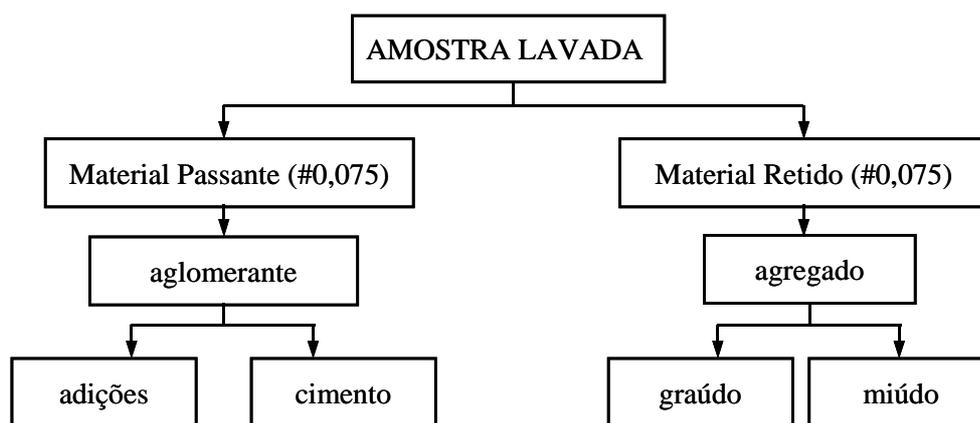


Figura 27: representação esquemática da técnica de reconstituição de traço

Com a determinação das quantidades, em massa, de cada material componente da mistura de concreto, as proporções dos materiais (considerando que o material passante seja o aglomerante) foram obtidas pela equação 12.

$$1: \frac{M_f}{M_i - M_f} \cdot 100 \quad \text{equação 12}$$

Onde:

$M_f$  = massa final;

$M_i$  = massa inicial.

Para o aprimoramento da técnica, inicialmente foram reconstituídos traços de 8 misturas com proporções conhecidas (amostras de cada concreto da matriz de ensaio não acelerado). Após essa primeira verificação, seis amostras de concreto sem identificação foram submetidas ao processo de reconstituição de traço, dentre as quais duas correspondem à matriz de ensaio de degradação por carbonatação com adição de sílica ativa. A Figura 28 apresenta a seqüência do processo de reconstituição do traço de concreto endurecido e na Tabela 15 são mostradas as amostras submetidas ao ensaio.

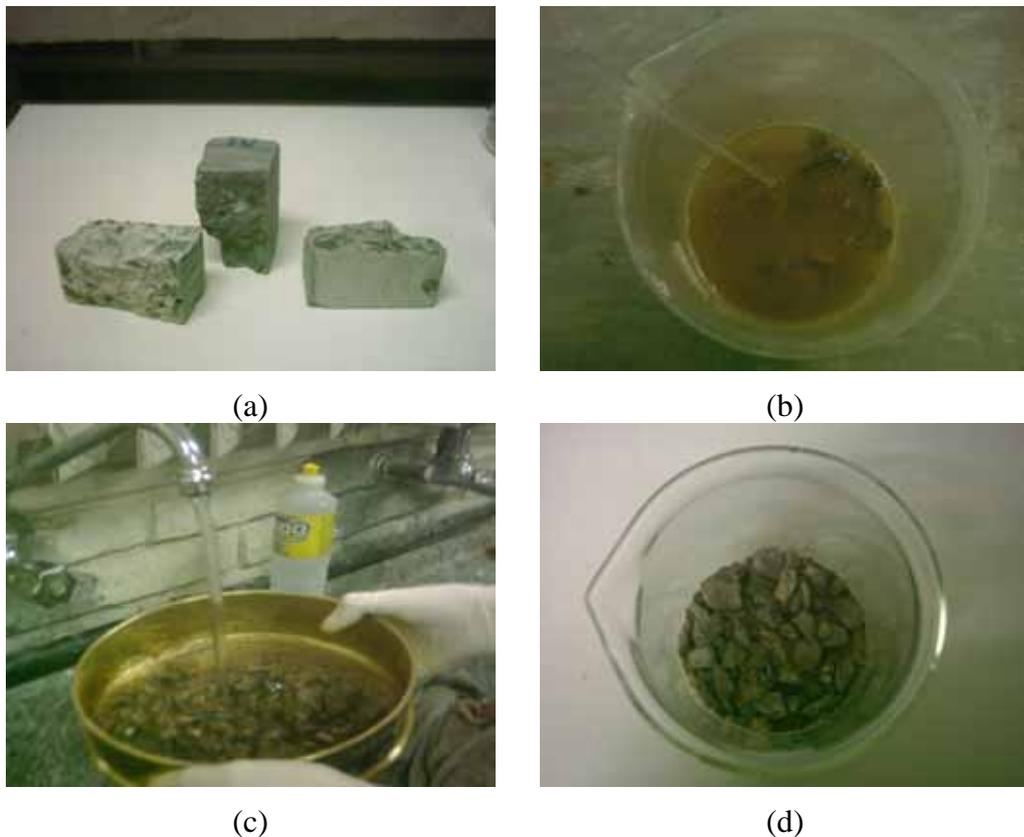


Figura 28: reconstituição de traço de concreto endurecido, amostra: (a) calcinada; (b) em solução de ácido clorídrico; (c) lavagem; (d) seca em estufa

Tabela 15: amostras submetidas à técnica de reconstituição de traço

Amostras	
Traço conhecido	Traço a determinar
80-00	2A <sup>43</sup>
80-00	2B
80-20	2C
45-10	2D
45-10	2E
30-00	2F
30-20	-
30-20	-

Os dados do ensaio de reconstituição de traço do concreto endurecido estão dispostos na Tabela 16.

Tabela 16: traços de concreto reconstituídos

Amostra	Massa inicial ( $M_i$ ) (g)	Massa final ( $M_f$ ) (g)	Traço (1:m)		
			obtido	aproximado	conhecido
80-00	352,79	322,48	9,92	10,0	9,30
80-00	572,96	519,62	9,74	10,0	9,30
80-20	360,38	327,53	9,97	10,0	9,30
45-10	640,68	532,85	4,94	5,0	4,50
30-20	479,70	363,77	3,14	3,0	2,39
30-20	431,40	335,28	3,49	3,0	2,39
30-00	561,67	441,25	3,66	4,0	2,39
<b>2A<sup>a)</sup></b>	543,40	432,03	3,88	4,0	-
<b>2B</b>	596,89	552,77	12,53	13,0	-
<b>2C</b>	430,48	396,87	11,81	12,0	-
<b>2D<sup>b)</sup></b>	454,06	411,50	9,67	10,0	-
<b>2E</b>	572,96	534,62	13,94	14,0	-
<b>2F</b>	390,49	348,96	8,40	9,0	-

a) corpo-de-prova irmão da mistura 30-00; b) corpo-de-prova irmão da mistura 80-20.

Pelo ensaio foi possível identificar as duas amostras que completavam a matriz dos ensaios ao natural. Dentre os 6 corpos-de-prova sem identificação que se encontravam misturados com as amostras desta pesquisa, as amostras 2A e 2D são binários com as amostras 30-00 e 80-20, respectivamente.

<sup>43</sup> Onde: 2A, 2B, 2C, 2D, 2E e 2F são as identificações previamente estabelecidas para cada corpo-de-prova não identificado.

Existem poucos relatos na literatura sobre técnicas de reconstituição de traço de concreto endurecido, sendo que a maioria das metodologias destina-se à reconstituição de traço de argamassas. O método adotado não confere a determinação precisa do traço, apresentando limitações para a identificação de traços com proporções de 1:m muito semelhantes. Como para esta pesquisa os traços que foram reconstituídos apresentavam proporções distintas com 1:m de 1:4,50 e 1:9,30, correspondendo às misturas com relação a/agl de 0,45 e 0,80, respectivamente, a técnica foi empregada sem grande dificuldades. Outro fator que contribuiu para a identificação das amostras foi o fato de existir um corpo-de-prova irmão, para cada mistura, com características específicas e já conhecidas, que foram utilizados como parâmetros de comparação.

#### 4.2.8 Caracterização do Ambiente de Exposição

A fim de verificar a agressividade do ambiente de exposição das amostras para o ensaio não acelerado de degradação por carbonatação, fez-se necessário a caracterização da atmosfera local quanto às condições de climatologia e qualidade do ar. A influência das condições climáticas do local de exposição das estruturas de concretos em ambientes sujeitos à carbonatação é relatada na literatura por diversos pesquisadores (MEYER, 1969; PARROT, 1987; NEVILLE, 1997; LIMA, 1999; entre outros). Dentre os fatores de maior influência destacam-se a umidade relativa do ar, a incidência de chuva (precipitação) e a temperatura. Com relação à qualidade do ar, destaca-se como o fator de principal importância a concentração de CO<sub>2</sub>.

Cabe salientar que neste item descreve-se a caracterização do macro clima do ambiente de exposição das amostras, a partir de dados fornecidos pela Rede de estações de Climatologia Urbana do Rio Grande do Sul. O micro clima não foi monitorado durante o andamento do ensaio, pois, para tal, se faz necessário o controle das condições climáticas junto aos corpos-de-prova, o que requer medições frequentes das variáveis de influência (radiação solar, umidade, influência da chuva, teor de CO<sub>2</sub>, entre outras), além de aparelhos específicos e disponibilidade de mão-de-obra.

Deste modo, os dados de climatologia referentes à umidade relativa (UR) do ar, precipitação pluviométrica e temperatura, mostrados nas Figura 29, Figura 30 e Figura 31, respectivamente, foram fornecidos pela Rede de Estações de Climatologia Urbana de Rio Grande do Sul, registrados da Estação de Observação Meteorológica de São Leopoldo, RS.

Estas informações são oriundas de médias históricas do comportamento climático da região metropolitana de Porto Alegre, RS, do período de 1988 a 2003, cujo período de exposição natural dos concretos, de 1997 a 2003, está incluso.

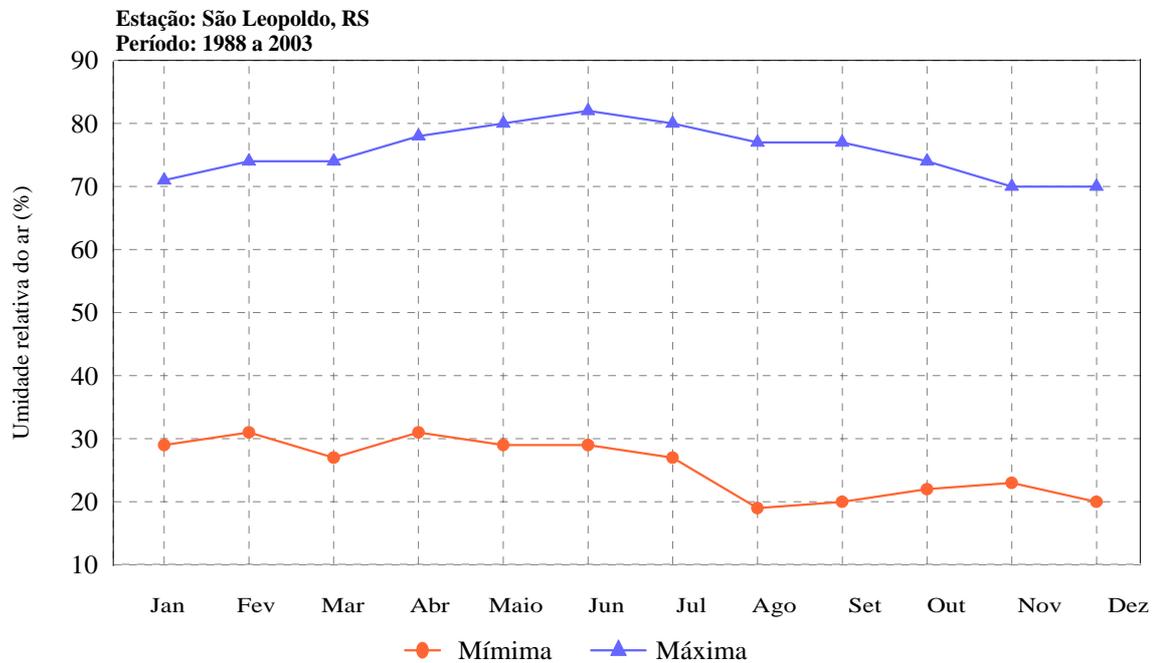


Figura 29: umidade relativa do ar registrada na região metropolitana de Porto Alegre durante a realização do ensaio de degradação por carbonatação não acelerado (fonte: REDE)

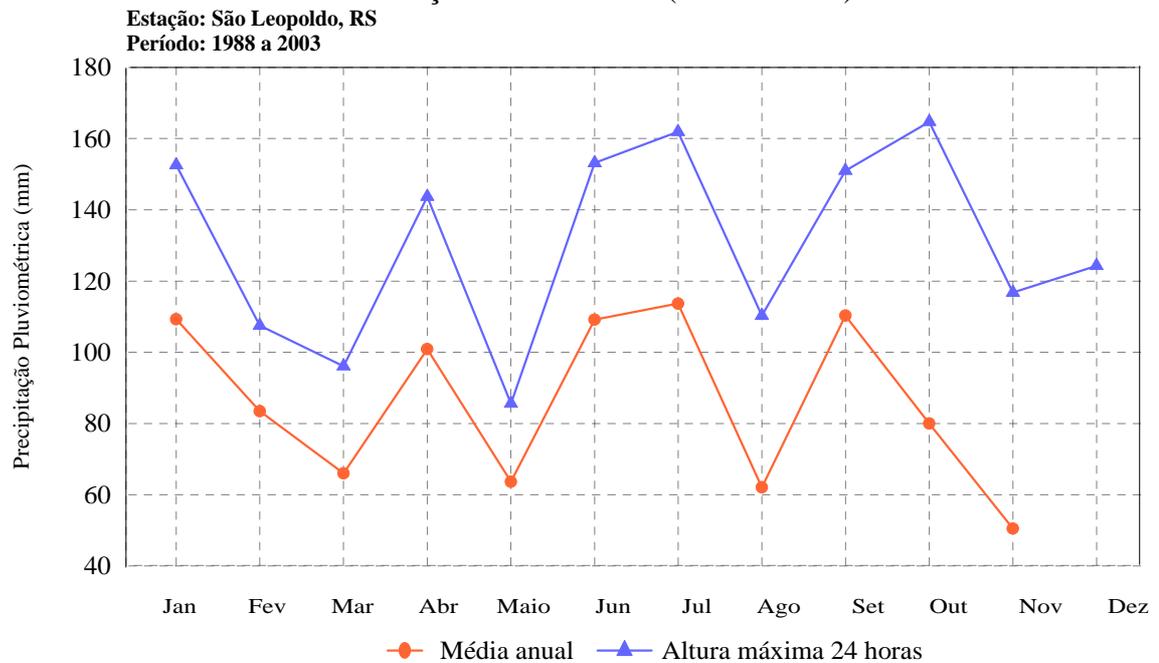


Figura 30: precipitação pluviométrica registrada na região metropolitana de Porto Alegre durante a realização do ensaio de degradação por carbonatação não acelerado (fonte: REDE)

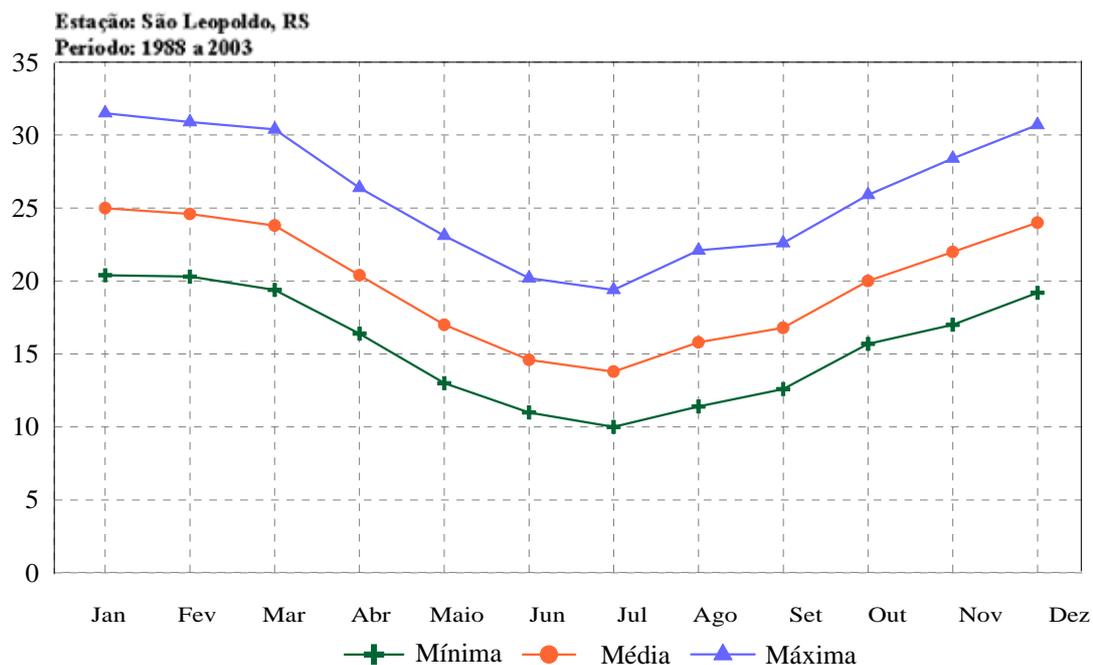


Figura 31: temperatura registrada na região metropolitana de Porto Alegre durante a realização do ensaio de degradação por carbonatação não acelerado (fonte: REDE)

Os dados fornecidos pela Rede de estações de Climatologia Urbana do Rio Grande do Sul, apesar de serem da cidade de São Leopoldo, representam as condições de climatologia do macro clima da cidade de Porto Alegre, RS. Optou-se pelo uso destes dados pelo fato de os mesmos corresponderem com o período de exposição dos corpos-de-prova no ambiente de degradação natural e serem fornecidos sem custos a pesquisa. Para efeito comparativo, no quadro da figura 32, são apresentados os dados médios dos elementos do clima de Porto Alegre, obtidos na estação meteorológica do 8º Distrito de Meteorologia (INMET<sup>44</sup>), para o período de 1916 e 1988<sup>45</sup>.

Nota-se, pelos valores médios, os dados históricos dos elementos do clima oriundos do INMET se assemelham com os obtidos pela Rede de estações de Climatologia Urbana do Rio

<sup>44</sup> Instituto Nacional de Meteorologia.

<sup>45</sup> Período correspondente à normal climatológica. Sendo que, normal é o valor padrão reconhecido de um elemento meteorológico, considerando a média de sua ocorrência em um determinado local, por um número determinado de anos. Normal significa a distribuição dos dados dentro de uma faixa de incidência habitual. Os parâmetros podem incluir temperaturas (altas, baixas e variações), pressão, precipitação (chuva, neve, etc.), ventos (velocidade e direção), temporais, quantidade de nuvens, percentagem de umidade relativa, etc. (INMET, 2004). Objetivando assegurar a comparação entre os dados coletados nas diversas partes do planeta, o Comitê Meteorológico Internacional, em 1872, estipulou períodos de 30 anos como sendo padrão para o cálculo das médias dos dados meteorológicos.

Grande do Sul, justificando, desta forma, o uso destes últimos para a caracterização do macro clima onde as amostras de concreto foram expostas.

Mês	Temperatura (°C)					Precipitação Total			Evaporação (mm)	Umidade Relativa (%)
	Média	Média Máxima	Média Mínima	Máxima Absoluta	Mínima Absoluta	Média (mm)	Máxima (mm)	Mínima (mm)		
Jan	24,7	30,5	20,1	40,7	10,4	101,6	275,1	10,0	106,7	71,0
Fev	24,6	31,1	20,3	40,4	11,3	100,7	231,7	20,5	89,8	74,0
Mar	23,2	28,6	19,0	38,9	9,0	93,9	247,7	3,7	86,3	76,0
Abr	19,9	25,3	15,8	35,9	4,5	92,1	386,6	0,5	65,6	77,0
Mai	17,0	22,1	12,8	33,4	0,4	102,8	405,5	2,5	49,4	81,0
Jun	14,7	19,8	10,8	31,5	-2,0	133,3	403,6	16,6	39,7	82,0
Jul	14,4	19,5	10,3	32,9	-1,3	120,8	280,1	11,0	44,0	81,0
Ago	15,2	20,5	10,9	34,9	-1,5	127,3	330,0	19,2	50,0	79,0
Set	16,8	21,8	12,8	36,1	2,2	133,1	362,7	15,5	60,2	78,0
Out	19,0	24,0	14,8	37,1	0,9	110,5	317,3	19,9	77,1	75,0
Nov	21,1	26,7	16,5	39,8	6,4	85,1	283,4	5,1	92,2	71,0
Dez	23,4	29,2	18,6	39,6	7,8	95,0	224,2	0,4	108,5	69,0
Ano	19,5	24,8	15,2	40,7	-2,0	108,02	405,5	0,4	869,5	76,2

Figura 32: elementos do clima de Porto Alegre, período de 1916 a 1988 (INMET, 2004)

Com base nos registros de climatologia, a **umidade relativa** do ar média (mostrado no gráfico da Figura 29) do ambiente de exposição dos concretos, para todos os períodos do ano, foi igual ou superior a 70%, conferindo uma UR média de 75,6%. Conforme relatado na literatura por Parrot (1987), Ceukelaire e Nieuwenburg (1993) e Neville (1997), a UR entre 50 e 75% é a mais adequada para desencadear o fenômeno de carbonatação. Logo, pode-se considerar que as amostras expostas à degradação natural encontravam-se em ambiente com UR favorável para o avanço da carbonatação.

Por outro lado, o fenômeno de carbonatação do concreto é fortemente influenciado pela exposição do elemento ao ambiente (MEYER, 1969; BARKER e MATTHEWS, 1994; OKOCHI et al., 2000; HOUST e WITTMANN, 2002). A condição de exposição das amostras (protegidas ou desprotegidas da chuva) apresenta grande influência na velocidade de carbonatação. Como o ensaio não acelerado de carbonatação procedeu em ambiente desprotegido da chuva, se faz necessária a análise do comportamento da **precipitação pluviométrica** durante o período de exposição das amostras. Conforme dados de precipitação mostrados na Figura 30, a região de exposição das amostras não possui estação seca. Segundo dados SEMA (2000, p.19), a precipitação anual média é de 1297 mm, distribuídos regularmente o ano todo. Nos meses de janeiro a outubro, exceto nos meses de março e abril,

a precipitação é superior a 100 mm, sendo que o período do ano mais chuvoso situa-se entre junho e setembro.

A literatura aponta que a carbonatação do concreto em ambientes desprotegidos da chuva tende a ser menor do que em ambientes protegidos (MEYER, 1969; HOUST e WITTMANN, 2002; FIGUEIREDO, 2004; entre outros). Dentro deste contexto, o tipo e local de exposição e das amostras desprotegido e sem estação seca, respectivamente, são fatores que tendem a gerar menores profundidades de carbonatação nos concretos.

A região de exposição apresenta as estações do ano bem definidas, com **temperatura** média de todos os períodos de 19,8°C (mostrada na Figura 31), observando-se também grandes variações de temperatura, sendo que a menor média da temperatura mínima foi registrada no mês de julho (10°C) e a maior média da temperatura máxima foi de 31,5°C, registrada no mês de janeiro. O clima regional do local de exposição das amostras é caracterizado, segundo (SEMA, 2000, p.18), como subtropical úmido, com temperatura variando nos meses mais frios (junho e julho) de -3°C a 18°C, sendo superior a 20°C no período mais quente (janeiro e fevereiro).

Embora seja menos importante que os outros fatores, a temperatura apresenta influência na carbonatação do concreto. Segundo (Abreu 2004) a influência da temperatura na taxa de reações químicas se dá de acordo com teoria de Arrhenius<sup>46</sup>, segundo a qual o incremento de temperatura implica no aumento da taxa de reações químicas. Desta forma Helene (1993, p.107) coloca que as questões de degradação química nas estruturas situadas em países de clima equatorial e tropical sejam mais graves e mais intensas que nas estruturas similares situadas em climas temperados.

O **teor de CO<sub>2</sub>** da atmosfera exerce grande influência na profundidade de carbonatação e seria de grande importância relatá-lo na caracterização do ambiente de exposição natural. Porém, em Porto Alegre, não se faz a medição deste poluente, pois as estações de controle de qualidade do ar priorizam o monitoramento de outros poluentes, como o SO<sub>2</sub> (dióxido de enxofre); NO<sub>2</sub> (dióxido de nitrogênio) e CO (monóxido de carbono).

Sato (2004) comenta da dificuldade da verificação da influência do ambiente de exposição na degradação, ressaltando ainda a falta de infraestrutura específica nas estações meteorológicas

---

<sup>46</sup> Svante August Arrhenius (1859-1927) formulou a expressão geral da influência da temperatura na velocidade das reações químicas e eletroquímicas.

tradicionais, onde os dados freqüentemente coletados (temperatura e UR) são insuficientes para estudos de previsão de vida útil de diversos materiais de construção. Alguns parâmetros como a radiação ultravioleta, períodos de molhagem e secagem e concentração de poluentes diversos são determinantes no processo de deterioração de alguns materiais e estes valores não são medidos nas estações metereológicas brasileiras.

Dentre os poluentes que não são monitorados nas estações metereológicas ou de controle de qualidade do ar destaca-se o CO<sub>2</sub>, fator de grande importância no fenômeno de carbonatação do concreto, cuja concentração na atmosfera influencia diretamente na profundidade carbonatada. Essa carência de dados relativos ao teor de CO<sub>2</sub> nas atmosferas urbanas não é exclusividade da região de exposição das amostras em estudo. Figueiredo (2004) em um estudo da carbonatação de edificações antigas em Brasília, DF, relatou a mesma problemática. Logo, seria prudente, para o estudo da degradação de estruturas em ambientes naturais, formar uma parceria com os órgãos responsáveis pelo controle da qualidade do ar para que estes efetuassem também as medições de CO<sub>2</sub> nos ambientes urbanos, principalmente nas regiões com grande densidade urbana, e conseqüentemente de automóveis, os quais, juntamente com o desmatamento, são os maiores contribuintes na geração deste poluente.

## 5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

O objetivo principal desta pesquisa está voltado à verificação da carbonatação do concreto com e sem adição de sílica ativa para os ensaios de degradação acelerado e natural, avaliando também a influência da relação água/aglomerante e o teor de adição de sílica ativa na profundidade de carbonatação para as duas condições de ensaio. A partir destas constatações pôde-se determinar os coeficientes de carbonatação e aceleração. Para maior confiabilidade dos resultados, os dados foram analisados com base em procedimentos estatísticos.

Utilizando-se o software SPSS 8.0 como ferramenta de apoio, foi desenvolvido um modelo matemático que representa a profundidade de carbonatação acelerada dos concretos. A partir da entrada dos dados de profundidade carbonatada e da equação que representa o comportamento dos concretos, o programa estatístico utilizado fornece os parâmetros de análise bem como o coeficiente de determinação ( $r^2$ ). A análise e a modelagem das profundidades de carbonatação foram efetuadas utilizando-se regressão múltipla não-linear, visto que é de consenso na literatura (Smolczyk, 1969; Helene, 1993; Kropp e Hilsoorf, 1995; entre outros) que o fenômeno de carbonatação apresenta comportamento parabólico e, pelo fato da regressão múltipla não-linear também representar a relação entre uma variável dependente e duas ou mais variáveis independentes, originando um modelo matemático que explica, para um determinado nível de significância, o efeito das variáveis independentes e as possíveis interações na variável de resposta.

A variável de resposta foi determinada a partir da análise de variância (ANOVA) dos termos dos modelos matemáticos obtidos. Segundo Spiegel (1993, p.515), a análise de variância testa a significância da diferença entre as médias dos grupos, baseando-se na relação da variabilidade das médias entre os grupos e da variabilidade das observações dentro dos grupos. A hipótese de nulidade é a de que as médias são todas iguais. Por meio do teste F (distribuição de Fischer) foi possível observar a significância estatística da variabilidade das médias entre grupos.

Os dados observados e previstos pelos modelos que descrevem o fenômeno são apresentados em forma de gráficos e tabelas e as expressões obtidas da análise dos dados revelam a natureza dos efeitos relação água/aglomerante e teor de sílica ativa sobre a variável de

resposta, a partir das condições experimentais específicas do presente programa experimental. A extrapolação destes dados para condições não incluídas no intervalo especificado no ajuste dos modelos pode incorrer em erros.

Para a verificação dos fatores significativos na resistência à compressão do concreto, utilizou-se a regressão não-linear dos dados e fez-se a análise de variância, conforme procedimento utilizado na verificação da profundidade carbonatada.

As equações obtidas que representam o comportamento dos concretos, tanto para a carbonatação como para a resistência à compressão axial, foram testadas e reformuladas até que o ajuste representasse o modelo de comportamento observado nos ensaios. Todos os parâmetros descritos no modelo apresentam influência estatisticamente significativa.

## 5.1 CARBONATAÇÃO ACELERADA DO CONCRETO

A partir da observação dos resultados de profundidade média de carbonatação, percebe-se que as variáveis relação  $a/agl$  e teor de sílica ativa exercem influência na profundidade carbonatada. Para avaliar o efeito destas variáveis e constatar se existe interação entre elas, realizou-se uma análise estatística por meio de regressão múltipla não-linear, utilizado-se o software SPSS 8.0.

Para verificar as correlações entre a exposição natural e acelerada e obter as curvas do comportamento dos concretos foram utilizados como dados de entrada no modelo os resultados de profundidade de carbonatação relativo ao tempo de exposição dos espécimes ao  $CO_2$  na câmara de carbonatação de 7, 28, 63 e 98 dias. Para o ajuste do modelo considerou-se que no tempo inicial zero a profundidade de carbonatação é nula. A equação 13 representa o comportamento da carbonatação acelerada dos concretos.

$$e_c = b_0 \cdot (agl)^{n_1} \cdot t^{b_1 + ad^{n_2}} \quad \text{equação 13}$$

Onde:

$e_c$  = profundidade de carbonatação (mm);

$agl$  = relação água/aglomerante do concreto;

$ad$  = teor de adição de sílica ativa do concreto ( $\frac{teor}{100}$ );

$t$  = tempo de exposição ao  $CO_2$  (dias);

$b_0$ ;  $b_1$ ;  $n_1$  e  $n_2$  = parâmetros dos fatores considerados no modelo.

A análise de variância (ANOVA) do modelo proposto é mostrada na Tabela 17, a qual apresentou um coeficiente de determinação ( $r^2$ ) igual a 0,953.

O valor de ‘p-value’<sup>47</sup> menor do que 0,01 designa que a relação entre as variáveis é estatisticamente significativa a um nível de confiança de 99%. O coeficiente de determinação  $r^2$  de 0,953 indica que o modelo explica 95,3% da variabilidade dos valores observados para a carbonatação do concreto.

Tabela 17: ANOVA do modelo para estimativa da profundidade de carbonatação

Fonte	GDL	SQ	MQ	F <sub>calc</sub>	Significância “p-value”
Modelo	4	1596,1	399,0	354,7	0,0000
Resíduo	61	68,6	1,1	-	-
Total	65	1664,761	-	-	-
Total corrigido	64	1467,7	-	-	-

GDL = Graus de Liberdade                      SQ = Soma Quadrada  
 MQ = Média Quadrada = SQ/GDL              F<sub>calc.</sub> = MQ<sub>modelo</sub>/MQ<sub>resíduo</sub>

A Tabela 18 apresenta os parâmetros dos fatores considerados no modelo proposto na equação 13 e os parâmetros estatísticos calculados para os fatores em análise.

Tabela 18: parâmetros dos fatores analisados para estimativa da profundidade de carbonatação

Fator	Parâmetro	Estimativa	Erro padrão	Teste t	Significância “p-value”
Constante	b0	0,01702	0,01063	1,60072	0,05718
$t$	b1	1,78231	0,13594	13,11083	0,00000
$agl$	n1	5,80361	0,57315	10,12583	0,00000
$ad$	n2	1,46607	0,09876	14,84431	0,00000

<sup>47</sup> p-value = probabilidade – distribuição t de Student.

Dentre as variáveis do modelo, nota-se que o tempo, teor de adição e relação *a/agl* apresentam influência significativa a um nível de confiança de 99% ('p-value' menor que 0,01). A constante  $b_0$  também apresenta influência significativa a um nível de confiança de 95% ('p-value' de 0,05).

A expressão matemática que relaciona os fatores analisados e a profundidade carbonatada resultou na equação 14.

$$e_c = 0,01702 \cdot (agl)^{5,8036} \cdot t^{1,7823+ad^{1,4661}} \quad \text{equação 14}$$

onde:

$e_c$  = profundidade de carbonatação, para o intervalo de 0 a 26,95 (mm);

*agl* = relação água/aglomerante do concreto, para o intervalo de 0,30 a 0,80;

*ad* = teor de adição de sílica ativa do concreto ( $\frac{teor}{100}$ ) (intervalo de 0 a 0,20);

*t* = tempo de exposição ao CO<sub>2</sub> (intervalo de 0 a 98) (dias).

O modelo acima representa o fenômeno de carbonatação para os concretos em estudo, com coeficiente de determinação ( $r^2$ ) de 95,3%. Os resultados de carbonatação observados no ensaio acelerado e os ajustados pelo modelo da equação 14 são representados nas tabelas 19 e 20, respectivamente.

O modelo de comportamento encontrado não atende o padrão convencional da raiz quadrada do tempo e os concretos com adição de sílica ativa apresentaram um comportamento distinto dos concretos sem esta pozolana.

Segundo apontamentos da literatura (Bakker, 1988; Helene, 1986; Neville, 1997 e Silva, 2002) para tempos elevados de exposição ao CO<sub>2</sub>, o processo de carbonatação tende à estabilização. Até o período máximo de exposição ao CO<sub>2</sub> empregado neste programa experimental (de 98 dias), esse comportamento não foi observado. Tal fato pode ser atribuído ao tempo de ensaio empregado ser inferior ao tempo necessário para alcançar a atenuação da curva de profundidade de carbonatação em função do tempo de exposição. Também se acredita que para misturas de maior relação *a/agl*, as quais apresentam elevada porosidade, o processo de atenuação da curva de carbonatação necessite de tempos de exposição ao CO<sub>2</sub>

bastante elevados exigindo, conseqüentemente, corpos-de-prova de grandes dimensões e um ensaio de carbonatação acelerado de longa duração.

Tabela 19: profundidade de carbonatação observada (mm)<sup>a</sup>

SA (%)	Relação água/aglomerante																			
	idade 7 dias					idade 28 dias					idade 63 dias					idade 98 dias				
	0,3	0,35	0,45	0,6	0,8	0,3	0,35	0,45	0,6	0,8	0,3	0,35	0,45	0,6	0,8	0,3	0,35	0,45	0,6	0,8
0	0	0	0	2,19	0	0	0	7,4	0	0	0	10,15	0	0	0	16,3				
5	0	0	0		0	0	0,24		0	0	1,09		0	3,85						
10	0	0	0		0	0	1,5		0	0	4,86		0	18,42						
15	0	0	0,12		0	0	0,92		0	0	0,98		0	5,17						
20	0,08	0	0,3		0,13	0	3,29		0	0	9,46		0	26,95						

<sup>a</sup>) Matriz completa de ensaios acelerados foi obtida por Kulakowski (2002).

Tabela 20: profundidade de carbonatação resultante do modelo (mm)

SA (%)	Relação água/aglomerante																			
	idade 7 dias					idade 28 dias					idade 63 dias					idade 98 dias				
	0,3	0,35	0,45	0,6	0,8	0,3	0,35	0,45	0,6	0,8	0,3	0,35	0,45	0,6	0,8	0,3	0,35	0,45	0,6	0,8
0	0	0,01	0,15		0,01	0,06	1,79		0,03	0,27	7,54		0,06	0,58	16,52					
5	0	0,03			0,02	0,35			0,07	1,49			0,14	3,29						
10	0	0,01	0,16		0,01	0,07	1,99		0,03	0,31	8,68		0,07	0,68	19,34					
15	0	0,03			0,02	0,41			0,08	1,83			0,18	4,13						
20	0	0,01	0,18		0,01	0,09	4,42		0,04	0,39	11,08		0,09	0,9	25,41					

Os gráficos da Figura 33 mostram o comportamento observado no ensaio acelerado e o previsto pelo modelo para a profundidade de carbonatação do concreto. Nota-se que o modelo proposto representa o comportamento observado dos concretos ao longo do tempo, apresentando pouca dispersão. Também se percebe que existe influência da relação a/agl no aumento da profundidade de carbonatação dos concretos. Para dosagens de relação a/agl baixa (igual ou inferior a 0,45), independente do teor de adição, os concretos não apresentaram carbonatação durante a realização do ensaio acelerado.

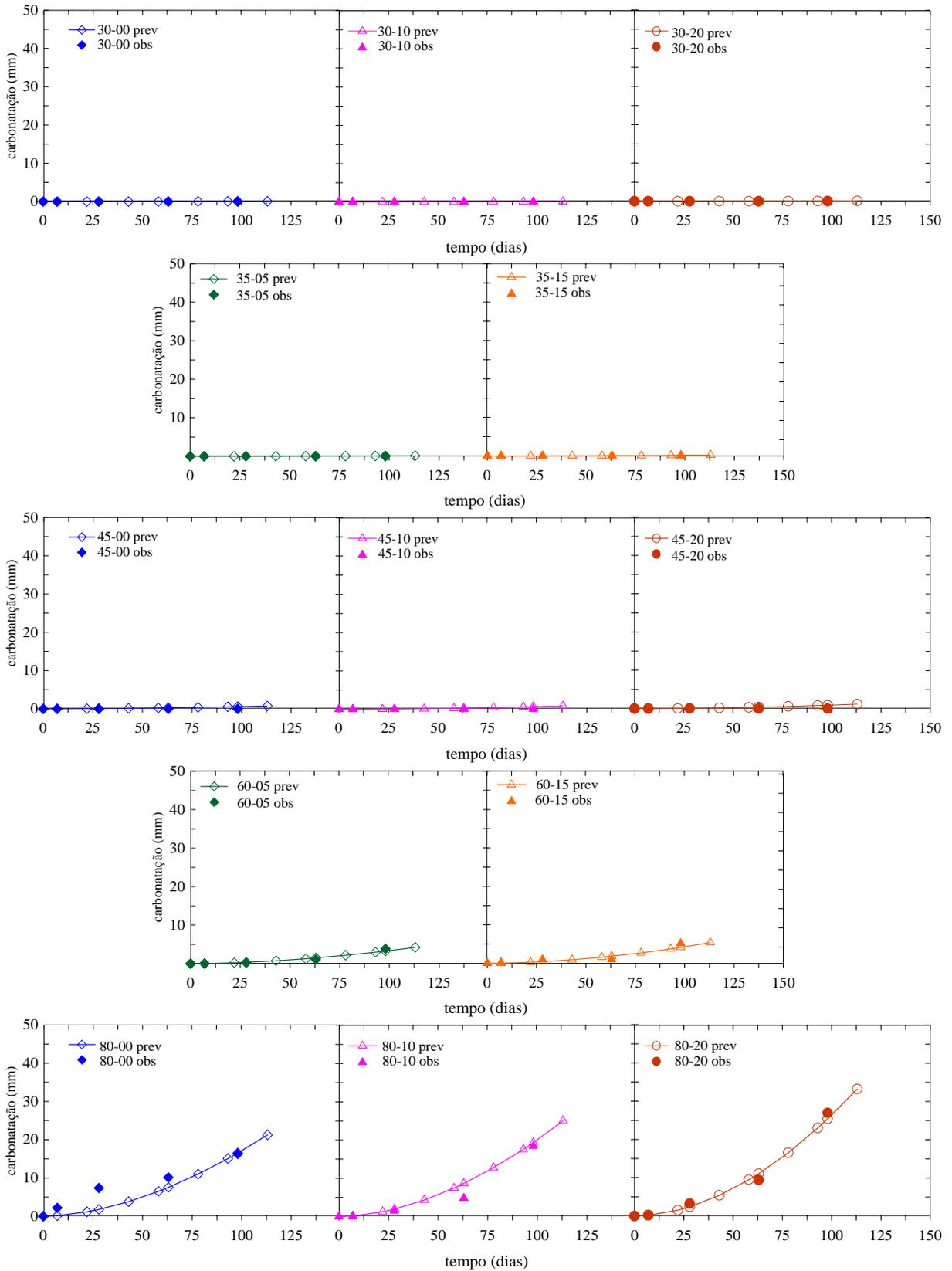


Figura 33: carbonatação dos concretos – comportamento observado (obs) e previsto (prev) – nomenclatura: ex: 80-00 – 80 representa relação a/agl de 0,8 e 00 o teor de adição de 0%

A Figura 34 apresenta as curvas do modelo ajustado onde verifica-se a influência da relação a/agl e da interação entre o teor de adição de sílica ativa e a relação a/agl na profundidade de carbonatação. A relação a/agl apresenta grande interação com a profundidade de carbonatação dos concretos, sendo maior quanto maior a relação água/aglomerante, fato este de consenso na literatura (HO e LEWIS, 1987; COLLEPARDI et al., 1989; SILVA, 2002; KHAN e LYNSDALE, 2002; CHI, HUANG e YANG et al., 2002; KULAKOWSKI, 2002; VIEIRA, 2003; entre outros). Para Silva (2002) a profundidade de carbonatação decresce com o decréscimo da relação água/cimento, especialmente para valores abaixo de 0,6, fato atribuído à desconexão dos poros capilares. Nota-se, para o tempo de exposição ao CO<sub>2</sub> de 98 dias a profundidade de carbonatação é cerca de 5,3 vezes menor (para a relação a/agl de 0,60 em comparação com a relação a/agl de 0,80). Essa redução é ainda maior (em torno de 30 vezes) quando se compara concretos com relação a/agl de 0,45 com os de 0,80.

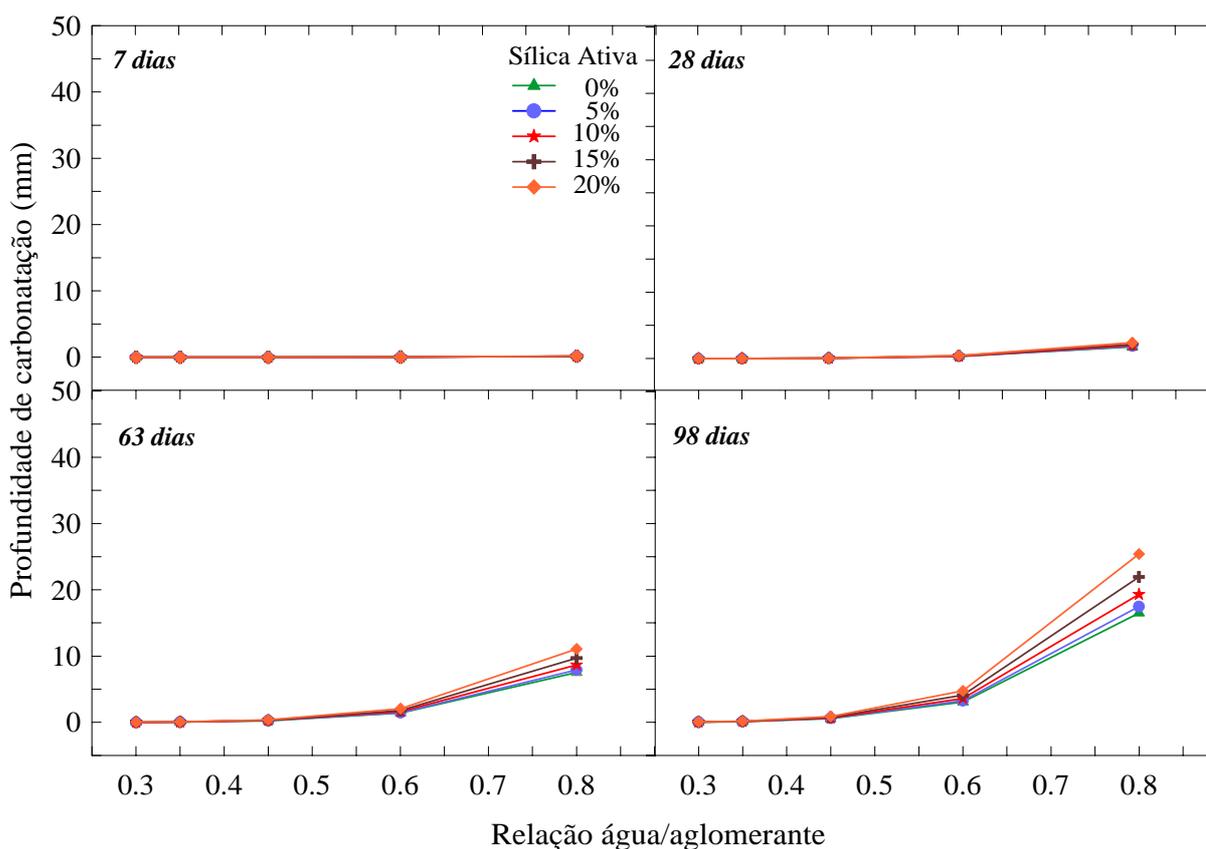


Figura 34: influência da interação entre a relação água/aglomerante e o teor de sílica ativa na profundidade de carbonatação do concreto

Para relações  $a/agl$  abaixo de 0,45 o teor de sílica ativa não exerce influência na profundidade de carbonatação dos concretos. Como observado por Kulakowski (2002) e Vieira (2003), pode-se dizer que existe uma região crítica limite no comportamento dos concretos frente à carbonatação delimitado pela existência de um intervalo de relações  $a/agl$  limite entre 0,45 e 0,50. Nota-se que, no limite inferior a 0,45, a presença e o teor de adição não exercem influência na profundidade carbonatada. Deste modo o pH e o teor de  $Ca(OH)_2$  exercem pouca influência na carbonatação dos concretos, com esses níveis de relação  $a/agl$ , sendo a carbonatação regida pela porosidade da matriz de cimento endurecida, que é função da relação água/aglomerante da mistura. Para os limites superiores à relação  $a/agl$  de 0,45 verifica-se que o teor de adição de sílica ativa apresenta influência na carbonatação dos concretos, sendo que a elevação do teor de adição causa um aumento na profundidade carbonatada. Esse fato pode ser notado nas misturas com relação  $a/agl$  de 0,80, onde a profundidade de carbonatação dos concretos com 10 e 20% de adição de sílica ativa, expostos por 98 dias à ação do  $CO_2$  é, respectivamente, 15 e 35% superior à do concreto referência (sem adição). Deste modo, para esse intervalo de relação  $a/agl$ , as características químicas do concreto passam a apresentar efeito significativo no avanço da carbonatação, sendo que a reserva alcalina das misturas exerce grande influência na intensidade do fenômeno. Bakker (1988) salienta que a velocidade das reações de carbonatação está relacionada com a quantidade dos produtos alcalinos carbonatáveis (tipo e quantidade de cimento) e com a quantidade de  $CO_2$  que difunde na unidade de tempo pelo concreto, sendo função da estrutura dos poros e umidade relativa no interior da matriz endurecida.

A sílica ativa, por ser uma pozolana altamente reativa, consome totalmente ou parcialmente o  $Ca(OH)_2$  oriundo das reações de hidratação do cimento, fazendo com que a reserva alcalina e, conseqüentemente o pH do concreto sejam reduzidos. Para relações  $a/agl$  mais baixas, pelo refinamento dos poros propiciado pela ação pozolânica e pelo efeito filler, a matriz torna-se mais densa, reduzindo a porosidade e dificultado o ingresso de  $CO_2$ , tornando o concreto menos susceptível à carbonatação. Para misturas com relação  $a/agl$  elevadas (acima de 0,45), devido à alta porosidade da pasta de cimento endurecida, o consumo de hidróxido de cálcio e a conseqüente formação de C-S-H (silicato de cálcio hidratado) conferido pela presença de adições pozolânicas não são suficientes para fechar ou reduzir, consideravelmente, a porosidade da matriz cimentante a ponto de limitar o ingresso de  $CO_2$ . Logo, prepondera o efeito de reserva alcalina e o  $CO_2$  que penetra no concreto reduz com maior velocidade o pH da mistura, carbonatando-o mais rapidamente.

Helene (1993) descreve o aumento da profundidade de carbonatação nos concretos com adições pozolânicas, desatacando que este fato pode ser explicado pelo conceito de reserva alcalina, pois à medida que na solução intersticial do concreto há uma maior concentração de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , o  $\text{CO}_2$  não penetra com a mesma velocidade devido à necessidade de primeiro rebaixar o pH e depois reagir com o hidróxido de cálcio presente para então seguir penetrando e precipitando carbonato de cálcio na solução dos poros. Constata-se, que para elevadas relações a/agl a carbonatação é fortemente dependente da quantidade de hidróxido de cálcio disponível na matriz cimentante. Por outro lado, o próprio fenômeno de carbonatação tende a precipitar o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  na forma de  $\text{CaCO}_3$  promovendo uma gradativa redução da porosidade na pasta de cimento endurecida. Houst e Wittmann (1994), analisando a difusão de  $\text{CO}_2$  e  $\text{O}_2$  através de concretos com relação a/agl de 0,4 a 0,80, verificaram que a redução da porosidade do concreto é maior para concretos de menor relação a/agl.

A influência do teor de adição de sílica ativa e da interação com a relação a/agl na profundidade de carbonatação dos concretos é representada pelas curvas de comportamento dos concretos da Figura 35.

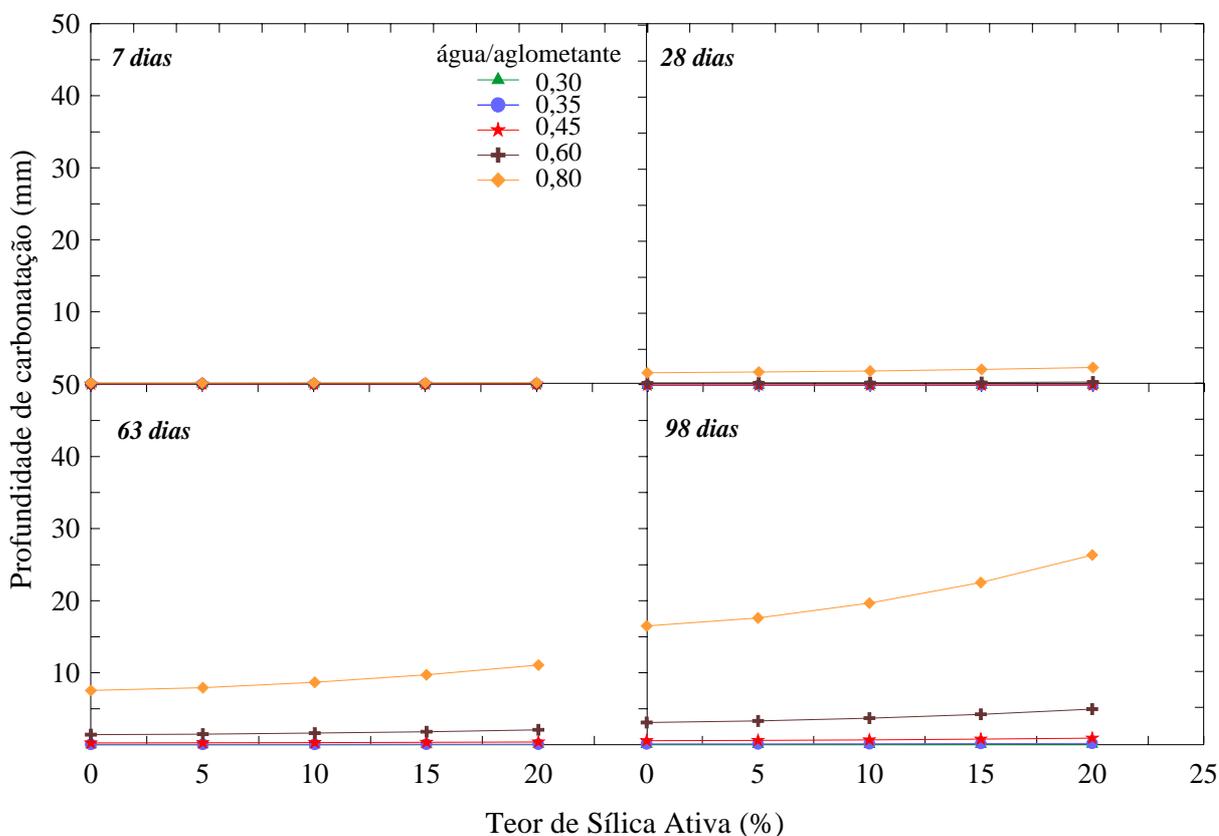


Figura 35: influência da interação entre o teor de adição de sílica ativa e a relação água/aglomerante na profundidade de carbonatação do concreto

Nos primeiros tempos de exposição ao CO<sub>2</sub> (0 e 7 dias) as misturas não apresentam comportamentos diferenciados. Com o avanço do tempo de exposição os concretos com relação água cimento de 0,80 e 0,60 tendem a apresentar profundidades de carbonatação superiores às demais. As misturas com relação a/agl igual ou inferior a 0,45 apresentam comportamentos semelhantes, onde a influência do teor de adição e do tempo de exposição ao CO<sub>2</sub> não é significativa. Nota-se que, para relações a/agl mais elevadas, o incremento do teor de adição de sílica ativa possui efeito nocivo na profundidade de carbonatação, pois quanto maior o teor de adição maior a profundidade carbonatada, comportamento também observado por KULAKOWSKI (2002), SILVA (2002), VENQUIARUTO (2002) e VIEIRA (2003). Apesar da adição de sílica ativa provocar uma descontinuidade nos poros, reduzindo a permeabilidade dos concretos e argamassas, verifica-se que os compostos com adição de sílica ativa apresentam carbonatação maior que os compostos sem sílica ativa. Isto se explica pelo fato da sílica ativa ter sido utilizada em substituição do volume de cimento, reduzindo a quantidade de hidróxido de cálcio presente no composto e, também, devido às reações pozolânicas (SILVA, 2002).

Com relação ao comportamento frente à carbonatação de concretos produzidos com outras adições pozolânicas, Ho e Lewis (1987), Collepari et al. (1989) e Venquiaruto (2002) relatam que a adição de cinza volante aumenta a profundidade carbonatada. Para Venquiaruto (2002) a adição de cinza de casca de arroz também eleva a carbonatação do concreto. Isaia (1995), avaliando o desempenho da adição de sílica ativa, cinza de casca de arroz e cinza volante no concreto, relata que a carbonatação é menor para os traços sem adição, devido estes apresentarem maior reserva alcalina, sendo que as misturas com sílica ativa apresentam maior profundidade de carbonatação que as demais, atribuindo esse fato a sua alta reatividade.

## 5.2 CARBONATAÇÃO NATURAL DO CONCRETO

O ensaio de carbonatação natural do concreto é caracterizado por um processo lento, tendo inúmeras variáveis não controláveis que influenciam o processo. Logo, em relação à escala de tempo, é mais prudente fazer referência à carbonatação natural no período de anos ou semanas, visto que, em função das variáveis intervenientes, a determinação das profundidades carbonatadas com precisão de dias é de difícil e imprecisa obtenção.

A Figura 36 apresenta o aspecto da carbonatação das amostras expostas ao ambiente de degradação natural urbano, durante 365 semanas (7 anos).

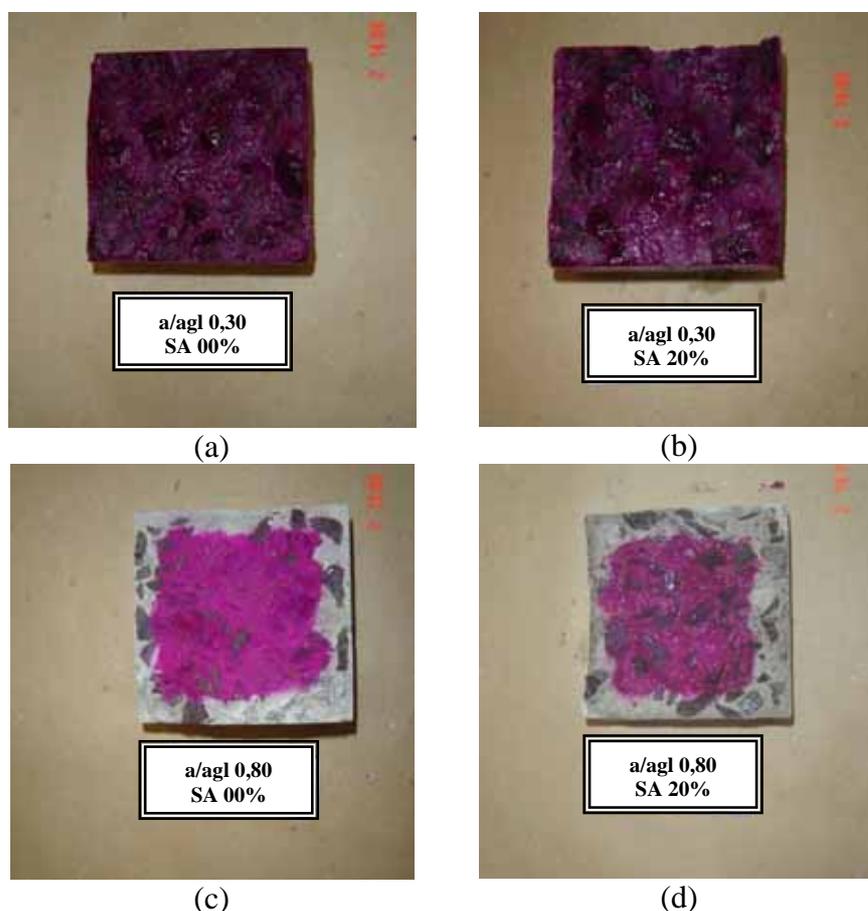


Figura 36: aspecto das amostras carbonatadas em ambiente natural

As amostras da Figura 36 (a) e (b), com relação a/agl de 0,30 e com 0 e 20% de sílica ativa, respectivamente, não apresentaram carbonatação durante o período de ensaio. Já as amostras (c) e (d) são referentes aos concretos produzidos com relação a/agl de 0,80 e teor de adição de sílica ativa de 0 e 20%, respectivamente. Nota-se que as mesmas apresentam frente de carbonatação definida, facilitando a tomada de medidas das profundidades nos pontos pré-determinados. Em relação ao aspecto da área carbonatada, Abreu (2004), em ensaio acelerado de concretos com cinza volante com concentrações de CO<sub>2</sub> de 5% e superior a 50%, verificou que o teor de CO<sub>2</sub> exerce efeito na área carbonatada. A autora relata que o avanço da frente de carbonatação nos concretos expostos a 5% de CO<sub>2</sub> apresentou-se relativamente mais homogêneo e intenso, diferindo dos expostos à concentração de CO<sub>2</sub> superior a 50%, cujas superfícies apresentavam coloração mais difusa e aleatorizada. Segundo Abreu (2004), este

aspecto da carbonatação em concretos já foi descrito por Alonso (1986<sup>48</sup>), que afirma que a frente de carbonatação neste caso é muito irregular, com reentrâncias profundas, muitas vezes tendendo a contornar o agregado. A zona de transição entre a matriz de cimento e o agregado é, geralmente, uma região de maior porosidade e com poros interconectados, o que facilita o acesso do CO<sub>2</sub> a regiões mais internas do corpo-de-prova (ALONSO, 1986; citado por ABREU, 2004 e HOUST e WITTMANN, 2002).

A modelagem dos resultados não foi possível de ser elaborada, devido à existência de apenas um ponto de medição da profundidade carbonatada durante o tempo de exposição no ambiente de degradação. As medições realizadas nas idades de 1, 2 e 4 anos infelizmente foram perdidas. Logo, o comportamento dos concretos frente à carbonatação durante o tempo de exposição não foi determinado. Porém, com base na literatura, admite-se que as amostras submetidas ao ensaio de carbonatação acelerado e ao ensaio natural apresentam tendências de comportamento iguais (HO e LEWIS, 1987; LIMA, 1999) e (YING-YU e QUI-DONG, 1987; PAPADAKIS, 1992; ANDRADE, et al., 1988, todos citados por KAZMIERCZAK, 1995).

A profundidade de carbonatação média dos exemplares, com relação a/agl de 0,80, foi de 12,01 mm para os concretos sem adição e de 14,28 mm para os concretos com 20% de adição sílica ativa. Os resultados de profundidade carbonatada obtidos após 365 semanas (7 anos) de exposição natural à ação do CO<sub>2</sub> são descritos na Tabela 21.

Tabela 21: profundidade de carbonatação (mm)<sup>49</sup> – ensaio ao natural

Sílica Ativa (%)	Relação água/aglomerante				
	0,30	0,35	0,45	0,60	0,80
0	0				12,02
	0				11,99
5					
10			0		
			0		
15					
20	0				13,73
	0				14,83

<sup>48</sup> ALONSO, C. **Estudio de la corrosion de armaduras en hormigón carbonatado**. 1986. Tesis (Doctoral). Facultad de Ciências, Universidad Complutense de Madrid. Madrid-España, 360p.

<sup>49</sup> Cada dado da tabela representa a profundidade média obtida nas 4 faces de cada corpo-de-prova (repetição igual a dois).

Como constatado no ensaio acelerado, verifica-se a influência da relação a/agl na carbonatação dos concretos, existindo uma região crítica limite em torno da relação a/agl de 0,45, abaixo da qual a profundidade de carbonatação pode ser considerada desprezível para concretos com e sem adição de sílica ativa. Acima desta relação a/agl a carbonatação é fortemente influenciada pela presença de adições, predominando o efeito de reserva alcalina discutido no item 5.1. O efeito da adição de sílica ativa fica notado nas misturas com relação a/agl de 0,80, onde, para o teor de 20%, o aumento médio da profundidade carbonatada foi de aproximadamente 16%, em relação às misturas sem adição.

Comparando o ensaio de carbonatação acelerado com o natural (Tabela 22 e Tabela 23) nota-se que, para as duas metodologias de ensaio, os concretos com relação a/agl de 0,80, com e sem adição de sílica ativa, apresentaram carbonatação. As misturas com a/agl inferior a 0,45, para os dois ensaios, não carbonataram e a presença ou ausência de adição não implicou em diferenças, mostrando que o efeito isolado da sílica ativa não exerce influência na carbonatação. Esse fato foi associado ao fechamento da porosidade do concreto nas misturas com baixas relações a/agl, como já discutido no item 5.1. Deste modo, tais fatos apontam que o procedimento de ensaio acelerado adotado representa a tendência de comportamento natural do fenômeno em estudo.

Tabela 22: profundidade de carbonatação média (mm) – ensaio acelerado

misturas	Tempo em semanas (anos)			
	1 (0,02)	4 (0,08)	9 (0,17)	14 (0,27)
30-00	0	0	0	0
30-20	0,08	0,13	0	0
45-10	0	0	0	0
80-00	2,19	7,4	10,15	16,30
80-20	0,3	2,29	9,46	26,65

Tabela 23: profundidade de carbonatação média (mm) – ensaio ao natural

misturas	Tempo em semanas (anos)			
	52 (1)	104 (2)	208 (4)	365 (7)
30-00	0	0	0	0
30-20	0	0	0	0
45-10	0	0	0	0
80-00	-	-	-	12,01
80-20	-	-	-	14,28

Nomenclatura: 30-00 – 30 representa a relação a/agl de 0,3 e 00 o teor de adição de sílica ativa de 0%.

A Figura 37 mostra as profundidades de carbonatação dos concretos de relação a/agl de 0,80 com adição de sílica ativa de 0 e 20%, para os dois ensaios, aferidas durante o período de execução dos ensaios.

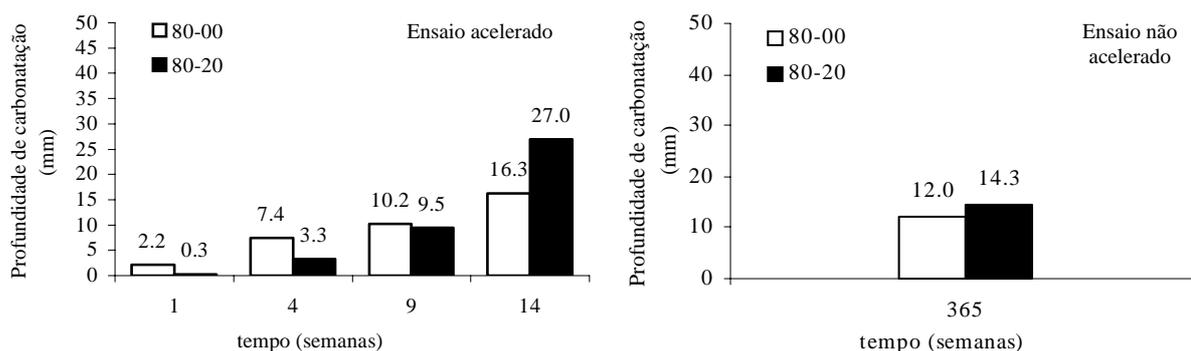


Figura 37: influência do teor de adição de sílica ativa na carbonatação do concreto ao longo do tempo

Para a relação a/agl de 0,80, verifica-se que para as primeiras idades a carbonatação do concreto com adição de sílica ativa é menor, porém para idades maiores, essa tendência tende a ser inversa. Essa maior resistência à carbonatação nas primeiras idades, para as misturas com adição de sílica ativa, pode ser ocasionada pela dificuldade de ingresso do  $\text{CO}_2$  devido à menor porosidade do concreto quando produzido com essa adição. Porém, assim que o  $\text{CO}_2$  penetra no concreto, devido o consumo de CH pelas reações pozolânicas e a conseqüente redução da reserva alcalina do concreto, a frente de carbonatação tende a avançar com maior velocidade, conforme discutido por Helene (1993).

Nota-se que no ensaio de degradação natural, após 365 semanas de exposição ao  $\text{CO}_2$ , as profundidades de carbonatação obtidas se enquadram no intervalo de tempo do ensaio acelerado compreendido entre 9 e 14 semanas. Esse fato mostra que a concentração de  $\text{CO}_2$  do ambiente de degradação influencia na profundidade de carbonatação do concreto, sendo que para teores mais elevados, a carbonatação tende a ser maior, fato relatado por Kazmierczak (1995), Uomoto e Takada (1993) e Neville (1997). Para ambientes urbanos a literatura aponta um teor de  $\text{CO}_2$  de aproximadamente 0,03 a 0,1%, chegando até 0,3% em grandes centros urbanos (NEVILLE, 1997). Considerando a concentração de 0,1% para a Cidade de Porto Alegre, o ensaio de carbonatação acelerado emprega um teor de  $\text{CO}_2$  cerca de 50 vezes superior à concentração da atmosfera natural, explicando a maior profundidade de carbonatação obtida no teste acelerado.

## 5.3 COEFICIENTES DE CARBONATAÇÃO E ACELERAÇÃO

### 5.3.1 Determinação dos Coeficientes de Carbonatação

O modelo que representa a carbonatação acelerada dos concretos, apresentado no item 5.1, não contempla a forma de comportamento descrita pela expressão da raiz quadrada do tempo, porém apresentou um coeficiente de determinação de 0,95, explicando 95% dos resultados observados. Por ser utilizado com frequência nos estudos de carbonatação acelerada e de previsão de vida útil de estruturas existentes, optou-se pela determinação dos coeficientes de carbonatação a fim de verificar o ajuste dos dados experimentais.

Conforme definição, descrita no item 2.3.3, o “coeficiente de carbonatação ( $k_{carb}$ ) é a relação da profundidade carbonatada de um concreto em função da raiz quadrada do tempo de exposição ao CO<sub>2</sub>, expresso, normalmente em mm/ano<sup>0,5</sup> ou mm/semanas<sup>0,5</sup>”. Esse coeficiente é determinado a partir da expressão da raiz quadrado do tempo (discutida no item 3.3), sendo empregado por diversos pesquisadores do exterior (HAMADA, 1969; UOMOTO e TAKADA, 1993; ROY, POH e NORTHWOOD 1999) e do Brasil (ISAIA, 1995; GUIMARÃES, 2000; VENQUIARUTO, 2002; FIGUEIREDO, 2004).

A determinação dos coeficientes de carbonatação se faz plotando no eixo das ordenadas (y) os dados de carbonatação acelerada (em milímetros) e no eixo das abscissas (x) a raiz quadrada da idade cronológica de exposição ao CO<sub>2</sub> dos concretos (em semanas ou anos), referentes às profundidades carbonatadas. Os gráficos gerados pelos dados de carbonatação *versus* tempo devem atender o critério de dispersão de valores de  $xy$ . Para cada variável em estudo, seja a/agl, teor de adição, tipo de adição, teor de CO<sub>2</sub>, tempo de cura, entre outras, deve-se traçar uma curva de comportamento. Cada mistura é analisada isoladamente com procedimento analítico por meio de regressão linear. Assim, os pontos gerados para cada mistura são ajustados por uma linha de tendência linear com função identidade do tipo  $f(x) = ax + b$ , onde “a” representa o coeficiente angular ou inclinação da reta e “b” a interseção.

O coeficiente de carbonatação é representado pelo coeficiente angular da reta “a”. As Figura 38 e Figura 39 apresentam, respectivamente, um exemplo da linearização das curvas de carbonatação para os concretos de relação a/agl de 0,80 com adição de 0, 10 e 20% de sílica

ativa expostos à ação de  $\text{CO}_2$  durante 63 e 98 dias<sup>50</sup> (9 e 14 semanas ou, respectivamente, 3 e 3,74 semanas<sup>0,5</sup>).

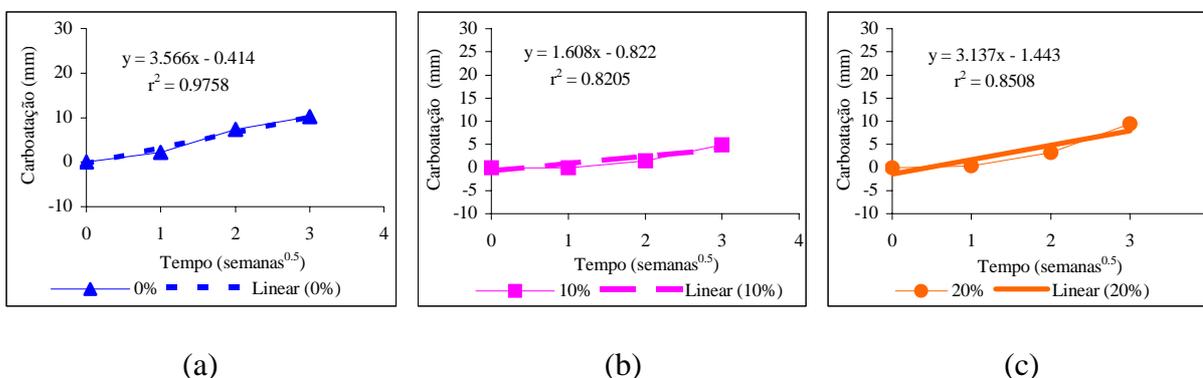


Figura 38: linearização das curvas de carbonatação – ensaio acelerado com 9 semanas de exposição ao  $\text{CO}_2$ : mistura com a/agl 0,80: (a) 0% de sílica ativa; (b) 10% de sílica ativa; (c) 20% de sílica ativa

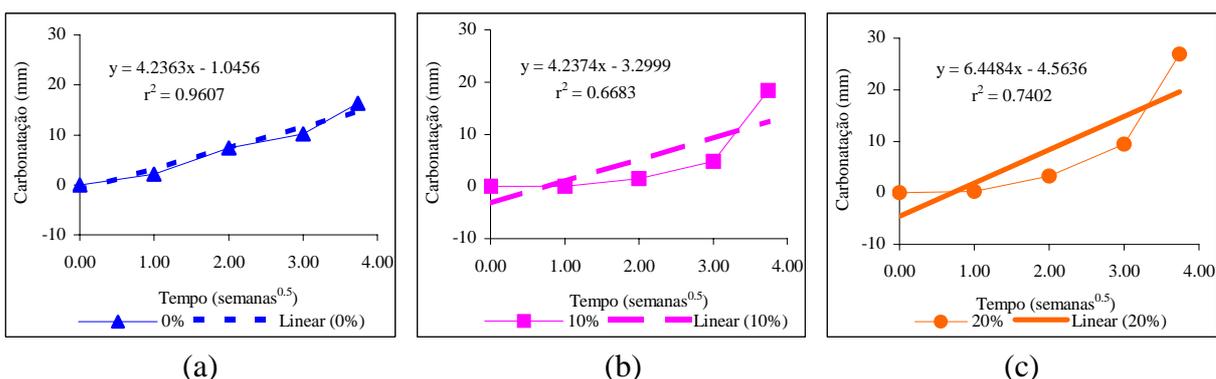


Figura 39: linearização das curvas de carbonatação – ensaio acelerado com 14 semanas de exposição ao  $\text{CO}_2$ : mistura com a/agl 0,80: (a) 0% de sílica ativa; (b) 10% de sílica ativa; (c) 20% de sílica ativa

A Figura 40 apresenta um modelo genérico, utilizado nesta pesquisa, para a obtenção dos coeficientes de carbonatação do concreto durante os períodos de exposição ao  $\text{CO}_2$ . Na Tabela 24 encontram-se os resultados dos coeficientes de carbonatação obtidos nos intervalos determinados na Figura 40.

<sup>50</sup> Para a obtenção dos coeficientes de carbonatação e aceleração, as idades de exposição ao  $\text{CO}_2$  dos concretos em ensaio acelerado, representadas em dias (0, 7, 28, 63 e 98), foram alteradas para semanas (0, 1, 4, 9 e 14).

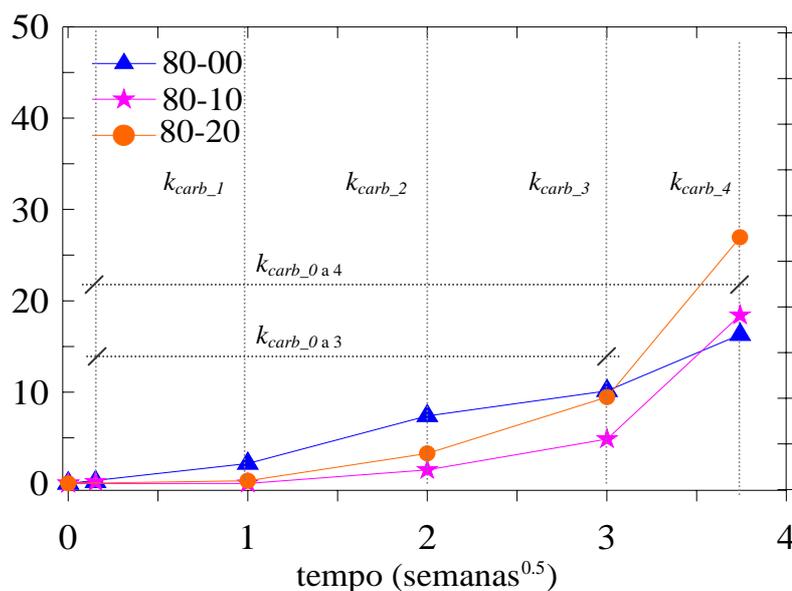


Figura 40: coeficientes de carbonatação – ensaio acelerado: mistura com a/agl 0,80 com 0, 10 e 20% de adição de sílica ativa

Tabela 24: coeficientes de carbonatação (mm) – ensaio acelerado

Mistura	Tempo de exposição ao CO <sub>2</sub> (semanas <sup>0,5</sup> )	Coefficiente de Carbonatação <sup>51</sup>	Coefficiente de Carbonatação (mm/semanas <sup>0,5</sup> )	r <sup>2</sup>
80-00	1,0	$k_{carb\_1}$	2.1900	<b>0,9758</b>
	2,0	$k_{carb\_2}$	3.7000	
	3,0	$k_{carb\_3}$	3.3833	
	3,7	$k_{carb\_4}$	4.3564	
	<b>0 a 3,0</b>	$k_{carb\_0\ a\ 3}$ <sup>52</sup>	<b>3,5660</b>	
	<b>0 a 3,7</b>	$k_{carb\_0\ a\ 4}$ <sup>53</sup>	<b>4,2363</b>	
80-10	1,0	$k_{carb\_1}$	0,0000	<b>0,8205</b>
	2,0	$k_{carb\_2}$	0,7500	
	3,0	$k_{carb\_3}$	1,6200	
	3,7	$k_{carb\_4}$	4,9230	
	<b>0 a 3,0</b>	$k_{carb\_0\ a\ 3}$	<b>1,6080</b>	
	<b>0 a 3,7</b>	$k_{carb\_0\ a\ 4}$	<b>4,2374</b>	
80-20	1,0	$k_{carb\_1}$	0,3000	<b>0,8508</b>
	2,0	$k_{carb\_2}$	1,6450	
	3,0	$k_{carb\_3}$	3,1533	
	3,7	$k_{carb\_4}$	7,2027	
	<b>0 a 3,0</b>	$k_{carb\_0\ a\ 3}$	<b>3,1370</b>	
	<b>0 a 3,7</b>	$k_{carb\_0\ a\ 4}$	<b>6,4484</b>	

<sup>51</sup> ( $k_{carb\_1}$ ) onde:  $k_{carb}$  = coeficiente de carbonatação; e 1 = tempo de exposição ao CO<sub>2</sub> (semanas).

<sup>52</sup>  $k_{carb\_0\ a\ 3}$  = obtido pelo ajuste dos dados reais de carbonatação acelerada (sem modelagem), para o período de até 3,0 semanas<sup>0,5</sup> (63 dias) de exposição ao CO<sub>2</sub>.

<sup>53</sup>  $k_{carb\_0\ a\ 4}$  = obtido pelo ajuste dos dados reais de carbonatação acelerada (sem modelagem) para o período de até 3,75 semanas<sup>0,5</sup> (98 dias) de exposição ao CO<sub>2</sub>.

Os coeficientes de carbonatação  $k_{carb\_1}$ ,  $k_{carb\_2}$ ,  $k_{carb\_3}$ ,  $k_{carb\_4}$  foram calculados pontualmente, empregando-se os dados de profundidade de carbonatação obtidos nas idades de ensaio de 1, 4, 9 e 14 semanas (1, 2, 3 e 3,74 semanas<sup>0,5</sup>), respectivamente. Deste modo, cada coeficiente representa a carbonatação do concreto obtida em uma única idade de ensaio. Já os coeficientes de carbonatação  $k_{carb\_0 a 3}$  e  $k_{carb\_0 a 4}$  foram calculados com os dados de profundidade de carbonatação obtidos durante o tempo de exposição ao CO<sub>2</sub>, sendo o primeiro para o tempo de ensaio de 1, 4 e 9 semanas (1, 2 e 3 semanas<sup>0,5</sup>) e o segundo para o tempo de ensaio de 1, 4, 9 e 14 semanas (1, 2, 3 e 3,74 semanas<sup>0,5</sup>). Assim, estes coeficientes representam o avanço da profundidade de carbonatação do concreto durante todo o tempo de ensaio.

A partir dos dados da tabela acima, observa-se que o  $k_{carb}$  apresenta valores diferenciados no decorrer da realização do ensaio, mostrando que, dependendo da data final de medição de profundidade de carbonatação, o mesmo pode apresentar um valor numérico distinto. Para o período de ensaio de 0 a 3,0 semanas ( $k_{carb\_0 a 3}$ ) a mistura 80-20, cuja linearização é mostrada na Figura 38(c), gerou um  $k_{carb}$  de 3,14 mm/semana<sup>0,5</sup> com um coeficiente de determinação de 0,85, indicando que o coeficiente explica 85,08% dos resultados obtidos. Para um tempo maior de ensaio (0 a 3,7 semanas) a mesma mistura, mostrada na Figura 39(c), apresentou um  $k_{carb}$  de 6,45 mm/semana<sup>0,5</sup> com um coeficiente de determinação de 0,74, explicando 74,02% dos resultados obtidos. Essa diferença de aproximadamente 51% entre os coeficientes de carbonatação para a mesma mistura, obtidos para duas idades distintas, também é notada pela inclinação da curva dos pontos de carbonatação obtidos no ensaio.

Por outro lado, nota-se que há uma proximidade nos valores dos coeficientes de carbonatação obtidos pontualmente e ao longo do tempo de exposição ao CO<sub>2</sub>. Observa-se que, para a mistura 80-00, os coeficiente obtidos pontualmente ( $k_{carb\_3}$ ) e ao longo do tempo ( $k_{carb\_0 a 3}$ ) foram, respectivamente, de 3,38 e 3,57 mm/semana<sup>0,5</sup>. Para a mistura 80-10, os coeficientes de carbonatação foram de 1,62 e 1,61 mm/semana<sup>0,5</sup>, em respectivo. E, para mistura 80-20, estes coeficientes foram de 3,15 e 3,14 mm/semana<sup>0,5</sup>, respectivamente. Para um maior tempo de exposição ao CO<sub>2</sub> (3,7 semana<sup>0,5</sup>) essa mesma tendência foi observada (ver Tabela 24). Assim, para as misturas em estudo, quando empregado o modelo da raiz quadrada do tempo, as medidas pontuais de profundidade de carbonatação se assemelham às obtidas considerando os dados ao longo do tempo.

Nota-se, na Figura 40 que até a idade de 3 semanas a carbonatação apresentava um crescimento pequeno ao longo do tempo. Já na quarta semana de ensaio, a profundidade de

carbonatação do concreto sofre uma elevação que, conseqüentemente, altera a inclinação da curva de comportamento do concreto e o coeficiente de carbonatação. Logo, percebe-se que existem algumas dificuldades na determinação destes coeficientes que dificultam, principalmente, a extrapolação dos resultados e a correlação com outros trabalhos.

Observa-se ainda (Figura 39) que, para o concreto de referência (sem adição de sílica ativa), o ajuste em função da raiz quadrada do tempo gerou um coeficiente de determinação de 0,96, explicando 96% dos dados observados. Logo, o ajuste dos dados de profundidade de carbonatação se apresentou adequado, descrevendo o comportamento dos dados observados. Por outro lado, para o mesmo período de exposição ao CO<sub>2</sub>, os concretos com adição de 10 e 20% de sílica ativa apresentaram coeficientes de determinação de 0,67 e 0,74, respectivamente. Deste modo, o ajuste dos dados em função da equação da raiz quadrada do tempo gerou baixos coeficientes de determinação, indicando que, possivelmente, a presença de sílica ativa altera o comportamento do concreto frente à carbonatação.

Complementando a verificação dos coeficientes de carbonatação, a Figura 41 apresenta a linearização das curvas de carbonatação para os concretos de relação a/agl de 0,60 com adição de 5 e 15% de sílica ativa, para a idade de exposição ao CO<sub>2</sub> de 14 semanas.

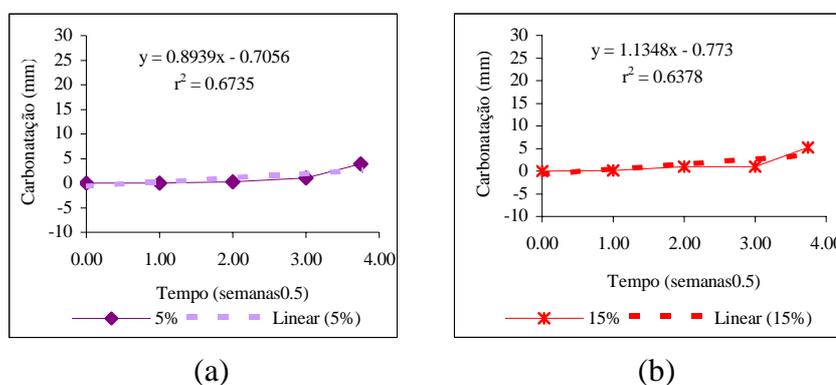


Figura 41: linearização das curvas de carbonatação – ensaio acelerado com 14 semanas de exposição ao CO<sub>2</sub>: mistura com a/agl 0,60: (a) 5% de sílica ativa; (b) 15% de sílica ativa

Para a mistura com 5% de adição de sílica ativa o coeficiente de carbonatação obtido foi de 0,89 mm/semanas<sup>0,5</sup> e para a mistura com 15% de adição foi de 1,13 mm/semanas<sup>0,5</sup>. Os coeficientes de determinação, resultante do ajuste das profundidades de carbonatação em função da raiz quadrada do tempo, para os concretos de relação a/agl de 0,60 com 5 e 15% de sílica ativa, foram baixos, explicando 67,35% e 63,78% dos resultados observados,

respectivamente, fato também observado nos concretos com relação  $a/agl$  de 0,80 com 10 e 20% de adição.

Com base nestas considerações, não foi possível estabelecer qual o melhor coeficiente de carbonatação para ser adotado. Tal fato deve ser averiguado com maior ênfase a fim de se determinar o expoente de  $t$  (tempo), que provavelmente, para os concretos com adição de sílica ativa, deve ser diferente de  $\frac{1}{2}$ .

Estes coeficientes também podem ser obtidos para as misturas carbonatadas em ambiente natural. Considerando o tempo de exposição de 365 semanas (7 anos) e aplicando na equação convencional da raiz quadrada do tempo, de maneira direta, tem-se para a mistura com relação água/aglomerante de 0,80 sem adição de sílica ativa o coeficiente de carbonatação de  $0,63 \text{ mm/semana}^{0.5}$  ( $4,54 \text{ mm/ano}^{0.5}$ ) e para a mistura com 20% de adição o coeficiente de carbonatação de  $0,75 \text{ mm/semana}^{0.5}$  ( $5,39 \text{ mm/ano}^{0.5}$ ).

A literatura utiliza o coeficiente de carbonatação obtido em estruturas reais ou ensaio não acelerado para estimar o comportamento da profundidade carbonatada média de uma determinada edificação para uma vida útil requerida. Deste modo, com os coeficientes de carbonatação obtidos no ensaio de degradação natural, extrapolou-se a profundidade de carbonatação para um período de 100 anos. Assim, edificações construídas há aproximadamente 365 semanas (7 anos) e executadas com concretos de relação  $a/agl$  de 0,80 com 0 e 20% de adição de sílica ativa, com  $k_{carb}$  de  $0,63 \text{ mm/semana}^{0.5}$  ( $4,54 \text{ mm/ano}^{0.5}$ ) e  $0,75 \text{ mm/semana}^{0.5}$  ( $5,39 \text{ mm/ano}^{0.5}$ ), respectivamente, apresentariam o comportamento frente à carbonatação conforme mostram as curvas de ajuste da Figura 42.

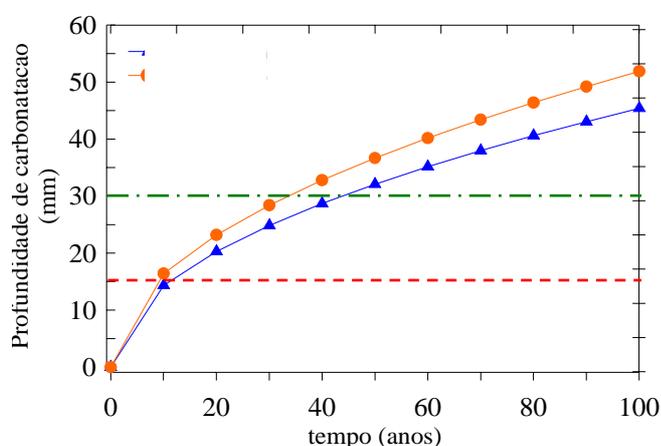


Figura 42: estimativa da profundidade carbonatada para uma vida útil de 100 anos em função de  $k_{carb}$

Conforme proposto por Helene (1997), a vida útil de projeto de uma edificação é alcançada quando a espessura de carbonatação for equivalente à espessura de cobrimento do concreto. Logo, tomando como base o cobrimento de armadura de 15 mm<sup>54</sup>, para a dosagem com relação a/agl de 0,80 com e sem adição de sílica ativa, nota-se que em um período de aproximadamente 10 anos a frente de carbonatação, para os dois concretos, teria atingido essa profundidade. Dobrando a espessura de cobrimento (30 mm<sup>55</sup>), o tempo necessário para a frente de carbonatação atingir a armadura para os concretos com 0% e 20% de sílica ativa, seria, respectivamente, de 43 e 33 anos. Nota-se que, dobrando a espessura de cobrimento a vida útil pode ser elevada em até 4 vezes para o concreto sem adição e em 3 vezes para a mistura com 20% de sílica ativa. Tal fato justifica a importância da espessura de cobrimento e da qualidade do concreto, visto que estes são responsáveis pela proteção das armaduras. Vieira (2003) avaliou o efeito da adição de sílica ativa na corrosão das armaduras, sendo este mais significativo para as relações a/agl mais elevadas. O teor de adição de 10% não alterou a intensidade de corrosão e o teor de 5% apresentou melhor desempenho que o sem adição. Porém, o teor de adição superior a 10% apresentou efeito desfavorável na variação final da intensidade de corrosão. Deste modo, em termos de vida útil para estruturas sujeitas à carbonatação, a adição de 20% de sílica ativa, em concretos com elevada relação a/agl, exerce influência negativa em termos de durabilidade. Para o caso em estudo, seria benéfico em termos de aumento de vida útil não utilizar essa pozolana.

A discussão acima descrita em torno dos coeficientes de carbonatação, determinados no ensaio natural, apresenta apenas uma aproximação da vida útil da estrutura. Como observado na determinação dos coeficientes de carbonatação para os concretos submetidos ao ensaio acelerado, a adição de sílica ativa e a idade de exposição ao CO<sub>2</sub> das amostras ou estrutura da qual foram determinados estes coeficientes exercem influência no coeficiente de carbonatação. Logo, deve-se evitar generalizações baseadas somente nestes coeficientes e a aplicação dos mesmos exige cuidado.

---

<sup>54</sup> Espessura de cobrimento recomendada para ambientes normais pela antiga NBR 6118/1986

<sup>55</sup> Espessura de cobrimento recomendada para ambientes normais pela nova NB 1/2003.

### 5.3.2 Determinação dos Coeficientes de Aceleração

Retomando a definição apresentada no capítulo de revisão, o “coeficiente de aceleração ( $\alpha_c$ ) é adimensional e expressa o número de vezes que o ensaio acelerado representa a degradação natural, sendo relativo aos concretos estudados e às condições de exposição impostas nos dois procedimentos de ensaio”. Pode ser determinado utilizando-se a formulação apresentada na equação 15.

$$\alpha_c = \frac{t_{nat}}{t_{ace}} \quad \text{equação 15}$$

Onde:

$\alpha_c$  = coeficiente de aceleração (adimensional);

$t_{nat}$  = tempo de realização ensaio ao natural (dias, semanas, anos<sup>56</sup>);

$t_{ace}$  = tempo de realização do ensaio acelerado equivalente<sup>57</sup> à profundidade de carbonatação ( $e_c$ ) encontrada no ensaio ao natural (dias, semanas, anos);

Pelo ajuste do comportamento observado pelo modelo matemático (equação 14), foi possível correlacionar os dados de ensaios natural e acelerado. Primeiro fez-se o ajuste dos dados reais da carbonatação acelerada, gerando as curvas que representam o comportamento dos concretos com relação a/agl de 0,80 até a idade de exposição ao CO<sub>2</sub> de 14 semanas (0,27 anos). Com os valores médios das profundidades de carbonatação obtidas no ensaio natural, de 12,01 e 14,28 mm para concretos com relação a/agl de 0,8 com 0 e 20% de adição de sílica ativa, respectivamente, fez-se a substituição na equação do modelo acelerado, encontrando-se o tempo equivalente de exposição acelerada ao CO<sub>2</sub>, como se verifica na Figura 43.

<sup>56</sup> O coeficiente de aceleração, por ser adimensional, pode ser determinado utilizando-se qualquer escala de tempo, desde que iguais para os dois procedimentos de ensaio.

<sup>57</sup> O tempo equivalente de realização do ensaio acelerado para que a profundidade de carbonatação encontrada no ensaio ao natural seja atingida, pode ser obtido utilizando-se o modelo de comportamento gerado pelos dados de carbonatação acelerada. Vale ressaltar que a profundidade de carbonatação natural deve estar compreendida no intervalo observado no ensaio de carbonatação acelerado pois a extrapolação do modelo pode levar a determinações imprecisas.

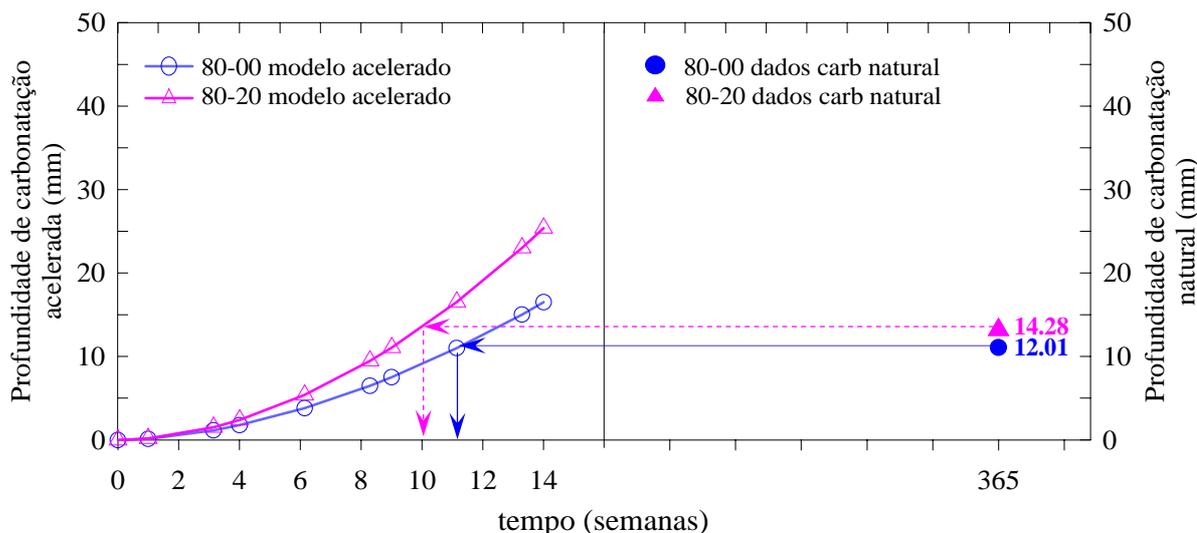


Figura 43: relação da carbonatação acelerada e natural

Os níveis de  $a/agl$  da matriz experimental acelerada apresentaram, para as relações  $a/agl$  0,30, 0,35 e 0,45, profundidades de carbonatação nula, resultado apenas os grupos com  $a/agl$  de 0,60 e 0,80 com profundidades de carbonatação diferente de zero. Para o ensaio ao natural, a matriz em estudo, devido o fracionamento, não considerou o grupo com  $a/agl$  0,60, resultado somente os concretos de  $a/agl$  0,80 com profundidade de carbonatação não nulas. Assim, para as demais misturas da matriz experimental a determinação deste coeficiente não foi possível, pois para as duas abordagens de ensaios as amostras apresentarem carbonatação nula, impossibilitando a correlação e a modelagem de comportamento. Por fim, utilizando a formulação apresentada na equação 15, determinou-se o coeficiente de aceleração. Esta equação fornece, para os concretos de relação  $a/agl$  de 0,80, com 0 e 20% de adição de sílica, os respectivos coeficientes de aceleração de 31,15 e 35,49. Logo, para as condições de ensaios propostas nesta pesquisa, concretos com relação  $a/agl$  de 0,80 com adição de sílica ativa de 0 e 20%, 14 semanas de ensaio acelerado correspondem, respectivamente, a 436 semanas (8,3 anos) e 497 semanas (9,5 anos) de exposição em atmosfera natural. Percebe-se que o concreto sem adição de sílica ativa apresenta uma estimativa de vida útil de 61 semanas (1,2 anos) superior ao com 20% desta adição.

Nota-se que a influência do teor de adição de sílica ativa verificada nos ensaios está representada nestes coeficientes, sendo que, para a mistura com 20%, o coeficiente de aceleração é 16% superior ao concreto isento desta adição.

A literatura consultada aponta poucos trabalhos relativos ao tema, sendo que, para concretos com adição de sílica ativa, não foram encontradas publicações. Cada trabalho adota uma metodologia de pesquisa específica e a associação dos resultados obtidos com os desta pesquisa exige cuidados. Para Isaia (1999) a comparação entre os dados de ensaios acelerados e natural de diferentes pesquisas deve ser efetuada com cautela porque alguns trabalhos não indicam o tempo de cura prévia antes da colocação em câmara condicionada ou o tempo que permaneceu dentro dela. O teor de umidade de equilíbrio também influencia na profundidade de carbonatação pois a concentração de umidade nos poros influencia na velocidade de difusão do CO<sub>2</sub>. Este fator também afeta a comparação de resultados entre ensaios acelerados e naturais, visto que estes últimos também podem estar afetados por condições ambientais diversas tais como: exposição interna ou externa, externa abrigada ou desabrigada, diminuindo a profundidade de carbonatação da primeira direção à última.

Como já comentado, os resultados apresentados por Isaia, Vagheti e Gastaldini (2001), em um estudo de carbonatação natural e acelerada de concretos com relação a/agl, teor e tipo de adição variada, também mostram que a carbonatação sofre influência da porosidade do concreto (relação a/agl), do teor de pozolana contida na mistura (quantidade de cimento substituído por adição mineral) e do tipo de ensaio empregado, no acelerado, o teor de CO<sub>2</sub> da câmara condicionada, no natural as condições ambientais (abrigado interno, abrigado externo, desabrigado). Logo, o modelo de comportamento dos concretos e os coeficientes de aceleração e carbonatação encontrados nesta pesquisa podem não reproduzir o comportamento de concretos submetidos a outras condições de ensaio (tempo de exposição e teor de CO<sub>2</sub>, tipo e teor de adições).

Verifica-se que há uma grande dificuldade na obtenção destes coeficientes devido ao grande número de fatores que envolvem o processo de carbonatação, principalmente os relativos às condições de execução de ensaio e exposição natural. Outro fator de grande importância, observado na literatura, é a carência de resoluções normativas oferecendo a padronização dos procedimentos de ensaio.

### 5.3.3 Aplicação do Coeficiente de Aceleração

Com base no modelo de carbonatação do ensaio acelerado, proposto na equação 14, foi possível determinar o tempo necessário de exposição ao CO<sub>2</sub> para se atingir a espessura de carbonatação equivalente a um cobrimento de armadura de 15 mm<sup>58</sup>. A Figura 44 mostra o comportamento das misturas com relação a/agl de 0,30; 0,45 e 0,80 com 0, 10 e 20% de adição de sílica ativa, para a espessura de carbonatação de 15 mm.

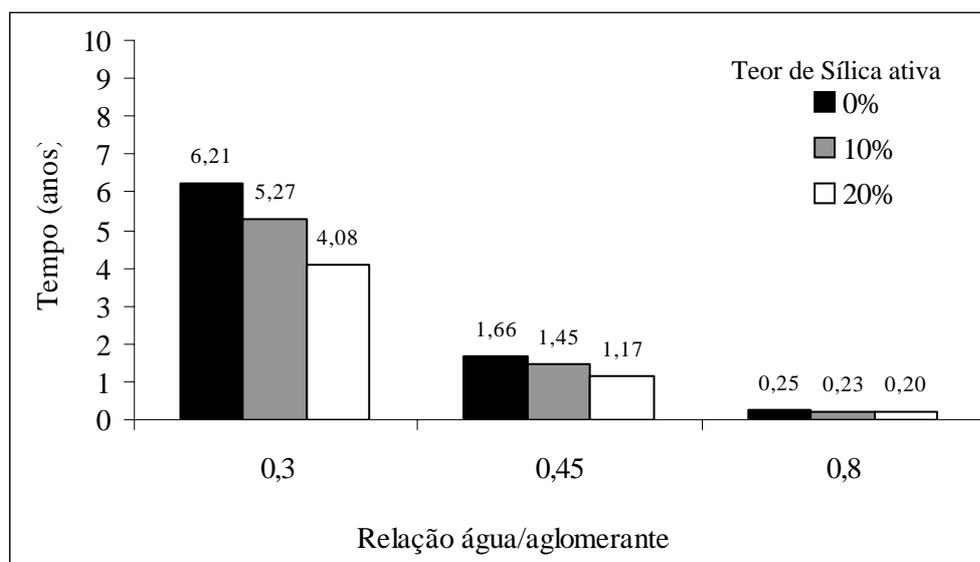


Figura 44: tempo necessário para que a carbonatação acelerada atinja a profundidade total de cobrimento de armadura (15 mm)

Nota-se que quanto maior a relação água/aglomerante e teor de adição, menor é o tempo necessário para que a carbonatação atinja a armadura do concreto.

Considerando o coeficiente de carbonatação, os valores de tempo encontrados no ensaio acelerado, dentro dos valores limites fixados no modelo de regressão mostrado na equação 14, podem ser traduzidos para valores de profundidade de carbonatação em atmosfera natural. Logo, para o concreto com relação água/aglomerante de 0,80, efetuando-se as correlações, tem-se o gráfico da Figura 45.

<sup>58</sup> A espessura de cobrimento de 15 mm foi tomada como referência a fim de evitar a extrapolação do modelo de carbonatação acelerado para tempos superiores aos tempos limites adotados na elaboração deste.

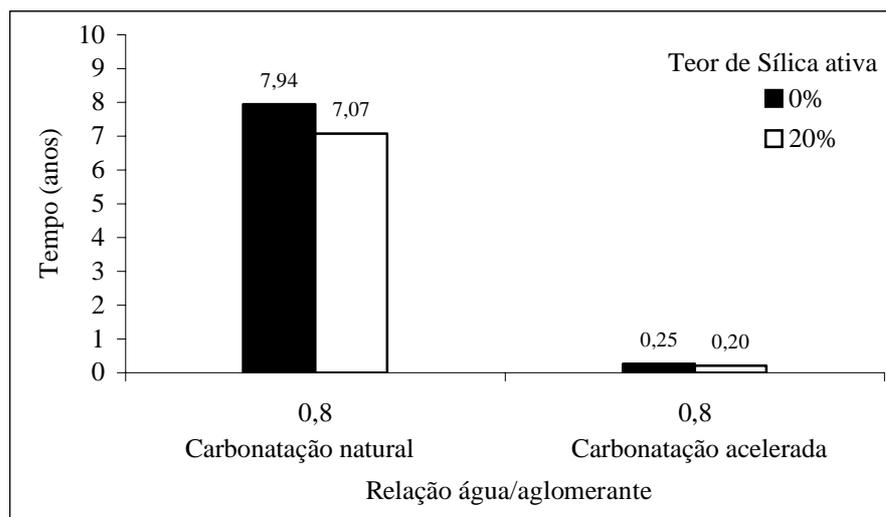


Figura 45: representação do tempo correspondente do ensaio acelerado para o natural para que a profundidade de carbonatação seja de 15 mm

Analisando o concreto sem adição de sílica ativa, para que a espessura de carbonatação atinja 15 mm segundo modelo acelerado, são necessários 13,3 semanas (0,25 anos) de exposição ao CO<sub>2</sub> com concentração de 5%. Multiplicando-se o tempo de exposição ao CO<sub>2</sub> acelerado pelo coeficiente de aceleração do concreto tem-se o tempo equivalente de exposição natural. Deste modo, multiplicando-se 13,3 pelo coeficiente de aceleração de 31,15, tem-se um tempo de 414,3 semanas ou aproximadamente 8 anos. Para um concreto de mesma relação água/aglomerante, porém com 20% de adição de sílica ativa, o tempo de ensaio acelerado necessário para que a frente de carbonatação seja igual a 15 mm é de 10,4 semanas (0,20 anos). Fazendo a multiplicação pelo coeficiente de aceleração deste concreto (35,49), tem-se um período de 370,1 semanas ou aproximadamente 7 anos de exposição natural.

Caso o concreto com 20% de adição de sílica ativa fosse exposto ao CO<sub>2</sub> durante 13,3 semanas de ensaio acelerado (tempo equivalente à exposição do concreto sem adição para atingir 15 mm de carbonatação), a espessura de carbonatação atingiria 23,88 mm, equivalendo à exposição natural de 9 anos.

A influência da adição de sílica ativa na carbonatação do concreto com elevada relação a/agl é marcante na vida útil de projeto conferido pelo concreto, onde o teor de 20% de adição reduz em aproximadamente um ano o tempo necessário para carbonatar uma espessura de cobrimento equivalente a 15 mm.

Para aplicações em projeto, os coeficientes de aceleração são de grande importância, atuando como ferramenta de tomada de decisão gerencial. Conhecendo estes coeficientes, elabora-se um ensaio acelerado (de curta duração) com amostras do concreto que se pretende empregar na edificação. Os dados de profundidade de carbonatação obtidos, em relação aos tempos de exposição ao  $\text{CO}_2$ , podem ser associados aos coeficientes de aceleração conhecidos e a partir deles determinar, para a vida útil requerida, a espessura de cobrimento necessária e também as características do concreto (relação a/agl, emprego ou não de adições, entre outros).

### 5.3.4 Coeficientes de Carbonatação e Aceleração: Visão Geral

#### 5.3.4.1 Discussão a partir do modelo ajustado para os dados experimentais

Como discutido anteriormente, verificou-se no ensaio acelerado que a profundidade de carbonatação resultante da exposição do concreto à ação do  $\text{CO}_2$ , durante 98 dias (14 semanas), não se comportou conforme o modelo da raiz quadrada do tempo. A Figura 46 apresenta os dados observados, plotados segundo o critério de dispersão de valores, de concretos de relação a/agl de 0,60 e 0,80 com adição de sílica ativa de 5 e 15% e 0, 10 e 20%, respectivamente.

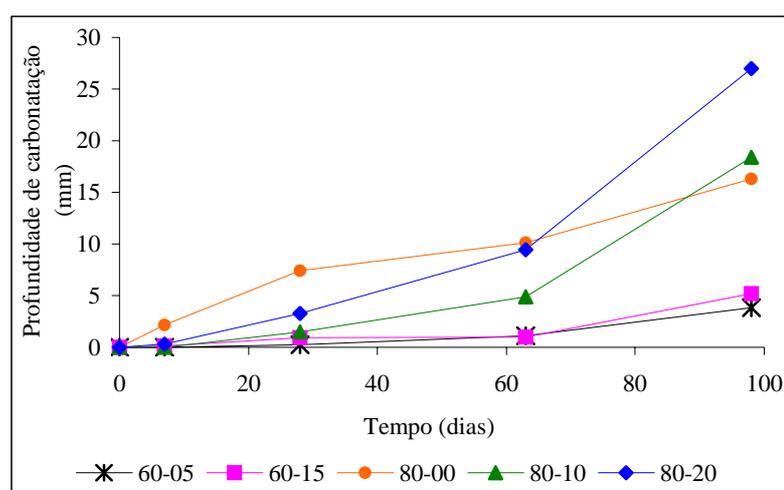


Figura 46: ensaio acelerado – profundidade de carbonatação observada para as misturas com relação a/agl 0,60 e 0,80

Verifica-se que o comportamento dos concretos frente à carbonatação, para esse período de tempo, apresenta uma tendência de crescimento oposta à descrita pela equação da raiz quadrada do tempo. O último ponto de profundidade de carbonatação coletado (98 dias ou 14 semanas), não deixa claro se o processo de carbonatação tende ao crescimento ou à atenuação. Segundo Guimarães (2000) e Smolczyk (1969), o concreto tende a apresentar o comportamento descrito pela equação da raiz quadrada do tempo somente após um período de 10 anos de exposição ao CO<sub>2</sub> em ambiente natural, sendo que, para períodos inferiores, o expoente de  $t$  pode diferir de  $\frac{1}{2}$ . Empregando os coeficientes de aceleração, o ensaio de carbonatação acelerado representou uma exposição natural de 8,3 (436 semanas) e 9,5 anos (497 semanas), para os concretos com 0 e 20% de adição de sílica ativa, respectivamente. Nota-se que o concreto com 20% de adição de sílica ativa apresentou um tempo próximo ao descrito na literatura. Porém, o tempo citado não é referente à carbonatação de concretos com adição de sílica ativa, pois sabe-se que para ensaios de carbonatação acelerados sem adições minerais, é comum obter-se um comportamento explicado algebricamente pela equação da raiz quadrada do tempo, com ótimos coeficientes de determinação ( $r^2$ ), porém essa aproximação não pode ser extrapolada para concretos com adições. Tais fatos evidenciam a necessidade do estudo da carbonatação do concreto, produzido com diferentes cimentos e adições e submetidos a longos períodos de exposição ao CO<sub>2</sub>. Estes resultados, aliados à estudos de microestrutura, podem vir a contribuir no melhor ajuste dos expoentes de  $t$  como também na modelagem do fenômeno de carbonatação.

Com estas observações, pode-se dizer que o ensaio acelerado realizado, provavelmente, não teve a duração necessária para que fosse possível alcançar o período de tendência ao estacionamento do fenômeno de carbonatação dos concretos e que, o modelo da raiz quadrada do tempo se mostrou pouco adequado para os concretos com sílica ativa. Assim, a extrapolação dos resultados se torna dificultosa com alta probabilidade de determinações incorretas.

#### 5.3.4.2 Discussão a partir do modelo da raiz quadrada do tempo

Segundo a literatura (Bakker, 1988; Neville, 1997; Helene, 1993), o fenômeno de carbonatação tende ao estacionamento ao longo do tempo. Logo, a adoção dos coeficientes de carbonatação e aceleração como referência para previsão de vida útil pode incorrer em

determinações errôneas ou então muito distantes da situação real. Considerando que a carbonatação do concreto com o decorrer do tempo, tende ao estacionamento (atenuação), enfatizando a importância de se obter o comportamento completo do fenômeno, plotou-se o gráfico da Figura 47.

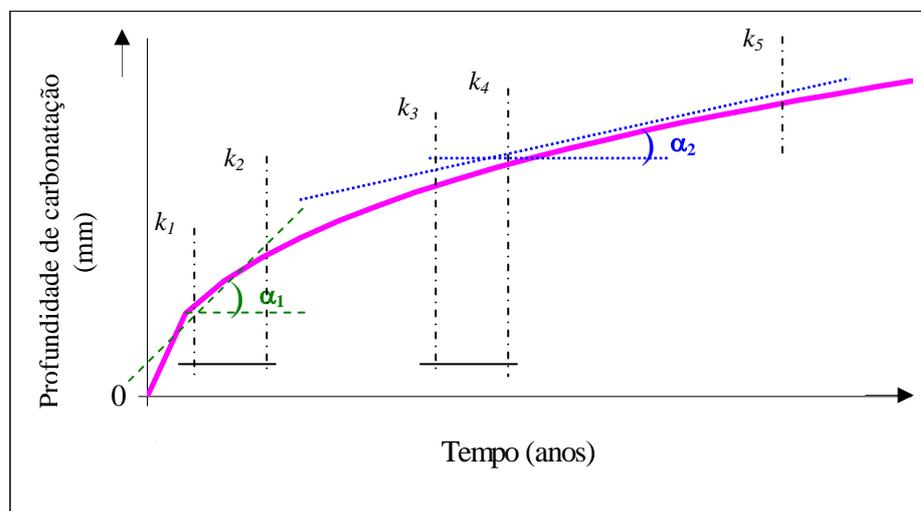


Figura 47: representação genérica do comportamento do concreto perante à ação do  $\text{CO}_2$  em função do tempo de exposição

Sendo “ $k$ ” os coeficientes teóricos de carbonatação, observa-se que  $k_1$  e  $k_2$  contemplam o período inicial do fenômeno de carbonatação do concreto, onde a curva que representa os dados possui um ângulo de inclinação  $\alpha_1$ . Já os coeficientes teóricos de carbonatação  $k_3$ ,  $k_4$  e  $k_5$  contemplam o período de atenuação da curva de comportamento dos concretos frente à carbonatação, onde a mesma possui um ângulo de inclinação  $\alpha_2$ . Face a estas observações, pode-se dizer que o fenômeno de carbonatação apresenta duas fases distintas de comportamento, sendo uma relativa à fase inicial de penetração do  $\text{CO}_2$  e outra à tendência ao estacionamento do fenômeno, representadas pelos ângulos de inclinação  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$ , respectivamente. A fase inicial pode ser função da porosidade do concreto, relação  $a/\text{agl}$ , reserva alcalina que está relacionada com o tipo e teor de adições, concentração de  $\text{CO}_2$ , condições de exposição (protegido ou desprotegido da chuva) e umidade relativa. O período de atenuação do fenômeno (tendência ao estacionamento) pode estar associado ao pH do concreto, relação  $a/\text{agl}$ , presença de adições e, principalmente, formação de carbonatos nos poros de maior dimensão, reduzindo substancialmente o acesso de  $\text{CO}_2$  para o interior do concreto.

Deste modo, acredita-se que para fins de modelagem e, conseqüentemente, melhor aproximação da vida útil das estruturas de concreto, o ensaio de carbonatação natural ou acelerado deve ser executado até a obtenção da curva de tendência ao estacionamento do fenômeno. Neste estágio presume-se que o ensaio de carbonatação pode representar com maior magnitude o comportamento do concreto perante à ação do CO<sub>2</sub>. Sendo assim, o comportamento do concreto frente à carbonatação pode ser descrito na forma de um modelo matemático que poderá ser extrapolado para tempos superiores aos realizados no ensaio, com uma probabilidade de erro reduzida. Essa abordagem, se provada sua validade, também pode ser empregada em projetos novos ou estruturas existentes, conferindo uma melhor aproximação da espessura carbonatada ao longo do tempo, aumentando a capacidade de otimização de projetos e, principalmente, análise de custos.

Com base nestas observações, para a realização de ensaios de carbonatação de longa duração, seja acelerado ou não, sugere-se que alguns cuidados devem ser tomados durante o planejamento e execução dos mesmos. Uma das observações necessárias está vinculada às dimensões dos corpos-de-prova, as quais devem ser igual ou superior ao dobro da espessura de cobertura do concreto requerida ou especificada nas normas técnicas. Por exemplo, considerando a especificação da NB 1/2003 para ambientes altamente agressivos, tem-se um cobrimento de armadura de 50 mm. Logo, para o estudo de um concreto que será inserido neste ambiente, acredita-se que serão necessários corpos-de-prova de dimensões mínimas de 100x100xC mm (altura, largura, comprimento<sup>59</sup>). Esse aumento na dimensão dos corpos-de-prova e do tempo de ensaio acarreta algumas dificuldades, dentre as quais podem se destacar: o acréscimo do tempo de ensaio e a conseqüente demora na obtenção dos dados; a necessidade de câmaras de carbonatação de maior tamanho; dificuldade de manuseio dos corpos-de-prova e, principalmente, elevação dos custos dos ensaios. Assim, mostra-se necessário um estudo aprofundado da viabilidade técnico-econômica da proposta.

Ainda com relação ao ensaio, outros cuidados estão relacionados à concentração de CO<sub>2</sub> utilizada no ensaio, visto que, segundo Mehta e Monteiro (1994), altas concentrações podem formar compostos diferenciados, presume-se que sejam utilizados teores iguais ou inferiores a 5%. Para se traçar as curvas de comportamento no mínimo devem ser tomados 3 pontos de

---

<sup>59</sup> O comprimento "C" do corpo-de-prova deve ser vinculado ao número de fatias necessárias para a obtenção da curva de comportamento.

medição de profundidade carbonatada no tempo. Fukushima et al (1998<sup>60</sup> apud Isaia, Vagheti, e Gastaldini, 2001) sugerem que as melhores condições para realização de ensaio acelerado, de modo a não influenciar nos mecanismos de carbonatação seriam as seguintes: taxa de CO<sub>2</sub> de 5%, temperatura de cura de 30°C e umidade relativa de 60%. Porém, cabe ressaltar, que não há consenso entre os pesquisadores da área sobre quais os melhores parâmetros a serem adotados para a realização dos ensaios de carbonatação acelerada.

A espessura de revestimento foi tomada como referência por ser um parâmetro de projeto de elevada importância nas estruturas em concreto armado e também pelo fato de ser largamente difundida e conhecida no setor da construção civil brasileira. O revestimento do concreto confere grande importância na proteção das armaduras, formando uma camada passivadora que dificulta e, às vezes, impede o ingresso de agentes agressivos, principalmente CO<sub>2</sub> e íons cloreto, capazes de desencadear o processo corrosivo. Logo, se em um determinado tempo ou período de vida útil a espessura de revestimento não for totalmente carbonatada, as armaduras imersas no concreto ainda estão protegidas, conferindo uma vida útil superior à estimada em projeto. Essa situação é favorável à segurança estrutural, conferindo um alto índice de confiabilidade. Porém, do ponto de vista econômico, para uma vida útil prevista, a melhor situação seria que a frente de carbonatação se aproximasse ao máximo da espessura do revestimento do concreto. Desde modo, os modelos de previsão de vida útil das estruturas de concreto são de suma importância, sendo que há a necessidade de que estes confirmem a melhor aproximação possível da situação real. Ainda são necessários estudos na área, pois inúmeros fatores interferem no processo. A obtenção de coeficientes que permitam correlacionar a degradação obtida em laboratório com a observada em campo pode ser uma grande contribuição na melhoria das estimativas de vida útil.

---

<sup>60</sup> FUKUSHIMA, T., YOSHIKAZI, Y., TOMOSAWA, F., TAKAHASHI, K. Relationship between neutralization depth and concentration distribution of CaCO<sub>3</sub> – Ca(OH)<sub>2</sub> in carbonated concrete. In: MALHOTRA, V. M. (ed). CANMET/ACI/JCI International Conference on recent advances in concrete technology, 4<sup>th</sup>, Tokushima, Japan, 1998. *Proceedings...* Detroit: American Concrete Institute, 1998, p. 347-363 (SP-179).

## 5.4 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

Os dados do ensaio complementar de resistência à compressão axial obtidos nas idades de 28 e 180 dias, para as relações a/agl e teores de adição de sílica ativa em estudo, são mostrados na Tabela 25.

Tabela 25: resistência à compressão dos concretos (MPa): dados observados aos 28 e 180 dias

idade	28 dias					idade	180 dias						
	Teor de sílica ativa (%)	Relação água/aglomerante					Teor de sílica ativa (%)	Relação água/aglomerante					
		0,30	0,35	0,45	0,60			0,80	0,30	0,35	0,45	0,60	0,80
0	59,6		44,8		20,8	0	71,3		49,2		31,6		
	52,8		41,2		18,8		68,0		46,8		24,8		
5		53,2		34,8		5		69,2		42,8			
		46,0		30,8			68,8		40,4				
10	62,0		51,6		31,4	10	77,2		60,8		31,6		
	61,2		47,2		25,2		69,2		60,0		28,0		
15		60,0		43,2		15		70,4		47,2			
		56,8		41,2			69,2		46,8				
20	75,6		49,9		28,4	20	82,4		66,4		38,8		
	64,0		46,8		17,6		71,6		57,6		32,4		

Por meio de regressão múltipla não-linear, efetuou-se a análise estatística dos dados. A análise de regressão permitiu a obtenção de um modelo matemático do ajuste dos dados e a verificação do efeito da relação a/agl, teor de adição e idade do ensaio na resistência à compressão axial. O modelo de ajuste encontrado é mostrado na equação 16, gerado a partir dos dados de resistência mecânica obtidos nas idades de 28 e 180 dias.

$$f_{cj} = \exp(b_0 - (agl \cdot b_1) + (b_2 \cdot ad)) \cdot id^{n_1} \quad \text{equação 16}$$

Onde:

$f_{cj}$  = resistência à compressão do concreto (MPa);

$agl$  = relação água/aglomerante do concreto (intervalo de 0,30 a 0,80);

$ad$  = teor de adição de sílica ativa do concreto (intervalo de 0 a 20%);

$id$  = idade de realização do ensaio em dias (intervalo de 28 a 180);

$b_0$ ;  $b_1$ ;  $b_2$  e  $n_1$  = parâmetros dos fatores considerados no modelo.

A análise de variância (ANOVA) do modelo proposto é mostrada na Tabela 26.

Tabela 26: ANOVA do modelo para a estimativa da resistência à compressão axial

Fonte	GDL	SQ	MQ	F <sub>calc</sub>	Significância “p-value”
Modelo	4	142361,7	35590,4	2188,60	0,0000
Resíduo	48	780,6	16,3	-	-
Total	52	143142,2	-	-	-
Total corrigido	51	14399,2	-	-	-

GDL = Graus de Liberdade      SQ = Soma Quadrada  
 MQ = Média Quadrada = SQ/GDL      F<sub>calc.</sub> = MQ<sub>modelo</sub>/MQ<sub>resíduo</sub>

O valor de ‘p-value’ menor do que 0,01 designa que a relação entre as variáveis é estatisticamente significativa a um nível de confiança de 99%. O coeficiente de determinação encontrado ( $r^2$ ) foi de 0,9458, indicando que o modelo explica 94,58% da variabilidade dos valores obtidos para resistência à compressão dos concretos.

Na Tabela 27 são apresentados os parâmetros dos fatores considerados no modelo proposto e os parâmetros estatísticos obtidos.

Tabela 27: parâmetros dos fatores analisados para estimativa da resistência à compressão axial

Fator	Parâmetro	Estimativa	Erro padrão	Teste t	Significância “p-value”
Constante	b <sub>0</sub>	4,20954	0,06361	66,17591	0,00000
<i>agl</i>	b <sub>1</sub>	1,76296	0,07673	22,97636	0,00000
<i>ad</i>	b <sub>2</sub>	0,85645	0,14654	5,84445	0,00003
<i>id</i>	n <sub>1</sub>	0,10388	0,01170	8,87680	0,00000

Nota-se que todos os fatores do modelo (relação água/aglomerante, teor de adição de sílica ativa e idade do ensaio) apresentam efeito significativo na resistência à compressão axial do concreto, apresentado um ‘p-value’ inferior a 0,05, o que significa um nível de confiança de 95%.

A equação que representa o modelo de regressão do ajuste dos dados de resistência à compressão axial é mostrada na equação 17.

$$f_{cj} = \exp(4,2375 - (agl \cdot 1,7312) + (0,8171 \cdot ad)) \cdot id^{0,09685} \quad \text{equação 17}$$

Onde:

$f_{cj}$  = resistência à compressão do concreto (MPa);

$agl$  = relação água/aglomerante do concreto (intervalo de 0,30 a 0,80);

$ad$  = teor de adição de sílica ativa do concreto (intervalo de 0 a 20%);

$id$  = idade de realização do ensaio em dias (intervalo de 28 a 180);

A Tabela 28 apresenta os valores de resistência à compressão axial, para 28 e 180 dias, previstos pelo modelo.

Tabela 28: resistência à compressão axial dos concretos (MPa): dados previstos aos 28 e 180 dias

idade	28 dias					idade	180 dias						
	Teor de sílica ativa (%)	Relação água/aglomerante					Teor de sílica ativa (%)	Relação água/aglomerante					
		0,30	0,35	0,45	0,60			0,80	0,30	0,35	0,45	0,60	0,80
0	56,08		43,05		23,23	0	68,04		52,23		28,18		
5		53,60		34,49		5		65,03		41,85			
10	61,10		46,90		25,30	10	74,13		56,90		30,70		
15		58,39		37,58		15		70,84		45,59			
20	66,56		51,09		27,57	20	80,75		61,99		33,45		

Para os dados obtidos aos 28 dias, a Figura 48 e a Figura 49 apresentam, respectivamente, a influência da relação a/agl e do teor de adição de sílica ativa na resistência à compressão dos concretos.

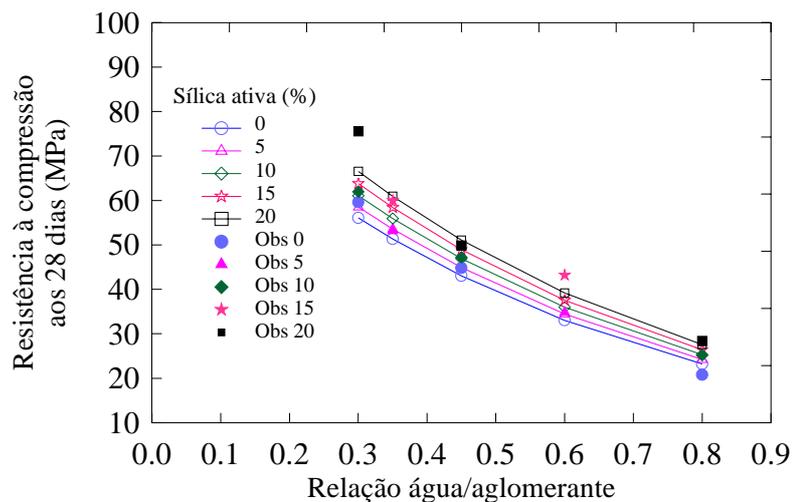


Figura 48: influência da interação entre a relação água/aglomerante e o teor de sílica ativa na resistência à compressão axial aos 28 dias

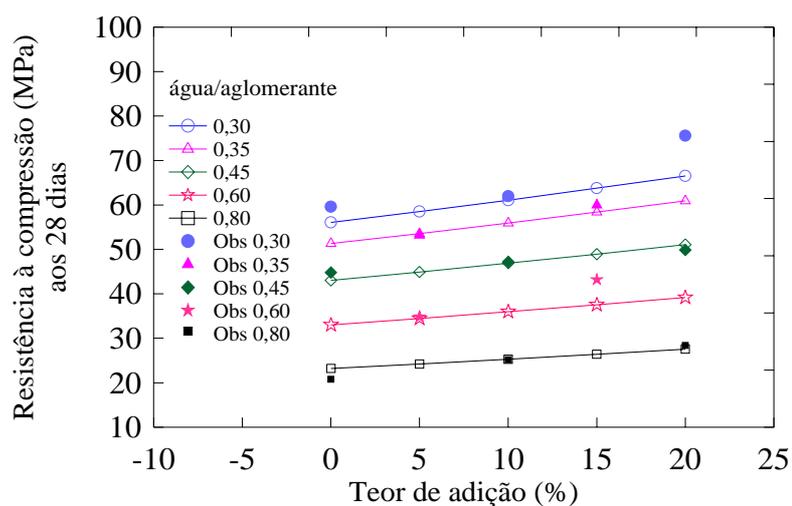


Figura 49: influência da interação entre o teor de adição de sílica ativa e a relação a/agl na resistência à compressão axial aos 28 dias

A influência da relação a/agl e do teor de adição de sílica ativa na resistência à compressão do concreto, para a idade de 180 dias, pode ser verificada nos gráficos da Figura 50 e Figura 51, respectivamente.

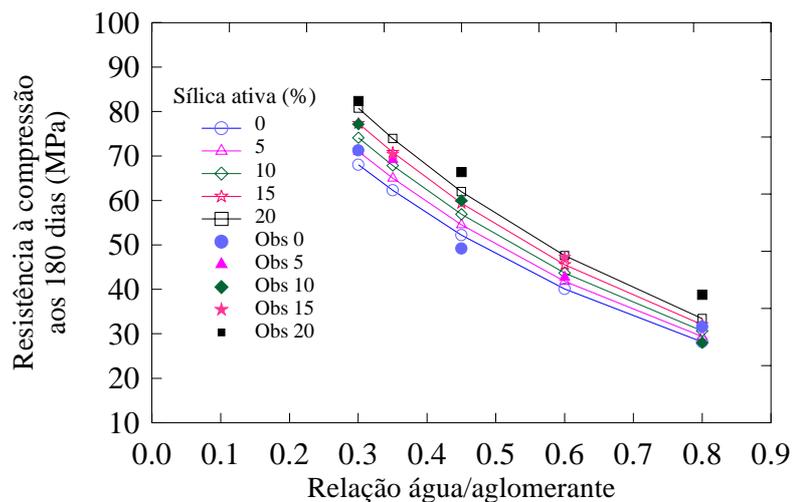


Figura 50: influência da interação entre a relação água/aglomerante e o teor de sílica ativa na resistência à compressão axial aos 180 dias

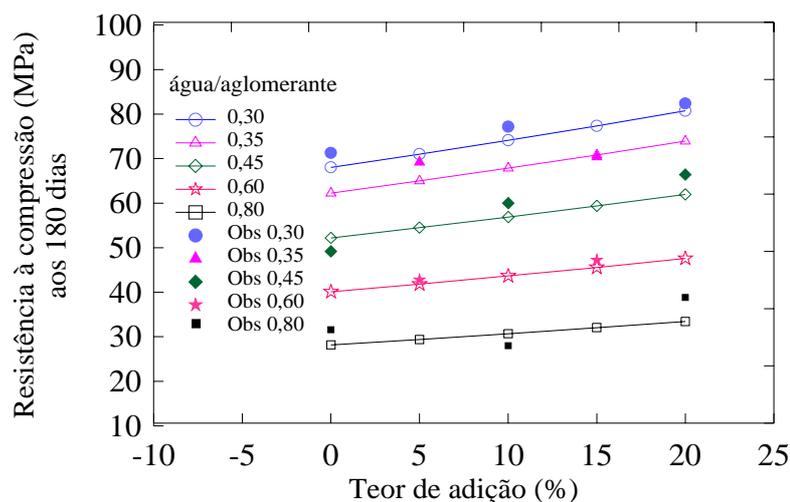


Figura 51: influência da interação entre o teor de adição de sílica ativa e a relação a/agl na resistência à compressão axial aos 180 dias

Nota-se que a relação a/agl exerce influência significativa na resistência à compressão axial dos concretos, fato de consenso na literatura (HO e LEWIS, 1987; DAL MOLIN, 1995; AITCIN, 2000; entre outros). A elevação da relação a/agl de 0,3 para 0,80, para as duas idades de ensaio, promove uma queda média de resistência à compressão de aproximadamente 60%. A interação da relação a/agl com o teor de adição de sílica ativa, pela análise estatística, mostrou-se não significativa, indicando que, independente da relação a/agl a adição de sílica ativa contribui de forma semelhante para o aumento da resistência à compressão dos concretos.

DAL MOLIN (1995, p.152) constatou que a adição de 10% de sílica ativa promove um aumento médio de 11% na resistência à compressão em concretos de alta resistência (CAR). Para uma mesma relação  $a/agl$ , o teor de adição na resistência à compressão exerce influência positiva, ou seja, aumentando-se o teor de adição, tem-se um aumento da resistência. No presente estudo verifica-se que incrementos de 10 e 20% na adição de sílica ativa conferem, respectivamente, ganhos de resistência de 8,2 e 16%. Comparando concretos de relação  $a/agl$  de 0,35 com 0 e 15% de adição sílica ativa Mazloom, Ramezianpour e Brooks (2004, p.349) observaram que o incremento da resistência à compressão axial conferido pela pozolana foi de 21%. Vieira (2003) observou comportamento semelhante, atribuindo o fato ao efeito físico e pozolânico conferido pela presença da sílica ativa. Os efeitos da adição desta pozolana afetam a morfologia e a microestrutura da matriz cimentante e da zona de transição pasta/agregado, reduzindo a porosidade (DAL MOLIN, 1995; AITICIN, 2000).

A Figura 52 apresenta a influência da relação água aglomerante, para os teores de adição de sílica ativa, na resistência à compressão do concreto nas idades de 28 e 180 dias.

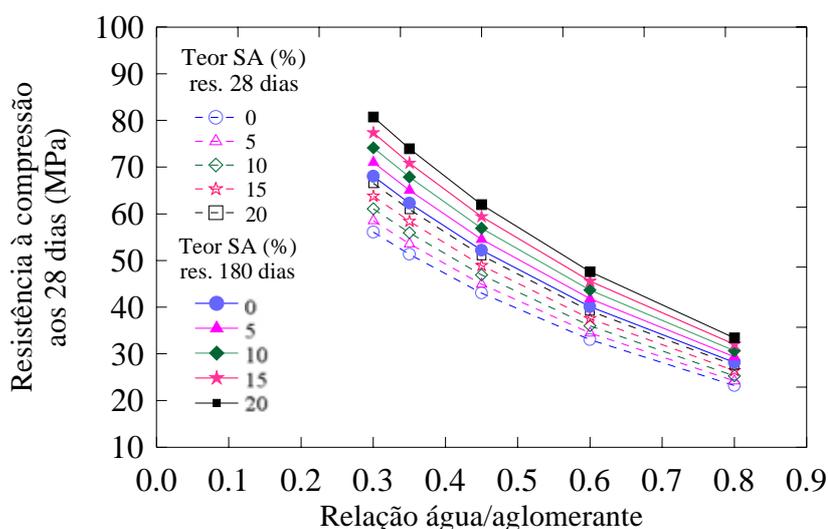


Figura 52: influência da interação entre a relação  $a/agl$  e o teor de sílica ativa na resistência à compressão axial aos 28 e 180 dias

Nota-se, para todas as misturas, um pequeno ganho de resistência na idade de 180 dias com relação aos 28 dias de ensaio. Tal fato se deve ao tipo de cimento empregado na confecção dos concretos o CP V ARI, que confere ganho de resistência principalmente nas primeiras idades do concreto e também pela adição de sílica ativa, que por ser uma pozolana altamente reativa, age nas primeiras idades, conferindo aumento na resistência à compressão. Segundo

Dal Molin (1995, p.151) e Mazloom, Ramezaniyanpour e Brooks (2004, p.399), o crescimento da resistência à compressão dos concretos com sílica ativa é maior, principalmente no período entre 1 e 28 dias.

A relação entre resistência à compressão axial, aos 28<sup>61</sup> dias, e profundidade de carbonatação, encontrada em ensaio acelerado após 98 dias de exposição ao CO<sub>2</sub>, pode ser observada no gráfico da Figura 53. As linhas de tendência do gráfico, para as duas variáveis de análise, foram traçadas com base nos modelos de ajuste encontrados, apresentados na equação 14 (carbonatação) e equação 17 (resistência).

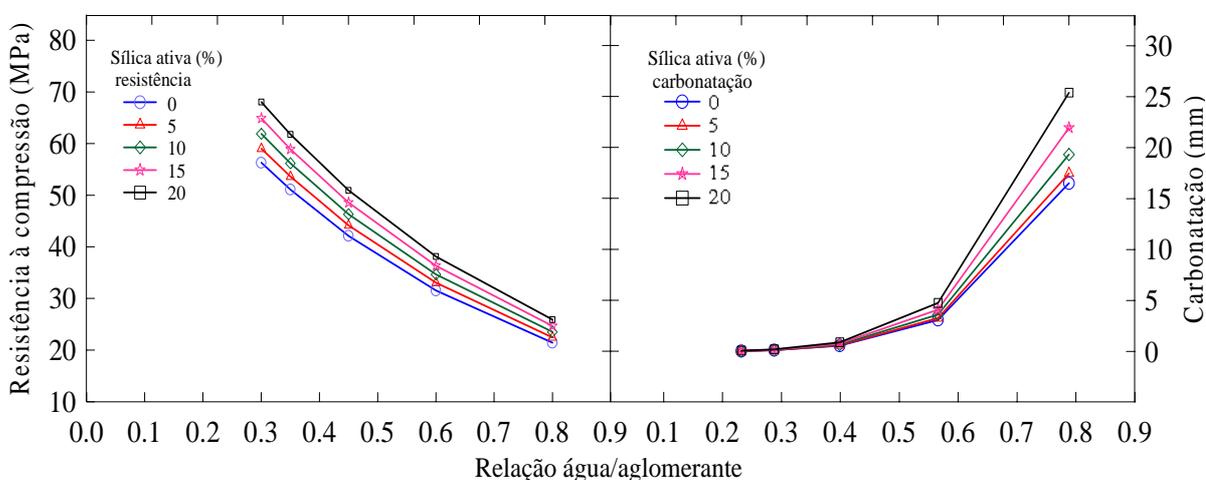


Figura 53: influência da adição de sílica ativa na carbonatação e na resistência à compressão axial dos concretos

Como discutido anteriormente, as misturas com adição de sílica ativa apresentaram maior resistência à compressão, para todos os níveis de relação a/agl. Porém, com relação à carbonatação do concreto, para um mesmo teor de adição de sílica ativa, verifica-se que o comportamento é inversamente proporcional à resistência à compressão axial. Ou seja, o aumento da resistência à compressão conferido pela adição de sílica ativa não reduz a profundidade de carbonatação do concreto. Kropp e Hilsdorf (1995, p.194) relatam que a correlação entre a profundidade carbonatada e a resistência à compressão do concreto depende do tipo de cimento empregado e da cura. Para uma mesma classe de resistência e duração de cura, a profundidade de carbonatação de concretos produzidos com cimento com

<sup>61</sup> A idade de 28 dias foi selecionada nesta comparação, devido ser largamente utilizada como parâmetro de controle dos concretos produzidos em geral.

adição de escória de alto forno é mais elevada do que a de concretos confeccionados com cimento Portland sem essa pozolana.

Desconsiderando a presença de adição de sílica ativa, percebe-se que o aumento da resistência à compressão reduz a profundidade de carbonatação. Como constatado no item 5.1, para relações  $a/agl$  inferior a 0,45 a influência do teor de adição não afeta a carbonatação do concreto, sendo esta propriedade dependente da relação  $a/agl$  da mistura.

A comparação das curvas de resistência à compressão axial e profundidade de carbonatação em concretos também alerta para o fato de que somente a propriedade de resistência à compressão não é parâmetro para estimar a durabilidade das estruturas, mas sim a relação água/aglomerante e o tipo de cimento empregado (KULAKOWSKI, 2002, p.150). Salienta-se, ainda, que, para relações  $a/agl$  mais elevadas, acima de 0,45, o teor de adição empregado, apesar de exercer influência benéfica na resistência à compressão, confere um efeito oposto ao desejado no controle da frete de carbonatação.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Objetivando a avaliação comparativa da carbonatação acelerada e natural de concretos com e sem adição de sílica ativa, esta pesquisa utilizou dados de carbonatação, gerados pelo projeto de Dal Molin et al. (1996) do Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação (NORIE) da Universidade Federal do Rio Grande de Sul (UFRGS).

Os concretos submetidos à carbonatação acelerada e natural, oriundos de um projeto fatorial cruzado e fracionado, permitiram verificar a influência das variáveis dependentes com a mesma representatividade de um projeto completo. Para o ensaio acelerado foram avaliados concretos com relação água/aglomerante (a/agl) de 0,3; 0,35; 0,45; 0,60 e 0,80 e teor de adição de sílica ativa de 0; 5; 10; 15 e 20%. Já para os concretos expostos em condições naturais de envelhecimento, foram estudados misturas idênticas às do ensaio acelerado com relação a/agl de 0,3; 0,45 e 0,80 e teor de adição de sílica ativa 0; 10 e 20%. O ambiente de exposição natural das amostras foi a cidade de Porto Alegre, RS, sendo os dados obtidos nesta pesquisa relativos às características deste ambiente. A extrapolação ou aplicação destes resultados para situações distintas pode não representar o comportamento observado.

Sendo assim, os resultados deste trabalho se aplicam a concretos sob as condições de produção e exposição aqui descritas, sendo necessários novos estudos e adaptações para a aplicação destes em meios de exposição diferenciados.

### 6.1 CONCLUSÕES

Desta forma, com relação ao objetivo principal, a investigação experimental, juntamente com a análise dos resultados, permitiram obter as seguintes conclusões:

- a) para os dois procedimentos de ensaio os concretos de elevada relação água/aglomerante com adição de sílica ativa apresentaram uma maior tendência à carbonatação. Em relação às misturas sem adição os concretos com relação a/agl de 0,80 apresentaram no ensaio acelerado e ao natural,

respectivamente, um incremento de 35% e 16% na profundidade de carbonatação;

- b) para os concretos com adição de sílica ativa, os dados de profundidade carbonatada do ensaio acelerado (teor de CO<sub>2</sub> de 5%) geraram um modelo de comportamento diferenciado do convencional da raiz quadrada do tempo, indicando que o ensaio, provavelmente, foi realizado em um período de tempo inferior ao necessário para a atenuação do fenômeno. Logo a extrapolação dos dados do modelo não se mostra adequada, conferindo elevadas profundidades para tempos considerados pequenos;
- c) a frente de carbonatação no ensaio natural e acelerado apresentou-se bem definida, facilitando a tomada de medidas da profundidade carbonatada.

Com relação aos objetivos secundários destacam-se as conclusões abaixo citadas:

- a) os dados de profundidade de carbonatação acelerada, obtidos na investigação experimental, foram modelados por meio de análise de regressão não-linear, conferindo o modelo apresentado na equação abaixo, com coeficiente de determinação  $r^2$  de 95,3%;

$$e_c = 0,01702 \cdot (agl)^{5,8036} \cdot t^{1,7823+ad^{1,4661}}$$

Onde:

$e_c$  = profundidade de carbonatação, para o intervalo de 0 a 26,95 (mm);

$agl$  = relação água/aglomerante do concreto, para o intervalo de 0,30 a 0,80;

$ad$  = teor de adição de sílica ativa do concreto ( $\frac{teor}{100}$ ) (intervalo de 0 a 0,20);

$t$  = tempo de exposição ao CO<sub>2</sub> (intervalo de 0 a 98) (dias);

- b) foi possível determinar os coeficientes de aceleração das misturas com relação a/ $agl$  de 0,80 com e sem adição de sílica ativa. Estes coeficientes indicaram que o fenômeno de carbonatação acelerado representou a degradação natural, acelerando o processo em 31,15 e 35,49 vezes, para o concreto com 0 e 20% de adição de sílica ativa, respectivamente;

- c) os coeficientes de carbonatação para os concretos submetidos ao ensaio natural foram determinados pela aplicação direta da equação da raiz quadrada do tempo, conferindo os coeficientes, para as misturas com 0 e 20% de adição de sílica ativa, de  $0,63 \text{ mm/semana}^{0.5}$  ( $4,54 \text{ mm/ano}^{0.5}$ ) e  $0,75 \text{ mm/semana}^{0.5}$  ( $5,39 \text{ mm/ano}^{0.5}$ ), respectivamente;
- d) os coeficientes de carbonatação para o ensaio acelerado foram obtidos pela linearização dos dados observados em função da raiz quadrada do tempo de exposição ao  $\text{CO}_2$  resultando, para a mistura de relação a/agl de 0,80 com 0, 10 e 20% de adição de sílica ativa, os coeficientes de  $4,24 \text{ mm/semana}^{0.5}$  ( $r^2 0,96$ );  $4,23 \text{ mm/semana}^{0.5}$  ( $r^2 0,66$ ) e  $6,45 \text{ mm/semana}^{0.5}$  ( $r^2 0,74$ ). Os concretos com relação a/agl de 0,60 com 5 e 15% de sílica ativa apresentaram os respectivos coeficientes de carbonatação:  $0,89 \text{ mm/semana}^{0.5}$  ( $r^2 0,67$ ) e  $1,13 \text{ mm/semana}^{0.5}$  ( $r^2 0,63$ );
- e) para os concretos com adição de sílica ativa, o ajuste dos dados de profundidade de carbonatação, em função da raiz quadrada do tempo, apresentou baixo coeficiente de determinação, mostrando-se pouco adequado para descrever o comportamento do fenômeno;
- f) a extrapolação dos coeficientes de aceleração e carbonatação requer cuidados, principalmente quando este for oriundo de ensaios acelerados ou naturais de curta duração. Os ensaios de degradação executados em períodos de curta duração podem não representar o fenômeno total de carbonatação que, com o passar do tempo, devido à colmatação dos poros do concreto pela precipitação do  $\text{CaCO}_3$ , tende a atenuar, conferindo menores profundidades de carbonatação para um determinado tempo de exposição. Logo, se o ensaio conseguir representar o fenômeno completo, o erro tende a ser menor, conferindo maior confiabilidade e aproximação do valor real da profundidade carbonatada no tempo. Além disso, esses coeficientes apresentam um maior potencial de utilização e sucesso nos modelos de previsão de vida útil;
- g) com relação à carbonatação acelerada, a elevação dos teores de adição de sílica ativa, nos concretos com relação a/agl superior a 0,45, influencia no

incremento da profundidade carbonatada. Para relações a/agl inferiores a 0,45 o teor de adição não exerce influência na profundidade carbonatada;

- h) a carbonatação do concreto é fortemente influenciada pela relação a/agl da mistura, sendo que existe uma relação a/agl limite em torno da relação a/agl 0,45. Abaixo desta zona, pode-se considerar a profundidade de carbonatação desprezível. Acima desta zona, a profundidade de carbonatação tende a se elevar com o aumento da relação a/agl e do teor de adição de sílica ativa;
- i) os dados de resistência à compressão axial dos concretos, determinados aos 28 e 180 dias, podem ser representados pelo modelo de comportamento da equação abaixo, o qual explica 94,58% dos resultados obtidos;

$$f_{cj} = \exp(4,2375 - (agl \cdot 1,7312) + (0,8171 \cdot ad)) \cdot id^{0,09685}$$

Onde:

- $f_{cj}$  = resistência à compressão do concreto (MPa);  
 $agl$  = relação água/aglomerante do concreto (intervalo de 0,30 a 0,80);  
 $ad$  = teor de adição de sílica ativa do concreto (intervalo de 0 a 20%);  
 $id$  = idade de realização do ensaio em dias (intervalo de 28 a 180);

- j) com relação à resistência à compressão, a análise estatística comprovou que a interação da relação a/agl com o teor de adição de sílica ativa mostrou-se não significativa, indicando que, independentemente da relação a/agl, a adição de sílica ativa contribui igualmente para o aumento da resistência à compressão dos concretos;
- k) a adição de sílica ativa aumenta a resistência à compressão axial dos concretos, porém para a carbonatação esse aumento não é favorável, pois o aumento do teor de adição eleva a profundidade carbonatada.

São pertinentes também as conclusões sobre a técnica de reconstituição de traço de concreto endurecido e o ambiente de exposição natural das amostras, como segue:

- a) a técnica de reconstituição parcial de traço de concreto mostrou-se viável de utilização, porém para misturas com relação 1:m (cimento:agregado graúdo e miúdo) muito próximas, este método não oferece precisão nas determinações.

A metodologia também não abrange a determinação de traços de concretos com adições, indicando a necessidade de aprimoramento da técnica;

- b) com relação ao ambiente de exposição, as amostras expostas à degradação natural encontravam-se em ambiente com UR média favorável para o avanço da carbonatação, em torno de 70%;
- c) a cidade de Porto Alegre, ambiente de exposição dos concretos à carbonatação natural, não apresenta estação seca, fato que, devido à saturação dos poros do concreto pela água da chuva, tende a gerar menores profundidades de carbonatação nos concretos; por outro lado a condição de exposição dos corpos-de-prova durante a realização do ensaio não acelerado (desprotegidos da chuva) também conduz a menores profundidades de carbonatação, devido ao fechamento dos poros pela água da chuva, que reduz substancialmente a capacidade de difusão do CO<sub>2</sub>.

Com base nas conclusões e observações oriundas da elaboração deste trabalho, verifica-se que o emprego de ensaios de durabilidade para o estudo da carbonatação e posterior previsão de vida útil das estruturas de concreto armado requer ainda muitos estudos, a fim de conferir melhor aproximação entre a situação real de degradação e os ensaios acelerados. Observou-se a carência de padronização dos procedimentos de ensaios acelerados e naturais, a fim de possibilitar a correlação entre os dados das duas abordagens e também confrontá-los com pesquisas geradas por outros pesquisadores. Só assim iniciar-se-ia a geração de uma base de dados relativos à durabilidade que então poderiam ser empregados, com uma certa segurança, para fins de previsão de vida útil de estruturas de concreto armado. Também se acredita que para fins de modelagem e, conseqüentemente, melhor aproximação da vida útil das estruturas de concreto, o ensaio de carbonatação natural ou acelerado deve ser executado até a obtenção da curva de tendência ao estacionamento do fenômeno.

Outro fato observado está associado ao comportamento do fenômeno de carbonatação acelerado, o qual difere do citado na literatura, mostrando que estudos que contribuam no ajuste e entendimento deste são de grande importância.

## 6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho tentou gerar algumas contribuições no que se refere à carbonatação de concretos com sílica ativa, expostos à degradação acelerada e não acelerada, restando ainda várias lacunas de conhecimento na área que necessitam de estudos. Com base na bibliografia pesquisada e nos resultados e observações coletados, tornam-se pertinentes as seguintes sugestões para a conclusão deste estudo:

- a) avaliar a influência do tipo de exposição das amostras (protegido ou desprotegido da chuva) na profundidade de carbonatação do concreto exposto à degradação natural;
- b) expor à degradação natural e acelerada concretos com outros tipos de adições minerais, para a obtenção dos coeficientes de aceleração;
- c) efetuar ensaios de carbonatação do concreto com períodos prolongados, a fim de obter atenuação da curva de desempenho do concreto frente à carbonatação, e utilizar os dados em modelos de previsão de vida útil;
- d) determinar os coeficientes de aceleração para concretos inseridos em outros ambientes urbanos;
- e) obter os coeficientes de aceleração para concretos sujeitos à ação conjunta de carbonatação e íons cloreto;

## REFERÊNCIAS

- ABREU, A. G. **Estudo da corrosão da armadura induzida por carbonatação em concretos com cinza volante**. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio grande do Sul, Porto Alegre.
- AHMAD, S. Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction: a review. **Cement & Concrete Composites**. v. 25, p.459–471, 2003.
- AÏTCIN, P. C. **Concreto de alto desempenho**. São Paulo: Pini, 2000, 667p.
- AÏTCIN, P. C. Durable concrete – current practice and future trends. In: CONCRETE TECHNOLOGY: PAST, PRESENT AND FUTURE, 1994. **Proceedings...** ACI SP-144, p. 85-104.
- AMARAL FILHO, E. M. Durabilidade dos concretos. In: REUNIÃO DO IBRACON, 33<sup>a</sup>, Santos, 1991. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 1991.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 201**: guide to durable concrete. ACI manual of concrete practice, Detroit, 1991, part 1, 39p.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 365**: service-life prediction - state-of-the-art report. Detroit, 2000, 44p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E 632**: standard recommended practice for developing short term accelerated test for prediction of the service life building components and materials. Philadelphia, 1978, rev. 1982. reapproved, 1996.
- ANDRADE, C.; SARRÍA, J. ALONSO, C.; Relative humidity in the interior of concrete exposed to natural and artificial weathering. **Cement and Concrete Research**. n. 29, 1999.
- ANDRADE, J. J. O. **Contribuição da vida útil das estruturas de concreto armado atacadas pela corrosão de armaduras: iniciação por cloretos**. 2001. Tese (Doutorado em Engenharia) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio grande do Sul, Porto Alegre, 256p.
- ANDRADE, J. J. O. **Durabilidade das estruturas de concreto armado: análise das manifestações patológicas nas estruturas no estado de Pernambuco**. 1997. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 150p.
- ANDRADE, J. J. O.; DAL MOLIN, D. C. C. Análise paramétrica de um modelo para a penetração de cloretos em estruturas de concreto armado. In: simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto, V, 2003.
- ANDRADE, J. J. O.; DAL MOLIN, D. C. C. Influência da sílica ativa na previsão da vida útil das estruturas de concreto armado através das técnicas de confiabilidade. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE BEHAVIOR OF DAMAGED STRUCTURES, 3<sup>a</sup>, Rio de Janeiro, 2002. **Anais...** DAMSTRUC'2002, p.11.

ARANHA, P. M. **Contribuição ao estudo das manifestações patológicas em estruturas de concreto armado na região Amazônica.** 1994. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 161p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5738:** confecção e cura de corpos de prova de concreto, cilíndricos ou prismáticos. Rio de Janeiro, dez, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6118 NB1:** projeto de estruturas de concreto – procedimento. Rio de Janeiro, 1986, rev. mar, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6502:** agregados – dimensões para uso em concreto. Rio de Janeiro, 1980.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7211:** agregados para concreto: especificações. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR MN 248:** agregados para concreto – determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, jul, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR MN 67:** concreto – determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, fev, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto: **NBR 5739:** Rio de Janeiro, jul, 1994.

BAKKER, R.F.M. Initiation period. In.: SCHIESSL, P. (Ed.) **Corrosion of Steel in Concrete:** report of technical committee 60CSC RILEM. London: Chapman & Hall Ltda, 1988, p.22-55.

BARKER, A. P.; MATTHEWS, J. D. Concrete durability specification by water/cement or compressive strength for European cement types. In: MALHOTRA, V. M. Durability of concrete International conference, 3rd, 1994. **Proceedings...**Detroit: American Concrete Institute, 1994, p. 1135-1159.

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

BENTZ, D.P. Influence of silica fume on diffusivity in cement-based materials. II. multi-scale modeling of concrete diffusivity. **Cement and Concrete Research**, Vol. 30 (7), 1121-1129, 2000.

BRANDÃO, A. M. da S.; PINHEIRO, L. M. **Qualidade e durabilidade das estruturas de concreto armado: aspectos relativos ao projeto.** Caderno de Engenharia: Engenharia de Estruturas. Universidade de São Paulo, n. 8, São Carlos, 1999, p.1-25.

BROOMFIELD, J. P. **Corrosion of steel in concrete.** London: E & FN Spon, 1998.

CABRAL, A. E. B.; ANDRADE, J. J. O.; DAL MOLIN, D. C. C. Previsão da vida útil de sistemas de reparo utilizados em estruturas de concreto armado atacadas por cloretos. In: CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE O COMPORTAMENTO DE ESTRUTURAS DANIFICADAS. Niterói. **Anais...** Rio de Janeiro: DAMSTRUC'2000.

CEUKELAIRE, L.; NIEUWENBURG, V. Accelerated carbonation of a blast-furnace cement concrete. **Cement and Concrete Research**. v. 23, p.442-452, 1993.

CHI, J. M.; HUANG, R.; YANG, C. C. Effects of carbonation on mechanical properties and durability of concrete using accelerated testing method. **Journal of Marine Science and Technology**, v. 10, n. 1, p.14-20, 2002.

COLLEPARDI, M.; FRATESI, R.; MORICONI, G.; PAURI, M. The influence of carbonation on the corrosion of steel in reinforced concrete. In: Beijing International Symposium of cement and concrete, Beijing, 1989. **Proceedings...** China, 1989.

COMITE EURO-INTERNACIONAL DU BETON. **Durable concrete structures**. Bulletin d' Information n° 183. Suecis, may 1992, 112p.

COMITE EURO-INTERNACIONAL DU BETON. **Model code 1990: design code**. Bulletin d' Information n° 203. Suecis, 1993.

COMITE EURO-INTERNACIONAL DU BETON. **New approach to durability design: an example for carbonation induced corrosion**. Bulletin d' Information n° 238. Suecis, May 1997, 138p.

CONSEIL INTERNATIONAL DU BÂTIMENT POUR LA RECHERCHE L'ÉTUDE ET LA DOCUMENTATION & REUNION INTERNATIONALE DES LABORATOIRES D'ESSAIS ET DE RECHERCHES SUR LES MATERIAUX ET LES CONSTRUCTIONS. **CIB W80/RILEM 71-PSL: on prediction of service life of building materials and components**. Rotterdam, 1983, 98p.

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

DAL MOLIN, D.C.C. **Fissuras em estruturas de concreto armado: análise das manifestações típicas e levantamento de casos ocorridos no Estado do Rio Grande do Sul**. 1988. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

DAL MOLIN, D.C.C.; VIEIRA, F.M.P; KULAKOWSKI, M.P.; STOLFO, R.M. **Pesquisa para o aprimoramento do emprego da sílica ativa *Silmix* em cimento e concreto e verificação de desempenho dos cimentos *Eldorado***. Porto Alegre; NORIE-CPGEC-UFRGS, 1997. 124p. (Relatório de pesquisa).

DHIR, R. K.; HEWLETT, P. C.; CHAN, Y. N. Near-surface characteristics of concrete: prediction of carbonation resistance. **Magazine of Concrete Research**, September, 1989.

**DURACON**. influência da ação do meio ambiente na durabilidade do concreto: Projeto Duracon, Brasil. Pesquisador responsável Maryangela Geimba de Lima. Relatório de reunião anual, outubro, 2002.

FIGUEIREDO, C. R. **Estudo da carbonatação em estruturas de concreto armado em Brasília: avaliação de pilares**. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 222p.

GUIMARÃES, A. T. C. **Vida útil de estruturas de concreto armado em ambientes marítimos**. 2000. Tese (Doutorado em Engenharia) – Departamento de Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 230p.

HAMADA, M. Neutralization (carbonation) of concrete and corrosion of reinforcing steel. In: International Symposium on the Chemistry of Cement, 5, Tokyo, 1969. **Proceedings...** Tokyo, 1969, Part III, v. II/4, p.343-369.

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

HELENE, P. R. L. **Corrosão em armaduras para concreto armado**. São Paulo: Pini, 1986.

HELENE, P. R. L. Vida útil das estruturas de concreto. In: CONGRESSO DE CONTROLE DE QUALIDADE, VI, Porto Alegre, 1997. **Anais...** Rio Grande do Sul: CONPAT, 1997.

HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: Pini, 1992. 349p.

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

HO, D.W.S.; LEWIS, R.K. The specification of concrete for reinforcement protection: performance criteria and compliance by strength. **Cement and Concrete Research**. v. 18, p.584-594, 1988.

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

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 cement paste. **Cement and Concrete Research**, v. 24, n. 6, p.1165-1176, 1994.

**INMET**. Instituto Nacional de Meteorologia. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Disponível em <http://www.inmet.gov.br.html>. Acesso em 15 jan, 2004.

ISAIA, G. C. Carbonatação do concreto: uma revisão. In: workshop sobre corrosão da armadura do concreto, Colloquia, 1999. **Anais...** São José dos campos, 1999.

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. Tese (Doutorado em Engenharia) – Departamento de Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 280p.

ISAIA, G. C.; VAGHETTI, M.; GASTALDINI, A. Carbonatação acelerada e natural de concreto com alto teor de pozolanas: um estudo preliminar. In: CONGRESSO BRASILEIRO

DO CONCRETO, 43º, Foz de Iguaçu, 2001. **Anais...** São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2001.

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

JOHN, V. M. **Avaliação da durabilidade de materiais e componentes e edificações: emprego do índice de degradação**. 1987. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio grande do Sul, Porto Alegre.

KAZMIERCZAK, C.S. **Contribuição para a análise da eficiência de películas aplicadas sobre as estruturas de concreto armado com o objetivo de proteção contra a carbonatação**. 1995. Tese (Doutorado em Engenharia) – Departamento de Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 168 p.

KHAN, M.I.; LYNSDALE, C.J. Strength, permeability, and carbonation of high-performance concrete. **Cement and Concrete Research**. n. 32, p.123–131, 2002.

KROPP, J; HILSDORF, H. K. **Performance criteria for concrete durability: State-of-the-Art Report**. Prepared by RILEM Technical Committee TC 116-PCD. RILEM: London, 1995, 329p.

KULAKOWSKI, M. P. **Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas compostos com adição de sílica ativa**. 2002. Tese (Doutorado em Engenharia) - Curso de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 180p.

LI, Z.; CHAU, C.-K. A Multipurpose Automatic Controlled System for Accelerated Concrete Durability Assessment. Department of Civil Engineering The Hong Kong University of Science and Technology, Clear Water Bay, Hong Kong. Disponível em <http://www.ce.utexas.edu/em2000/papers/CKChau.pdf> . Acesso em 10 jan, 2004.

LIANG, M. Te; QU, W.; LIANG, C.-H. Mathematical modeling and prediction method of concrete carbonation and its applications. **Journal of Marine Science and Technology**, v. 10, n. 2, p.128-135, 2002.

LIMA, I. A. **Hormigones con escorias de horno eléctrico como áridos: propiedades, durabilidad y comportamiento ambiental**. 1999. (Tesis Doctoral) - Canals I Ports departament D'Enginyeria de la Construcció, Escola Técnica Superior D'Enginyers de Camins, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 234p.

MAEKAWA, K.; ISHIDA, T.; KISHI, T. Multi-scale Modeling of Concrete Performance: integrated Material and Structural Mechanics. **Journal of Advanced Concrete Technology** v. 1, n. 2, p.91-126, July 2003.

MALHOTRA, V. M.; GARETTE, G. G.; SIVASUNDARAM, V. **Role of silica fume in concrete: a review**. In: Advances in concrete technology (Malhotra VM (ed.)). CANMET, Canada, 1994, 2 ed, p. 915±990.

MAZLOOM, M.; RAMEZANIANPOUR, A.A.; BROOKS, J.J. E. Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete. **Cement & Concrete Composites**, v. 26, p.347–357, 2004.

MEHTA, P. K. Concrete technology at the crossroads – problems and opportunities. In: **CONCRETE TECHNOLOGY: PAST, PRESENT AND FUTURE**, 1994. **Proceedings...** ACI SP-144, p. 1-30.

MEHTA, P. K. Durability of Concrete – Fifty Years of Progress? In: **SEMINÁRIO QUALIDADE E DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO**, Porto Alegre, 1993. **Anais...**, Porto Alegre: NORIE/CPGEC/UFRGS, 1993, 33p.

MEHTA, P. K.; GERWICK, B. C. **Concrete in the service of the modern world**. In: International Conference Concrete in the Service of Mankind, University of Dundee, Scotland, jun, 1996.

MEHTA, P. K.; GERWICK, B. J. Cracking corrosion interaction in concrete exposed to marine environment. **Concrete International**. v. 4, n. 10, p.45-51, 1982.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: PINI, 1994, 573p.

MEYER, A. investigation on the carbonation of concrete. In: International Symposium on the Chemistry of Cement, 5. Tokyo, 1968. **Proceedings...** Tokyo, 1969, Part III, v. II/4, p.394-401. (Supplementary Papers).

NEPOMUCENO, A. A. **Comportamiento de los morteros de reparacion frente a 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. Tesis (Doctoral) – Universidad Politecnica de Madrid, Madrid, 371p.

NEVILLE, A M. **Propriedades do concreto**. São Paulo: PINI, 1997, 828p.

NIREKI, T. “Service life design”. **Construction and building materials**, London, v. 10, n. 5, p.403-406, 1996.

NIREKI, T. Examination of durability test methods for building materials based on performance evolution. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE ON DURABILITY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS**, 1. Ottawa, 1978. **Proceedings...** Philadelphia, ASTM, 1980. p. 119-1130. (ASTM special technical publication, 691).

OKOCHI, H.; KAMEDA, H.; HASEGAWA, S. I.; SAITO N.; KUBOTA, K.; IGAWA, M. Deterioration of concrete structures by acid deposition an assessment of the role of rainwater on deterioration by laboratory and field experiments using mortar specimens. **Atmospheric Environment**, v. 34, p.2937-2945, 2000.

PAPADAKIS, V. G.; VAYENAS, C. G. FARDIS, M. N. Experimental investigation and mathematical modeling of the concrete carbonation problem. **Chemical Engineering Science**, v. 46, n. 516, p.1333-1338, 1991a.

PAPADAKIS, V. G.; VAYENAS, C. G.; FARDIS, M. N. Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation. **ACI Materials Journal**, n. 88, p.363-373, jul./aug., 1991b.

PAPADAKIS, V. G.; VAYENAS, C. G.; FARDIS, M. N. Reaction engineering approach to the problem of concrete carbonation. **Journal of the American Institute of Chemical Engineers**, v. 35, n. 10, p.1639-1650, 1989.

PAPADAKIS, V.G. Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress. **Cement and Concrete Research**, v.30, p.291-299, 2000.

PARROT, L. J. **A review of carbonation in reinforced concrete**. C&CA – Cement and concrete association, 1987. 42p.

PARROT, L. J. Design for avoiding damage due to carbonation-induced corrosion. INTERNATIONAL CONGRESS ON DURABILITY OF CONCRETE. **Proceedings...** Nice, 1991.

PULIDO, J. E., JACOBS, T. L., PRATES DE LIMA, E. C. Structural reliability using Monte Carlo simulation with variance reduction techniques on elastic-plastic structures. **Computer and Structures**, p. 419-430, 1992.

QUARTICIONI, V. A. **Reconstituição de traço de Argamassas: atualização do método IPT**. 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia da Construção Civil, São Paulo, 188p.

RAMEZANIANPOUR, A. A.; TARIGHAT, A.; MIYAMOTO, A. **Concrete carbonation modeling and monte carlo simulation method for uncertainty analysis of stochastic front depth**. Disponível <http://donald.lib-e.yamaguchi-u.ac.jp/hokoku/502/09.pdf>. Acesso em 01 de outubro de 2003.

**REDE** de Estações de Climatologia Urbana de Rio Grande do Sul. Dados registrados da Estação de Observação Meteorológica de São Leopoldo, RS. Técnico responsável Meteorologista Eugenio Hackbart (CREA-RS 42376). São Leopoldo, 2004.

REUNION INTERNATIONALE DE LABORATOIRES D'ESSAIS ET MATERIAUS (RILEM). Concrete durability: an approach towards performance testing. Rilem Recommendation CPC-18. **Materials and Structures**, n.102, p.435-440, nov-dec 1984.

ROY, S.; POH, K.; NORTHWOOD, D. Durability of concrete accelerated carbonation and weathering studies. **Building and Environment**. v. 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, 1995.

SAETTA, A.V.; SCHREFLER, B.A.; VITALINI, R.V. The carbonation of concrete and the mechanism of moisture, heat and carbon dioxide flow through porous materials. **Cement and Concrete Research**, v.26, n.10, p.1479-1484, 1993.

SAETTA, A.V.; VITALIANI, R. V. Experimental investigation and numerical modeling of carbonation process in reinforced concrete structures. Part I: Theoretical formulation. **Cement and Concrete Research**. v. 34, p.571-579, 2004.

SATO, N. **Descobrimos com o tempo**. Entrevista a Revista Habitare: construção civil. Disponível em [http://habitare.infoha.org.br/revista/materias/7\\_tempo/index.htm](http://habitare.infoha.org.br/revista/materias/7_tempo/index.htm). Acesso em 22 fev, 2004. 2p.

SECRETARIA MUNICIPAL DO MEIO AMBIENTE – SEMA. **A qualidade do ar em Porto Alegre**. Manuel Luiz Leite Zurita e Alessandra Moschem Tolfo (Org.). Porto Alegre, 2000. 92p.

SENTLER, L. Service live predictions of concrete structures. **Durability of Building Materials**, Amsterdam, v. 5, p.81-98, 1987.

SILVA FILHO, L. C. P. da. **Durabilidade do concreto à ação de sulfatos: análise do efeito da permeabilidade de água e da adição de microssílica**. 1994. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio grande do Sul, Porto Alegre, 143p.

SILVA, T. J. **Predicción de la vida útil de forjados unidireccionales de hormigón mediante modelos matemáticos de deterioro**. 1998. Tesis (Doctoral) – Universitat Politècnica de Catalunya, Bracelona.

SILVA, V. M. **Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas executados com e sem adição de sílica ativa**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 185p.

SMOLCZYK, H.G. In: The International Symposium on the Chemistry of Cement, V. Tokyo, 1969. **Proceedings...** Tokyo, 1969, Part III, v. II/4, p.369-384.

SPIEGEL, M. R. **Estatística**. Tradução e revisão técnica Pedro Consentino, ed 3. São Paulo: Makron Books, 1993, p.369.

STEFFENS, A.; DINKLER, D.; AHRENS, H. Modeling carbonation for corrosion risk prediction of concrete structures. **Cement and Concrete Research**, v. 32, p.935–941, 2002.

SYBDUCAT D'ETUDES INTERINDUSTRIES-CONSTRUCTION; CENTER SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DE LA CONSTRUCTION; BUREAU DE COCNTROLE POUR LA SECUTITE DE LA CONSTRUCTION. In: Bâtiment dans son ensemble: **Guide des performances du bâtiment**. Bruxelles, 1979.

TESSARI, R. **Estudo da capacidade de proteção de alguns tipos de cimento nacionais, em relação à corrosão de armaduras sob a ação de íons cloretos**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 95p.

THOMAS, M.D.A.; MATTHEWS, J.D. Carbonation of fly ash concrete. **Concrete and Research**. v. 44, p.160, 1992.

TORALLES CARBONARI, B. M.; CARBONARI, G. **Concreto de alto desempenho: do laboratório a obra**. Mini curso. Florianópolis, abr. 1998, 76p.

TUUTTI, K. **Corrosion of Steel in Concrete**. Swedish Cement and Concrete Research Institute. Stockholm, Suecis, 1982. 30p.

UOMOTO, T.; TAKADA, Y. Factors affecting concrete carbonation rate. **Durability of Building Materials and Components**. v. 6, 1993.

VAGHETTI, M. A. O. **Os efeitos da cinza volante com cinza de casca de arroz ou sílica ativa sobre a carbonatação de concreto de cimento Portland**. 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 135p.

VAGHETTI, M. A. O.; ISAIA, G. C.; GASTALDINI, A. Influência da pré-cura ao ar dos concretos com pozolanas na carbonatação acelerada. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 43º, Foz de Iguaçu, 2001. **Anais...** São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2001, p.188.

VENQUIARUTO, S. D. **A influência da finura e do teor de adições minerais na carbonatação do concreto**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 135p.

VERDÚ, F. A. **Curso sobre aperfeiçoamento de materiais de construção**. Universidade Federal do Rio grande do Sul, Porto Alegre, 1963, p.232.

VIEIRA, F. M. P. **Contribuição ao estudo da corrosão de armaduras em concretos com adição de sílica ativa**. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia) – Curso de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 246p.