

Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**Estimativa da carbonatação natural de materiais cimentícios a partir de ensaios acelerados e de modelos de predição**

**Cristiane Pauletti**

Porto Alegre  
2009

CRISTIANE PAULETTI

**ESTIMATIVA DA CARBONATAÇÃO NATURAL DE  
MATERIAIS CIMENTÍCIOS A PARTIR DE ENSAIOS  
ACELERADOS E DE MODELOS DE PREDIÇÃO**

Tese 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 Doutor em Engenharia. Orientação: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Denise Carpena Coitinho Dal Molin e Prof. Dr. Jean-Pierre Ollivier (Co-Tutela França). Coorientação: Prof. Dr. Claudio de Souza Kazmierczak e Prof. Dr. Jérôme Verdier (Co-Tutela França)

Porto Alegre  
2009

**CRISTIANE PAULETTI**

**ESTIMATIVA DA CARBONATAÇÃO NATURAL DE  
MATERIAIS CIMENTÍCIOS A PARTIR DE ENSAIOS  
ACELERADOS E DE MODELOS DE PREDIÇÃO**

Esta Tese de Doutorado foi julgada adequada para a obtenção do título de DOUTOR EM ENGENHARIA, na área Construção, 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, 30 de outubro de 2009

Prof.<sup>a</sup> Denise Carpena Coitinho Dal Molin  
Dr.<sup>a</sup> pela Universidade de São Paulo  
Orientadora

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

Prof. Jean-Pierre Ollivier  
Dr. pelo Institut National des Sciences Appliquées  
Orientador Convênio Co-Tutela, França

Prof. Jérôme Verdier  
Dr. pela Université Paul Sabatier  
Coorientador Convênio Co-Tutela, França

Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho  
Coordenador do PPGEC/UFRGS

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof.<sup>a</sup> Maria Alba Cincotto (USP)**  
Dr.<sup>a</sup> pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

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

**Prof. Samir Maghous (UFRGS)**  
Doutor pela École Nationale des Ponts et Chaussées

Dedico este trabalho à minha família,  
o meu porto seguro

## **AGRADECIMENTOS**

Ao papai do céu, o Deus Todo Poderoso, que me ilumina e protege, pela saúde e força. Sei que quando uma porta se fecha, uma janela se abre e, se algo não aconteceu quando eu esperava era porque algo melhor estava reservado.

A uma instituição chamada família, e no meu caso, constituída pelo pai Elio, mãe Maria, mana Solange e mano Julio. Vocês não fazem idéia do orgulho que tenho de pertencer a esta família, uma verdadeira fortaleza, onde sei que sempre encontrarei apoio e para onde sei que sempre poderei voltar. Muito, muito obrigada por tudo, amo vocês do fundo do meu coração!

À professora Denise Dal Molin, uma orientadora incrível, que ultrapassou a fronteira do profissional e se tornou uma amiga. Uma pessoa capaz de ver muito longe, de aliviar o peso das tarefas, de extrair o melhor de qualquer coisa. Sempre disse que quando eu crescer, quero ser como ela!

Ao professor Claudio Kazmierczak, um grande mestre, que me deu o primeiro voto de confiança nos caminhos da ciência, que me incentivou e apoiou sempre, sendo um dos grandes responsáveis pelo que me tornei como profissional. Pela orientação, carinho e amizade, muito obrigada!

Ao professor Paulo Monteiro, que com sua excelente visão do mundo acadêmico me apresentou ao professor Olliver.

Ao professor Jean-Pierre Ollivier que muito prontamente me aceitou para ser sua orientanda durante o doutorado sanduíche, no INSA de Toulouse, e, que mais tarde propôs a dupla titulação e me orientou no processo de co-tutela. Pelos inestimáveis conhecimentos transmitidos, pela paciência, por ter me acolhido como a uma filha, pela amizade, je vous remercie!

Ao professor Jérôme Verdier, que aceitou coorientar este trabalho em Toulouse, pelo dinamismo, pelos ensinamentos, pela orientação e, principalmente, pela amizade que levarei para sempre, merci beaucoup!

Aos relatores deste trabalho, professora Maria Alba Cincotto e professor Geraldo Cechella Isaia, por sua apreciação e disponibilidade, obrigada por terem aceitado o convite e realizado os pareceres em duas línguas. Pela participação na banca e pelas contribuições dadas ao trabalho, muito obrigada. Também ao professor Samir Maghous, por suas contribuições e participação na defesa deste trabalho.

Às professoras e amigas Ângela Masuero, Aguida e Marlova, pela troca de idéias de sempre, pela disposição e inestimável ajuda, pela força e amizade de vocês, muito obrigada.

Aos professores do mestrado e doutorado Campagnolo, Carin, Carla ten Caten, Elvira, Formoso, Greven, Ronaldo, Ruth, Ruy e Sattler, pelos conhecimentos transmitidos. Ao professor José Luis Duarte Ribeiro, pelas importantes contribuições na análise estatística da primeira etapa deste trabalho.

Ao professor Luiz Carlos, mais que um coordenador, um líder, de extrema competência, que contagia a todos com seu entusiasmo. Obrigada pelo carinho, apoio e amizade.

Aos demais professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS, pelos auxílios recebidos, e aos funcionários do NORIE, pela disponibilidade em ajudar no que fosse possível. Às secretárias: Aida, Ana Luiza, Carmen, Liliani e Rita, obrigada por tudo, sempre!

Ao Ederson e ao Airton, pela ajuda prestada no laboratório do NORIE. Ao Seu Fontes, do LEME, muito obrigada!

Aos auxiliares de pesquisa da UFRGS, hoje engenheiros, Anderson, Andreas e Roger, que colaboraram nas moagens de material, medições, leituras de carbonatação e demais atividades realizadas em laboratório.

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

Aos que foram laboratoristas do LMC da UNISINOS, no mestrado: Décio, Marcos Paulo, Letícia e João; no doutorado: Daiana e Letícia, pela ajuda em todas as etapas deste trabalho, pela amizade desenvolvida ao longo desses anos.

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

Ao Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, por ter me recebido e aceito como doutoranda.

Ao Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions de Toulouse, por ter me acolhido, instalado e permitido realizar parte deste trabalho em suas dependências.

Aos laboratoristas do LMDC, Frédéric Leclerc, Guillaume Lambaré, Marc Bégué, Maud, Simone Julien, obrigada por todo auxílio.

Aos professores do INSA e UPS, Gilles Escadeillas, Gilles Klysz, Ginette Arliguie, Martin Cyr, Michel Mouret e, em especial, ao Alain Sellier, muito obrigada.

Aos órgãos de fomento à pesquisa, CAPES e CNPq, pelo apoio financeiro. Ao CNPq também pela bolsa sanduíche.

Ao Programa Alban, que abriu portas e mudou minha vida, fazendo com que eu aprendesse mais uma língua, conhecesse outra cultura, fizesse novos contatos. Não promoveu apenas a tese, mas a minha vida como um todo, tudo isso é parte desse doutorado.

Aos colegas e amigos do INSA: Samir, Jérôme, Laurie, Marie, Guillaume, Pierre, Fabrice, Camille, Franck, Sam, Fidy, Batian, Oly, Youcef, Steves, Antoine, Pauline, Paco, Xiao Xiao, Thomas, Rackel, Nicolas Hyvert, Xuan Son, entre outros, pelo carinho, pelo auxílio, pelas festas, muito obrigada.

Amigos que conheci em Toulouse: Dhanya, Nga, Ida, Bogdan, Andreea, Hélène, Nathalie, Eugenie, Aurélien, Estèlle, Maria Kuznetsova, Jean-Louis, Samuel, Adrien, muitos de vocês eu levarei para o resto da vida. Aos brasileiros que foram minha casa em Toulouse: Américo, Alfredo, Tadeu, Thalita, Tiago, Camilla, João Francisco, João Cláudio, João Ramalho, Vitor, Jorge, Gustavo, Leonardo, Cyntia, Zeca, Fernando, Murilo, Caio, Diego, Vivi, vocês foram minha família na primeira estada em Toulouse, muito obrigada por tudo, do fundo do meu coração.

Um agradecimento especial ao Leonardo Noletto, um grande companheiro e amigo, que vou levar para toda vida. Obrigada pelo apoio, casa, carinho, incentivo e amizade, sempre!

Aos meus colegas e amigos, sejam eles do NORIE ou não: César, Fábio, Fabrício, Manuel, Tiago, Alexandre, Ângela Azevedo, Antônio Eduardo, Bernardo, Elaine, Eugen (*in memoriam*), Fernanda Leite, Lu Miron, Paulo Jorge, Paulo Salvador, Paulo Sérgio, Renato, Simone, Amanda, Santiago, Clarissa, Bruno, Fabi, Isatto, Lisi, Ju Brito, Letícia, Adriana, Ju Senisse, Carina, Laís, Gisele, Jairo Andrade, Camila Simonetti, Lu Caetano, Carol Kehl, Eugênia, Rosana, Pati Lovato, Pati Tillmann, Lu Marcondes, Mauro, Anderson, Camila, pelo carinho e pelos laços de amizade.

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

Ao Jairo Wolf e à Edna, parceiros no entendimento desse fenômeno tão complexo, pelas discussões, parceria e principalmente pela amizade de vocês, muito obrigada.

Aos amigos mais que especiais, que tiveram um papel fundamental nesses anos de tese: Daniel, Natália, Aline Barroso, Ana Paula, Geilma, Franciele, Lu Cordeiro, Lucília, Aline Morales, sem vocês o doutorado teria sido muuuuuito mais difícil. Obrigada por compartilharem comigo momentos felizes e tristes, pelo bem que cada um de vocês me proporciona, nossa amizade é eterna!

Aos mais recentes amigos do GRID: Ale, Ju, Christa, Patrick, Mari, Fábio, Bressani, Andréa, Eloisa, Dudu...vocês são pessoas excepcionais e independente do rumo que nossas vidas tomarem, sempre terei vocês no meu coração.

Aos amigos que conquistei vida afora, Arlete, Claudinha Kunst, Iraci, Lisete, Lu Mendel, Onilde, Serginho, pelo incentivo e apoio de todas as horas, pela amizade, maior bem que vocês me proporcionam. Ao Vinícius Sterque da Silva e família, pelo apoio e incentivo transmitidos nas fases iniciais deste trabalho, o meu muito obrigada!

À minha sempre amiga Yuriko, e meu afilhado, Pedro Henrique, mesmo distantes vocês estão sempre bem perto, dentro do meu coração. Obrigada pelos imensos momentos de alegria, pelo apoio e por acreditarem em mim, amo vocês.

Às empresas que fizeram doações para este estudo: Cimentos Votorantim, pelo cimento e cinza volante utilizados nos experimentos; Cimentos Cimpor, pelos corpos moedores; Duratex S.A. (Deca), pelas esferas de alumina; Café Iguaçu, pelas embalagens utilizadas no procedimento da RILEM, Chellmar Embalagem Moderna Ltda, pelas embalagens empregadas no condicionamento em sala climatizada. À Tumelero da Rua Conceição, pelo período em que as amostras ficaram expostas em suas dependências. Muito obrigada!

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

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

Cristiane



“Você não pode provar uma definição. O que você pode  
fazer é mostrar que ela faz sentido”  
*Albert Einstein*

## RESUMO

PAULETTI, C. Estimativa da carbonatação natural de materiais cimentícios a partir de ensaios acelerados e de modelos de predição. 2009. Tese de Doutorado em co-tutela (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre e École Doctorale Mécanique, Energétique, Génie Civil et Procédés, Institut National des Sciences Appliquées, Toulouse.

A carbonatação, fenômeno físico-químico de reação entre o dióxido de carbono da atmosfera e os produtos da hidratação do cimento, reduz a alcalinidade do concreto, destruindo a película passivadora que envolve o aço, podendo dar condições para a iniciação da corrosão das armaduras. Devido ao tempo requerido para que a reação ocorra em condições naturais, são utilizados ensaios acelerados. No entanto, não há padronização para estes ensaios e existe a dificuldade de se transpor os resultados dessas pesquisas para as condições reais. Este trabalho tem por objetivo estimar a carbonatação natural a partir de ensaios acelerados e de modelos de predição, avaliando possíveis distorções que possam ser causadas pelo processo de aceleração, como pela intervenção dos parâmetros que constituem os modelos, através da comparação com os resultados experimentais. Foram realizados ensaios de carbonatação natural e acelerada, calculados os coeficientes de aceleração a partir dos dados experimentais, e utilizados dois modelos de predição, sendo um complexo e outro simplificado. Para a parte experimental foram empregadas argamassas preparadas com dois tipos de cimento (CP I-S e tipo CP IV) e três relações água/cimento (0,40, 0,55 e 0,70). Para as amostras dos ensaios acelerados de carbonatação foram utilizados dois tempos de cura (7 e 28 dias), dois tipos de condicionamento (em sala climatizada e conforme recomendações da RILEM) e, dois percentuais de dióxido de carbono (6% e 100% de CO<sub>2</sub>). Para os ensaios naturais foram adotados três tempos de cura (7, 14 e 28 dias) e três ambientes de exposição ao CO<sub>2</sub> atmosférico, sendo um deles um ambiente climatizado (20°C e UR=70%), protegido das intempéries e outros dois externos, não abrigados das chuvas. Os resultados obtidos indicam que o comportamento das amostras condicionadas em sala climatizada e carbonatadas com 6% de CO<sub>2</sub> são as que mais se assemelham às condições naturais de ensaio. O modelo complexo de carbonatação pode substituir os ensaios de carbonatação, mas exige muitos parâmetros de entrada, difíceis de serem medidos e, portanto, difícil de ser utilizado. O modelo simplificado representou bem os resultados acelerados e naturais e foi adaptado para o caso de cimentos pozolânicos.

Palavras-chave: normalização, carbonatação, ensaio acelerado, ensaio natural, condicionamento, concentração de CO<sub>2</sub>, modelagem.

## ABSTRACT

PAULETTI, C. **Estimate of natural carbonation of cement materials based on accelerated tests and prediction models**. 2009. Tese de Doutorado em co-tutela (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre e École Doctorale Mécanique, Energétique, Génie Civil et Procédés, Institut National des Sciences Appliquées, Toulouse.

Carbonation, a physicochemical phenomenon with a reaction between atmospheric carbon dioxide and cement hydration products, reduces alkalinity in concrete, and can destroy the passivating film that envelops steel, creating the conditions to begin framework corrosion. Accelerated tests are used due to the time needed for the reaction to occur under natural conditions. However these tests are not standardized and it is difficult to transpose the results of these research studies to real-life conditions. The purpose of this work is to estimate natural carbonation based on accelerated tests and prediction models, verifying whether the tendencies of the natural test are maintained in the accelerated tests and how the parameters that constitute the models intervene in the response, as compared to the experimental results. Natural and accelerated carbonation tests were performed, the acceleration coefficients calculated based on experimental data, and two prediction models were used, one of them complex and the other simplified. For the experimental part, cement mortars prepared with two types of cement (CP I-S and type CP IV) were used, and three water/cement ratios (0.40, 0.55 and 0.70). For the samples of the accelerated carbonation tests, two curing times were used (7 and 28 days), two types of pre-conditioning (in an air conditioned room and according to recommendations from RILEM), and two percentages of carbon dioxide (6% and 100% of CO<sub>2</sub>). Three curing times (7, 14 and 28 days) were adopted for the natural tests, and three environments of exposure to atmospheric CO<sub>2</sub>, one of them an air conditioned environment (20°C and UR=70%), protected from the weather, and two other external ones not sheltered from the rain. The results obtained indicate that the behavior of the pre-conditioned samples in an air conditioned room, and carbonated with 6% of CO<sub>2</sub> is most similar to the natural testing conditions. The complex carbonation model tested at work can replace the carbonation tests, but requires many input parameters that are difficult to measure, and therefore complicated to use. The simplified carbonation model used provided a good representation of the carbonation results observed in the experimental tests and was adapted to the case of pozzolanic cements.

Key-words: normalization, carbonation, accelerated tests, natural tests, pre-conditioning, CO<sub>2</sub> concentration, modeling.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>16</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>21</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>27</b>
1.1 JUSTIFICATIVA .....	28
1.2 ORIGINALIDADE .....	31
1.3 OBJETIVO .....	32
1.4 ESTRUTURA DA TESE .....	32
<b>2. CARBONATAÇÃO .....</b>	<b>34</b>
2.1 A CARBONATAÇÃO DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS.....	34
2.1.1 Carbonatação dos hidratos .....	35
2.1.2 Carbonatação dos anidros .....	44
2.1.3 Características dos carbonatos de cálcio formados.....	45
2.2 CONSEQUÊNCIAS DA CARBONATAÇÃO.....	47
2.3 OS PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM A CARBONATAÇÃO... 50	
2.3.1 Características do material.....	51
2.3.2 Condições ambientais .....	52
2.3.3 Condições do ensaio .....	58
2.3.4 Parâmetros para modelagem.....	71
2.4 FORMAS DE MEDIÇÃO DA CARBONATAÇÃO .....	72
2.5 PESQUISAS EM CARBONATAÇÃO .....	76
2.5.1 Carbonatação natural .....	76
2.5.2 Carbonatação acelerada .....	77
2.5.3 Resumo sobre as condições das pesquisas de carbonatação.....	78
2.5.4 Principais conclusões do trabalho de Pauletti (2004).....	86
2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE A CARBONATAÇÃO.....	89
<b>3. PROGRAMA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>91</b>
3.1 VARIÁVEIS DO ENSAIO DE CARBONATAÇÃO .....	92
3.1.1 Fatores relacionados à natureza do ensaio .....	92

3.1.2	Condições ambientais .....	94
3.1.3	Com relação ao material .....	95
3.1.4	Resumo do planejamento dos ensaios de carbonatação.....	97
3.2	<b>MATERIAIS</b> .....	99
3.2.1	Cimento.....	99
3.2.2	Cinza Volante.....	102
3.2.3	Agregado Miúdo .....	104
3.2.4	Água.....	104
3.3	<b>MISTURA DAS ARGAMASSAS</b> .....	104
3.4	<b>MÉTODOS</b> .....	106
3.4.1	Carbonatação natural .....	106
3.4.2	Carbonatação Acelerada .....	108
3.4.3	Ensaio de Carbonatação Acelerada.....	112
3.4.4	Procedimentos para obtenção dos resultados de profundidade de carbonatação.....	114
3.4.5	Ensaio complementares de microestrutura.....	118
3.4.6	Resistência à Compressão Axial.....	121
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>123</b>
4.1	<b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS</b> .....	124
4.1.1	Carbonatação natural .....	125
4.1.2	Carbonatação acelerada .....	127
4.2	<b>ANÁLISE CONJUNTA DOS RESULTADOS</b> .....	131
4.2.1	Influência isolada do tempo de cura .....	132
4.2.2	Influência isolada do tipo de cimento .....	135
4.2.3	Influência isolada da relação a/c .....	137
4.2.4	Interação tempo de cura e tipo de cimento .....	141
4.2.5	Interação tempo de cura e relação a/c.....	145
4.2.6	Interação tipo de cimento e relação a/c.....	148
4.3	<b>COEFICIENTES DE ACELERAÇÃO</b> .....	151
4.4	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE OS RESULTADOS DE PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO</b> .....	153
4.5	<b>ENSAIOS COMPLEMENTARES DE MICROESTRUTURA</b> .....	155
4.5.1	Difração de raios X.....	155
4.5.2	ATG e ATD .....	158

4.5.3	Porosidade por intrusão de mercúrio .....	162
4.5.4	Considerações finais sobre os ensaios de microestrutura .....	166
4.6	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO .....	167
4.7	CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE OS RESULTADOS OBTIDOS ... .....	170
<b>5. MODELAGEM DA CARBONATAÇÃO.....</b>		<b>172</b>
5.1	REVISÃO DOS MODELOS DE CARBONATAÇÃO.....	173
5.1.1	O modelo de Ying-Yu e Qui-Dong (1987).....	174
5.1.2	O modelo de Papadakis, Vayenas e Fardis (1989, 1991b) .....	175
5.1.3	O modelo de Bakker (1993) citado por Miragliota e Rougeau (2002).....	177
5.1.4	O modelo do CEB (1997) .....	179
5.1.5	Conclusões sobre os modelos de carbonatação descritos da literatura.....	180
5.2	O MODELO DE DUPRAT, SELLIER E NGUYEN (2006).....	181
5.2.1	As entradas do modelo.....	184
5.2.2	Resultados das simulações.....	186
5.2.3	Conclusões sobre o modelo de Duprat, Sellier e Nguyen (2006).....	188
5.3	O MODELO DE CARBONATAÇÃO DE HYVERT (2009).....	188
5.3.1	Apresentação do modelo de Hyvert.....	189
5.3.2	Adaptações do modelo simplificado.....	197
5.3.3	Aplicação do modelo aos dados desta pesquisa.....	201
5.3.4	Proposta de melhoria do modelo .....	214
5.3.5	Utilização prática do modelo .....	218
5.3.6	Validação do modelo modificado com concretos.....	220
5.3.7	Resumo das modificações feitas no modelo inicial .....	222
5.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE OS MODELOS.....	222
<b>6. CONCLUSÕES GERAIS.....</b>		<b>225</b>
6.1	CONSIDERAÇÕES SOBRE OS ENSAIOS EXPERIMENTAIS DE CARBONATAÇÃO.....	226
6.2	CONSIDERAÇÕES SOBRE OS MODELOS DE PREDIÇÃO .....	228
6.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	229
6.4	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	230
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>		<b>232</b>

<b>APÊNDICE A – Data de início e período de duração, de cada etapa dos procedimentos que antecederam os ensaios acelerados de carbonatação .....</b>	<b>246</b>
<b>APÊNDICE B – Massa após cura e ao final da secagem em sala climatizada (20±1°C, UR=70±5%), dos grupos 1 e 2.....</b>	<b>248</b>
<b>APÊNDICE C – Parâmetros da etapa de condicionamento, conforme recomendações da RILEM (1999), no TC 116-PCD.....</b>	<b>251</b>
<b>APÊNDICE D – Massa após cura, Δm calculado, massa a ser atingida e massa final atingida ao término do condicionamento conforme os procedimentos da RILEM, dos grupos 1 e 2 .....</b>	<b>253</b>
<b>APÊNDICE E – Comparativo entre os resultados experimentais de profundidade de carbonatação e os obtidos pela modelagem matemática para cada uma das condições de exposição e variáveis estudadas .....</b>	<b>260</b>
<b>APÊNDICE F – Resultados de profundidade de carbonatação natural para cura de 7, 14 e 28 dias .....</b>	<b>264</b>
<b>APÊNDICE G – Resultados das profundidades de carbonatação acelerada .....</b>	<b>271</b>
<b>APÊNDICE H – Resultados da resistência à compressão axial aos 7, 28 e 63 dias de idade.....</b>	<b>280</b>
<b>ANEXO A – Dados de precipitação, umidade relativa e temperaturas médias mensais, estação INMET Porto Alegre, para o período de 2003 a 2008.....</b>	<b>286</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ilustração da carbonatação do $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (baseada em: Thiery (2005)) .....	36
Figura 2 – Diagrama de equilíbrio termodinâmico das fases hidratadas do cimento com o $\text{CO}_2$ (baseada em: Chaussadent (1997)) .....	38
Figura 3 – Impacto da carbonatação no balanço de massa de modelo de pasta de cimento a $25^\circ\text{C}$ e umidade relativa saturada (baseada em: Glasser e Matschei (2007)).....	40
Figura 4 – Detalhe da zona inicial apresentada na figura 3 (baseada em: Glasser e Matschei (2007)) .....	41
Figura 5 – Consumo das diferentes fases carbonatadas para o cimento Portland comum (baseada em: Castellote <i>et al.</i> (2008)) .....	43
Figura 6 – Redução do pH com o avanço da carbonatação (adaptada de: Glasser e Matschei, (2007)) .....	47
Figura 7 – Água liberada e consumida devido à carbonatação do modelo de pasta de cimento hidratada (baseada em: Glasser e Matschei (2007)).....	49
Figura 8 – Fatores que influenciam a carbonatação (baseada em: Pauletti, Possan e Dal Molin (2007)) .....	51
Figura 9 – Influência da concentração de $\text{CO}_2$ nos coeficientes de carbonatação (baseada em: Rougeau (1997)).....	55
Figura 10 – Aumento na massa de amostras submetidas à carbonatação acelerada (baseada em: Castellote <i>et al.</i> (2009)) .....	56
Figura 11 – Resultados da carbonatação de argamassas de cimento CP I em diferentes concentrações de $\text{CO}_2$ (baseada em: Hyvert (2009)).....	57
Figura 12 – profundidade de carbonatação em concretos com difusão do $\text{CO}_2$ em uma direção (1D), duas direções (2D) e três direções (3D) (Adaptada de: Chen <i>et al.</i> , 2008).....	59
Figura 13 – Esquema ilustrativo das etapas do condicionamento especificado pela RILEM (1999) .....	62
Figura 14 – Efeito isolado do tempo de cura submersa na profundidade de carbonatação.....	87
Figura 15 – Efeito isolado do tipo de cimento na profundidade de carbonatação.....	87
Figura 16 – Efeito isolado da relação a/c na profundidade de carbonatação .....	87
Figura 17 – Efeito isolado do tipo de condicionamento na profundidade de carbonatação.....	87
Figura 18 – Efeito isolado do percentual de $\text{CO}_2$ na profundidade de carbonatação .....	88
Figura 19 – Efeito isolado do tempo de condicionamento na profundidade de carbonatação .....	88
Figura 20 – Esquema ilustrativo das etapas desenvolvidas no presente trabalho .....	92
Figura 21 – Esquema ilustrativo dos ensaios de carbonatação natural e acelerada da presente pesquisa .....	98
Figura 22 – Distribuição granulométrica do cimento CP I.....	100
Figura 23 – Distribuição granulométrica do cimento tipo CP IV.....	101



Figura 24 – Difratoograma de raios X do cimento CP I.....	101
Figura 25 – Distribuição granulométrica da cinza volante após moagem.....	102
Figura 26 – Difratoograma de raios X da cinza volante.....	103
Figura 27 – Corpos-de-prova expostos em ambiente de ensaio natural externo (Ext <sub>U</sub> ).....	107
Figura 28 – Corpos-de-prova expostos em ambiente de ensaio natural interno (sala climatizada) .....	107
Figura 29 – Disposição das amostras para acondicionamento em sala climatizada .....	108
Figura 30 – Esquema de montagem da câmara de carbonatação a 6% de CO <sub>2</sub> (Baseada em: Abreu (2004)).....	113
Figura 31 – Ventiladores da parte superior da câmara de 6% de CO <sub>2</sub> .....	113
Figura 32 – Imagem digital aberta no programa de análise .....	115
Figura 33 – Imagem com a área não carbonatada delimitada pelas linhas traço ponto, ponto ....	116
Figura 34 – Imagem com delimitação das áreas carbonatadas em cada uma das laterais (linhas contínuas) .....	116
Figura 35 – Imagem com medida da distância (linhas tracejadas), limitada pelas linhas traço, ponto, ponto.....	117
Figura 36 – Imagem com medida da maior e da menor profundidade de carbonatação para cada uma das laterais (linhas pontilhadas) .....	117
Figura 37 – Esquema de corte das amostras não carbonatadas, submetidas à porosimetria por intrusão de Hg.....	120
Figura 38 – Esquema de corte das amostras carbonatadas, submetidas à porosimetria por intrusão de Hg.....	121
Figura 39 – Esquema ilustrativo da divisão dos ensaios acelerados para a elaboração dos modelos matemáticos e análise dos resultados.....	129
Figura 40 – Efeito isolado do tempo de cura na evolução da ec com o tempo para condição natural externo .....	132
Figura 41 – Efeito isolado do tempo de cura na evolução da ec com o tempo para condição natural interno.....	132
Figura 42 – Efeito isolado do tempo de cura na evolução da ec com o tempo para condição SC6 .....	132
Figura 43 – Efeito isolado do tempo de cura na evolução da ec com o tempo para condição SC100 .....	132
Figura 44 – Efeito isolado do tempo de cura na evolução da ec com o tempo para condição R6 .....	133
Figura 45 – Efeito isolado do tempo de cura na evolução da ec com o tempo para condição R100 .....	133
Figura 46 – Efeito isolado do tipo de cimento na evolução da ec com o tempo para condição natural externo .....	135

Figura 47 – Efeito isolado do tipo de cimento na evolução da ec com o tempo para condição natural interno.....	135
Figura 48 – Efeito isolado do tipo de cimento na evolução da ec com o tempo para condição SC6 .....	136
Figura 49 – Efeito isolado do tipo de cimento na evolução da ec com o tempo para condição SC100 .....	136
Figura 50 – Efeito isolado do tipo de cimento na evolução da ec com o tempo para condição R6 .....	136
Figura 51 – Efeito isolado do tipo de cimento na evolução da ec com o tempo para condição R100 .....	136
Figura 52 – Efeito isolado da relação a/c na evolução da ec com o tempo para condição natural externo .....	138
Figura 53 – Efeito isolado da relação a/c na evolução da ec com o tempo para condição natural interno.....	138
Figura 54 – Efeito isolado da relação a/c na evolução da ec com o tempo para condição SC6... ..	138
Figura 55 – Efeito isolado da relação a/c na evolução da ec com o tempo para condição SC100 .....	138
Figura 56 – Efeito isolado da relação a/c na evolução da ec com o tempo para condição R6.....	138
Figura 57 – Efeito isolado da relação a/c na evolução da ec com o tempo para condição R100 .	138
Figura 58 – Interação tempo de cura e tipo de cimento na evolução da ec com o tempo para condição natural externo: (a) cura de 7 dias, (b) cura de 28 dias .....	141
Figura 59 – Interação tempo de cura e tipo de cimento na evolução da ec com o tempo para condição natural interno: (a) cura de 7 dias, (b) cura de 28 dias.....	142
Figura 60 – Interação tempo de cura e tipo de cimento na evolução da ec com o tempo para condição SC6: (a) cura de 7 dias, (b) cura de 28 dias .....	142
Figura 61 – Interação tempo de cura e tipo de cimento na evolução da ec com o tempo para condição SC100: (a) cura de 7 dias, (b) cura de 28 dias .....	142
Figura 62 – Interação tempo de cura e tipo de cimento na evolução da ec com o tempo para condição R6: (a) cura de 7 dias, (b) cura de 28 dias.....	143
Figura 63 – Interação tempo de cura e tipo de cimento na evolução da ec com o tempo para condição R100: (a) cura de 7 dias, (b) cura de 28 dias.....	143
Figura 64 – Interação tempo de cura e relação a/c na evolução da ec com o tempo para condição natural externo: (a) cura de 7 dias, (b) cura de 28 dias .....	145
Figura 65 – Interação tempo de cura e relação a/c na evolução da ec com o tempo para condição natural interno: (a) cura de 7 dias, (b) cura de 28 dias.....	146
Figura 66 – Interação tempo de cura e relação a/c na evolução da ec com o tempo para condição SC6: (a) cura de 7 dias, (b) cura de 28 dias .....	146
Figura 67 – Interação tempo de cura e relação a/c na evolução da ec com o tempo para condição SC100: (a) cura de 7 dias, (b) cura de 28 dias .....	146

Figura 68 – Interação tempo de cura e relação a/c na evolução da ec com o tempo para condição R6: (a) cura de 7 dias, (b) cura de 28 dias.....	147
Figura 69 – Interação tempo de cura e relação a/c na evolução da ec com o tempo para condição R100: (a) cura de 7 dias, (b) cura de 28 dias.....	147
Figura 70 – Interação tipo de cimento e relação a/c na evolução da ec com o tempo para condição natural externo: (a) CP I, (b) tipo CP IV .....	148
Figura 71 – Interação tipo de cimento e relação a/c na evolução da ec com o tempo para condição natural interno: (a) CP I, (b) tipo CP IV.....	149
Figura 72 – Interação tipo de cimento e relação a/c na evolução da profundidade ec com o tempo para condição SC6: (a) CP I, (b) tipo CP IV .....	149
Figura 73 – Interação tipo de cimento e relação a/c na evolução da ec com o tempo para condição SC100: (a) CP I, (b) tipo CP IV .....	149
Figura 74 – Interação tipo de cimento e relação a/c na evolução da ec com o tempo para condição R6: (a) CP I, (b) tipo CP IV .....	150
Figura 75 – Interação tipo de cimento e relação a/c na evolução da ec com o tempo para condição R100: (a) CP I, (b) tipo CP IV .....	150
Figura 76 – Difratoograma das pastas de cimento CP I carbonatadas em diferentes ambientes ... .....	156
Figura 77 – Difratoograma das pastas de cimento tipo CP IV carbonatadas em diferentes ambientes.....	156
Figura 78 – ATG de argamassa de CP I e relação a/c 0,40 em duas camadas carbonatadas com 6% de CO <sub>2</sub> (R6 sup e R6 2 <sup>a</sup> cam) e no núcleo não carbonatado (R6 NC) .....	158
Figura 79 – ATG de argamassa de CP I e relação a/c 0,40 em uma camada carbonatada com 100% de CO <sub>2</sub> (R100 sup) e no núcleo não carbonatado (R100 NC).....	159
Figura 80 – ATD de argamassa de CP I e relação a/c 0,40 em duas camadas carbonatadas com 6% de CO <sub>2</sub> (R6 sup e R6 2 <sup>a</sup> cam) e no núcleo não carbonatado (R6 NC) .....	161
Figura 81 – ATD de argamassa de CP I e relação a/c 0,40 em duas camadas carbonatadas com 100% de CO <sub>2</sub> (R100 sup e R100 2 <sup>a</sup> cam) e no núcleo não carbonatado (R100 NC) .....	162
Figura 82 – Volume de mercúrio intrudido em argamassas de CP I e tipo CP IV, após condicionamento em sala climatizada (SC) e conforme RILEM (R) (amostras não carbonatadas).....	163
Figura 83 – Distribuição dos poros por volume de mercúrio intrudido em argamassas de CP I e tipo CP IV, após condicionamento em sala climatizada (SC) e conforme RILEM (R) (amostras não carbonatadas).....	163
Figura 84 – Volume de mercúrio intrudido em argamassas de CP I, carbonatadas e não carbonatadas, extraídas a partir da superfície (sup) e do núcleo (núcleo) das amostras de 4x4x16 cm .....	164
Figura 85 – Distribuição dos poros por volume de mercúrio intrudido em argamassas de CP I, carbonatadas (C) e não carbonatadas (NC), extraídas a partir da superfície (sup) e do núcleo (núcleo) das amostras de 4x4x16 cm.....	165

Figura 86 – Volume de mercúrio intrudido em argamassas de tipo CP IV, carbonatadas (C) e não carbonatadas (NC), extraídas a partir da superfície (sup) e do núcleo (núcleo) das amostras de 4x4x16 cm .....	165
Figura 87 – Distribuição dos poros por volume de mercúrio intrudido em argamassas de tipo CP IV, carbonatadas (C) e não carbonatadas (NC), extraídas a partir da superfície (sup) e do núcleo (núcleo) das amostras de 4x4x16 cm .....	166
Figura 88 – Resistência à compressão axial média com relação à idade de ruptura, (a) grupo 1, (b) grupo 2, (c) grupo 3 e (d) grupo 4.....	169
Figura 89 – Resistência à compressão axial média com relação à idade de ruptura, (a) natural 1, (b) natural 2 e (c) natural 3 .....	170
Figura 90 – Cristais de portlandita em argamassa de CP I, a/c 0,70 .....	185
Figura 91 – Cristais de portlandita em argamassa de CP I, a/c 0,70 .....	185
Figura 92 – Resultados das simulações com o modelo de Duprat, Sellier e Nguyen (2006). 187	
Figura 93 – Difusão do CO <sub>2</sub> com a frente de carbonatação .....	190
Figura 94 – e <sub>c</sub> experimental e calculadas pelo modelo – CP I e 0,088% CO <sub>2</sub> .....	210
Figura 95 – e <sub>c</sub> experimental e calculadas pelo modelo – tipo CP IV e 0,088% CO <sub>2</sub> .....	210
Figura 96 – e <sub>c</sub> experimental e calculadas pelo modelo – CP I e 6% CO <sub>2</sub> .....	210
Figura 97 – e <sub>c</sub> experimental e calculadas pelo modelo – tipo CP IV e 6% CO <sub>2</sub> .....	210
Figura 98 – e <sub>c</sub> experimental e calculadas pelo modelo – CP I e 100% CO <sub>2</sub> .....	210
Figura 99 – e <sub>c</sub> experimental e calculadas pelo modelo – tipo CP IV e 100% CO <sub>2</sub> .....	210
Figura 100 – e <sub>c</sub> experimental e calculadas pelo modelo – CP I e 0,088% CO <sub>2</sub> .....	212
Figura 101 – e <sub>c</sub> experimental e calculadas pelo modelo – tipo CP IV e 0,088% CO <sub>2</sub> .....	212
Figura 102 – e <sub>c</sub> experimental e calculadas pelo modelo – CP I e 6% CO <sub>2</sub> .....	212
Figura 103 – e <sub>c</sub> experimental e calculadas pelo modelo – tipo CP IV e 6% CO <sub>2</sub> .....	212
Figura 104 – e <sub>c</sub> experimental e calculadas pelo modelo – CP I e 100% CO <sub>2</sub> .....	212
Figura 105 – e <sub>c</sub> experimental e calculadas pelo modelo – tipo CP IV e 100% CO <sub>2</sub> .....	212
Figura 106 – e <sub>c</sub> experimental e calculadas pelo modelo – CP I e 0,088% CO <sub>2</sub> .....	216
Figura 107 – e <sub>c</sub> experimental e calculadas pelo modelo – tipo CP IV e 0,088% CO <sub>2</sub> .....	216
Figura 108 – e <sub>c</sub> experimental e calculadas pelo modelo – CP I e 6% CO <sub>2</sub> .....	216
Figura 109 – e <sub>c</sub> experimental e calculadas pelo modelo – tipo CP IV e 6% CO <sub>2</sub> .....	216
Figura 110 – e <sub>c</sub> experimental e calculadas pelo modelo – CP I e 100% CO <sub>2</sub> .....	216
Figura 111 – e <sub>c</sub> experimental e calculadas pelo modelo – tipo CP IV e 100% CO <sub>2</sub> .....	216
Figura 112 – Comportamento do modelo modificado com a variação da pressão de CO <sub>2</sub> para o CP I .....	218
Figura 113 – Comportamento do modelo modificado com a variação da pressão de CO <sub>2</sub> para o tipo CP IV .....	218
Figura 114 – e <sub>c</sub> experimental e calculadas pelo modelo – CP I e 10% CO <sub>2</sub> .....	221
Figura 115 – e <sub>c</sub> experimental e calculadas pelo modelo – 25% CV e 10% CO <sub>2</sub> .....	221

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Fases sólidas resultantes do estudo termodinâmico ao longo da carbonatação a 25°C .....	41
Tabela 2 – Propriedades de alguns indicadores químicos de pH .....	72
Tabela 3 – Estudos de carbonatação em concretos realizados no Brasil.....	79
Tabela 4 – Estudos de carbonatação em concretos realizados em diversos países .....	81
Tabela 5 – Estudos de carbonatação em argamassas realizados no Brasil.....	83
Tabela 6 - Estudos de carbonatação em argamassas realizados em diversos países .....	84
Tabela 7 – ANOVA dos resultados de carbonatação acelerada aos 28 dias de ensaio .....	87
Tabela 8 – Resultados da caracterização física e mecânica dos cimentos CP I e tipo CP IV ..	99
Tabela 9 – Composição química dos cimentos utilizados na pesquisa .....	100
Tabela 10 – Composição química da cinza volante utilizada na pesquisa .....	103
Tabela 11 – Caracterização física da cinza volante.....	104
Tabela 12 – Resultados da caracterização física do agregado miúdo.....	104
Tabela 13 – Traços, em massa (kg), para confecção das argamassas .....	105
Tabela 14 – Quantidade de materiais em kg/m <sup>3</sup> .....	105
Tabela 15 – Comparação entre os resultados obtidos e os esperados para o condicionamento da RILEM .....	111
Tabela 16 – Análise de variância dos resultados de carbonatação natural aos 58 meses de ensaio .....	125
Tabela 17 – Valores reais e codificados das variáveis do ensaio de carbonatação natural ....	126
Tabela 18 – Análise de variância dos resultados de carbonatação acelerada aos 28 dias de ensaio .....	128
Tabela 19 – Valores reais e codificados das variáveis do ensaio de carbonatação acelerada	129
Tabela 20 – Influência do tempo de cura para as diferentes condições de ensaio, na e <sub>c</sub> (mm)....	133
Tabela 21 – Influência do tipo de cimento para as diferentes condições de ensaio, na e <sub>c</sub> (mm)..	137
Tabela 22 – Influência da relação a/c para as diferentes condições de ensaio, na e <sub>c</sub> (mm) ...	139
Tabela 23 – Influência da interação tempo de cura e tipo de cimento em diferentes condições de ensaio, na e <sub>c</sub> (mm).....	144
Tabela 24 – Influência da interação tempo de cura e relação a/c, para as diferentes condições de ensaio, na e <sub>c</sub> (mm).....	147
Tabela 25 – Influência da interação tipo de cimento e relação a/c para as diferentes condições de ensaio, na e <sub>c</sub> (mm).....	150

Tabela 26 – Coeficientes de aceleração para a relação $a/c=0,55$ com diferentes tempos de cura, tipos de cimento e condições de ensaio .....	152
Tabela 27 – Perda de massa por ATG das amostras de CP I carbonatadas com 6% e 100% de $CO_2$ e do núcleo não carbonatado.....	159
Tabela 28 – Dados de entrada comuns para o modelo de carbonatação .....	186
Tabela 29 – Dados de entrada para os diferentes materiais.....	187
Tabela 30 – Valores encontrados para os parâmetros a serem calibrados.....	196
Tabela 31 – Valores das massas molares, em g/mol .....	202
Tabela 32 – Massas molares dos óxido do cimento, em g/mol .....	202
Tabela 33 – Composição do cimento, em moles/kg de cimento .....	203
Tabela 34 – Massa de cimento por litro de pasta (kg/l).....	204
Tabela 35 – Composição do cimento, em moles/kg de cimento .....	205
Tabela 36 – Composição da pasta quando 100% do cimento são hidratados, em moles/kg de cimento .....	206
Tabela 37 – Composição da pasta após a aplicação do grau de hidratação do cimento, em moles/kg de cimento .....	206
Tabela 38 – Formação dos aluminatos da pasta se 100% do cimento e da cinza vítrea são hidratados em moles/kg de cimento .....	207
Tabela 39 – Composição da pasta se 100% do CP I contido no tipo CP IV é hidratado, em moles/kg de cimento .....	207
Tabela 40 – Composição da pasta após aplicação do grau de hidratação do cimento, em moles/kg de cimento .....	207
Tabela 41 – Composição da pasta após as reações pozolânicas, em moles/kg de cimento....	208
Tabela 42 – Composição da pasta de tipo CP IV após a aplicação do grau de hidratação do cimento e das reações pozolânicas, em moles/kg de cimento .....	208
Tabela 43 – Quantidade de pasta de cimento por litro de argamassa (litro/litro).....	208
Tabela 44 – Valores dos parâmetros $Q1$ e $C2'$ para as argamassas utilizadas .....	209
Tabela 45 – Coeficientes de difusão do $CO_2$ calculados pelo modelo quando se utilizam os valores de $\alpha$ e $n$ encontrados por Hyvert (2009) .....	209
Tabela 46 – Valores de $\alpha$ , $n$ e dos coeficientes de difusão do $CO_2$ calculados pelo modelo quando são calibrados também $\alpha$ e $n$ .....	211
Tabela 47 – Coeficientes de difusão do $CO_2$ para as argamassas .....	213
Tabela 48 – Valores de $\alpha$ e $n$ para diferentes parâmetros de entrada .....	213
Tabela 49 – Valores de $\alpha$ , $n$ e dos coeficientes de difusão do $CO_2$ calculados pelo modelo modificado.....	217
Tabela 50 – Valores de $\alpha$ e $n$ para diferentes parâmetros de entrada no modelo modificado	217
Tabela 51 – Comparação entre os valores calculados e a aplicação prática do modelo utilizando $\alpha$ e $n$ fixados anteriormente (tabela 49) .....	219

Tabela 52 – Comparação entre os valores calculados e da aplicação prática do modelo recalibrando $\alpha$ e $n$ .....	219
Tabela 53 – Coeficientes de difusão do CO <sub>2</sub> calculados para os concretos de Isaia <i>et al.</i> (2001) e comparação entre as profundidades de carbonatação medidas e previstas pelo modelo .....	221

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a/agl: relação água/aglomerante

a/c: relação água/cimento

ABCP: Associação Brasileira de Cimento Portland

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI: American Concrete Institute

AFNOR: Association Française de Normalisation

AFPC: Association Française pour la Construction

AFREM: Association Française de Recherches et d'Essais sur les Matériaux et les Constructions

AMN: Asociación Mercosur de Normalización

ANOVA: Análise de Variância

ASTM: American Society for Testing and Materials

ATD: análise térmica diferencial

ATG: análise termogravimétrica

C<sub>2</sub>S: silicato dicálcico

C<sub>3</sub>A: aluminato tricálcico

C<sub>3</sub>S: silicato tricálcico

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

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

CaCO<sub>3</sub>: carbonato de cálcio

CaO: óxido de cálcio

carbo ou carb: carbonatação

CE: Comissão de estudos

CEB: Comité Euro-International du Béton

CEN: Comité Européen de Normalisation

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



CP I: cimento Portland comum

CP II: cimento Portland composto

CP III: cimento Portland de alto-forno

CP I-S: cimento Portland comum com adição

CP IV: cimento Portland pozolânico

CP V-ARI: cimento Portland de alta resistência inicial

C-S-H: silicato de cálcio hidratado

C/S: relação cálcio/silício

cte: constante

DRX: difração de raios X

$e_c$  e  $x_c$ : profundidade de carbonatação

$f_c$ : resistência à compressão axial

ident.: identificação

IFTR: espectrometria infravermelha pela transformada de Fourier

INMET: Instituto Nacional de Meteorologia

LACER: Laboratório de Cerâmica

LMC: Laboratório de Materiais de Construção

LMDC: Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions

MPa: Mega Pascal

NaCl: cloreto de sódio

NBR: Norma Brasileira Regulamentada

NF: Norme Française

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

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

NORIE: Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação

pH: potencial de hidrogênio

prec. ou precond.: condicionamento

redist.: redistribuição de umidade

RILEM: Réunion Internationale de Laboratoires d'Essais et Matériaux

T: temperatura

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UNISINOS: Universidade do Vale do Rio dos Sinos

UR: umidade relativa

## 1. INTRODUÇÃO

A corrosão das armaduras e os danos desencadeados pelo fenômeno de carbonatação são problemas de extensão mundial (PARROTT, 1987). A carbonatação é uma das maiores responsáveis pela iniciação da corrosão das armaduras (TUUTTI, 1982). Estas afirmações indicam a importância de pesquisar este fenômeno que tanto influencia na durabilidade de concretos armados sujeitos à corrosão.

A carbonatação é um fenômeno físico-químico de neutralização da solução intersticial dos poros do concreto, tendo como consequência deletéria, a destruição da película passivadora que envolve o aço, deixando o material suscetível à corrosão da armadura. As reações ocorrem principalmente com o CO<sub>2</sub> presente na atmosfera, que penetra a partir da superfície para o interior do material. A cinética de difusão depende, entre outros fatores, da concentração de CO<sub>2</sub> e sua condição de acesso no concreto, a qual é função do tamanho, da distribuição de poros e da condição hídrica desses poros. Dentro do período de vida útil previsto para uma determinada estrutura, deve-se evitar que a profundidade carbonatada atinja a armadura, ou seja, supere a espessura de cobrimento.

Para que se possam adotar medidas preventivas com relação à carbonatação é preciso entender o fenômeno e como cada fator envolvido o influencia. Segundo Pihlajavaara (1976), os primeiros estudos realizados sobre carbonatação do concreto datam dos anos 30, do século XX. Alguns trabalhos foram publicados no final dos anos 60, do século passado (HAMADA, 1969; MEYER, 1969; PIHLAJAVAARA, 1968; SMOLCZYK, 1969), mas o fenômeno e sua significância, especialmente em estudos experimentais em concreto, só passaram a ser melhor conhecidos a partir de 1976, quando foi realizado um colóquio sobre a carbonatação do concreto.

Como a carbonatação natural ocorre lentamente, são utilizados ensaios acelerados, onde se aumenta a concentração de CO<sub>2</sub> para antecipar as reações. Apesar do grande número de pesquisas já realizadas que envolvem ensaios acelerados de carbonatação, há vários aspectos, como, por exemplo, o tipo de condicionamento e o percentual de CO<sub>2</sub> que ainda não são

bem compreendidos ou normalizados. Além disso, este grande número de estudos foi realizado sem padronização e, provavelmente, sem conhecimento apurado das influências causadas pelos parâmetros adotados para a realização dos ensaios, não se podendo afirmar até que ponto os ensaios acelerados afetam e alteram os resultados obtidos, com relação ao que ocorre na realidade (carbonatação natural). É preciso ter em mente que o objetivo do ensaio acelerado, como o próprio nome diz, é simplesmente acelerar a obtenção de respostas. Essa aceleração altera a cinética das reações, o que por si só constitui uma distorção do fenômeno natural. No entanto, o ensaio acelerado deve representar o fenômeno que ocorre em condições naturais, ou seja, as tendências de comportamento de diferentes materiais devem ser as mesmas nas duas condições de ensaio (por exemplo, se na condição natural um cimento X1 carbonata Y% mais que o cimento X2, na condição acelerada essa tendência deve ser mantida, ou deve ser da mesma ordem de grandeza).

A partir da constatação que os resultados de ensaios acelerados condizem com a condição natural, poder-se-á realizar previsões de vida útil, como também, comparar diferentes materiais. Então, a questão passa a ser como fazer a transposição destes dados obtidos em condições aceleradas para um contexto de ambientes naturais. No estado atual de conhecimento sobre o assunto, dois caminhos parecem possíveis: através de coeficientes de aceleração ou de modelos de previsão.

Diante deste panorama, este trabalho pretende contribuir no sentido de avaliar experimentalmente os principais parâmetros envolvidos nos ensaios de carbonatação acelerada e comparar os resultados com os obtidos em condições naturais, verificando se as tendências de comportamento nas duas condições se preservam ou não. Com os dados obtidos, poder-se-á analisar a viabilidade da utilização de coeficientes de aceleração para estimativa da carbonatação natural das estruturas de concreto, como também, verificar e validar outras formas de previsão, como modelos complexos e simplificados de carbonatação, existentes na bibliografia.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

O interesse pelo estudo da carbonatação surgiu durante a realização do trabalho de conclusão de curso, no qual o objetivo era comparar diferentes concretos, com e sem adições, quando submetidos à carbonatação acelerada. Foi neste momento que se percebeu não haver padronização para a realização de tais ensaios. No Mestrado, considerou-se que seria

importante verificar diferentes condições de ensaios acelerados para, no doutorado, compará-las com o que acontece naturalmente, no intuito de apurar se há ou não igualdade de comportamento, das tendências, entre o fenômeno natural e o acelerado, avaliando as possibilidades de transposição dos resultados de ensaios acelerados para condições naturais.

Como dito anteriormente, um dos problemas nos ensaios acelerados é a falta de padronização nos procedimentos, o que faz com que os resultados de diferentes trabalhos encontrem dificuldades de correlação entre si ou que ela seja até mesmo impossível. Mehta (1991) e Saetta, Schrefler e Vitaliani (1995) ressaltam que o conhecimento encontra-se muito fragmentado, que os estudos são realizados com uma variável por vez, não permitindo a determinação da interação entre os vários fatores e que existe grande dificuldade de transpor os resultados obtidos em laboratório para a realidade. Vários autores (ISAIA, 1995; JIANG; LIN; CAI, 2000; KULAKOWSKI, 2002, SANJUÁN; ANDRADE; CHEYREZY, 2003, MUNTEAN *et al.*, 2005, entre outros) salientam que, na maioria das vezes, as condições de investigação são distintas, o que dificulta uma comparação fidedigna dos resultados obtidos.

A consolidação dos resultados das pesquisas realizadas é de suma importância na escolha dos materiais, dos parâmetros de dosagem e dos cobrimentos a serem feitas para cada situação, e mesmo para estimar o comportamento de novos materiais frente aos que já se conhecem.

Muitas pesquisas são conduzidas com percentuais de CO<sub>2</sub> bastante elevados (acima de 50%), muito superiores aos que as estruturas estão submetidas em situações normais de exposição. No final de 2002, ano em que esta pesquisa foi iniciada, tinha-se conhecimento de apenas um trabalho em andamento (ABREU, 2004) e outro publicado (SANJUÁN; DEL OLMO, 2001) que comparavam diferentes concentrações de CO<sub>2</sub>, incluindo teores acima de 50%, e seus reflexos no fenômeno da carbonatação do concreto. Esta era, então, uma lacuna que precisava ser preenchida, pois havia diversas pesquisas que empregaram 100% de CO<sub>2</sub> (ANDRADE; ALONSO; BACLE, 1988; FATTUHI, 1988; KAZMIERCZAK, 1995; NEPOMUCENO, 1992) e não se tinha informações sobre as diferenças no comportamento do fenômeno entre percentuais de CO<sub>2</sub> mais baixos (5-10%) e mais altos (acima de 50%).

Os procedimentos de condicionamento empregados para os ensaios acelerados de carbonatação são os mais diversos. As diferentes formas de condicionamento influenciam na carbonatação, pois é nessa etapa que serão desenvolvidas condições internas que interferem nos resultados dos ensaios. A quantidade de água a ser perdida pelo corpo-de-prova, bem como a forma e o tempo necessários para alcançar essa perda, podem alterar a

hidratação dos aglomerantes e, por consequência, a quantidade e tamanho dos poros. Em última análise, os diferentes procedimentos de acondicionamento podem não só alterar a cinética das reações de carbonatação, como também, modificar as tendências de comportamento que o material teria naturalmente. A carência de estudos comparativos entre distintos acondicionamentos é outra lacuna a ser preenchida.

Essa falta de compreensão de alguns fatores relacionados à carbonatação (como o percentual de CO<sub>2</sub> e o acondicionamento) faz com que os resultados de pesquisas com ensaios acelerados de carbonatação tenham que ser avaliados com cuidado. Apesar dos vários estudos realizados, ainda há muito a ser investigado. Alguns trabalhos relacionados ao incremento de CO<sub>2</sub> nos ensaios de carbonatação foram publicados nos últimos anos (CASTELLOTE *et al.*, 2009; GLASSER; MATSCHEI, 2007; PETER *et al.*, 2008). Com relação ao estudo de diferentes acondicionamentos, podem-se citar as contribuições de Rougeau (1997), Thiery (2005) e Bahador e Jong (2006). Entretanto, nenhuma das pesquisas citadas fez comparações com resultados de carbonatação natural.

Parrott (1987) ressalta que raramente se encontram informações descrevendo condições de exposição dos materiais ensaiados. O autor salienta também que é necessário realizar um programa de ensaios com diferentes percentuais de CO<sub>2</sub>, colocando amostras iguais em diferentes ambientes, com condições distintas.

Como os ensaios acelerados são amplamente utilizados é necessário um procedimento padrão para a realização dos mesmos. No Brasil, a comissão CE 18:300.06 – Comissão de Estudos de Durabilidade do Concreto, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) foi formada em meados de 2009 e visa, entre outros assuntos, a elaboração de uma norma de procedimento para os ensaios de carbonatação, o qual deve ser dividido em “ensaio acelerado” e “medida da carbonatação”.

Além dos ensaios experimentais, muitos pesquisadores (PAPADAKIS; VAYENAS; FARDIS, 1991a, SAETTA; SCHREFLER; VITALIANI, 1993; CEB 1997, BARY; SELLIER, 2004; POSSAN, 2004; THIERY, 2005, HYVERT, 2009, entre muitos outros) têm trabalhado no desenvolvimento de modelos de carbonatação, sejam eles empíricos, analíticos ou numéricos. Esses modelos procuram representar o fenômeno e objetivam simular o ensaio de carbonatação ou prever a carbonatação a partir de ensaios acelerados.

Dentre os citados, o modelo de carbonatação desenvolvido por Bary e Sellier (2004) e modificado por Duprat, Sellier e Nguyen (2006) é um modelo complexo, baseado nas equações de equilíbrio de massa de CO<sub>2</sub> e água, que procura levar em consideração todos os fatores envolvidos no fenômeno. Já o modelo desenvolvido por Hyvert (2009) é simplificado e mais fácil de alimentar com os dados de entrada. Estes dois modelos são apresentados e aplicados neste trabalho. Sua escolha é devida ao fato de que ambos foram desenvolvidos no Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions (LMDC) de Toulouse; as primeiras aplicações destes modelos se mostraram promissoras e era necessário realizar uma validação mais completa. A abrangência desta pesquisa possibilita uma contribuição à validação dos modelos de carbonatação escolhidos.

Através da confrontação de resultados experimentais de ensaios naturais e acelerados de carbonatação, pretende-se auxiliar no entendimento de fatores (concentração de CO<sub>2</sub> e condicionamento) relacionados aos ensaios acelerados, que ainda suscitam dúvidas no meio científico. Almeja-se ainda, dispor de uma modelagem que relacione ensaios acelerados e naturais de carbonatação.

## 1.2 ORIGINALIDADE

A originalidade desta pesquisa pode ser verificada em dois aspectos principais:

- a) na comparação dos resultados experimentais de ensaios acelerados de carbonatação, contemplando diferentes condições de execução, com resultados experimentais de carbonatação natural, visando avaliar se há alguma alteração do fenômeno;
- b) na utilização desses dados para validação dos modelos de carbonatação desenvolvidos no LMDC de Toulouse e adaptação do modelo de Hyvert (2009) para o caso de cimentos com adição de cinza volante.

A escassez de trabalhos contemplando ensaios naturais e acelerados no mesmo material vem sendo salientada há tempo (SMOLCZYK, 1969; PARROTT, 1987; SANJUÁN; ANDRADE; CHEYREZY, 2003; MUNTEAN *et al.*, 2005). Na bibliografia consultada não foi encontrado nenhum trabalho que fizesse comparação entre diferentes condições de ensaios acelerados com os resultados de carbonatação natural.

A necessidade de validar o modelo de Hyvert (2009) para cimentos com adições pozolânicas e concentrações de CO<sub>2</sub> que fossem além dos 50% por ele testadas, foi abordada por Baroghel-Bouny na ocasião da defesa de tese de Hyvert (2009).

### 1.3 OBJETIVO

O objetivo da presente pesquisa consiste em avaliar as estimativas da profundidade de carbonatação natural a partir de ensaios acelerados e modelos de predição, verificando se as tendências do ensaio natural se confirmam nos ensaios acelerados e como os parâmetros que constituem os modelos intervêm nos resultados, através da comparação com os valores experimentais obtidos.

Para alcançar este objetivo, algumas etapas foram seguidas:

- verificar a influência de dois tipos de condicionamento (sala climatizada e conforme RILEM) no fenômeno da carbonatação acelerada;
- verificar a influência de dois percentuais de CO<sub>2</sub> (6% e 100%) no fenômeno da carbonatação acelerada;
- verificar a influência de diferentes ambientes de exposição natural (um interno e dois externos não protegidos das intempéries) na profundidade de carbonatação;
- comparar resultados de carbonatação obtidos nos ensaios naturais com os obtidos nos ensaios acelerados a partir de corpos-de-prova produzidos nas mesmas condições;
- estabelecer coeficientes de aceleração de carbonatação através da correlação entre os resultados de ensaios naturais e acelerados para os materiais estudados nesta pesquisa;
- validar o modelo de Hyvert (2009) para os resultados experimentais desta pesquisa a fim de prever a carbonatação natural a partir dos ensaios acelerados;
- adaptar o modelo de Hyvert (2009) para que seja aplicável aos aglomerantes com adição de cinzas volantes.

### 1.4 ESTRUTURA DA TESE

A presente tese está dividida em seis capítulos. No primeiro capítulo é apresentada a introdução que engloba a justificativa, a originalidade, o objetivo e a estrutura do trabalho.



No capítulo 2 são abordados diversos aspectos relativos à carbonatação. Buscou-se na literatura trabalhos que também tenham sido realizados neste sentido e, no final do capítulo, uma revisão dos procedimentos adotados para os ensaios de carbonatação realizados no Brasil e no mundo.

No capítulo 3 é abordado o programa experimental da pesquisa, os materiais e métodos utilizados.

Os resultados dos ensaios experimentais e a discussão dos mesmos, correlacionando-os com dados da literatura, são apresentados no capítulo 4.

No capítulo 5 trata-se da modelagem da carbonatação. Inicialmente são feitas algumas considerações sobre modelos existentes e em seguida apresentados e aplicados os modelos de Duprat, Sellier e Nguyen (2006) e de Hyvert (2009), sendo este último adaptado ao caso de cimentos pozolânicos.

No sexto e último capítulo são apresentadas as conclusões a que este estudo conduziu e sugestões para trabalhos futuros.

## 2. CARBONATAÇÃO

A carbonatação do concreto é um dos principais fenômenos de iniciação do processo de corrosão das armaduras (TUUTTI, 1982), uma das manifestações patológicas que mais afeta as estruturas de concreto armado, além de ser de difícil intervenção e reparo (MEHTA, 1991).

A espessura de cobertura do aço no concreto armado desempenha uma dupla função: por um lado é uma barreira física, que dificulta o acesso de agentes agressivos que venham a atacar o aço e por outro lado é uma barreira química, que através da elevada alcalinidade forma uma película protetora que passiva a armadura (ANDRADE, 1992). A carbonatação, fenômeno físico-químico que ocorre principalmente entre os hidratos do cimento e o CO<sub>2</sub> da atmosfera, reduz a alcalinidade do concreto, fazendo o pH da solução dos poros passar de valores em torno de 14, para valores na faixa de 9. Essa diminuição da alcalinidade não é um fator prejudicial para o concreto em si, mas no caso do concreto armado pode se tornar crítica para a corrosão da armadura, quando determinadas condições forem reunidas (presença de água, diferença de potencial, acesso ao oxigênio), fatores normalmente encontrados nas estruturas de concreto armado.

Para melhor entendimento deste fenômeno foi realizada uma síntese sobre a carbonatação de materiais cimentícios, consequências do processo, fatores que o influenciam, formas de medição, um resumo das pesquisas realizadas sobre o tema e, por fim, uma discussão dos parâmetros considerados pertinentes para o objetivo desta pesquisa.

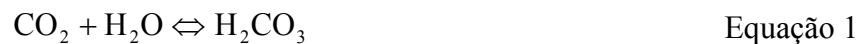
### 2.1 A CARBONATAÇÃO DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS

As reações dos compostos do cimento com substâncias agressivas, principalmente com o dióxido do carbono, ocorrem lentamente, formando essencialmente carbonato de cálcio e água. Uma ampla exposição dos mecanismos e reações envolvidos foi feita por diversos pesquisadores (HOUST, 1993; ISAIA, 1995; KAZMIERCZAK, 1995; PAPADAKIS; VAYENAS; FARDIS, 1989; PARROTT, 1987; SMOLCZYK, 1976; THIERY, 2005;

TUUTTI, 1982). A carbonatação dos hidratos, principalmente do hidróxido de cálcio e do silicato de cálcio hidratado, a carbonatação dos demais constituintes do cimento, bem como os mecanismos envolvidos e os produtos formados são apresentados na sequência.

### 2.1.1 Carbonatação dos hidratos

- a) Os mecanismos do processo de carbonatação são essencialmente (PAPADAKIS; VAYENAS; FARDIS, 1989; THIÉRY, 2005) difusão do  $\text{CO}_2$  na fase gasosa dos poros e posterior dissolução na água dos poros, formando ácido carbônico (equação 1);



- b) o ácido carbônico na água se comporta como um diácido fraco e a dissociação ocorre em duas fases, como descrito na equação 2 e na equação 3:



- c) a passagem do  $\text{CO}_2$  em solução (equação 1, equação 2, equação 3) provoca queda da concentração de íons  $\text{OH}^-$  na solução intersticial dos poros, o que faz o pH diminuir. Para restabelecer a alcalinidade do meio, ocorre a dissolução do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  na água dos poros (equação 4) e difusão do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  dissolvido das regiões de maior alcalinidade para as de menor alcalinidade;



- d) reação do  $\text{CO}_2$  dissolvido com o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  dissolvido e precipitação do carbonato de cálcio (equação 5);



A figura 1 ilustra a intervenção combinada de três fases: gasosa, aquosa e sólida durante o processo de carbonatação do hidróxido de cálcio.

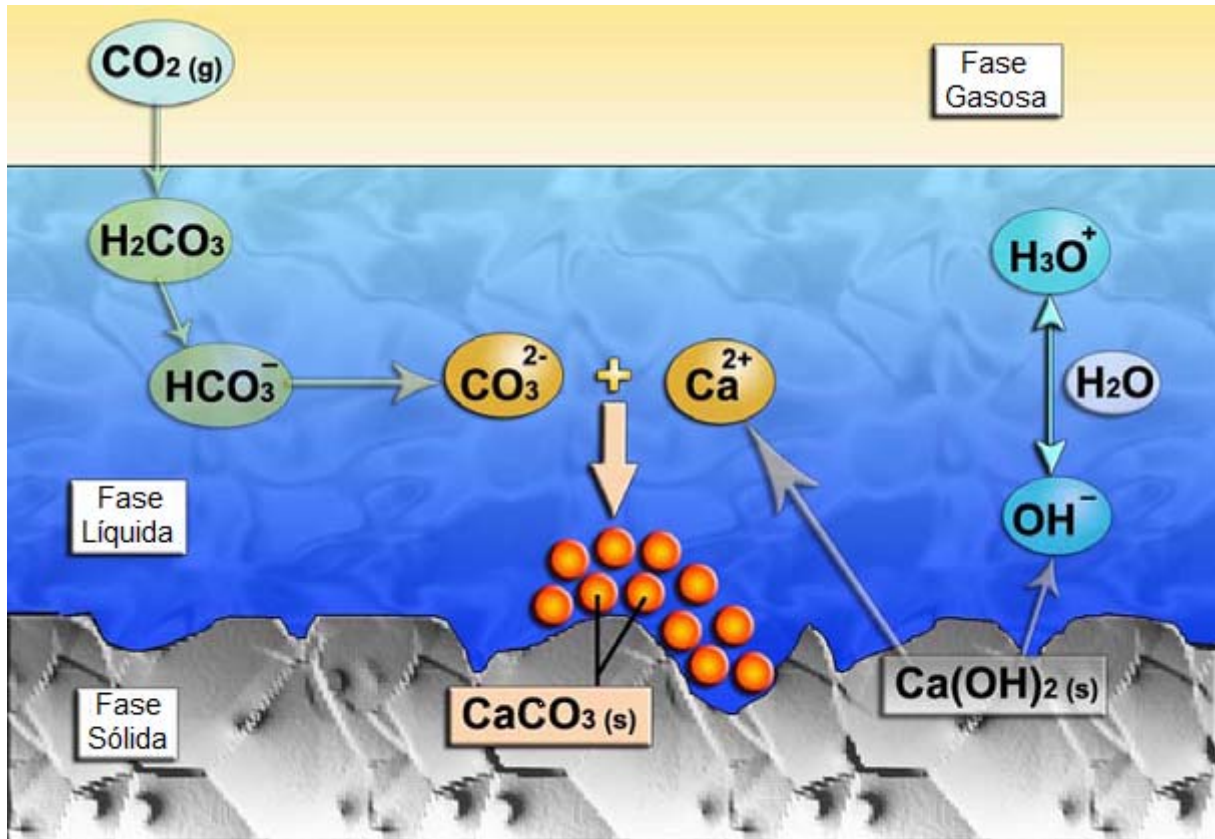
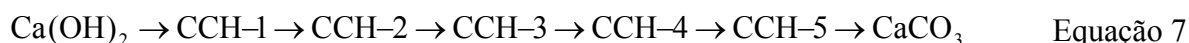


Figura 1 – Ilustração da carbonatação do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (baseada em: Thiery (2005))

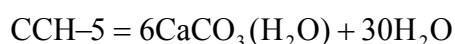
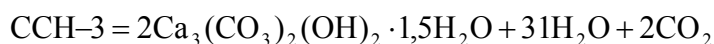
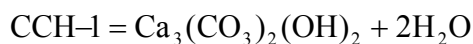
Todas as reações de carbonatação ocorrem em presença de água ou umidade e de forma simplificada, a reação de carbonatação do hidróxido de cálcio pode ser descrita como na equação 6:



As etapas intermediárias da transformação gradual do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  em  $\text{CaCO}_3$  foram estudadas por Stepkowska *et al.* (2007), que sugerem a equação 7:



Onde:



Os hidróxidos de sódio (NaOH) e potássio (KOH) presentes na solução dos poros reagem com o ácido carbônico para formar carbonatos de sódio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) e potássio ( $\text{K}_2\text{CO}_3$ ), que em seguida reagem com o  $\text{Ca(OH)}_2$  formando carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) e disponibilizando novamente os hidróxidos de sódio e potássio (HOUST; WITTMANN, 2002).

O  $\text{C}_3\text{A}$  se hidrata para formar aluminatos de cálcio hidratados, etringita (trisulfoaluminato de cálcio) e monosulfoaluminatos de cálcio a partir dos sulfatos presentes no cimento. Paris (1993)<sup>1</sup> *apud* Isaia (1999) aponta que a etringita também sofre carbonatação, resultando ao final aragonita e gipsita.

Sobre a carbonatação dos silicatos de cálcio hidratado, a literatura apresenta opiniões contraditórias. Thiery (2005) explica que a reação dará origem a carbonatos de cálcio, a um gel de sílica e água livre (equação 8):



Thiery *et al.* (2005) colocam que a reação apresentada na equação 8 não pode ser negligenciada, pois o C-S-H<sup>2</sup> fixa muitas moléculas de  $\text{CO}_2$ . Segundo Parrott (1987) e Baroghel-Bouny (1994), a reação do  $\text{Ca(OH)}_2$  com o  $\text{CO}_2$  é a que se produz majoritariamente, enquanto que a reação com o C-S-H ocorre apenas na carbonatação acelerada. Os resultados dos ensaios de carbonatação natural e acelerada realizados por Hyvert (2009) também o levam

<sup>1</sup> PARIS, J. M. F. La carbonatation de la pasta hidratada de cemento portland. Interpretación físico-química. Madrid: **Monografias del Instituto Eduardo Torroja**, 1993, n° 130.

<sup>2</sup> Nomenclatura simplificada para o silicato de cálcio hidratado:  $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ .

a supor que as fases mal cristalizadas, não detectadas na DRX (em particular os C-S-H) se carbonatam apenas em altas concentrações de  $\text{CO}_2$ , sendo a taxa de carbonatação do C-S-H, função da concentração de  $\text{CO}_2$ .

No entanto, um estudo realizado por Chaussadent (1997) apresenta um diagrama (figura 2) de equilíbrio termodinâmico das fases sólidas do C-S-H e do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  que podem intervir no processo de carbonatação e ressalta que ambos os compostos podem se carbonatar em atmosfera natural.

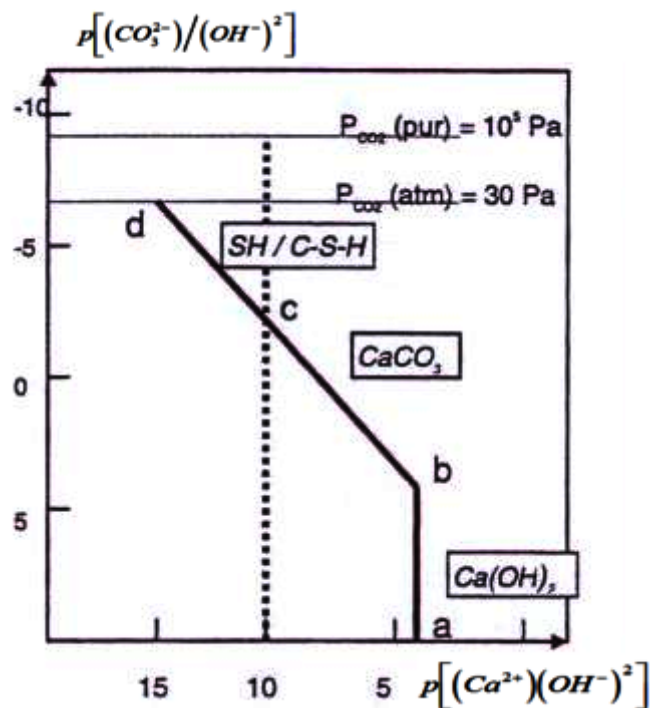


Figura 2 – Diagrama de equilíbrio termodinâmico das fases hidratadas do cimento com o  $\text{CO}_2$  (baseada em: Chaussadent (1997))

Na interpretação da figura 2 o ponto (a) representa a portlandita em meio isento de  $\text{CO}_2$ . Quando o  $\text{CO}_2$  penetra no concreto, se dissolve na fase líquida intersticial e reage com a portlandita se deslocando pela linha (ab) até o ponto (b), que corresponde à precipitação do  $\text{CaCO}_3$ . Fica neste ponto até que toda a portlandita é consumida. Em seguida, o gás carbônico dissolvido pode reagir com os géis de C-S-H seguindo a linha (bc) com precipitação no ponto (c) da sílica hidratada ( $\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ). Quando todo o C-S-H é consumido se desloca pela linha

(cd) até alcançar a concentração em gás carbônico correspondente à pressão parcial de equilíbrio. A pressão parcial de gás carbônico é suficiente para que a portlandita e o C-S-H possam carbonatar em atmosfera natural (CHAUSSADENT, 1997) e o C-S-H apenas poderá carbonatar quando toda a portlandita for consumida (BAROGHEL-BOUNY, 1994; CHAUSSADENT, 1997).

Em estudos mais recentes, analisando as interações entre o cimento Portland e o dióxido de carbono, Glasser e Matschei (2007) colocam que a extensão da reação depende da atividade do  $\text{CO}_2$  (incluindo as espécies dissolvidas,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ) assim como da massa total na pressão avaliada, e que, se o potencial de reação existe, ela vai ocorrer. Este potencial foi quantificado usando estudos termodinâmicos (GLASSER; MATSCHEI, 2007) em conjunto com uma base de dados apropriada e verificação experimental (MATSCHEI; LOTHENBACH; GLASSER, 2007). A simulação que mostra as mudanças mineralógicas devidas à carbonatação foi realizada no *software* GEMS para um modelo de cimento com composição inicial em massa: 68,5%  $\text{CaO}$ , 22%  $\text{SiO}_2$ , 4,5%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 5%  $\text{CaSO}_4$  e aproximadamente 2,9% de  $\text{SO}_3$  (GLASSER; MATSCHEI, 2007). No modelo, cem gramas deste cimento reagiram com 50 gramas de água ( $a/c=0,5$ ). Os álcalis e óxidos de ferro foram omitidos para simplificar o sistema. As consequências mineralógicas da interação dinâmica entre a pasta de cimento hidratada com o  $\text{CO}_2$  atmosférico foram investigadas pela crescente adição de quantidades de  $\text{CO}_2$  ao modelo cimentício. Os cálculos consideram a conservação de massa, exceto para o ganho de  $\text{CO}_2$ , o qual é adicionado até atingir a condição atmosférica. A figura 3 mostra as mudanças mineralógicas ocorridas ao longo da carbonatação do modelo de cimento hidratado ao longo do eixo x, entre as profundidades  $X_2$  e  $X_1$ , sendo esta última a camada exterior completamente carbonatada em equilíbrio com o  $\text{CO}_2$  atmosférico ( $P_{\text{CO}_2}$  aproximadamente  $3,5 \cdot 10^{-4}$  atm).

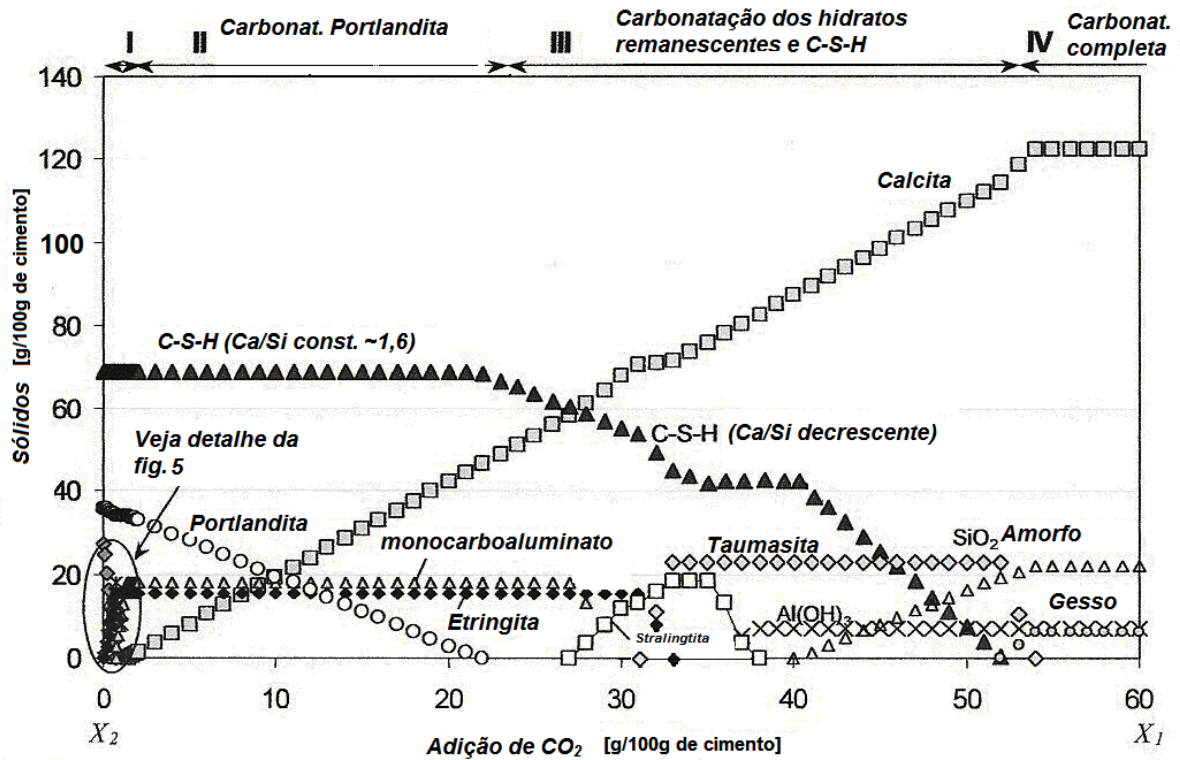


Figura 3 – Impacto da carbonatação no balanço de massa de modelo de pasta de cimento a 25°C e umidade relativa saturada (baseada em: Glasser e Matschei (2007))

A distribuição da fase calculada é função da adição de  $\text{CO}_2$ , ou seja, o diagrama representa a seqüência de diferentes zonas e não as espessuras físicas relativas (GLASSER; MATSCHEI, 2007). A figura 4 apresenta uma ampliação da zona inicial da figura 3. A tabela 1 apresenta uma interpretação das fases presentes em cada zona.



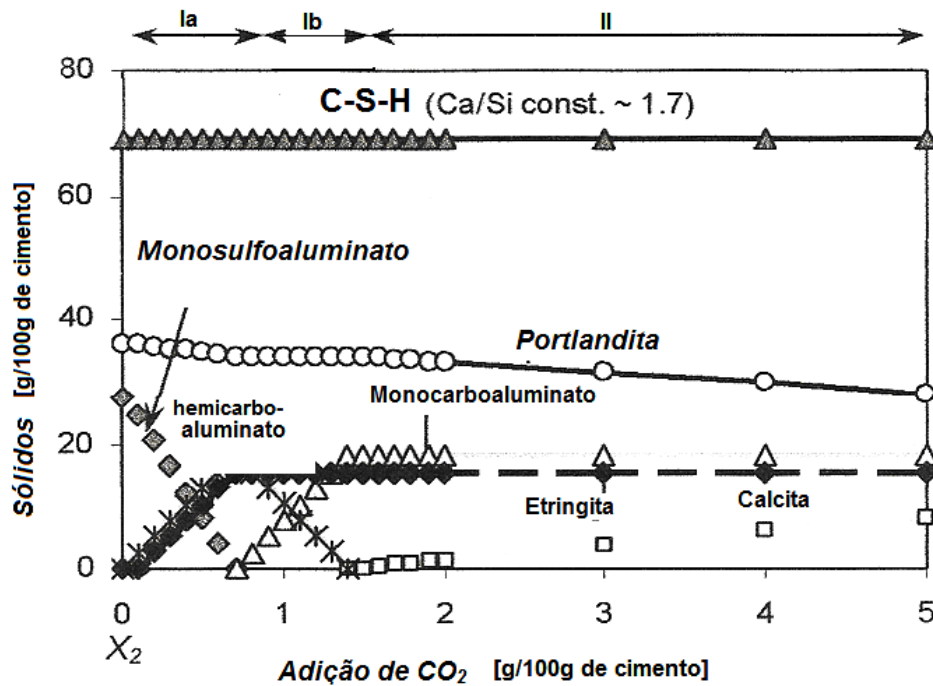


Figura 4 – Detalhe da zona inicial apresentada na figura 3 (baseada em: Glasser e Matschei (2007))

Tabela 1 – Fases sólidas resultantes do estudo termodinâmico ao longo da carbonatação a 25°C

Zona	Fases sólidas resultantes (todas em presença de água)
<b>0</b> (zona intacta do núcleo)	C-S-H (Ca/Si~1,65), portlandita, monosulfoaluminato
<b>I</b> (estágios iniciais)	a) C-S-H (Ca/Si~1,65), portlandita, monosulf.↓, hemicarb.↑, etringita↑
	b) C-S-H (Ca/Si~1,65), portlandita, hemicarb.↓, monocarb.↑, etringita
<b>II</b> (carbonatação da portlandita)	C-S-H (Ca/Si~1,65), portlandita↓, monocarboaluminato, etringita, calcita↑
	a) C-S-H (Ca/Si~1,65→1,4)↓, monocarboaluminato, etringita, calcita↑
	b) C-S-H (Ca/Si~1,4→1,3)↓, monocarb.↓, etringita, strätlingita↑, calcita↑
	c) C-S-H (Ca/Si~1,3)↓, etringita↓, calcita↑, strätlingita↑, taumasita↑
	d) C-S-H (Ca/Si~1,3→1,1)↓, calcita↑, strätlingita, taumasita
	e) C-S-H (Ca/Si~1,1→1,0)↑, calcita↑, strätlingita↓, taumasita, Al(OH) <sub>3</sub> ↑
	f) C-S-H (Ca/Si~1,0→0,83)↓, calcita↑, taumasita, Al(OH) <sub>3</sub>
	g) C-S-H (Ca/Si~0,83)↓, calcita↑, taumasita, Al(OH) <sub>3</sub> , sílica amorfa↑
h) sílica amorfa, calcita↑, taumasita↓, Al(OH) <sub>3</sub> , gipsita	
<b>III</b> (zona de transição; carbonatação dos hidratos restantes)	
<b>IV</b> (zona completamente carbonatada)	sílica amorfa, calcita, Al(OH) <sub>3</sub> , gipsita

Baseada em: Glasser e Matschei (2007)

A formação de taumasita ao longo da carbonatação, indicada na figura 3 e na tabela 1, foi questionada pelos próprios autores do estudo, uma vez que este composto se forma preferencialmente em temperaturas mais baixas (na ordem de 8°C). Mas, os pesquisadores apontam outros trabalhos onde também houve formação deste composto (BLANCO-VARELA; AGUILERA; MARTÍNEZ-RAMÍREZ, 2006; DAMIDOT *et al.*, 2004; DIAMOND, 2003).

De acordo com os resultados de Glasser e Matschei (2007), ao final da carbonatação tem-se na fase estável: sílica amorfa,  $\text{Al}(\text{OH})_3$  e gipsita, provenientes da carbonatação do C-S-H, do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , dos aluminatos e da etringita, respectivamente, além da calcita, gerada em praticamente todas as reações.

Os estudos realizados por Glasser e Matschei (2007) estão em concordância com os resultados de Chaussadent (1997) no sentido que a carbonatação do C-S-H vai ocorrer após o consumo da portlandita. No entanto, em matrizes cimentícias onde há grandes cristais de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , existe um potencial de acumulação de “*stress*” local, provocado pela carbonatação, o que deve ser confirmado para se saber qual reação é favorecida (GLASSER; MATSCHEI, 2007).

Por outro lado, ensaios realizados por Castellote *et al.* (2008) em pastas carbonatadas, em ambiente com 100% de  $\text{CO}_2$  e monitoradas por difração de nêutrons, mostram que a portlandita e o C-S-H carbonatam simultaneamente. Segundo eles, a etringita é a fase consumida mais rapidamente, seguida do gel de C-S-H, e por último, a fração cristalina, sendo o consumo da portlandita a reação mais lenta, como ilustra a figura 5.

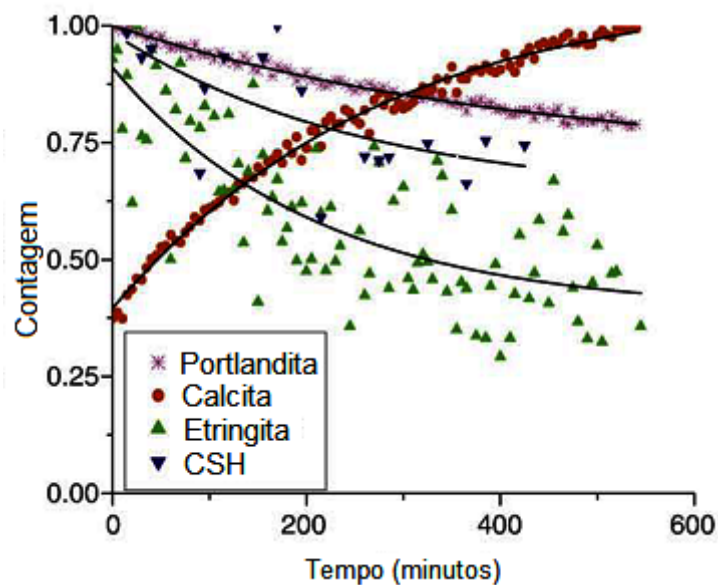


Figura 5 – Consumo das diferentes fases carbonatadas para o cimento Portland comum (baseada em: Castellote *et al.* (2008))

Estudos realizados por Thiery (2005) com 50% de  $\text{CO}_2$  em pastas e concretos também indicam que a carbonatação do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  e do C-S-H pode ser simultânea, após uma primeira fase, onde a carbonatação do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  aparece como prioritária. O consumo da portlandita diminui ao longo do tempo, e se estabiliza rapidamente em razão de uma redução de acessibilidade ligada à formação de carbonato de cálcio. No entanto, a do C-S-H continua progressivamente, em velocidade praticamente constante, até um nível de carbonatação quase total. A formação de uma camada pouco permeável em torno do cristal de portlandita foi verificada por Grandet (1975), que justifica que em função disso, a carbonatação do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  será da ordem de 50 a 60%. Groves *et al.* (1990)<sup>3</sup> *apud* Thiery *et al.* (2005) observaram por microscopia eletrônica de transmissão que o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  é progressivamente cercado por bordas de microcristais de  $\text{CaCO}_3$ , formando uma camada que dificulta a passagens dos íons. Smolczyk (1976) relata que sob condições normais, um cimento com 65% de CaO tem aproximadamente 40% de CaO carbonatável. Essa teoria de que nem todo o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  irá carbonatar é reforçada pelo fato de ainda existir esse composto na zona onde a fenolftaleína já indicou o ponto de viragem, mostrada nos perfis de  $\text{CaCO}_3$  de concretos carbonatados (THIÉRY, 2005).

<sup>3</sup> GROVES, G. W.; RODWAY, D. I.; RICHARDSON, I. G. The carbonation of hardened cement pastes. *Advances in Cement Research*, v.3, n.11, p. 117-125, 1990.

Hoppe Filho (2008) constatou que na carbonatação acelerada (5% de CO<sub>2</sub>) praticamente toda a portlandita disponível é consumida e ainda grande parte dos hidratos é degradada para suprir o teor de cálcio necessário para a formação do carbonato de cálcio. Neste caso, ao final da carbonatação, tanto a portlandita quanto o C-S-H carbonataram. Castellote *et al.* (2009) verificaram que na carbonatação natural (0,03% de CO<sub>2</sub>) ou com 3% de CO<sub>2</sub> ainda há C-S-H na matriz carbonatada, no entanto, para percentuais de 10% e 100% de CO<sub>2</sub> o C-S-H desaparece completamente.

Os dados encontrados na literatura mostram que não há um consenso sobre quais compostos são carbonatados preferencialmente, mas há uma tendência para carbonatação da portlandita em estágios iniciais, por ser este um dos compostos mais solúveis. A necessidade de consumir toda a portlandita antes da carbonatação do C-S-H é apontada em estudos termodinâmicos (CHAUSSADENT, 1997; GLASSER; MATSCHEI, 2007) que ainda necessitam de validação. Em ensaios experimentais de carbonatação acelerada (CASTELLOTE *et al.*, 2008; HOPPE FILHO, 2008) a carbonatação da portlandita e do C-S-H foi simultânea, o que ainda precisa ser investigado para condições naturais de carbonatação. A possibilidade do C-S-H carbonatar apenas em ambientes com concentrações de CO<sub>2</sub> superiores às atmosféricas também precisa de confirmação. A ordem de consumo e os produtos formados parecem depender do conjunto de fatores (principalmente da concentração de CO<sub>2</sub>) utilizados no ensaio.

### 2.1.2 Carbonatação dos anidros

Os compostos C<sub>2</sub>S e C<sub>3</sub>S que ficam anidros no cimento, segundo Peter *et al.* (2008), também são passíveis de carbonatação, desde que o CO<sub>2</sub> tenha acesso a eles. Os pesquisadores investigaram a influência de quatro compostos (Ca(OH)<sub>2</sub>, C-S-H, C<sub>2</sub>S e C<sub>3</sub>S) na carbonatação e simularam dois cenários:

1° negligenciaram a carbonatação do C-S-H, do C<sub>2</sub>S e do C<sub>3</sub>S;

2° negligenciaram a carbonatação do C<sub>2</sub>S e do C<sub>3</sub>S.

Eles constataram que no segundo caso a carbonatação é muito semelhante à carbonatação do cenário completo (Ca(OH)<sub>2</sub>, C-S-H, C<sub>2</sub>S e C<sub>3</sub>S). Nas condições dos ensaios que eles realizaram (50% CO<sub>2</sub>, em concretos), a quantidade de CO<sub>2</sub> consumida pela portlandita é três vezes maior que a do C-S-H, 20 vezes maior que do C<sub>2</sub>S e 50 vezes maior que do C<sub>3</sub>S (PETER *et al.*, 2008). Uma vez que a carbonatação do C<sub>2</sub>S e do C<sub>3</sub>S exerce pouca influência

no resultado final, esta pode ser desprezada para efeito de modelagem (PAPADAKIS; VAYENAS; FARDIS, 1991b; THIÉRY, 2005).

Estudos realizados por Hyvert (2009) com argamassas carbonatadas em ambiente natural (0,03% de CO<sub>2</sub>) e acelerado (50% de CO<sub>2</sub>) mostram no ensaio de difração de raios X que os anidros não foram carbonatados. Segundo o autor, isto pode ser atribuído à baixa conectividade do meio poroso que inicialmente evita a hidratação e, que na sequência impede a carbonatação.

Os dados encontrados na literatura sobre a carbonatação dos anidros são contraditórios. Para que os anidros se carbonatem é necessária a hidratação prévia desses compostos e, para isso, será necessário o acesso de água e CO<sub>2</sub>. A comparação entre os dados de diferentes pesquisas deve ser feita com cuidado, uma vez que cada processo foi realizado de maneira distinta, com condições de ensaio e materiais diferentes.

### 2.1.3 Características dos carbonatos de cálcio formados

O CaCO<sub>3</sub> mineralogicamente, aparece como: calcita, vaterita e raramente na forma de aragonita (SMOLCZYK, 1976). Na forma de calcita, esta forma alotrópica é a mais estável, quando na forma de vaterita e aragonita se transforma em calcita ao longo do tempo (BAROGHEL-BOUNY, 1994).

A calcita geralmente está presente na camada superficial do cimento hidratado. A vaterita e aragonita são pouco frequentes nesses materiais. A relação Mg/Ca influencia a forma do CaCO<sub>3</sub>, diminuindo a cristalinidade com o aumento dessa relação. A vaterita é formada a partir da larnita (Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>) e sua formação será favorecida quando os cristais de Ca(OH)<sub>2</sub> forem imperfeitos. O precipitado de CaCO<sub>3</sub> é inicialmente amorfo e, em baixas temperaturas, forma calcita. A 30°C forma vaterita e calcita em igual quantidade; a 40°C a vaterita predomina. Nessa temperatura também inicia a formação da aragonita, que é predominante a 60-80°C. Em qualquer temperatura mudam finalmente para calcita devido à dissolução da forma metaestável. A calcita possui solubilidade menor que a aragonita, que possui menor solubilidade que a vaterita (solubilidade: calcita < aragonita < vaterita) (STEPKOWSKA *et al.*, 2003).

A vaterita tem forma hexagonal, a aragonita forma ortorrômbica e a calcita é romboédrica (STEPKOWSKA *et al.*, 2003). O volume do carbonato de cálcio é maior que o da portlandita

- calcita: + 12%; aragonita: + 3%; vaterita: + 19% (BAROGHEL-BOUNY, 1994). Ishida e Maekawa (2000) indicam que o volume do cristal de  $\text{CaCO}_3$  é aproximadamente 11,7% maior que o do  $\text{Ca(OH)}_2$ , mas não fazem distinção entre as três formas do polimorfo.

Resultados de Thiery (2005) dos ensaios de ATG (análise termogravimétrica) e ATD (análise termodiferencial) completados por diagramas de DRX (difração de raios X) e IRTF (espectrometria infravermelha pela Transformada de Fourier) mostram grande variabilidade na estabilidade térmica dos carbonatos, que se degradam quando o nível de carbonatação aumenta. Foram encontrados três modos de decomposição do  $\text{CaCO}_3$  ao longo da carbonatação. O modo I ( $780^\circ\text{C} \leq T \leq 990^\circ\text{C}$ ) corresponde à dissociação do  $\text{CO}_2$  de uma forma bem cristalizada de  $\text{CaCO}_3$ , a calcita. O modo II ( $680^\circ\text{C} \leq T \leq 780^\circ\text{C}$ ) está associado à descarbonatação das formas metaestáveis, vaterita e aragonita. O modo III ( $550^\circ\text{C} \leq T \leq 680^\circ\text{C}$ ) aparece para um estado último da carbonatação e está ligado à decomposição das formas amorfas do  $\text{CaCO}_3$ . A formação da calcita é proveniente preferencialmente da carbonatação de grandes cristais de  $\text{Ca(OH)}_2$ , enquanto que a vaterita, a aragonita e os carbonatos amorfos seriam produzidos a partir da carbonatação dos C-S-H (THIÉRY, 2005). Hidalgo *et al.* (2008) indicam que a presença da aragonita está relacionada com o C-S-H de baixa relação Ca/Si (C/S), produzido pela descalcificação do C-S-H primário ou aquele formado em amostras com adições minerais, onde esta relação já é mais baixa.

Com relação à quantidade de  $\text{CaCO}_3$  formado, estudos realizados por Castellote *et al.* (2009) em pastas de cimento Portland comum, relação a/c=0,5 e carbonatadas em ambiente com 0,03%, 3%, 10% e 100% de  $\text{CO}_2$  durante 103 dias, indicam um aumento da quantidade de  $\text{CaCO}_3$  com o acréscimo da concentração de  $\text{CO}_2$ . Hyvert (2009) constatou um acréscimo na quantidade de carbonatos formados após 296 dias de carbonatação, quando passou de natural para acelerada, mas entre as amostras carbonatadas em ensaio acelerado (10%, 25% e 50% de  $\text{CO}_2$ ), a quantidade foi praticamente a mesma. Pesquisas realizadas por Sanjuán e Del Olmo (2001) com percentuais de  $\text{CO}_2$  de 5%, 20% e 100% durante 7 meses indicam que o carbonato de cálcio formado varia com o percentual de  $\text{CO}_2$ , sendo que o formado a 100 % tem uma estrutura cristalina totalmente diferente do produzido quando o processo é mais lento (5% e 20%), além do tamanho desses cristais que se tornam menores quando a reação é acelerada.

Em resumo, o resultado do tipo de carbonato de cálcio formado está relacionado com a estrutura dos compostos a partir dos quais foi formado e sua detecção vai depender fortemente do momento em que o ensaio é realizado, como ele é realizado e em qual temperatura. Pois,

se ao final tudo se torna calcita, as demais formas (vaterita e aragonita) serão encontradas com menos frequência e em condições drásticas (altas concentrações de  $\text{CO}_2$  e temperaturas acima a partir dos  $30^\circ\text{C}$ ) de carbonatação.

## 2.2 CONSEQUÊNCIAS DA CARBONATAÇÃO

A carbonatação provoca uma série de alterações na microestrutura dos materiais cimentícios. Segundo Johannesson e Utgenannt (2001), as duas consequências maiores são a queda do pH e a mudança na porosidade.

A carbonatação faz parte da iniciação do fenômeno da corrosão, pois diminui a estabilidade química da capa protetora ou película passivadora do aço (TUUTTI, 1982), sendo este efeito o maior motivador das pesquisas sobre o assunto. A figura 6 apresenta a evolução da queda do pH feita a partir da simulação termodinâmica realizada por Glasser e Matschei (2007).

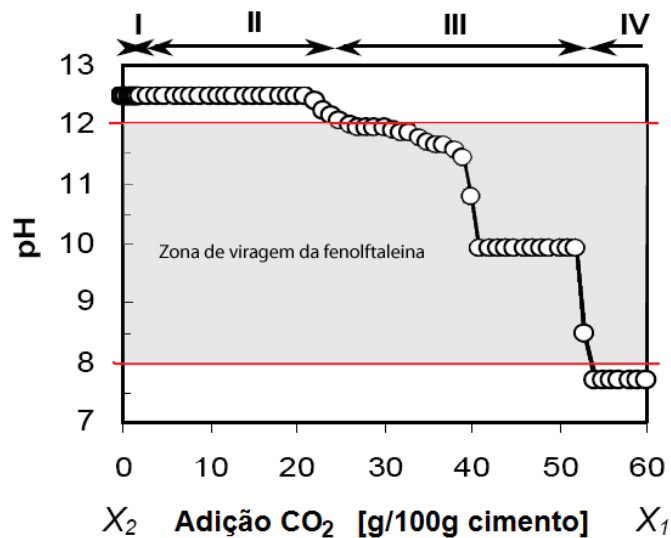


Figura 6 – Redução do pH com o avanço da carbonatação (adaptada de: Glasser e Matschei, (2007))

De acordo com Glasser e Matschei (2007) não há mudanças significativas na concentração de íons na zona II (figura 6), o pH é mantido pela presença de C-S-H ( $\text{C/S} \sim 1,65$ ), portlandita, calcita, monocarboaluminato e etringita. No entanto, quando a portlandita é esgotada há uma mudança significativa na zona III e o pH é mantido pelo C-S-H. Quando a relação C/S diminui para valores em torno de 0,8, o pH passa de cerca de 12,5 para aproximadamente 9,9. Ao final do processo de carbonatação, o pH atinge valores próximos a 7,5. Cabe ressaltar que

este valor foi encontrado em uma simulação termodinâmica, na qual os autores salientam não terem considerado os álcalis nesse cálculo. Já Thiery *et al.* (2005) explicam que a reação de carbonatação do C-S-H não afeta a alcalinidade da solução dos poros, pois a solubilidade do C-S-H é baixa comparada com a do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . É importante destacar ainda que, é na zona III da figura 6, que ocorre a mudança de coloração do indicador químico de pH e, é esta a zona em carbonatação, onde há compostos carbonatados, e também, não carbonatados. Ao final das contas, o fato é que a carbonatação provoca a redução da alcalinidade do material fazendo com que uma das condições necessárias para o desencadeamento da corrosão seja atingida.

Outra consequência da carbonatação é o aumento do volume dos sólidos. Glasser e Matschei (2007) explicam que a cristalização dos produtos de carbonatação ocorre nos poros, sem haver necessariamente expansão, caso o volume dos poros seja maior que o dos produtos formados. Eles estimaram um aumento total de sólidos de aproximadamente 18%.

O aumento no volume dos sólidos provoca a redução do volume de poros, da superfície específica e no tamanho médio dos poros (HOUST; SADOUKI; WITTMANN, 1993; PAPADAKIS; VAYENAS; FARDIS, 1989; YING-YU; QUI-DONG, 1987). Ngala e Page (1997) verificaram uma queda de 10% a 15% na porosidade total de pastas de cimento Portland comum depois de carbonatadas, enquanto que a porosidade capilar foi pouco afetada. No entanto, em misturas contendo cinza volante e escória, a porosidade capilar foi aumentada em 140% e 230%, respectivamente (NGALA; PAGE, 1997). Claisse, El-Sayad e Shaaban (1999) mediram reduções que variam entre 18% e 38%, na porosidade total, dependendo do tipo de cura e da relação a/c.

Durante o processo de carbonatação há liberação de água quimicamente combinada, pois a calcita é anidra. A figura 7 apresenta as quantidades de água liberada e consumida pelas reações de carbonatação.



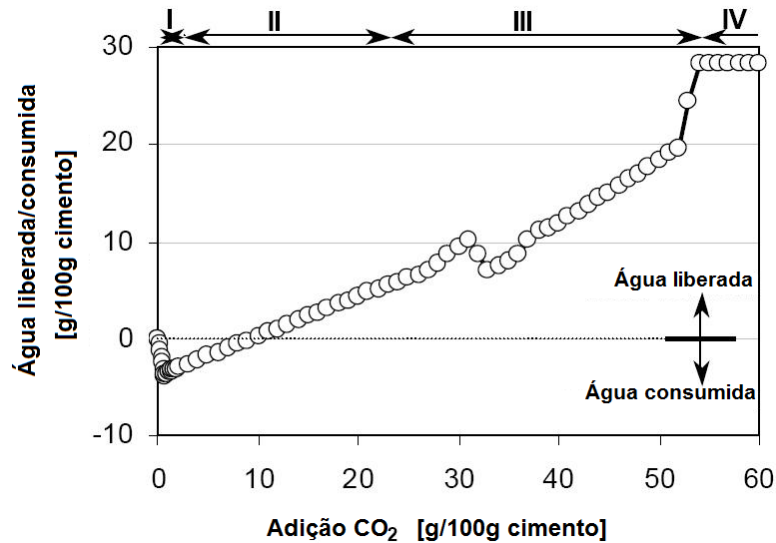


Figura 7 – Água liberada e consumida devido à carbonatação do modelo de pasta de cimento hidratada (baseada em: Glasser e Matschei (2007))

A figura 7 indica dois pontos de consumo de água: no início, quando há formação de etringita e por volta de 30g de CO<sub>2</sub>, quando a quantidade de taumasita aumenta (GLASSER; MATSCHEI, 2007). Se a água liberada nas reações for retida, há um grande potencial de expansão. É desejável que essa água saia para que haja o equilíbrio e o CO<sub>2</sub> continue a difundir.

Se a água produzida pela reação do Ca(OH)<sub>2</sub> com o CO<sub>2</sub> não evaporar, pode haver o preenchimento parcial dos poros de ar. Este efeito é visível na simulação de ensaios de carbonatação com altas concentrações de CO<sub>2</sub>. Neste caso, uma elevada taxa de produção de água e CaCO<sub>3</sub> são esperadas e a frente d'água localizada (agindo como uma barreira) ou parcial obstrução dos poros com CaCO<sub>3</sub> certamente ocorrerá (MUNTEAN; BÖHM, 2009).

Além disso, o fenômeno provoca retração por carbonatação, a qual conduz a tensões de tração adicionais, aumentando sua tendência de fissuração (TAYLOR, 1990). Thiery (2005) diz que a primeira vista é curioso que a carbonatação cause retração, uma vez que há aumento no volume da fase sólida e apresenta três explicações encontradas na literatura: a) a retração seria devida a um rearranjo da microestrutura que se altera na migração e difusão de íons (POWERS, 1962<sup>4</sup> *apud* THIERY, 2005); b) a retração ocorreria pela diminuição da água quimicamente combinada, especialmente do C-S-H; c) a retração seria causada pela

<sup>4</sup> POWERS, T. C. A hypothesis on carbonation shrinkage. J. Res. Dev. Labs. Portld. Cem. Ass., 4(2):40-50.

transferência da água liberada nas reações, a qual é impedida pela camada de  $\text{CaCO}_3$  de sair, o que cria um gradiente hídrico (SWENSON; SEREDA, 1967<sup>5</sup> *apud* THIERY, 2005). O autor conclui que o fenômeno é complexo e ainda não foi provado que seja uma causa notável de microfissuração.

Baroghel-Bouny (1994) chama a atenção para os efeitos da carbonatação, que provocam modificações físico-químicas suscetíveis de alterar a microestrutura. Segundo ela, essas mudanças podem “falsificar” resultados de ensaios como os de isotermas de absorção e dessorção. No momento de se submeter uma amostra à dessorção, a perda de água vai ser mais importante se esta amostra se carbonata ao mesmo tempo, ressaltando que o risco de carbonatação não deve ser negligenciado nas amostras destinadas às experiências de absorção do vapor d’água (e outros ensaios de caracterização da microestrutura) visto as perturbações negativas que podem ser provocadas pela carbonatação nessas medidas.

### 2.3 OS PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM A CARBONATAÇÃO

A carbonatação depende de diversos fatores. Segundo Houst (1993), entre os principais fatores que influenciam a velocidade de carbonatação estão: a relação água/cimento, a cura, a quantidade e o tipo de cimento, a concentração de gás carbônico, a quantidade de água, a temperatura, o teor de álcalis e as fissuras.

No caso da carbonatação natural, as condições de exposição, como a concentração de  $\text{CO}_2$ , e a proteção ou não das intempéries (quando em local protegido a velocidade de carbonatação é maior) são fatores muito influentes na carbonatação. No caso de ensaios acelerados, uma condição muito importante é o condicionamento. Diversos pesquisadores relacionaram os parâmetros que influenciam a carbonatação, e entre estes, pode-se destacar os trabalhos de Parrott (1987), Isaia (1999) e Delmi (2004).

O estado da arte das pesquisas de carbonatação no Brasil foi abordado por Pauletti, Possan e Dal Molin (2007), apontando os fatores que, segundo elas, estão bem compreendidos (✓) e os que ainda merecem maior investigação (✗), cujo resumo é apresentado na figura 8.

---

<sup>5</sup> SWENSON, E. G.; SEREDA, P. J. Some ageing characteristics of lime. J. Appl. Chem., 17:198-202.

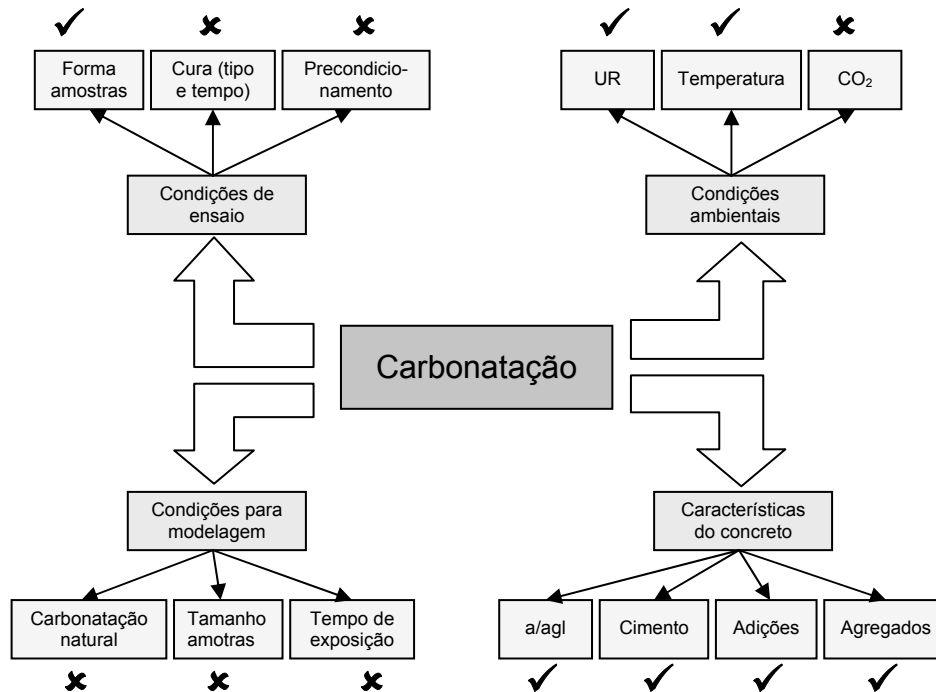


Figura 8 – Fatores que influenciam a carbonatação (baseada em: Pauletti, Possan e Dal Molin (2007))

A seguir são abordados os fatores que exercem influência sobre a carbonatação, conforme a divisão feita na figura 8, no entanto, analisando a literatura como um todo e não apenas os trabalhos feitos no Brasil.

Os trabalhos referenciados a seguir foram analisados em cada tópico sob a ótica do fator que está sendo discutido. A relação completa dos parâmetros utilizados em cada uma dessas pesquisas consta nas tabelas 3 a 6, onde são inclusive citados, os valores de umidade relativa e temperatura de ensaio, quando especificados pelos autores.

### 2.3.1 Características do material

O grupo de fatores denominado características do concreto engloba: a relação água/aglomerante, o cimento, as adições e os agregados.

Os efeitos de se aumentar ou diminuir a relação a/agl, bem como do consumo de cimento, são bem difundidos na comunidade científica e acredita-se que sejam bem compreendidos.

A influência das adições é pesquisada com grande ênfase em estudos no sul do Brasil (ABREU, 2004; BARIN, 2008; CADORE, 2008; ISAIA, 1995; ISAIA; FURQUIN; GASTALDINI, 2009; KULAKOWSKI, 2002; SPERB, 2003; VAGHETTI, 1999;

VENQUIARUTO, 2002), entre outros, e em diversas partes do mundo (BAI; WILD; SABIR, 2002; CEUKELAIRE; VAN NIEUWENBURG, 1993; LAMMERTIJN; BELIE, 2008; PAPADAKIS; FARDIS; VAYENAS, 1992; SAEKI; MONTEIRO, 2005; SISOMPHON; FRANKE, 2007; ZORNOZA; PAYÁ; GARCÉS, 2009) e parece indicar que o avanço da carbonatação vai depender da forma de adição e quantidade das mesmas. Embora as adições em substituição ao cimento geralmente aumentem a carbonatação, também melhoram a compactidade e diminuem a penetração de líquidos, gases e íons, o que no balanço final, pode trazer mais benefícios que prejuízos, devendo ser avaliado o efeito dessas adições na durabilidade.

Os fatores que constituem as características dos materiais (relação a/agl, cimento, adições e agregados) são parte do projeto de experimentos de cada pesquisa e, na maioria das vezes, o alvo da avaliação do material em estudo.

### 2.3.2 Condições ambientais

Estão neste grupo, a temperatura, a umidade relativa e a concentração de CO<sub>2</sub> e sendo que maior ênfase é dada a estes dois últimos.

A temperatura exerce pouca influência na carbonatação entre 20 e 40°C, pois as reações ainda são controladas pela difusão (PAPADAKIS, VAYENAS, FARDIS, 1991b; NEVILLE, 1997). Tuutti (1982) considera a temperatura importante, uma vez que seu acréscimo aumenta a mobilidade das moléculas, facilitando o transporte de substâncias e atuando como acelerador das reações químicas.

Apesar da pouca influência na velocidade de carbonatação, a temperatura não pode ser desprezada no estudo da corrosão por efeito da carbonatação, pois é um fator importante na taxa de corrosão da armadura. O incremento de temperatura aumenta a velocidade de reação e a mobilidade dos íons, mas sua redução pode provocar a condensação que pode produzir incrementos locais onde exista umidade (ANDRADE, 1992).

#### 2.3.2.1 Umidade relativa

Quando se fala em umidade relativa do ensaio, não significa que esta será a quantidade de água, em percentual, que se terá no interior dos poros do material (assunto tratado no condicionamento, item 2.3.3.2), mas sim, a umidade com a qual o corpo-de-prova está em

equilíbrio. A umidade relativa está relacionada ao entorno, às condições do ambiente em que o ensaio está sendo realizado.

A água possui duplo papel na carbonatação: ela pode bloquear os poros, dificultando a difusão do CO<sub>2</sub>, porém, é também o meio onde ocorre a reação entre o CO<sub>2</sub> e o Ca(OH)<sub>2</sub> (PAPADAKIS; VAYENAS; FARDIS, 1989). Não há consenso na literatura sobre um valor de umidade relativa ótima para as reações de carbonatação, mas sim de um intervalo, compreendido entre 40 e 85%. Como exemplo, alguns pesquisadores citam os seguintes valores de umidade ideal para a carbonatação: ACI (1991) comitê 222, 50%, Andrade (1992) entre 50 e 80%, Helene (1986) entre 65 e 85%, Neville (1997) entre 50 e 70%, Papadakis, Vayenas e Fardis (1989) entre 50 e 65%, Saetta, Schrefler e Vitaliani (1995) entre 40 e 80%, Silva (1995) 60%, Wolf e Dal Molin (1989), 70%, Ying-Yu e Qui-Dong (1987) entre 50 e 75%.

Os trabalhos de Wolf e Dal Molin (1989), Papadakis, Vayenas, Fardis (1991b), Roy, Poh e Northwood (1999) e Gervais *et al.* (2004) contemplam ensaios de carbonatação com diferentes umidades relativas. A taxa de carbonatação máxima é observada em umidades intermediárias (60% a 70%). Russell *et al.* (2001) também avaliaram a influência de diferentes umidades relativas (55, 65 e 75%) na carbonatação e constataram que a taxa máxima ocorre em umidade de 55%.

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

Conforme Neville (1997), as dimensões dos elementos são igualmente um fator a ser levado em conta, pois a água liberada pelas reações de carbonatação deve difundir a fim de manter o equilíbrio higroscópico entre o interior do concreto e a atmosfera. Se a difusão for muito lenta, a pressão de vapor dentro do material se eleva até a saturação e a difusão do CO<sub>2</sub> nos poros fica praticamente interrompida. Este aspecto será retomado no item 2.3.3.2.

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

A concentração de CO<sub>2</sub> no ar é um parâmetro ambiental importante na taxa de carbonatação. Há significativas diferenças nas concentrações de CO<sub>2</sub> quando se comparam ambientes fechados e abertos. A carbonatação em ambientes fechados geralmente é superior à observada em ambientes abertos, que permitem a renovação constante do ar (HO; LEWIS, 1987; KAZMIERCZAK, 1995; KOKUBU; NAGATAKI, 1989).

Devido ao tempo requerido para a obtenção de respostas no ensaio de carbonatação natural, com exposição a teores de CO<sub>2</sub> atmosféricos, ensaios acelerados, com concentrações de CO<sub>2</sub> entre 1% e 100%, são empregados pela comunidade científica. Entretanto, o percentual de CO<sub>2</sub> ideal para os ensaios acelerados é um fator que ainda suscita dúvidas.

A cinética de carbonatação pode ser descrita, em primeira aproximação, como sendo a difusão do CO<sub>2</sub> através dos poros do material com dada umidade, o que significa que se pode assumir que a reação do CO<sub>2</sub> dissolvido é muito mais rápida que a difusão (HOUST; WITTMANN, 2002). Assim sendo, é a taxa de difusão do CO<sub>2</sub> que controlará a velocidade de carbonatação. Na sequência são apresentadas algumas pesquisas que estudaram diferentes concentrações de dióxido de carbono no ensaio de carbonatação.

Uomoto e Takada (1993), verificando a influência do teor de CO<sub>2</sub> no avanço da frente de carbonatação, submeteram corpos-de-prova de concreto a concentrações de CO<sub>2</sub> de 0,07% (ambiente natural interno), 1% e 10% (teste acelerado), sob temperatura e umidade controladas (T=20 °C e UR=55%). Segundo os autores, para as relações água/cimento estudadas, o aumento do teor de CO<sub>2</sub> elevou a velocidade de carbonatação dos concretos.

Rougeau (1997) realizou estudos com seis concentrações de CO<sub>2</sub> (1, 5, 20, 50, 70 e 100%) e dois tipos de condicionamento (que serão expostos e discutidos no item 2.3.3.2). Os resultados são apresentados na figura 9.

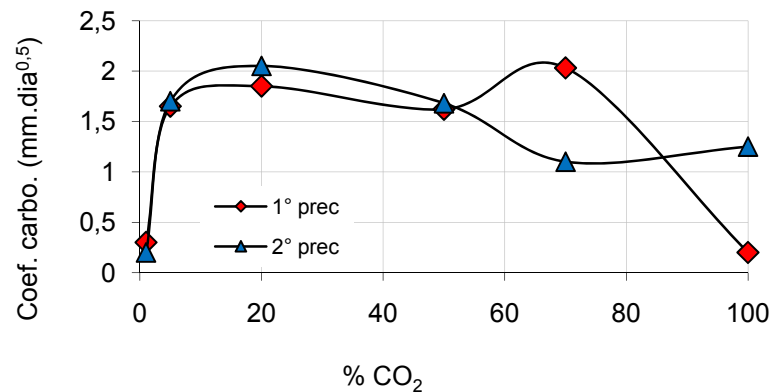


Figura 9 – Influência da concentração de CO<sub>2</sub> nos coeficientes de carbonatação (baseada em: Rougeau (1997))

Os dados da figura 9 mostram que independentemente do tipo de condicionamento, o coeficiente de carbonatação aumenta até a concentração de 20% de CO<sub>2</sub> e os valores são similares até 50% de CO<sub>2</sub>. O incremento mais substancial ocorre até o percentual de 5% de CO<sub>2</sub>. Para teores de CO<sub>2</sub> de 70 e 100%, há uma variação no coeficiente de carbonatação em função do tipo de condicionamento, todavia, tanto para 50% quanto para 100% de CO<sub>2</sub>, os coeficientes são menores que para 20%. O autor do referido trabalho não aponta as causas para esse comportamento. Duas hipóteses parecem possíveis nas reações de carbonatação com elevadas concentrações de CO<sub>2</sub> (a partir de 50%):

- a) a quantidade de água gerada é maior;
- b) a quantidade de carbonatos gerada é maior.

Em ambas as hipóteses os poros do material seriam obstruídos, diminuindo a difusão do CO<sub>2</sub> e dificultando o avanço da carbonatação. Muntean e Böhm (2009) mostram que ambos os fatores contribuem para desacelerar a carbonatação.

Abreu (2004) e Pauletti (2004) também mediram profundidades de carbonatação inferiores para teores de CO<sub>2</sub> próximos à saturação quando comparados com os resultados obtidos a 5% e 6% de CO<sub>2</sub>, respectivamente.

Sanjuán e Del Olmo (2001) realizaram ensaios com percentuais de CO<sub>2</sub> de 5, 20 e 100% e a profundidade de carbonatação aumentou com o acréscimo de CO<sub>2</sub>. De acordo com os autores, a carbonatação a 5 e 20% apresenta uma frente mais homogênea que a 100%, onde os resultados são totalmente diferentes e segundo eles, longe dos obtidos em condições naturais.

Pastas de cimento Portland comum foram ensaiadas por Castellote *et al.* (2009) em ambiente com umidade de equilíbrio de 65%, temperatura de 22°C e concentrações de CO<sub>2</sub> de 0,03% (natural) e 3, 10 e 100% (acelerado). A carbonatação foi acompanhada pela evolução do ganho de massa, e os resultados para o ensaio acelerado são apresentados na figura 10.

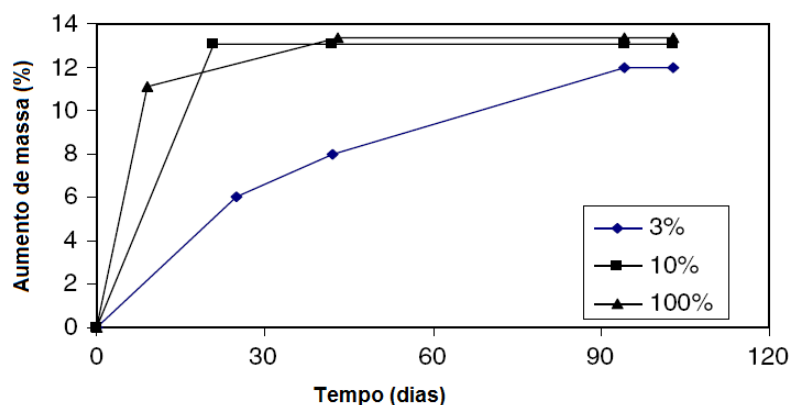


Figura 10 – Aumento na massa de amostras submetidas à carbonatação acelerada (baseada em: Castellote *et al.* (2009))

Observa-se que na figura 10 o incremento de massa final é praticamente o mesmo para as concentrações de 10 e 100% de CO<sub>2</sub>, sendo estas superiores aos valores observados com 3% de CO<sub>2</sub>. Para as três concentrações de CO<sub>2</sub> estudadas por Castellote *et al.* (2009), aos 103 dias de ensaio, a massa das amostras estava estabilizada ou aumentava muito lentamente. Não é possível concluir quando houve a estabilização de massa. Na curva com 100% de CO<sub>2</sub> a estabilização está entre 7 e 40 dias, com 10% entre 0 e 20 dias e com 3% entre 40 e 98 dias, aproximadamente. Com relação à velocidade de carbonatação, embora a curva de 100% seja mais acentuada (formando maior ângulo com o eixo das abscissas), não é possível afirmar que tenha carbonatado mais rápido, pois o número de leituras é limitado. Se a primeira leitura de 10% fosse realizada com menos dias de ensaio, talvez a inclinação dessa curva também fosse mais acentuada. Os pesquisadores constaram que ao final dos 103 dias de ensaio a quantidade de carbonato de cálcio formada aumenta com o aumento do percentual de CO<sub>2</sub>, mas é praticamente a mesma para as concentrações de 10% e 100%. Lembra-se que os produtos formados na reação de carbonatação são essencialmente carbonato de cálcio e água. Como a determinação dos carbonatos não foi feita nas fases intermediárias de carbonatação, fica difícil dizer quanto corresponde a cada um deles. No percentual de 100% pode ser que o potencial de carbonatação seja mais importante, o que não significa necessariamente que carbonate mais rápido, mas que consiga dissolver mais cálcio para formar mais carbonatos.



Na pesquisa realizada por Hyvert (2009), amostras de argamassa foram ensaiadas com concentrações de 0,03, 10, 25 e 50% de CO<sub>2</sub>. Os resultados obtidos para o cimento Portland comum, após 211 dias de ensaio, são apresentados na figura 11.

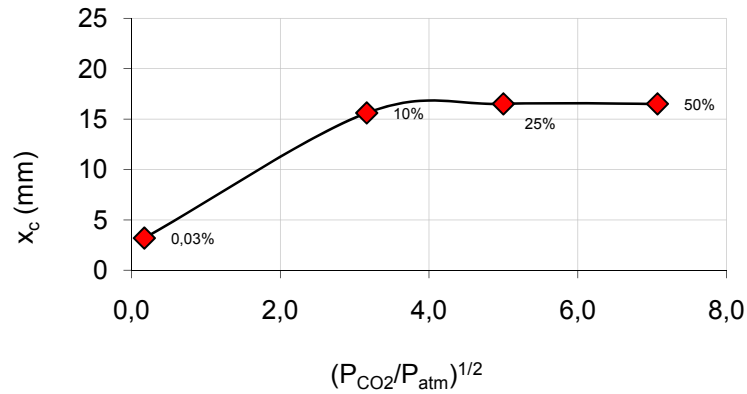


Figura 11 – Resultados da carbonatação de argamassas de cimento CP I em diferentes concentrações de CO<sub>2</sub> (baseada em: Hyvert (2009))

Os ensaios de Hyvert (2009) (figura 11) indicam que a profundidade de carbonatação aumenta consideravelmente até a concentração de 10% de CO<sub>2</sub>. A partir desse valor, o incremento é mínimo e, entre 25% e 50%, não há diferença. Praticamente as mesmas tendências foram observadas pelo autor para os cimentos Portland composto (com 6-20% de filer calcário) e Portland com escória de alto-forno. Esse comportamento é semelhante ao encontrado por Castellote *et al.* (2009), pois a partir de 10% de CO<sub>2</sub> não há mais aceleração da carbonatação. Por volta desse percentual a carbonatação parece atingir sua taxa máxima de reação. Em ambos os trabalhos a umidade de equilíbrio dos ensaios foi de 65% e a temperatura de 22°C. Existe um ponto limite, onde a carbonatação é dificultada ou impedida de avançar. Como dito anteriormente, isso é devido a uma obstrução dos poros com água e carbonatos, ambos gerados pelas reações de carbonatação e contribuindo para a desaceleração da reação (MUNTEAN; BÖHM, 2009).

Algumas pesquisas (CASTELLOTE *et al.*, 2009; SANJUÁN; DEL OLMO, 2001; UOMOTO; TAKADA, 1993) apontam maior avanço da frente de carbonatação com o aumento da concentração de CO<sub>2</sub>. Em outros casos (HYVERT, 2009; ROUGEAU, 1997) a profundidade carbonatada cresce com o aumento na concentração de CO<sub>2</sub> até um determinado limite. Cabe ressaltar que o estudo realizado por Uomoto e Takada (1993) apenas avaliou percentuais de

CO<sub>2</sub> até 10% e que os resultados de Castellote *et al.* (2009) foram apresentados por incremento de massa (figura 10) e praticamente não apresentam diferença entre 10% e 100%.

Em princípio, quanto maior a quantidade de CO<sub>2</sub>, maior o potencial de difusão e, em consequência, o avanço da frente de carbonatação. No entanto, *por que nem sempre carbonata mais?* Não foram encontradas publicações que fizessem referência do porque a carbonatação é maior até um determinado percentual de CO<sub>2</sub> a partir do qual passa a ser menor ou igual. Os estudos supracitados indicam que o incremento na profundidade de carbonatação ocorre até determinada concentração, que gira em torno de 20%, ou talvez 10%, uma vez que Rougeau (1997) testou 5% e 20%, não passando pelo valor de 10%. Para estabelecer o percentual ideal para os ensaios acelerados de carbonatação é necessário comparar ensaios acelerados e naturais, em termos de resultados, perfis das curvas e as diferenças na microestrutura. Essa confrontação entre ensaios naturais e acelerados é realizada no capítulo 4. O percentual de CO<sub>2</sub> a ser adotado também será função das demais características do ensaio, como umidade de equilíbrio e tipo de condicionamento.

A norma europeia (AFNOR, NF EN 13295, 2004) indica concentração de CO<sub>2</sub> de 1%, justificando que os produtos formados nas reações de carbonatação são os mesmos gerados em concentrações naturais de CO<sub>2</sub>. No Brasil, foi formado, em 2009, o comitê que discute a elaboração da norma do ensaio de carbonatação (ensaio acelerado e medida da carbonatação).

### 2.3.3 Condições do ensaio

As condições do ensaio estão relacionadas com a forma dos corpos-de-prova, cura (tipo e tempo) e condicionamento.

A forma das amostras (cilíndrica ou prismática) na frente de carbonatação já foi discutida por alguns autores (ISAIA, 1995; SAETTA; SCHREFLER; VITALIANI, 1995; VAGHETTI, 1999; KULAKOWSKI, 2002) e seus efeitos já são conhecidos, sendo as formas cilíndricas preferidas em relação às prismáticas. Quando amostras cilíndricas são utilizadas, a circunferência é impermeabilizada de forma a permitir que o CO<sub>2</sub> entre em apenas uma direção e a ruptura é feita diametralmente (HOPPE FILHO, 2008; SANJUÁN; DEL OLMO, 2001). A maioria dos estudos de carbonatação tem a preocupação de evitar a soma de vetores na difusão de CO<sub>2</sub>, selando algumas superfícies dos corpos-de-prova para que o dióxido de carbono penetre apenas em uma direção. A soma de vetores na frente de carbonatação, ou

seja, a entrada do CO<sub>2</sub> em uma, duas ou três direções (1D, 2D, 3D, respectivamente) foi avaliada por Chen *et al.* (2008) e alguns resultados são apresentados na figura 12.

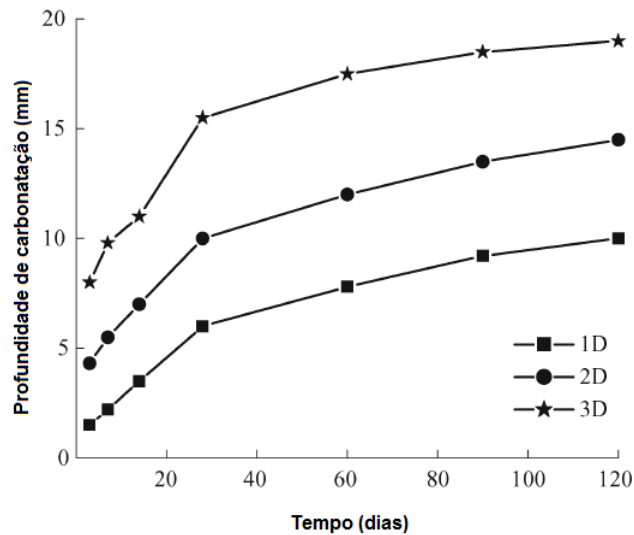


Figura 12 – profundidade de carbonatação em concretos com difusão do CO<sub>2</sub> em uma direção (1D), duas direções (2D) e três direções (3D) (Adaptada de: Chen *et al.*, 2008)

Os perfis de avanço da carbonatação em 1D, 2D e 3D (figura 12) são semelhantes, mas os valores atingidos pelas três modalidades são diferentes, sendo a profundidade atingida em 3D é cerca de 30% maior que a 2D e esta por sua vez, é cerca de 45% maior que a alcançada em 1D.

Ao comparar diferentes pesquisas é necessário identificar se as medidas foram feitas com penetração de CO<sub>2</sub> em 1D, 2D ou 3D, para evitar confrontações em desigualdade de condições, uma vez que este fator interfere no valor obtido. Este parâmetro deve ser igualmente evidenciado nos procedimentos de prescrição dos ensaios de carbonatação.

### 2.3.3.1 Cura

As condições e o tempo de cura têm importante papel na formação da microestrutura do concreto e, conseqüentemente, da profundidade de carbonatação.

Considerando o tipo de cura, ao comparar a cura ao ar com a cura úmida, Lo e Lee (2002) verificaram que concretos curados por 28 dias em água carbonataram 72% do que carbonataram os concretos curados ao ar pelo mesmo período, após 3 meses de ensaio

acelerado. Os autores não especificam se realizaram algum tipo de condicionamento antes de colocar as amostras em ensaio acelerado com 2% de CO<sub>2</sub>, apenas explicam que cobriram as amostras com epóxi para que a difusão do CO<sub>2</sub> ocorresse apenas em uma direção. No caso das amostras não terem sido condicionadas, as diferenças entre os dois tipos de cura foram majoradas, pois em poros saturados com água a difusão do CO<sub>2</sub> é mais lenta e, por consequência, a velocidade de carbonatação também é reduzida.

Dhir, Hewlett e Chan (1989) curaram concretos por 28 dias, em 4 diferentes combinações entre cura em água e ao ar, e constataram que a redução na cura inicial em água de 4 dias para 1 dia implicou num aumento da profundidade de carbonatação superior a 80%, após 20 semanas de exposição.

Comparando os resultados de carbonatação de concretos curados em umidades relativas de 100 e 65%, Atis (2002) averiguou que em cura úmida (UR=100%) a profundidade de carbonatação atinge entre 35 e 70% do valor com relação à cura seca (UR=65%), dependendo da mistura, e verificou também que aumentando o tempo de cura a carbonatação diminui.

Com relação ao tempo de cura, Fattuhi (1988) realizou ensaios de carbonatação com concretos submetidos a diferentes condições de cura e constatou que aumentando o período de cura submersa, a profundidade de carbonatação diminui. Nos resultados obtidos pelo pesquisador, em corpos-de-prova nos quais a cura foi submersa por 1, 3, 5, 7 e 28 dias, as taxas de carbonatação foram de 66, 53, 42, 39 e 17%, respectivamente, com relação àqueles curados ao ar por 28 dias.

Lopes (1999) e Monteiro (1996) mostram que passando a cura de 7 para 28 dias tem-se uma diminuição na profundidade de carbonatação entre 20 e 30%.

Após 18 meses de ensaio com concentração de CO<sub>2</sub> natural, o aumento no tempo de cura de 1 para 28 dias reduziu a profundidade de carbonatação pela metade, sendo que este efeito depende do tipo de cimento e da relação a/c (BALAYSSAC; DÉTRICHÉ; GRANDET, 1995).

A revisão da literatura apresentada acima permite inferir que a cura submersa ou úmida propicia as melhores condições para hidratação do cimento, e conseqüente fechamento dos poros. A cura submersa tem a vantagem de ser mais fácil de realizar, uma vez que não exige nenhum tipo de equipamento e os custos são mais baixos. É importante lembrar que, neste

caso, a água deve ser saturada com cal, para não ocorrer lixiviação das espécies químicas mais solúveis, como o hidróxido de cálcio.

No caso de cura em obra, a água evapora rapidamente apenas nos milímetros superficiais das peças e o interior continua a se hidratar. Em condições de laboratório a cura torna-se essencial para uniformizar os procedimentos de ensaio e acelerar a hidratação, uma vez que em seguida os materiais serão submetidos a ensaios acelerados de agressão, o que dificilmente ocorre em obra.

### 2.3.3.2 Precondicionamento

O condicionamento, por vezes também chamado de sazonalidade, constitui a etapa entre a cura das amostras e o início do ensaio de carbonatação propriamente dito, quando os corpos-de-prova são submetidos à ação do CO<sub>2</sub>.

As diferentes formas de condicionamento podem resultar em profundidades de carbonatação diversas para um mesmo material. Esta etapa é um ponto crítico e não deve ser ignorada (BAUER, 1995; DHIR; HEWLETT; CHAN, 1989; NEPOMUCENO, 1992; PAPADAKIS, 2000a; entre outros).

Um problema bastante comum nas pesquisas é a ausência desta etapa ou a omissão na descrição do condicionamento (ver item 2.5.3). Bahador e Jong (2006) concluíram que a maior razão para diferentes resultados em ensaios acelerados de carbonatação está nos diversos condicionamentos utilizados por distintos pesquisadores os quais são discutidos a seguir.

#### 2.3.3.2.1 Precondicionamento preconizado pela RILEM (1999) no TC 116-PCD

A RILEM (1999), nas recomendações do TC 116-PCD, descreve os procedimentos para ensaios de permeabilidade do concreto como critério da sua durabilidade. Nessas recomendações, a parte “A” especifica o condicionamento de corpos-de-prova de concreto para medição da permeabilidade a gases e absorção capilar de água. O procedimento é indicado para quaisquer ensaios que requeiram distribuição uniforme de umidade do material a ser ensaiado.

O procedimento da RILEM (1999) especifica a umidade de equilíbrio em 75%. Como a umidade de equilíbrio e do ambiente de ensaio desta pesquisa foi de 70%, o detalhamento do procedimento é feito considerando a umidade de 70%. A figura 13 apresenta um esquema das

etapas do condicionamento especificado pela RILEM (1999), até o início do ensaio de carbonatação.

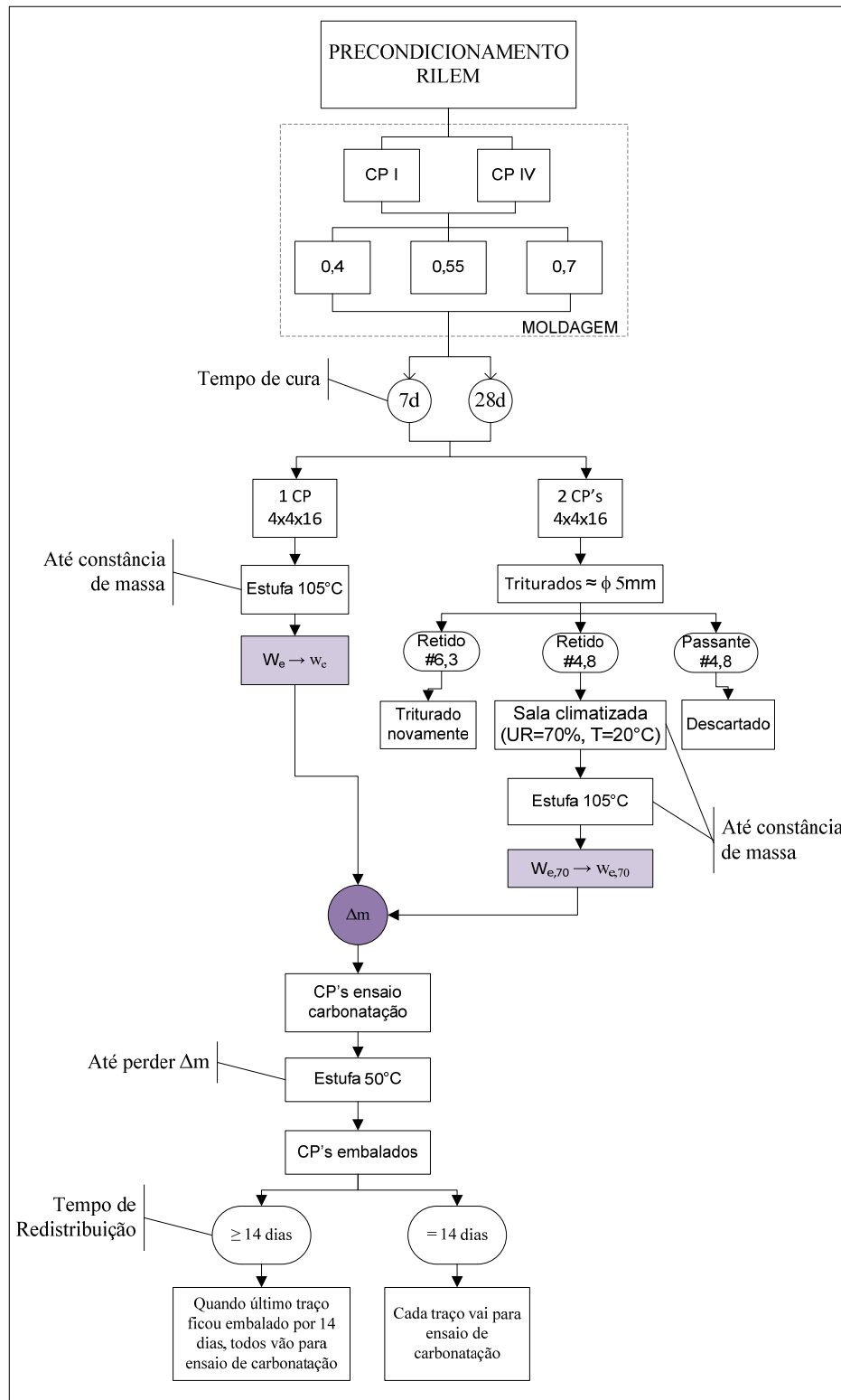


Figura 13 – Esquema ilustrativo das etapas do condicionamento especificado pela RILEM (1999)

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

a. determinação da concentração da umidade de equilíbrio

Nesta etapa, primeiro determina-se a quantidade total de água evaporável ( $W_e$ ). Para isso, ao final de cada período de cura, uma amostra de cada composição do material a ser ensaiado é seca em estufa a 105°C até que a diferença de massa observada seja menor que 0,5g entre duas leituras consecutivas, num intervalo de 24 horas. O cálculo da quantidade total de água evaporável ( $W_e$ ) é dado pela equação 9:

$$W_e = m_o - m_d \quad \text{Equação 9}$$

Onde:

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

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

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

Em seguida, pode-se calcular a concentração da umidade evaporável ( $w_e$ ), pela equação 10:

$$w_e = \frac{W_e}{m_d} \quad \text{Equação 10}$$

Em segundo lugar é feita a determinação da concentração intermediária de equilíbrio da umidade. Através de um ensaio de dessorção, ao final da cura, uma segunda amostra é cortada em fatias de  $\pm 5$  mm ou triturada de forma a se obter pedaços de diâmetro equivalente, e é colocada em ambiente com umidade de  $70 \pm 2\%$  e temperatura de  $20 \pm 1^\circ\text{C}$ . Para este teste de dessorção, deve ser usada uma quantidade mínima de 500g do material. O material permanece em secagem até o equilíbrio de umidade com o ambiente controlado. Deve-se tomar cuidado para que não se perca parte do material durante as pesagens. Após o equilíbrio, o material é pesado e colocado em estufa a 105°C até a constância de massa, com diferença de 0,1g entre duas leituras consecutivas em um intervalo de 24 horas. A quantidade de água evaporável no equilíbrio ( $W_{e,70}$ ) é calculada pela equação 11:

$$W_{e,70} = m_{e,70} - m_d \quad \text{Equação 11}$$

Onde:

$W_{e,70}$  = quantidade de água de equilíbrio a  $70\pm 2\%$  de umidade relativa (g);

$m_{e,70}$  = massa do corpo-de-prova no equilíbrio com  $70\pm 2\%$  de umidade relativa (g);

$m_d$  = massa do corpo-de-prova seco (g).

Então, pode-se calcular a concentração da umidade de equilíbrio ( $w_{e,70}$ ), pela equação 12:

$$w_{e,70} = \frac{W_{e,70}}{m_d} \quad \text{Equação 12}$$

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

A perda de massa necessária durante a pré-secagem é calculada em função da massa original do corpo-de-prova, ao final da cura, pela equação 13:

$$\Delta m = \left( \frac{w_e - w_{e,70}}{1 + w_e} \right) m_o \quad \text{Equação 13}$$

Onde:

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

$w_e$  = concentração da umidade evaporável;

$w_{e,70}$  = concentração da umidade de equilíbrio;

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

#### c. pré-secagem

A secagem das amostras a serem ensaiadas é acelerada a uma temperatura de  $50^\circ\text{C}$  em câmara ventilada, onde as amostras permanecem até perderem a massa especificada na etapa anterior.



A pré-secagem segue até que a perda de água requerida seja alcançada, com precisão de 5%, conforme a equação 14:

$$\frac{\Delta m_{\text{obs}} - \Delta m_{\text{cal}}}{\Delta m_{\text{cal}}} < 0,05 \quad \text{Equação 14}$$

Onde:

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

$\Delta m_{\text{cal}}^6$  = variação de massa requerida, calculada para cada corpo-de-prova, de acordo com a equação 13 (g).

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

#### d. fase de redistribuição da umidade

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

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

#### 2.3.3.2.2 Precondicionamento em sala climatizada

O precondicionamento que se está chamando “em sala climatizada” consiste em expor as amostras a serem ensaiadas em um ambiente com temperatura e umidade controladas e

---

<sup>6</sup>  $\Delta m$  é o valor calculado para o corpo-de-prova utilizado na etapa preliminar, quando é feita a determinação da perda de massa necessária durante a pré-secagem e  $\Delta m_{\text{cal}}$  é o valor correspondente a cada um dos corpos-de-prova do ensaio, o que resulta em valores distintos.

monitorar a massa das amostras até que estas atinjam o equilíbrio hídrico com o ambiente, o que é verificado através de massa constante<sup>7</sup>.

#### 2.3.3.2.3 Outras formas de acondicionamento

Rougeau (1997) realizou uma pesquisa utilizando dois tipos de acondicionamento baseados em um procedimento de saturação e posterior secagem. Um deles é o procedimento da RILEM (1999), TC-116 PCD e, o outro, considera um tempo de secagem fixo.

Para o acondicionamento com tempo de secagem fixo, Rougeau (1997) testou dois métodos: no primeiro uma secagem a 40°C durante dois dias e, no segundo, uma secagem durante 11 dias em atmosfera com 20°C e umidade relativa de 65%. Os resultados dos dois acondicionamentos em ensaio de carbonatação com diferentes percentuais de CO<sub>2</sub> foram apresentados na figura 9, item 2.3.2.2. Os valores de carbonatação até a concentração de 50% de CO<sub>2</sub> são semelhantes entre os dois acondicionamentos. O primeiro modo de secagem adotado por Rougeau (1997) é o modo recomendado pela A.F.P.C.-A.F.R.E.M. (1997).

A norma européia (AFNOR, 2004 – NF EN 12395) especifica um acondicionamento para o ensaio acelerado de carbonatação que consiste em expor as amostras a um ambiente com umidade relativa de 60±10% e temperatura de 21±2°C até constância de massa.

#### 2.3.3.2.4 Discussão sobre os acondicionamentos

No acondicionamento preconizado pela RILEM (1999), TC-116 PCD, o princípio deste procedimento é de começar o ensaio de carbonatação acelerada em concretos onde a taxa de saturação é conhecida e constante, independentemente do tipo de concreto testado. A vantagem é que este acondicionamento permite conhecer com precisão o estado hídrico do material no tempo t=0, principalmente se os resultados forem utilizados em modelos preditivos. O inconveniente deste tipo de procedimento é a imposição de um período de secagem dos corpos-de-prova naturalmente. Para obter uma determinada taxa de saturação, é necessário fazer essa secagem natural que permitirá traçar as curvas de evolução da taxa de saturação em função da duração da secagem. Em razão do tempo requerido para essas diferentes fases preliminares, tal acondicionamento é julgado como pouco compatível com a necessidade de reduzir a duração do ensaio de carbonatação acelerada (ROUGEAU, 1997).

---

<sup>7</sup> Considera-se massa constante quando a diferença entre pesagens consecutivas com intervalo de 24 horas é inferior a 0,1g.

Além disso, o procedimento da RILEM (1999) deixa dúvidas quanto à sua realização. Está especificado que após o período de cura determina-se a quantidade de água em equilíbrio com o ambiente de ensaio, através de dessorção. Diversos estudos (BAROGHEL-BOUNY, 1994; DELMI, 2004; entre outros) mostram que o ensaio de dessorção é demorado, podendo levar meses para alcançar o equilíbrio desejado. Essa fase de determinação da quantidade de água a ser perdida pelas amostras vai depender do tipo de cimento, das adições, da relação a/c e também do tempo de cura inicial, entre outros fatores. Rougeau (1997) e Pauletti (2004) interpretaram a necessidade de uma moldagem prévia para essa determinação. Dessa forma evita-se que as amostras utilizadas para determinar a quantidade de água a ser perdida ( $\Delta m$ ) sejam diferentes daquelas utilizadas para o ensaio de carbonatação. Pois, se todas as amostras forem moldadas ao mesmo tempo, enquanto se determina a quantidade de água a ser perdida, as amostras que serão carbonatadas estarão ainda curando ou em ambiente de laboratório (curando, carbonatando). Isso gera diferentes graus de hidratação, e por consequência porosidades diferentes, quantidade de produtos carbonatáveis diferentes, que influenciam na difusão do CO<sub>2</sub>, na profundidade de carbonatação e quantidade de carbonatos formados. Outra parte que deixa dúvidas é a fase de redistribuição, onde está escrito que esse procedimento continua até a idade de 27 dias, mas com mínimo de 14 dias. Isso supõe que aos 28 dias as amostras estejam prontas para o ensaio de carbonatação, quando dificilmente as amostras atingiram o equilíbrio hídrico da primeira etapa. Diferente da interpretação feita por Rougeau (1997) e Pauletti (2004), os trabalhos de Dalla Lana (2005), Hoppe Filho (2008), Isaia (1995), Stumpp (2003), Venquiaruto (2002), entre outros, utilizaram para a fase de pré-secagem e para o ensaio de carbonatação, amostras da mesma moldagem, o que indica que o método não é claro.

Para se obter um ambiente de umidade relativa de 75% em temperatura mais elevada (50°C, por exemplo) são necessárias câmaras climatizadas. Para facilitar esse procedimento, a própria RILEM especifica que se determine previamente, em ambiente com temperatura de 21°C e umidade relativa de 75%, a quantidade de água a ser perdida e em seguida as amostras a serem utilizadas no ensaio atinjam essa condição preestabelecida em estufa a 50°C e então seja feita a redistribuição da água restante na amostra.

No condicionamento com tempo de secagem fixo, no início do ensaio de carbonatação acelerada, o estado hídrico dos concretos pode variar em função da microestrutura do material. No entanto, a simplicidade desse procedimento permite uma boa reprodutibilidade com duração de realização factível, explica Rougeau (1997).

No mesmo sentido da reflexão de Rougeau (1997), Pauletti *et al.* (2006) questionam o papel do condicionamento e o que se espera dele: “*que haja uma distribuição homogênea de uma quantidade de água em equilíbrio com um ambiente de dada umidade relativa?*” ou “*que a condição de ensaio seja igual para todos os corpos-de-prova, mesmo que isso resulte em quantidades distintas de água internamente?*” ou “*que seja um procedimento de fácil realização?*” ou “*que represente da forma mais fiel possível o que ocorre na prática?*”. A discussão do que se espera desse procedimento está sendo feita pelo comitê da norma brasileira. Para avaliar diferentes materiais, uma quantidade de água em equilíbrio com ambiente de umidade relativa conhecida parece ser um fator importante. Para o caso de previsão de vida útil a condição mais semelhante à carbonatação natural é a que parece ser mais importante. Ainda é preciso avaliar e discutir esse assunto.

Outros aspectos importantes com relação aos condicionamentos são a redistribuição da água de equilíbrio, uma vez que a secagem ocorre da superfície para o núcleo e a água que fica no núcleo do corpo-de-prova deve ser redistribuída e a temperatura utilizada nas etapas de perda de água e redistribuição, assuntos que também são discutidos a seguir.

Parrott (1994) mostra que para cubos de concreto com 100 mm são necessários 2,5 a 7 dias (dependendo do tipo de cimento e da relação a/c) de secagem a 50°C para se obter uma umidade média interna de 60%. Amostras que foram secas por alguns dias (1 a 7 dias) a 50°C e depois seladas e mantidas por mais alguns dias (3 a 10 dias) a 50°C para redistribuição da umidade residual mostram que o procedimento se mostrou eficiente, segundo o autor, provendo um rápido e conveniente método para obtenção de uma distribuição uniforme da umidade em cubos de concreto de 100mm.

Thiery (2005) avaliou por gamadensimetria que o modo de secagem recomendado pela A.F.P.C.-A.F.R.E.M. (1997) (40°C durante dois dias) é bastante superficial, restando a amostra com cerca de 90% de saturação no seu núcleo, o que vai atrapalhar a difusão do CO<sub>2</sub> durante a carbonatação. Baseado no trabalho de Parrott (1994), Thiery (2000)<sup>8</sup> *apud* Thiery (2005) realizou um procedimento de condicionamento que consiste em secagem a 45°C por 14 dias e em seguida, selagem das amostras e redistribuição em estufa a 45°C por 14 dias. Os resultados mostram que o perfil de gamadensimetria é praticamente o mesmo antes e depois do processo de redistribuição da umidade e que, mesmo em um concreto poroso, de resistência de 20 MPa, o

---

<sup>8</sup> THIERY, M. Étude de la durabilité liée aux transferts gazeux pour deux bétons très différents. Rapport Technique, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Division Bétons et Composites Cimentaires.

núcleo ainda fica com taxa de saturação próxima aos 80%. Em função disso, Thiery (2005) testou outro condicionamento (S1): secagem a 45°C por um mês e posterior colocação das amostras em dessecadores com a mesma umidade do ambiente do ensaio de carbonatação (53±5%) por mais um mês. Entretanto, as resistências dos concretos utilizados por Thiery (2005) foram de 40 e 50 MPa e esse procedimento também não se mostrou eficaz. Por fim, o autor adotou outro condicionamento (S2): 1 semana a 45°C + 1 semana a 60°C + 1 semana a 45°C que permitiu atingir taxas de saturação inferiores a 80% no centro das amostras de ambos os concretos. A diferença entre os condicionamentos S1 e S2 foi mais significativa para concretos de 50 MPa, que são mais densos.

Os efeitos do condicionamento para ensaios de carbonatação acelerada foram avaliados por Bahador e Jong (2006) que verificaram a estrutura dos poros do concreto quando submetidos à secagem a 105 e 40°C. A secagem a 105°C aumenta o diâmetro médio dos poros cerca de três vezes e aumenta também a conectividade entre eles. Isso acontece porque nessa temperatura ocorre a degradação dos hidratos. A secagem a 40°C também pode causar danos na estrutura dos poros próximos à superfície do concreto. Os autores recomendam métodos de secagem a vácuo e por congelamento para o condicionamento de amostras a serem utilizadas em ensaios de carbonatação. Esses métodos podem ser eficazes para se atingir o objetivo do condicionamento, todavia envolvem equipamentos específicos e maiores custos de execução, o que são fatores limitantes para diversos laboratórios que acabariam por não realizar corretamente o procedimento. Castel *et al.* (2001) investigaram se a microfissuração superficial exerce influência na profundidade de carbonatação de concretos de três classes de resistência (25, 40 e 60 MPa). Os pesquisadores submeteram as amostras a quatro tempos de cura úmida (0, 1, 3 ou 28 dias) e quatro modos de tratamento após os períodos de cura:

- c) sala climatizada a 20°C e 55% de UR até 35° dia;
- d) 15 dias em estufa a 50°C e depois sala climatizada a 20°C e 55% de UR até 35° dia;
- e) 15 dias em estufa a 50°C, depois 15 dias em dessecador a 20°C e 9% UR e por fim sala climatizada a 20°C e 55% de UR até 35° dia;
- f) 30 dias sala úmida 100% UR e depois sala climatizada a 20°C e 55% de UR até 35° dia (esse último para cura de 28 dias, amostras consideradas sem microfissuração).

A microfissuração da superfície dos concretos foi quantificada e as amostras carbonatadas a 50% de CO<sub>2</sub>. O aumento da profundidade de carbonatação é atribuído a três fatores: porosidade do material, presença de microfissuração superficial e variação interna da quantidade de água. Os autores concluem que para concretos de 25 MPa de resistência, a microfissuração superficial pode ser negligenciada face à porosidade do material. Ao contrário, para concretos de 60 MPa, que praticamente não carbonatam na ausência de fissuras, a carbonatação foi aumentada pela microfissuração. Os concretos de 40 MPa foram considerados como um caso intermediário entre os outros dois. Globalmente, Castel *et al.* (2001) condicionam a influência da microfissuração superficial na profundidade de carbonatação à classe de resistência do concreto e consideram que esta passa a ser significativa para concretos que alcancem resistências a partir dos 50 MPa. Em resistências mais altas (50 MPa) ou relações a/c mais baixas (a/c<0,45) a carbonatação do concreto é muito pequena ou nula (KULAKOWSKI, 2002), mas isso também será dependente do tipo de material, que no caso de haver adições vai estar vinculado ao tipo e teor de adições empregado. Deve-se tomar cuidado para não inserir em materiais deste tipo uma microfissuração causada pela secagem, o que elevaria as profundidades de carbonatação, levando a um falso resultado, que dificilmente ocorreria naturalmente.

O condicionamento em sala climatizada, com temperatura e umidade relativa controladas, é uma alternativa de fácil execução. Porém, em casos onde não são tomadas as devidas precauções para retirada do CO<sub>2</sub> do ambiente, deve-se tomar cuidado com a possibilidade de falso equilíbrio. Estudos realizados por Delmi (2004) e Baroghel-Bouny (1994) mostram que amostras de um ou dois centímetros de espessura podem levar meses para atingirem o equilíbrio hídrico. Os corpos-de-prova de argamassa ensaiados por Delmi (2004) possuíam dimensões de 4x4x2 cm e necessitaram de 260 dias para atingir o equilíbrio a uma temperatura de 23°C e umidade relativa de 65%. Para acelerar a perda de água poderiam ser usadas temperaturas um pouco mais elevadas (30-35°C). Outra forma de condicionamento seria determinar a quantidade total de água evaporável de cada traço de concreto, no estado saturado, ao final do período de cura, através da secagem a 105°C, sacrificando para isso dois ou três corpos-de-prova. A partir disso, estabelecer a perda de um percentual “x” desse total e realizar a secagem a uma temperatura de cerca de 50°C até que esse valor predeterminado seja atingido. Por fim, selar as amostras e realizar o procedimento de redistribuição da umidade restante. É evidente que esta metodologia merece ser melhor avaliada, mas pode ser uma

solução de rápida execução face aos demais procedimentos apresentados, onde o teor de umidade interna seria conhecido e igual para as diferentes composições de concreto. A diferença com relação à RILEM é que elimina a etapa de dessorção, que é a mais demorada. No entanto, nessa determinação inicial a 105°C haveria a perda de água quimicamente combinada como hidratos, precisando ser essa idéia melhor discutida.

Quanto aos resultados de ineficiência da redistribuição de umidade apresentados por Thierry (2005), seria importante avaliar o desempenho do material utilizado como selante, bem como testar outros períodos e temperaturas para a redistribuição.

A revisão apresentada com relação aos procedimentos que podem ser adotados para o condicionamento mostra que inúmeras são as possibilidades e que elas muito interferem nos resultados de carbonatação. Talvez seja difícil encontrar uma opção perfeita, mas certamente, a alternativa mais adequada estará relacionada à escolha de outras variáveis do ensaio de carbonatação, como o tipo e tempo de cura e o percentual de CO<sub>2</sub> a serem adotados, bem como na simplicidade e praticidade de execução, devendo a metodologia ser clara e objetiva, para que se obtenha reprodutibilidade com resultados satisfatórios.

#### 2.3.4 Parâmetros para modelagem

Quando os ensaios de carbonatação acelerada são realizados com vistas à modelagem do fenômeno, deve-se levar em consideração a relação com ensaios de carbonatação natural, o tamanho das amostras e o tempo de ensaio.

A ASTM E-632 (1996) recomenda que para fins de previsão da vida útil, os resultados de ensaios acelerados sejam correlacionados com dados oriundos de ensaios naturais de degradação. Por demandarem bastante tempo (geralmente anos) para obtenção de resultados, os ensaios naturais são pouco correntes e, na maioria das vezes, procura-se estabelecer coeficientes de aceleração, ou seja, calcular quanto tempo seria necessário para atingir tal profundidade na prática. Mais detalhes sobre os ensaios e pesquisas de carbonatação natural são apresentados no item 2.5.1.

Com relação ao tamanho das amostras para a realização de ensaios de carbonatação, a NBR 6118 (2003) especifica a espessura de cobertura do concreto e, em função disso, as dimensões dos corpos-de-prova devem ser iguais ou superiores ao dobro dessa espessura. Corpos-de-prova prismáticos, com dimensões mínimas de 40x40x160 mm devem ser utilizados, segundo a

AFNOR, NF EN 13295 (2004), que também especifica amostras de 100x100x400 mm (no mínimo) quando a dimensão máxima do agregado for maior que 10 mm.

Também se acredita que para fins de modelagem e, conseqüentemente, melhor aproximação da vida útil das estruturas de concreto, o ensaio de carbonatação acelerado deve ser conduzido até a obtenção da curva de tendência ao estacionamento do fenômeno, que normalmente é alcançado com períodos mais longos de exposição ao CO<sub>2</sub>. Isso implica em aumento na dimensão dos corpos-de-prova e no tempo de ensaio, o que necessita de um estudo de viabilidade técnico-econômica (PAULETTI; POSSAN; DAL MOLIN, 2007).

É possível encontrar na literatura uma série de modelos de predição da carbonatação natural. Esse assunto é abordado no capítulo 5.

## 2.4 FORMAS DE MEDIÇÃO DA CARBONATAÇÃO

A frente carbonatada pode ser medida através diversas técnicas que são brevemente descritas neste trabalho. Embora haja alguma diferença nos valores medidos entre diferentes procedimentos, o mais utilizado é o de indicadores químicos de pH. Thiery (2005) explica em detalhes o funcionamento dos indicadores de pH. Para medidas da carbonatação, o indicador deve apresentar contraste colorido entre a forma ácida e a forma básica e é importante que essa cor se destaque do tom cinza natural dos concretos. Potenciais indicadores são o vermelho de cresol, a fenolftaleína, a timolftaleína e o azul de Nil. A tabela 2 apresenta as propriedades de alguns indicadores químicos de pH.

Tabela 2 – Propriedades de alguns indicadores químicos de pH

<b>Indicadores</b>	<b>Cores</b>	<b>Ponto de viragem</b>	<b>Formulação</b>
Vermelho de cresol	Amarelo Vermelho	7,2 – 8,8	0,1g/100 ml de etanol
Fenolftaleína	Incolor Rosa	8,0 – 9,9	0,1g/100 ml de etanol
Timolftaleína	Incolor Azul	9,3 – 10,5	0,1g/100 ml de etanol
Amarelo de alizarina	Amarelo claro Amarelo escuro	10,0 – 12,1	0,1g/100 ml de etanol
Alizarina	Vermelho Púrpura	10,1 – 12,1	0,1g/100 ml de etanol
Azul de Nil	Azul Vermelho	10,1 – 11,1	0,1g/100 ml de água

Baseada em: Thiery (2005)



Segundo Thiery (2005), quanto mais alto for o ponto de viragem, maior será a profundidade carbonatada indicada, pois neste caso, é necessário neutralizar uma quantidade menor de carbonato de cálcio para atingir o ponto de viragem. Existem diferenças na profundidade carbonatada apresentada por cada indicador, o que torna difícil o emprego de diferentes indicadores para obtenção dos perfis de pH. Mas de acordo com Thiery (2005), esta diferença é inferior ao erro de medida. A timolftaleína apresenta profundidades de carbonatação um pouco superiores às da fenolftaleína (KAZMIERCZAK; LINDENMEYER, 1996). Além dos indicadores citados na tabela 2, Forrester (1976) cita outros como o verde Naphthol B e um indicador de longa duração que é composto por um indicador fluorescente (laranja Acridine) misturado com um indicador de absorção (amarelo Thiazole).

Entre os indicadores químicos de pH, o mais utilizado na engenharia civil, para medida da carbonatação, é a fenolftaleína. Não há concordância no meio científico em qual valor de pH ocorre exatamente o ponto de viragem da fenolftaleína. A cor rosa indica a elevada concentração de  $\text{Ca(OH)}_2$ , mas não a ausência total de carbonatação. A metodologia não faz distinção entre pH baixo por carbonatação ou devido a outros gases ácidos (NEVILLE, 1997).

O ponto de viragem da fenolftaleína ocorre em pH entre 8 e 10 (ponto A). Sendo que o concreto/argamassa possuem pH de cerca de 12,5 (ponto B), nesta faixa entre A e B (ver Figura 6) a fenolftaleína ainda apresenta coloração rosa. No entanto, já houve consumo de parte dos produtos que conferem alcalinidade ao material, ou seja, a carbonatação já iniciou e a frente indicada pela fenolftaleína, assim como por outros indicadores químicos, não é real. Apesar disso, não existe problema algum em se fazer uso desses indicadores quando os ensaios de carbonatação são realizados de forma comparativa.

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

Existem outras técnicas para medir o pH da solução dos poros, como a extração da fase líquida intersticial, no entanto, essa técnica é limitada pelo peso do dispositivo de extração que coleta volumes muito pequenos de líquido e os resultados oferecem uma medida global do pH (THIERY, 2005).

Parrott (1987) salienta que outros métodos de medida de profundidade de carbonatação, como a análise termogravimétrica, a análise química, a difração de Raios-X, a microscopia ótica e a análise da solução do pH dos poros, entre outros, dão resultados superiores e mais precisos em comparação aos indicados pela fenolftaleína. Kazmierczak e Lindenmeyer (1996) encontraram valores de profundidade de carbonatação superiores para análises por microscopia ótica com relação à fenolftaleína. Da mesma forma, os resultados obtidos por Lo e Lee (2002) indicaram que a carbonatação de concretos analisados com espectroscopia por infravermelho é cerca de 24% maior que a apresentada pela fenolftaleína.

A variação de massa pode ser utilizada para acompanhamento da carbonatação, sem destruição da amostra, uma vez que os compostos formados geram carbonatos com massa superior e ainda liberam água (MEHTA, 1991; KAZMIERCZAK; LINDENMEYER, 1996; THIERY, 2005; CASTELLOTE *et al.*, 2009). No entanto, esta técnica não pode ser usada para estruturas reais.

Mehta (1991) e Kazmierczak e Lindenmeyer (1996) descrevem o uso da microscopia ótica com feixe de luz polarizada para determinar a frente de carbonatação. Nessa metodologia é necessário preparar uma lâmina delgada para cada seção a ser analisada. A região não carbonatada apresenta cor escura quando vista no microscópio e o  $\text{CaCO}_3$ , cor natural. As desvantagens dessa técnica são a dificuldade de confeccionar as lâminas e o custo elevado.

Villain e Thiery (2006) apresentam a gamadensimetria como técnica para medida da profundidade carbonatada. Este é um procedimento não destrutivo que permite medir também o  $\text{CO}_2$  que entra e é fixado no concreto ao longo do período de carbonatação, sem afetar o estado hídrico e as reações químicas. A única desvantagem, segundo os autores, é que é necessário um estado de referência (no tempo  $t=0$ ), o que impede seu uso no caso de testemunhos de estruturas reais.

No trabalho de Villain, Thiery e Platret (2007), a análise termogravimétrica (ATG) combinada com a análise química foi empregada para determinar os perfis de diferentes profundidades carbonatadas em concreto. Na ATG a argamassa extraída do concreto é

utilizada e a combinação com a análise química é necessária por dois motivos: em primeiro lugar, a argamassa utilizada na ATG não é representativa do todo e em segundo, os carbonatos do agregado podem ser confundidos com os carbonatos gerados pela carbonatação. A análise química combinada com ATG pode dar o resultado exato da composição do cimento e da areia. Os resultados da gamadensimetria foram comparados com os obtidos por combinação de ATG-análise química e os perfis apresentam boa concordância (VILLAIN; THIERY, 2006; VILLAIN; THIERY; PLATRET, 2007).

Martinez-Ramirez *et al.* (2003) empregaram a espectroscopia de micro-Raman para quantificar o carbonato de cálcio formado em diferentes profundidades na argamassa de cal, sem destruir a amostra. Encontraram calcita e em diferentes profundidades também aragonita. Não foi encontrada a vaterita, mas os autores afirmam que a técnica possibilita a identificação dos três tipos do polimorfo. O tamanho dos cristais de calcita encontrados está entre 25 e 30µm. As profundidades investigadas variaram de 0 a 5µm e não foi possível estabelecer uma relação clara entre o CaCO<sub>3</sub> e a profundidade na amostra.

A difração de raios X (DRX) também pode ser empregada para identificar as diferentes formas cristalinas dos compostos. Todavia, esta técnica não permite identificar os compostos semicristalinos ou amorfos (THIERY, 2005).

Outras técnicas que podem ser empregadas: ressonância magnética nuclear (<sup>29</sup>Si M.A.S.-N.M.R.) utilizada por Castellote *et al.* (2009), espectrometria infravermelha pela transformada de Fourier (IRTF) empregada por Farcas e Touzé (2001).

Algumas técnicas devem ser utilizadas em combinação com outras para complementar e aperfeiçoar o resultado obtido. Por exemplo, Castellote *et al.* (2009) utilizaram uma combinação de três técnicas: <sup>29</sup>Si M.A.S.-N.M.R., ATG e DRX. Villain e Thiery (2006) fizeram uso da gamadensimetria e ATG combinada com análise química.

Para cada caso deve ser avaliado qual o melhor método a ser utilizado. Ainda que os indicadores químicos não consigam mostrar com precisão onde se encontra a frente de carbonatação, eles têm a capacidade de identificar a região onde houve mudança de pH, que é o que vai comandar a despassivação do aço. A técnica é muito simples, de baixo custo, não exige mão-de-obra especializada, é adequada para uso em campo e pode ser utilizada entre as pesquisas com fins comparativos. Na seqüência são apresentadas algumas pesquisas de carbonatação natural e acelerada.

## 2.5 PESQUISAS EM CARBONATAÇÃO

A intenção deste item é mostrar parte do que tem sido feito em pesquisas de carbonatação natural e acelerada, apresentando ao final um resumo dos trabalhos consultados. Como serão avaliados dados de ensaios acelerados e naturais, apresentam-se, na seqüência, algumas pesquisas que foram realizadas com concentrações naturais de CO<sub>2</sub> e as correlações que foram estabelecidas.

### 2.5.1 Carbonatação natural

Em função do tempo requerido para a obtenção de resultados, são pouco correntes as pesquisas com concentrações naturais de CO<sub>2</sub>. A maior parte dos ensaios naturais é realizada com o intuito de correlacionar os dados obtidos com resultados de estudos acelerados, a fim de estabelecer coeficientes de aceleração e predizer a profundidade de carbonatação, ou seja, calcular quanto tempo seria necessário para atingir tal profundidade na prática.

Muntean *et al.* (2005) fazem uma ampla reflexão a cerca das relações entre ensaios naturais e acelerados de carbonatação, mas também lamentam a escassa bibliografia em torno do tema. Os autores salientam que os ensaios acelerados não podem ser extrapolados para um cenário de exposição natural através de simples mudança na escala de concentração de CO<sub>2</sub>. Eles citam o trabalho realizado por Sanjuán, Andrade e Cheyrezy (2003) e comparações com modelos teóricos que mostram que as predições ficam restritas ao mesmo tipo de material e que não há concordância no meio científico quanto aos fatores pelos quais a carbonatação aumenta ou diminui, concluindo que os testes acelerados e naturais não são sempre análogos.

Alguns trabalhos que realizaram pesquisas em condições naturais de exposição são apresentados nas tabelas 3 a 6 (item 2.5.3).

No presente estudo se pretende comparar os dados de pesquisas naturais com ensaios acelerados realizados em condições distintas, para colocar em evidência as diferenças entre os dois tipos de ensaio. Poucas são as pesquisas que apresentam correlações entre ensaios naturais e acelerados.

Ho e Lewis (1987) expuseram concretos para carbonatação natural em laboratório (23°C e umidade relativa de 50%) e em ambiente externo não protegido das intempéries. As medidas foram obtidas após 4 meses e um ano de exposição. A profundidade de carbonatação, após um

ano em laboratório, equivale a uma semana em câmara com 4% de CO<sub>2</sub>. A carbonatação das amostras ensaiadas em laboratório foi maior que daquelas expostas ao tempo.

Isaia, Vagheti e Gastaldini (2001) pesquisaram a carbonatação natural (ambiente interno) e acelerada (10% de CO<sub>2</sub>) de concretos com adição de sílica ativa, cinza volante e cinza de casca de arroz, como também misturas binárias e ternárias com essas adições. Os autores concluíram que, para misturas com até 25% de pozolana a equivalência entre acelerado e natural é igual, em média, a  $1 \text{ mm.semana}^{0,5} = 1 \text{ mm.ano}^{0,5}$  e, quando o teor de adição é de 50%,  $1 \text{ mm.semana}^{0,5} = 3,6 \text{ mm.ano}^{0,5}$ .

Possan (2004) apresenta resultados de concretos confeccionados por Kulakowski (2002) e Vieira (2003) com e sem adição de sílica ativa, expostos à carbonatação natural em ambiente não protegido das intempéries durante sete anos. As relações água/aglomerante medidas foram de 0,30, 0,45 e 0,80 e apenas a maior delas apresentou espessura carbonatada. Relacionando os dados aos ensaios acelerados, com 5% de CO<sub>2</sub> e umidade relativa de 70%, 14 semanas de ensaio acelerado correspondem a 8,3 anos de ensaios naturais para concretos com CP V sem adições e 9,5 anos para concretos com adição de 20% de sílica ativa.

As relações entre ensaios acelerados e naturais devem ser feitas com cuidado. Os coeficientes de aceleração encontrados traduzem o comportamento de determinado material, nas características em que o ensaio foi realizado, mas fazer generalizações é muito complicado, pois diversos fatores influenciam os resultados que não devem ser extrapolados para outras situações.

### 2.5.2 Carbonatação acelerada

Os ensaios acelerados procuram simular as condições mais propícias para o desenvolvimento das reações de carbonatação, controlando os fatores que a influenciam e, ao mesmo tempo, fazendo com que os resultados sejam obtidos no menor intervalo de tempo possível.

Como não existe normalização do ensaio de carbonatação, cada pesquisa adota métodos e condições distintos, o que torna difícil e até mesmo impossibilita a comparação entre diferentes estudos, sendo necessária uma padronização.

Os ensaios acelerados podem ser utilizados comparativamente como parâmetro de durabilidade entre diferentes composições, desde que as condições de ensaio tenham sido as

mesmas para os todos os materiais. Outra utilização está na predição da profundidade carbonatada ao natural a partir dos ensaios acelerados, mas para isso é preciso primeiro entender o que se passa em ambas as condições para então poder fazer extrapolações.

Como ressaltado anteriormente (item 2.3), uma série de fatores influenciam os resultados de carbonatação e isto é ainda mais evidente para os ensaios acelerados.

Muntean e Böhm (2009) ressaltam que o efeito da barreira de água aumenta algumas dúvidas sobre a relevância de vários ensaios acelerados de laboratório com altas concentrações de CO<sub>2</sub>. E sugerem que o primeiro passo para fazer uso desses ensaios acelerados poderia ser o melhor entendimento entre a água liberada pela reação, o transporte da água em meio poroso, a água como motor da reação de carbonatação, a mudança na porosidade e a fração de água produzida pela reação, especialmente no que se refere ao comportamento de longo prazo das concentrações ativas.

Diversos pesquisadores investigaram a carbonatação acelerada, principalmente em concretos e argamassas. Alguns resultados são expostos no item seguinte (2.5.3).

### 2.5.3 Resumo sobre as condições das pesquisas de carbonatação

A dificuldade de se encontrar na literatura trabalhos em carbonatação natural e acelerada para o mesmo material foi aqui verificada e também havia sido salientada por Muntean *et al.* (2005).

Os dados de diversas pesquisas de carbonatação realizadas no Brasil e no mundo, principalmente para concretos e argamassas são apresentados de forma sintetizada nas tabelas 3 a 6, adaptadas do trabalho de Pauletti (2004).

Tabela 3 – Estudos de carbonatação em concretos realizados no Brasil

<b>Pesquisador</b>	<b>Ano</b>	<b>Amostras forma/dimensão (mm)</b>	<b>a/agl</b>	<b>Tipo de cura Tempo de cura (dias)</b>	<b>Precondicionamento Tempo/local</b>	<b>UR (%)</b>	<b>T (°C)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (%)</b>	<b>Tempo de exposição (dias)</b>
Nepomuceno	(1992)	prismas 20x55x80	-	úmida/ao ar 1, 7 e 28	70 dias laboratório	entre 50 e 70	20	100	variável
Isaia	(1995)	cilindros 100x100	0,30 a 0,50	úmida 7	28 dias laboratório	-	-	10	28, 56, 84 e 112
Sierra	(1996)	cilíndricos 100x200		submersa 7		maior que 80	24	5	
Vaghetti	(1999)	cilindros 100x100	0,35 a 0,55	úmida 7	21 e 84 laboratório	entre 50 e 80	23	10	28, 56, 84 e 112
Lopes	(1999)	cilindros 100x200	0,38 a 0,48	úmida 7 e 28	22 e 43 laboratório	55	27	100	7, 14, 21, 28 e 35
Alves	(2000)	cilindro 100x70	0,35 a 0,65	úmida 7	21 dias laboratório	80	24	5	28, 56 e 84
Cunha e Helene	(2001)	prismas 279x152x114	0,35 a 0,65	úmida 28	15 dias laboratório	65	23,5	100	2h/2h, a/c=0,35 4h/4h, a/c=0,65
Levy	(2001)	Cubos 100		úmida 14	Lab. Até 182 dias	60±15	29	12	14 e 28
Isaia, Vaghetti, Gastaldini	(2001)	Cilindros 100x100	0,33 a 0,57	Úmida 7	Lab. até completar 28 dias	60 a 70	20 a 26	10	8, 12, 16, 20 semanas
Isaia, Vaghetti, Gastaldini	(2001)	Cilindros 100x100	0,33 a 0,57	Úmida 7	-	40 a 90	12 a 35	natural	0,5, 1 e 2 anos
Venquiaruto	(2002)	cilindros 100x70	0,35 a 0,65	úmida 7	35 dias laboratório/ estufa RILEM				

<b>Pesquisador</b>	<b>Ano</b>	<b>Amostras forma/dimensão (mm)</b>	<b>a/agl</b>	<b>Tipo de cura Tempo de cura (dias)</b>	<b>Precondicionamento Tempo/local</b>	<b>UR (%)</b>	<b>T (°C)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (%)</b>	<b>Tempo de exposição (dias)</b>	
Kulakowski	(2002)	prismas 100x100x300	0,30 a 0,80	úmida amostras embaladas 14	14 dias câmara precond.	70	25	5	35, 56, 91 e 126	
Coelho <i>et al.</i>	(2002)	cilindros 100x200	-	úmida 28	35 dias laboratório	entre 60 e 70	26	100	77 e 91	
Silva	(2002)	cilindros 50x100	0,45	úmida 7	Sem precond.	60	25	100	7, 14, 28, 63 e 91	
Vieira	(2003)	prismas 100x100x60	0,40 a 0,70	úmida 28	7 dias estufa (50°C), 14 dias em sala clim.	70	25	≥50	24 e 96h depois a cada semana até 23 sem.	
Kirchheim	(2003)	prismas 60x60x180	0,40 a 0,60	úmida 28	até constância câmara precond.	70	25	100		
Stumpp	(2003)	cilindros 100x70	0,35 a 0,55	úmida 7	RILEM	75	22	5	4, 8, 12 semanas	
Sperb	(2003)	cilindros 100x70	0,35 a 0,65	úmida 7	RILEM	75	23	10	4, 8, 12 semanas	
Abreu	(2004)	prismas 100x100x60	0,44 a 0,65	úmida 28	32 dias câmara precond.	70	25	5 e <50	63 e 195	
Bourguignon	(2004)	cilindros 100x200	0,40 a 0,75	úmida 15	49 dias seca – UR 50%	65	26	95	14 e 28	
Figueiredo	(2004)	Testemunhos de estruturas reais					60		100	1h
Dalla Lana	(2005)	cilindros 100x50	0,4 a 0,8	Sacos aniagem 7d Natural 49d	RILEM	75	22	5	4, 8, 12 semanas	
Hoppe Filho	(2008)	cilindros 80x150	0,35 a 0,65	úmida 28	RILEM	75	20	5	4, 8, 12, 16 e 20 semanas	
Barin	(2008)	cilindros 100x65	0,30 a 0,55	úmida 7	RILEM	75	23	2	3, 6, 9 e 12 semanas	



Pesquisador	Ano	Amostras forma/dimensão (mm)	a/agl	Tipo de cura Tempo de cura (dias)	Precondicionamento Tempo/local	UR (%)	T (°C)	CO <sub>2</sub> (%)	Tempo de exposição (dias)
Cadore	(2008)	cilindros 100x50	0,3 a 0,8	Sacos aniagem 7d Natural 90 e 300d	RILEM	75	22	5 natural	4 à 12 semanas 91 e 300 dias
Hoppe	(2008)	cilindros 100x66,7	0,45 a 0,65	úmida 7	RILEM	75	23	5	3, 6, 9 e 12 semanas

Baseada em: Pauletti (2004)

Tabela 4 – Estudos de carbonatação em concretos realizados em diversos países

Pesquisador	Ano	Amostras forma/dimensão (mm)	a/agl	Tipo de cura Tempo de cura (dias)	Precondicionamento Tempo/local	UR (%)	T (°C)	CO <sub>2</sub> (%)	Tempo de exposição (dias)
Tuutti	(1982)	-	0,40 e 0,70	submersa 7	6 meses laboratório	80	-	1	90
Ho e Lewis	(1987)	prismas 75x75x300	-	úmida 1, 7, 28, 91 e 365	21 dias laboratório	50	23	4	7, 28, 63 e 112
Fattuhi	(1988)	prismas 50x50x285	-	submersa/ao ar 28		entre 50 e 70	entre 20 e 26	100	-
Dhir <i>et al.</i>	(1989)	cubos 100	-	úmida/ao ar 28	14 dias laboratório	50	20	4	140
Ohga e Nagataki	(1989)	prismas 100x100x300	-	submersa 7, 28 e 91		50	40	7	a cada 7 dias
Papadakis <i>et al.</i>	(1991b)	prismas 100x100x300	0,50 a 0,80	úmida 90	- estufa	35, 45, 55, 65, 70 e 85	22, 30 e 42	50	1, 3, 5, 10, 15 e 20
Branca <i>et al.</i>	(1993)	cubos 100	0,35 a 0,65	úmida 7	-	75	20	30	-

<b>Pesquisador</b>	<b>Ano</b>	<b>Amostras forma/dimensão (mm)</b>	<b>a/agl</b>	<b>Tipo de cura Tempo de cura (dias)</b>	<b>Precondicionamento Tempo/local</b>	<b>UR (%)</b>	<b>T (°C)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (%)</b>	<b>Tempo de exposição (dias)</b>
Uomoto e Takada	(1993)	Cilindros 100x200	0,50 a 0,70	Submersa 0 a 5	Não fizeram	55	20	0,07, 1, 10	1, 4, 8, 13, 26 semanas
Balaysac <i>et al.</i>	(1995)	cilindros 110x100	-	submersa/ao ar 1, 3 e 28	-	60	20	0,03	-
Rougeau	(1997)	cilíndricos 160x320		úmida 28	2 dias à 40 °C ou 11d, 20°C, 65%UR	65	20	1, 5, 20, 50, 70, 100	7, 14 e 28
Roy <i>et al.</i>	(1999)	prismas 100x100x500	0,55 a 0,75	submersa 7		52, 64, 75, 84 e 92		6	7, 28, 56 e 112
Jiang <i>et al.</i>	(2000)	prismas 100x100x200	-	-		70	20	20	-
Sanjuán e Del Olmo	(2001)	cilindros 75x150	-	submersa 28	-	70	-	5, 20 e 100	-
Lo e Lee	(2002)	cilindros 100x200	0,38 a 0,54	submersa/ao ar 28	-	-	21	2	30, 60 e 90
Thiery	(2005)	Cilindros 50-100x110	0,48 a 0,84	úmida 91	45°C por 30 dias	53	21	50	14 e 28
Khunthongkeaw <i>et al.</i>	(2006)			submersa 28		55	40	4	

Baseada em: Pauletti (2004)

Tabela 5 – Estudos de carbonatação em argamassas realizados no Brasil

Pesquisador	Ano	Amostras forma/dimensão (mm)	a/agl	Tipo de cura Tempo de cura (dias)	Precondicionamento Tempo/local	UR (%)	T (°C)	CO <sub>2</sub> (%)	Tempo de exposição (dias)
Wolf e Dal Molin	(1989)	cilindros 50x100	-	submersa 7	-	30, 50, 70 e 90	-	-	-
Wolf	(1991)	cilindros 50x100	0,28 a 0,58	úmida 28	sem precond.	-	-	-	28, 63, 91, 150 e 180
Kazmierczak	(1995)	prismas 55x80x20	-	submersa 7	câmara precond.	-	-	100	-
John	(1995)	prismas 40x40x160	-	-	-	-	21,5	5	-
Bauer	(1995)	cilindros 50x100	0,30 a 0,70	úmida 63	15 dias 50°C, depois condições lab até cte massa	entre 65 e 70	-	50	inicial 2 dias, depois variável
Monteiro	(1996)	prismas 60x80x25	0,40 a 0,70	úmida 7 e 28	15 dias laboratório	entre 50 e 70	24	100	variável
Seidler	(1999)	prismas 40x40x160	0,40 a 0,70	úmida 28	7 dias câmara precond.	68	21	5	56, 91 e 126
Kulakowski	(2002)	prismas 40x40x160	0,30 a 0,80	úmida amostras embaladas 14	14 dias câmara precond.	70	25	5	35, 56, 91 e 126
Medeiros	(2002)	prismas 60x60x120		úmida 3	25 dias seca - UR 50%	65	24	5	
Silva	(2002)	cilindros 50x100		úmida 7		60	25	100	
Lara	(2003)	Prismas 100x100x300 cilindros 50x100	0,60 e 0,75	úmida 28	Estufa 60°C cte massa, depois UR 65% até cte massa	65-70		10	

<b>Pesquisador</b>	<b>Ano</b>	<b>Amostras forma/dimensão (mm)</b>	<b>a/agl</b>	<b>Tipo de cura Tempo de cura (dias)</b>	<b>Precondicionamento Tempo/local</b>	<b>UR (%)</b>	<b>T (°C)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (%)</b>	<b>Tempo de exposição (dias)</b>
Pauletti	(2004)	prismas 40x40x160	0,40 a 0,70	Submersa 7 e 28	RILEM e cte massa sala clim.	70	20	6 e 100	1 a 280

Baseada em: Pauletti (2004)

Tabela 6 - Estudos de carbonatação em argamassas realizados em diversos países

<b>Pesquisador</b>	<b>Ano</b>	<b>Amostras forma/dimensão (mm)</b>	<b>a/agl</b>	<b>Tipo de cura Tempo de cura (dias)</b>	<b>Precondicionamento Tempo/local</b>	<b>UR (%)</b>	<b>T (°C)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (%)</b>	<b>Tempo de exposição (dias)</b>
Meyer	(1969)	prismas 40x40x160	0,40 a 0,80	submersa 7	-	50	18	-	-
Ying-Yu e Qui-Dong	(1987)	prismas 80x40x160	-	submersa 2 dias e ao vapor por 22h	24 horas estufa a 60°C	52	20	20	-
Andrade <i>et al.</i>	(1988)	-	0,50	úmida 28	-	entre 50 e 70	20	100	-
Kobayashi e Uno	(1989)	cilindros 50x100	0,40 a 0,60	úmida 28	-	60	20	10	-
Papadakis	(2000a)	cilindros 100x90	-	submersa 365	28 laboratório	61	25	3	100
Johannesson e Utgenannt	(2001)	cilindros $\phi$ x3	-	-	-	65	20	1	120

<b>Pesquisador</b>	<b>Ano</b>	<b>Amostras forma/ dimensão (mm)</b>	<b>a/agl</b>	<b>Tipo de cura Tempo de cura (dias)</b>	<b>Precondiciona- mento Tempo/local</b>	<b>UR (%)</b>	<b>T (°C)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (%)</b>	<b>Tempo de exposição (dias)</b>
Van Gerven <i>et al.</i>	(2004)	cubos 40	-	úmida 28	sem precond.	>90	37	5 e 20	72 e 360 horas
Gervais <i>et al.</i>	(2004)	cubos 40	-	-	-	23, 48 e 98	-	100	-
Hyvert	(2009)		0,50	91		65	21	Nat, 10, 25, 50	

Baseada em: Pauletti (2004)

Como apontam as tabelas 3 a 6, muito já se investigou, mas os parâmetros adotados em cada pesquisa são os mais diversos possíveis. Então, *como correlacionar estes estudos?* Além disso, há falta de algumas informações, o que também dificulta esse processo.

Não é possível distinguir se os resultados gerados em diferentes pesquisas são fruto da natureza dos materiais ou dos métodos utilizados. Essa dificuldade acaba contribuindo na geração de lacunas no entendimento do fenômeno.

Sabe-se que todos os fatores apontados nas tabelas 3 a 6 influenciam nos resultados. Se existem aspectos que não estão bem entendidos, como do tipo de condicionamento e da concentração de CO<sub>2</sub>, por exemplo, não se pode fazer uso indiscriminado de condições que possam alterar o fenômeno e, assim, deixar de representá-lo. É preciso analisar não só a velocidade de avanço da frente de carbonatação, mas o comportamento como um todo, em termos de compostos formados, semelhança com dados reais, possibilidade de transposição para a prática, enfim, os ensaios acelerados devem servir para o objetivo a que são propostos.

Muntean *et al.* (2005) apontam as possíveis causas de discrepâncias entre ensaios naturais e acelerados e acreditam que há duas diferenças significativas: o tipo de exposição (aumento da concentração de CO<sub>2</sub>, umidade relativa e temperaturas constantes) e a curta duração de todo o estudo. Os autores explicam que muitos efeitos estão concorrendo e que uma interação precisa não é conhecida, tanto que tendências gerais são exaustivamente discutidas e diferentemente interpretadas pela comunidade científica.

#### 2.5.4 Principais conclusões do trabalho de Pauletti (2004)

Os dados da pesquisa realizada por Pauletti (2004), que utilizou o mesmo programa experimental desenvolvido nesta tese, para os ensaios acelerados de carbonatação, serviram de embasamento para algumas decisões tomadas no presente trabalho. Um resumo das principais conclusões é aqui apresentado.

No trabalho de Pauletti (2004) foram analisados e discutidos os resultados de profundidade de carbonatação acelerada aos 28 dias de ensaio. Pela análise estatística de variância (ANOVA), com nível de confiança de 95%, todas as variáveis estudadas se mostraram estatisticamente

significativas. Um resumo desta análise é apresentado na tabela 7 e na figura 14 a figura 19, que mostram o efeito isolado<sup>9</sup> das mesmas na profundidade de carbonatação.

Tabela 7 – ANOVA dos resultados de carbonatação acelerada aos 28 dias de ensaio

Fatores	SQ	GDL	MQ	Teste F	Valor-p	Significância
tempo de cura submersa	22,61	1	22,61	12,77	0,0004	S
tipo de cimento	1427,80	1	1427,80	806,74	0,0000	S
relação a/c	5815,78	2	2907,89	1643,03	0,0000	S
tipo de secagem (precond.)	982,59	1	982,59	555,18	0,0000	S
% de CO <sub>2</sub>	2965,03	1	2965,03	1675,31	0,0000	S
tempo de secagem	28,55	1	28,55	16,13	0,0001	S

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

Fonte: Pauletti (2004)

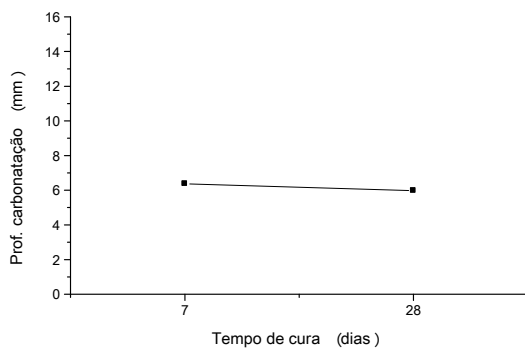


Figura 14 – Efeito isolado do tempo de cura submersa na profundidade de carbonatação

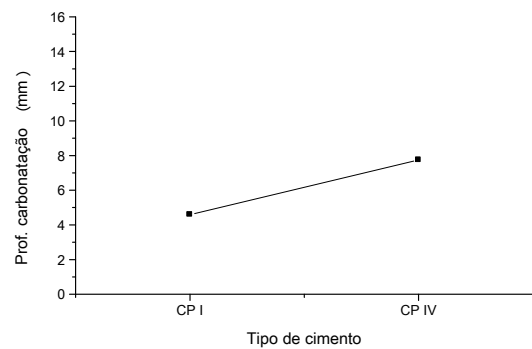


Figura 15 – Efeito isolado do tipo de cimento na profundidade de carbonatação

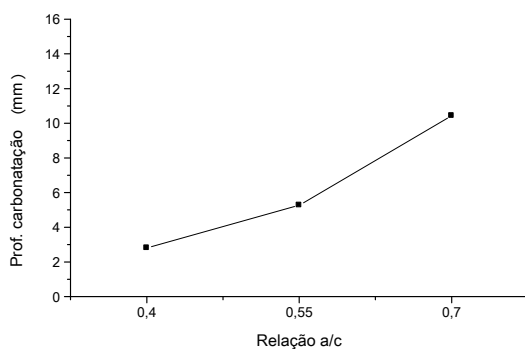


Figura 16 – Efeito isolado da relação a/c na profundidade de carbonatação

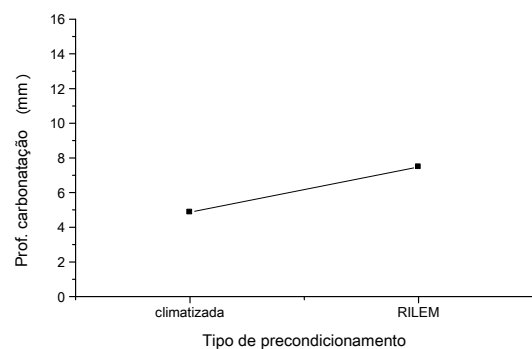


Figura 17 – Efeito isolado do tipo de acondicionamento na profundidade de carbonatação

<sup>9</sup> O efeito isolado corresponde à média de todos os resultados empregados na análise, isolando o fator que está sendo analisado.

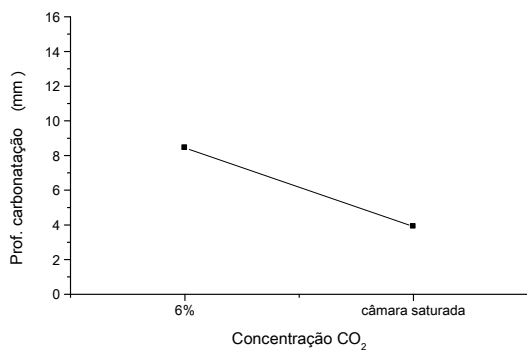


Figura 18 – Efeito isolado do percentual de CO<sub>2</sub> na profundidade de carbonatação

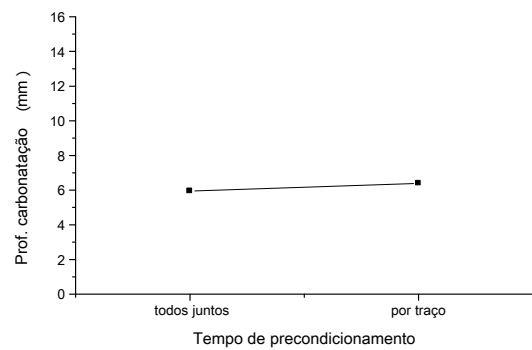


Figura 19 – Efeito isolado do tempo de condicionamento na profundidade de carbonatação

A análise aos 28 dias de ensaio mostra que entre as variáveis investigadas, a que mais fortemente influencia nos resultados de profundidade de carbonatação é a concentração de CO<sub>2</sub>, seguida da relação a/c e do tipo de cimento.

O tempo de cura se mostrou significativo, no entanto, sua influência é fraca. Conforme mostra o apêndice A, quando o condicionamento é feito em sala climatizada, o tempo de obtenção do equilíbrio hídrico dos corpos-de-prova fica em torno de 25 dias, independentemente do tempo de cura. Porém, quando a perda de água é realizada em estufa, os corpos-de-prova feitos com cimento tipo CP IV necessitam cerca de 10 dias para secagem quando a cura é de 7 dias e de 20 a 30 dias quando a cura é de 28 dias. Quanto ao grau de hidratação, em sala climatizada as amostras continuam a se hidratar, pois a umidade ainda é elevada e a perda de água é lenta, resultando em hidratações diferentes para cada condicionamento.

Com relação ao tipo de cimento, sabe-se que as reações pozolânicas evoluem com o tempo e que após 28 dias de idade elas ainda não tiveram tempo suficiente de ocorrerem por completo, e menos ainda a 7 dias de cura. Se após estes períodos as amostras já são submetidas a procedimentos de secagem, onde perdem umidade e diminui a hidratação, essas reações ficam prejudicadas e mais ainda as reações pozolânicas do cimento tipo CP IV. Quando as amostras são submetidas ao ensaio de carbonatação vai haver competição entre diversas reações. Muntean *et al.* (2005) citam algumas reações que podem competir entre si e da dificuldade de saber qual fenômeno vai predominar: carbonatação do Ca(OH)<sub>2</sub> x carbonatação do C-S-H, carbonatação x hidratação, hidratação x reação pozolânica, entre outras.



O efeito da relação a/c já é bem conhecido, quanto maior esta relação, maior será a porosidade e mais facilmente o CO<sub>2</sub> poderá difundir no material.

O tipo de acondicionamento apresentou uma influência bastante forte na profundidade de carbonatação. Ao final do período de secagem a massa dos corpos-de-prova ensaiados nos dois ambientes era bastante diferente (isso pode ser constatado comparando os apêndices B e D). Se para ambos os tipos de acondicionamento a umidade de equilíbrio foi de 70±5%, a massa ao final dos procedimentos deveria ser teoricamente a mesma. Os que foram secos em estufa tiveram uma perda de massa de cerca de 20%, enquanto que a perda para os secos em sala climatizada ficou em torno de 6%, o que é muito inferior. Tendo em conta o tempo necessário para que a massa entrasse em equilíbrio com o ambiente, o que foi 22 dias para cura de 7 dias e 27 dias para cura de 28, e verificando-se os estudos realizados por Delmi (2004) e Baroghel-Bouny (1994), sabe-se que uma amostra do tamanho das ensaiadas (4x4x16 cm) não consegue atingir o equilíbrio em tão curto período de tempo. A diferença de massa entre as amostras de diferentes tipos de acondicionamento indica que a quantidade de água no interior das amostras acondicionadas em sala climatizada é maior. O equilíbrio que se pensou ter atingido no acondicionamento em sala climatizada pode ter sido mascarado por uma carbonatação superficial das amostras. Como resultado dessa carbonatação tem-se a liberação de água e formação de produtos mais densos, que podem ter provocado a falsa impressão de se ter alcançado a constância de massa dos corpos-de-prova. Esse fechamento superficial pelos carbonatos dificulta a saída da água interna e assim levando a crer que o equilíbrio de massa foi alcançado. Além disso, a água dos poros capilares menores, que está fortemente adsorvida, tem dificuldade para evaporar nas condições de temperatura (20°C) e umidade relativa (70%) do ambiente climatizado.

Com relação aos diferentes percentuais de CO<sub>2</sub> estudados, a 6%, a carbonatação foi superior que em câmara saturada de CO<sub>2</sub>, resultados que são corroborados por Rougeau (1997) e Abreu (2004).

Uma avaliação mais apurada é apresentada no capítulo 4, quando os dados são analisados ao longo do tempo e não apenas para a idade de 28 dias.

## 2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE A CARBONATAÇÃO

A revisão da literatura apresentada neste capítulo 2 mostra que não há consenso em diversos fatores que envolvem a carbonatação. Nos ensaios acelerados haverá o consumo do C-S-H. Já

nos ensaios naturais, a bibliografia é escassa e indica que ao final da carbonatação ainda há C-S-H ou que este hidrato não é consumido em concentrações atmosféricas de  $\text{CO}_2$ . Estudos experimentais de carbonatação acelerada apontam para o consumo simultâneo dos compostos carbonatáveis, enquanto que estudos termodinâmicos indicam que o C-S-H carbonatará após a portlandita, mas isso ainda não foi comprovado.

O tipo de  $\text{CaCO}_3$  formado na carbonatação, depende da forma do cristal do qual é originado. Há indicações que grandes cristais de  $\text{Ca(OH)}_2$  formam carbonato de cálcio na forma de calcita, enquanto que a carbonatação dos C-S-H (em ensaio acelerado) forma vaterita, aragonita e carbonatos amorfos.

Como principais consequências da carbonatação têm-se: a redução do pH da solução intersticial dos poros do material; o aumento no volume de sólidos, o que gera redução da porosidade; a liberação de água e; a retração por carbonatação.

Diversos fatores influenciam a carbonatação, e no entendimento desta autora, o condicionamento e a concentração de  $\text{CO}_2$  são os que carecem de mais investigação. Com relação ao condicionamento é preciso saber o que se espera desse procedimento e o que é mais importante para a avaliação da carbonatação.

O resumo das pesquisas apresentadas deixa clara a inexistência de padronização para os ensaios acelerados de carbonatação.

Existem diversas técnicas para determinar a profundidade carbonatada. Embora tenha algumas restrições, o uso de indicadores químicos de pH, em especial a fenolftaleína, ainda é o método mais utilizado, por ser de fácil aplicação e baixo custo. No presente trabalho, a fenolftaleína foi escolhida para determinação da profundidade carbonatada.

A maneira de transpor os resultados acelerados para a prática deve ser feita com cuidado. Acredita-se que é importante criar um banco de dados com resultados de carbonatação que possa ser usado para transpor resultados para a realidade, através de coeficientes de aceleração. Mas, para isso é preciso padronizar os ensaios acelerados e antes disso, entender o fenômeno e o que representa o resultado do ensaio acelerado. O primeiro passo a ser dado é a comparação de uma série de condições aceleradas com condições naturais, e isso começa com o planejamento de um programa experimental, o que é apresentado na sequência.

### 3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

A revisão da literatura, apresentada no capítulo 2 deixa evidente a falta de padronização para a realização dos ensaios acelerados de carbonatação, em especial no Brasil. Muitas pesquisas já foram realizadas, mas ainda existem fatores que não são totalmente compreendidos ou não há consenso sobre eles no meio científico. Em face disto, parece ser indispensável a elaboração de um programa experimental que contemple ensaios de carbonatação natural e acelerada, procurando abranger essas variáveis que ainda merecem investigação. A comparação dos resultados de profundidade de carbonatação natural com os acelerados, sob diferentes condições de ensaio, permitirá saber qual destas condições melhor representa o fenômeno que ocorre naturalmente.

Do programa experimental desta pesquisa resultou a dissertação de mestrado intitulada “Análise comparativa de procedimentos para ensaios acelerados de carbonatação” (PAULETTI, 2004). No referido trabalho foram analisados os resultados de carbonatação acelerada em argamassas de cimento CP I e tipo CP IV, nas relações a/c 0,4, 0,55 e 0,7, após 28 dias de ensaio acelerado.

No presente trabalho, para chegar aos resultados de carbonatação natural ou relacioná-los com os ensaios acelerados, seguiram-se três caminhos: os ensaios de carbonatação natural, os coeficientes de aceleração e os modelos de carbonatação (um deles, bastante complexo e outro, um modelo simplificado). A figura 20 apresenta um esquema que resume as etapas presente pesquisa.

A descrição do programa experimental é realizada neste capítulo. Os modelos numéricos que foram gerados a partir dos resultados do programa experimental são apresentados no capítulo 4. A descrição e aplicação dos modelos de carbonatação (DUPRAT; SELLIER; NGUYEN, 2006; HYVERT, 2009) constam no capítulo 5.

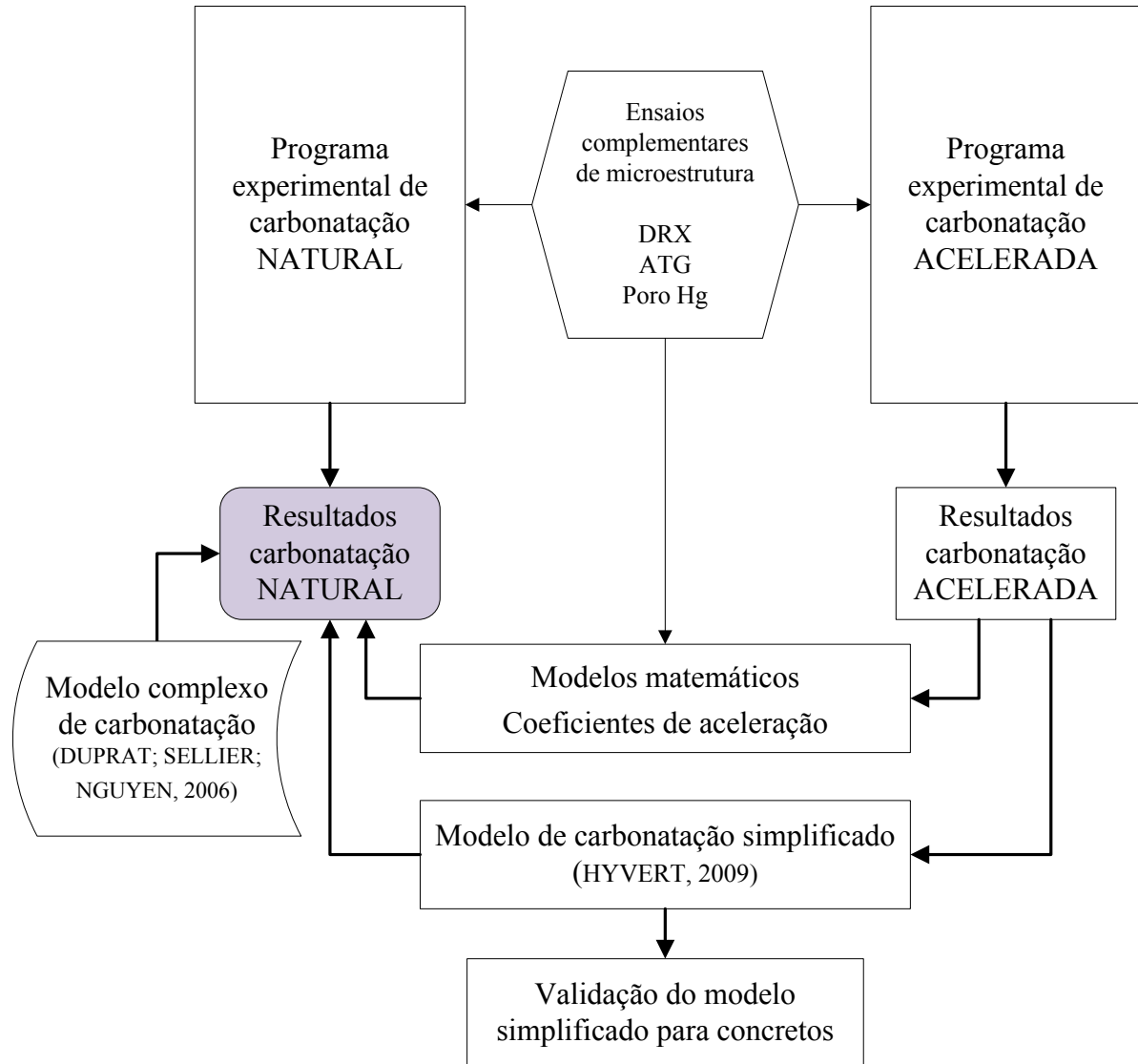


Figura 20 – Esquema ilustrativo das etapas desenvolvidas no presente trabalho

### 3.1 VARIÁVEIS DO ENSAIO DE CARBONATAÇÃO

A definição das variáveis a serem estudadas partiu do pressuposto de auxiliar no entendimento de fatores que não são bem compreendidos. As variáveis para os ensaios de carbonatação são especificadas a seguir.

#### 3.1.1 Fatores relacionados à natureza do ensaio

Os fatores relacionados à natureza do ensaio são: forma das amostras, cura (tipo e tempo) e condicionamento (tipo e tempo).

A forma das amostras não foi variável, pois se escolheu trabalhar com corpos-de-prova prismáticos, com dimensões de 40x40x160 mm. Esta opção foi adotada para evitar a soma de vetores na carbonatação de amostras cilíndricas e, os cantos das amostras prismáticas (por onde o CO<sub>2</sub> difunde em duas direções) foram desconsiderados. Uma comparação da carbonatação de amostras prismáticas e cilíndricas foi feita por Kulakowski (2002), que concluiu que a carbonatação é cerca de 50% maior na forma cilíndrica, quando nenhuma das superfícies dos corpos-de-prova é impermeabilizada.

O tipo de cura adotado foi a submersa, por se tratar de uma maneira mais simples, que é eficiente, de fácil controle das condições e reprodutibilidade, possível de ser adotada por qualquer laboratório e assim já ter as amostras em estado saturado para partir para o condicionamento em igualdade de saturação. O tempos de cura submersa para os ensaios acelerados foram de 7 e 28 dias, e para o ensaio ao natural, 7, 14 e 28 dias. O tempo de 28 dias foi escolhido para igualar o tempo de cura dos dois tipos de cimento.

O condicionamento foi um dos pontos de partida para a elaboração do programa experimental. Para o ensaio acelerado foram adotados dois tipos de condicionamento:

- a) conforme especificado pela RILEM (1999) no TC 116-PCD (estufa a  $50\pm 1^\circ\text{C}$ );
- b) em ambiente com temperatura e umidade controladas (temperatura de  $20\pm 1^\circ\text{C}$  e umidade relativa de  $70\pm 5\%$ ).

O tempo de condicionamento foi especificado com base em dois métodos:

- a) até obter a concentração da umidade de equilíbrio ( $w_{e70}$ ) ou equilíbrio ao ar com umidade relativa de 70% + mínimo de 14 dias para redistribuição interna da umidade (todos os traços com a mesma idade);
- b) até obter a concentração da umidade de equilíbrio ( $w_{e70}$ ) ou equilíbrio ao ar com umidade relativa de 70% + 14 dias para redistribuição interna da umidade (cada traço com idade distinta).

Com relação aos tempos de condicionamento, a intenção é verificar, quando se estuda diversos cimentos e relações a/c, se existe diferença na carbonatação em função da idade do corpo-de-prova no início do ensaio. No caso (a), todas as amostras iniciam o ensaio de

carbonatação com a mesma idade e para isso o corpo-de-prova que atingiu o equilíbrio hídrico desejado fica embalado até que o último corpo-de-prova do conjunto que está sendo investigado alcance a condição especificada. No segundo caso (b), após atingir o equilíbrio hídrico os corpos-de-prova de um mesmo traço permanecem embalados por 14 dias (para redistribuição da umidade) e então são levados às câmaras de carbonatação. Neste segundo caso, todos estão com a mesma umidade interna, mas cada traço iniciou a carbonatação com idades diferentes.

### 3.1.2 Condições ambientais

Nas condições ambientais estão compreendidos: umidade relativa, temperatura e concentração de CO<sub>2</sub>.

Para os ensaios de carbonatação acelerada, a escolha da temperatura e umidade relativa teve como base a condição considerada mais favorável para a carbonatação. Sendo assim, a umidade escolhida para o equilíbrio das amostras e para realização dos ensaios foi de 70±5% e a temperatura de 20±1°C.

Durante a elaboração do programa experimental, no final de 2002, havia um estudo em realização (ABREU, 2004) que apresentava resultados que chamavam a atenção (% CO<sub>2</sub> >50% carbonatava menos que 5%) e se decidiu verificar se tais resultados eram uma tendência ou não, escolhendo dois percentuais de CO<sub>2</sub> para os ensaios acelerados:

- a) seis (6) %: função do equipamento disponível e já utilizado por outras pesquisas do grupo (ABREU, 2004; KULAKOWSKI, 2002);
- b) câmara saturada de CO<sub>2</sub> (entre 70 e 100% de CO<sub>2</sub>): uma câmara deste tipo é mais fácil de ser montada e já havia disponibilidade no laboratório. Muitas pesquisas tinham sido feitas com altas concentrações de CO<sub>2</sub> e ainda havia dúvidas quanto ao aumento ou não da velocidade de carbonatação em concentrações de CO<sub>2</sub> muito altas (100%). Os resultados comparativos de pesquisas variando percentuais de CO<sub>2</sub> eram (e ainda são) escassos e contemplando 100% de CO<sub>2</sub>, apenas começavam a ser publicados (SANJUÁN; DEL OLMO, 2001). Só se tomou conhecimento do trabalho de Rougeau (1997) mais tarde, em 2006, durante os estudos realizados em Toulouse. A adoção da concentração de 100% de CO<sub>2</sub>

objetiva a comprovação dos estudos realizados por Rougeau (1997) e assim melhor avaliar a continuidade ou não da utilização deste percentual para os ensaios acelerados.

Para os ensaios de carbonatação natural foram escolhidas duas condições:

- a) ambiente interno protegido das intempéries (Int): sala climatizada a  $20\pm 1^{\circ}\text{C}$  e  $\text{UR}=70\pm 5\%$ , com concentração de  $\text{CO}_2$  de 0,088%;
- b) ambiente externo não protegido das intempéries – foram escolhidos dois ambientes:  $\text{Ext}_U$  (em São Leopoldo, no campus da UNISINOS), e  $\text{Ext}_N$  (no centro de Porto Alegre, junto ao NORIE), com concentrações médias de  $\text{CO}_2$  de 0,063% e 0,071%, respectivamente.

### 3.1.3 Com relação ao material

Nesta etapa foram decididas as variáveis com relação ao tipo de material: tipo de cimento, relação a/c, adições e agregados.

Além de verificar o comportamento da carbonatação frente a diferentes tipos de condicionamento e percentuais de  $\text{CO}_2$ , considerou-se necessário avaliar se as tendências seriam confirmadas para diferentes composições. Por isso foram escolhidos dois tipos de cimento:

- a) CP I-S-32<sup>10</sup> (cimento base): a escolha por este cimento é devida ao fato do mesmo possuir pequeno teor de adições (até 5%) e assim poder melhor controlar a substituição para composição de um segundo cimento. O cimento CP V-ARI também poderia ser utilizado, mas por ser mais fino, preferiu-se não inserir mais esta variável no estudo. Outra possibilidade seria selecionar um cimento com base na composição química potencial, mas em função da opção pelo uso de um cimento mais semelhante aos cimentos comerciais, para melhor representar o comportamento da carbonatação ocorrida na realidade e não para uma mistura com composição especial, esta alternativa também foi descartada;

---

<sup>10</sup> Para fins de simplificação será chamado de CP I.

- b) 60% de CP I-S-32 + 40% de cinza volante, em massa (o que se convencionou chamar de cimento tipo CP IV)<sup>11</sup>. O cimento Portland pozolânico é um cimento bastante utilizado na região sul do Brasil e as adições de cinza volante são muito pesquisadas no mundo todo (BOUZOUBAÂ *et al.*, 1999; FU *et al.*, 2002; ISAIA; GASTALDINI; MORAES, 2003; PAPADAKIS, 2000b), tendência que deve continuar.

As três relações água/cimento escolhidas são: 0,40, 0,55 e 0,70. Considerou-se que assim se estaria contemplando valores de resistência à compressão baixos, intermediários e altos.

Os ensaios de carbonatação deste trabalho foram realizados com argamassas, pois seu intuito é comparativo entre os diferentes fatores que determinam o progresso da carbonatação, tais como o tipo de condicionamento e a concentração de CO<sub>2</sub>, mas, principalmente entre carbonatação natural e acelerada. Ying-Yu e Qui-Dong (1987) avaliaram a carbonatação natural e acelerada de argamassas e concretos e a análise teórica e experimental dos resultados mostra que, em ambos os materiais, o mecanismo é o mesmo. Kunthongkeaw, Tangtermsirikul e Leelawat (2006) mostram que os dados de carbonatação em argamassas podem ser usados para estimar, qualitativamente, a carbonatação de concretos similares. Kulakowski (2002) comparou a carbonatação de concretos e argamassas e constatou que, no último caso, a profundidade carbonatada é sempre maior. Isso acontece porque a microestrutura dos materiais é diferente e, em consequência, o espaço para formação dos carbonatos. Em função dessa variação entre os materiais, a comparação e transposição direta dos resultados obtidos em argamassas não devem ser feitas para concretos. A título de exemplo, tem-se o trabalho publicado por Castellote *et al.* (2009) que na busca por melhor entendimento do efeito da variação da concentração de CO<sub>2</sub> nos ensaios de carbonatação, empregaram material com microestrutura mais diversa ainda, pastas de cimento, pois o intuito não era obter o valor de carbonatação em si, mas a comparação entre as diferentes condições.

A decisão pelo uso de argamassas foi tomada em virtude do número de amostras a serem ensaiados e do espaço das câmaras de carbonatação acelerada disponíveis, pois as dimensões

---

<sup>11</sup> A substituição de 40% do cimento CP I-S-32 por cinza volante compõe um cimento equivalente ao CP IV, e é desta forma que esta mistura é chamada no presente trabalho. Apesar de o cimento ser um aglomerante, a expressão “relação a/agl” é comumente empregada quando se utilizam adições minerais e/ou proporções não contempladas nas normas de cimento. Como a mistura que foi realizada (60% CP I + 40% CV) atende aos requisitos da norma para cimentos pozolânicos, faz-se uso da expressão “relação a/c”, ao invés de “relação a/agl”.



dos corpos-de-prova de argamassa poderiam ser menores (KULAKOWSKI, 2002; MONTEIRO, 1996). Além disso, em argamassas a frente de carbonatação é mais definida. Devido à presença de agregado graúdo em concretos, a frente de carbonatação não avança como uma linha reta perfeita e seu acompanhamento visual, por meio de aspersão de indicadores químicos de pH, pode induzir a uma maior dispersão dos resultados (NEVILLE, 1997; KAZMIERCZAK, 1995). Essa dispersão vai depender do método de medição e do critério a ser adotado pelo operador que realiza a leitura da profundidade de carbonatação, e pode ser minimizada com o auxílio de software de análise de imagens digitais, mas ainda assim, será influenciada pelo operador.

Diversos trabalhos sobre a carbonatação (ANDRADE *et al.*, 1988; GERVAIS *et al.*, 2004; KULAKOWSKI, 2002; MONTEIRO, 1996; PAPADAKIS, 2000a; SEIDLER, 1999; HYVERT, 2009; entre outros) também utilizaram corpos-de-prova de argamassa.

Amostras de argamassas após carbonatação e em estado são (não carbonatadas), também foram utilizadas para ensaios complementares: difração de raios-X, ATG/ATD e porosidade por intrusão de mercúrio.

Corpos-de-prova de pastas de cimento foram feitos para alguma análise específica, como no ensaio de difração de raios X, no qual o objetivo era comparar duas condições de ensaio. Para que um determinado composto seja detectado neste ensaio é necessário haver uma quantidade mínima de 5% do suposto composto, na forma cristalina, no material a ser analisado. É evidente que a microestrutura das pastas será diferente daquela das argamassas e, em consequência, o espaço para a formação dos cristais, gerando compostos com tamanhos diferentes. No entanto, o objetivo é verificar ou não a presença de diferentes formas de carbonatos de cálcio, que poderiam não estar em quantidade suficiente se não fosse eliminado o agregado, e por isso, foram utilizadas pastas de cimento, suprimindo assim o pico de quartzo que certamente apareceria com forte intensidade.

#### 3.1.4 Resumo do planejamento dos ensaios de carbonatação

Como variáveis de resposta dos ensaios de carbonatação tem-se a profundidade carbonatada nas seguintes idades após exposição aos ambientes com CO<sub>2</sub>:

- a) profundidade de carbonatação acelerada: de 1 a 254 dias;
- b) profundidade de carbonatação natural: aos 6, 14, 20, 30, 48 e 58 meses.

Um resumo esquemático dos ensaios de carbonatação é apresentado na figura 21.

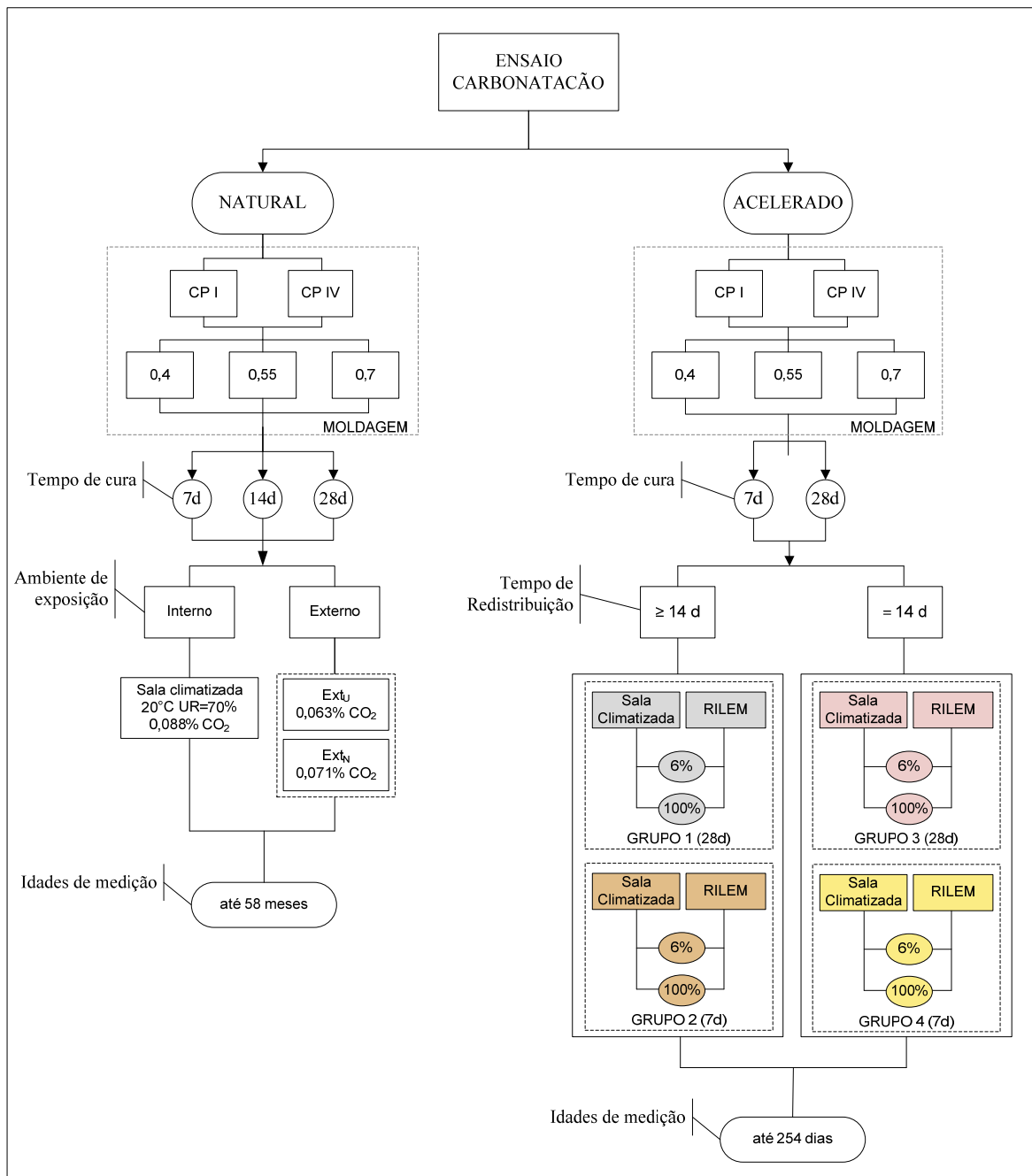


Figura 21 – Esquema ilustrativo dos ensaios de carbonatação natural e acelerada da presente pesquisa

## 3.2 MATERIAIS

Nesta etapa é apresentada a caracterização dos materiais escolhidos para a pesquisa experimental.

### 3.2.1 Cimento

Os cimentos utilizados são: o CP I-S-32 (cimento Portland comum com adição) e um segundo cimento criado a partir da substituição de 40%, em massa, do CP I por cinza volante, formando assim cimento semelhante a um CP IV<sup>12</sup> (cimento Portland pozolânico).

Embora a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (1991), através da NBR 5736, permita que o cimento Portland pozolânico seja composto por até 50% de material pozolânico, optou-se por um percentual menor (40%), em função da prescrição da American Society for Testing and Materials (ASTM) (1998) na designação C 150, que limita essa quantidade em 40%. Dessa maneira, o cimento atende às especificações de ambas as normas. As caracterizações física e mecânica dos cimentos utilizados são apresentadas na tabela 8.

Tabela 8 – Resultados da caracterização física e mecânica dos cimentos CP I e tipo CP IV

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

Nota:

O equipamento que estava sendo utilizado apresentou problemas, impossibilitando a determinação desse resultado.

As composições químicas dos cimentos CP I e tipo CP IV foram realizadas pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) e são apresentadas na tabela 9.

<sup>12</sup> Ver item 3.1.3.

Tabela 9 – Composição química dos cimentos utilizados na pesquisa

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

Os resultados da tabela 8 e da tabela 9 atendem aos requisitos das normas ABNT (1991) – NBR 5732 e 5736, que especificam os cimentos CP I e CP IV, respectivamente.

A análise granulométrica foi feita em equipamento laser utilizando água como dispersante. O ensaio foi realizado pelo LACER (Laboratório de Cerâmica), na UFRGS. O diâmetro médio do CP I foi de 19,77 $\mu$ m e do tipo CP IV 14,04 $\mu$ m. A distribuição granulométrica do CP I é apresentada na figura 22 e do tipo CP IV na figura 23.

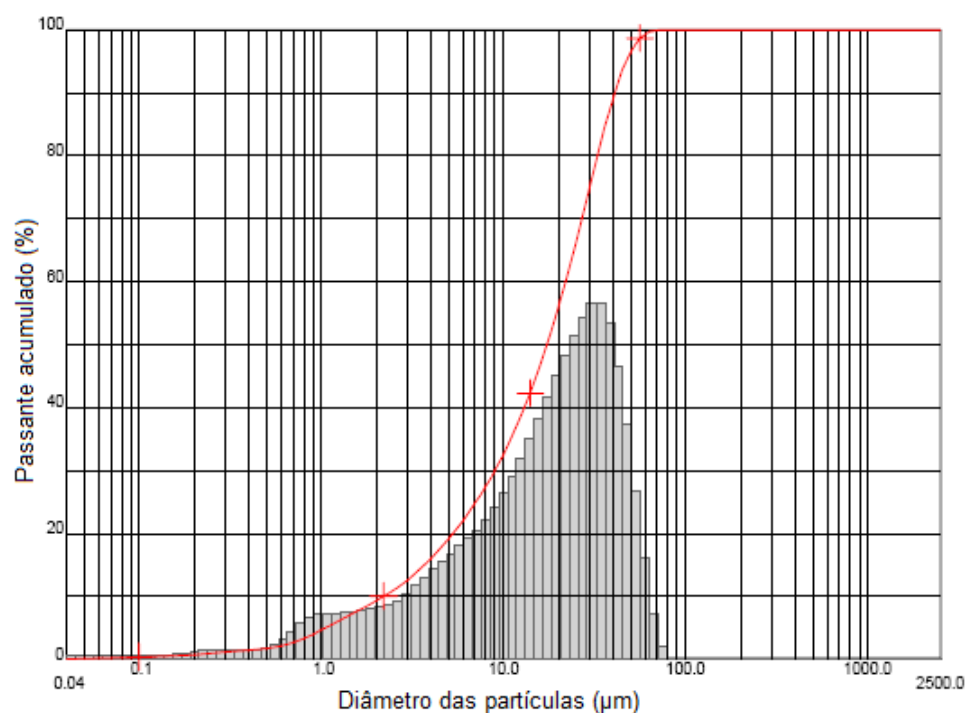


Figura 22 – Distribuição granulométrica do cimento CP I

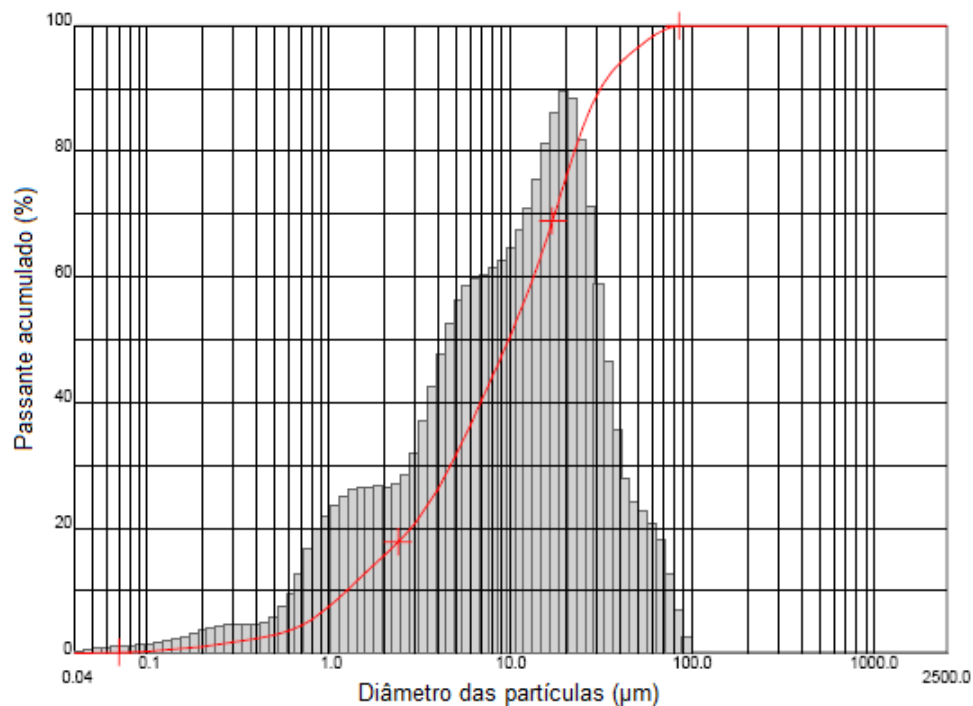


Figura 23 – Distribuição granulométrica do cimento tipo CP IV

A caracterização por difração de raios-X do cimento CP I é apresentada na figura 24.

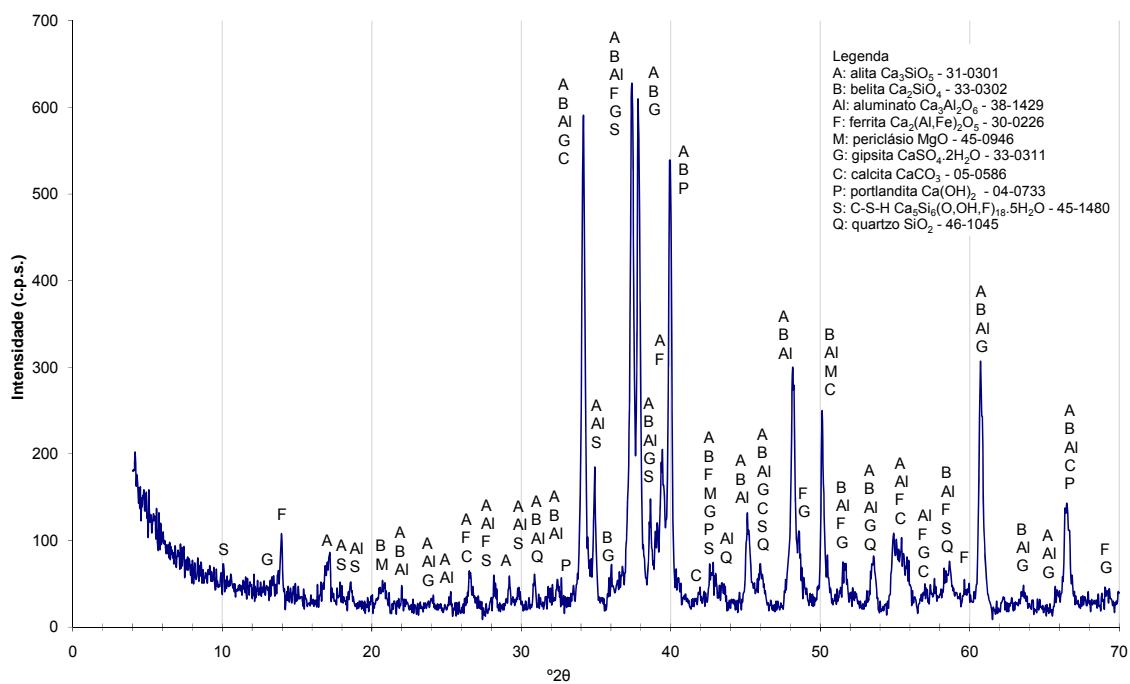


Figura 24 – Difratoograma de raios X do cimento CP I

Os compostos do cimento encontrados no ensaio de difração de raios X estão de acordo com a análise química.

### 3.2.2 Cinza Volante

A cinza volante empregada é proveniente de Charqueadas (RS) e é a mesma que serve de matéria-prima às cimenteiras da região. No processo de fabricação do CP IV a cinza volante é moída junto com o clínquer, mas como o cimento foi composto em laboratório, foi necessário moer a cinza previamente. O diâmetro médio da cinza antes da moagem era de  $36,78\mu\text{m}$ . O objetivo era alcançar um diâmetro médio de  $10\mu\text{m}$ , o que foi atingido com 10h de moagem em moinho de bolas. A distribuição granulométrica, cuja análise resultou em diâmetro médio de  $10,72\mu\text{m}$  após a moagem, é mostrada na figura 25.

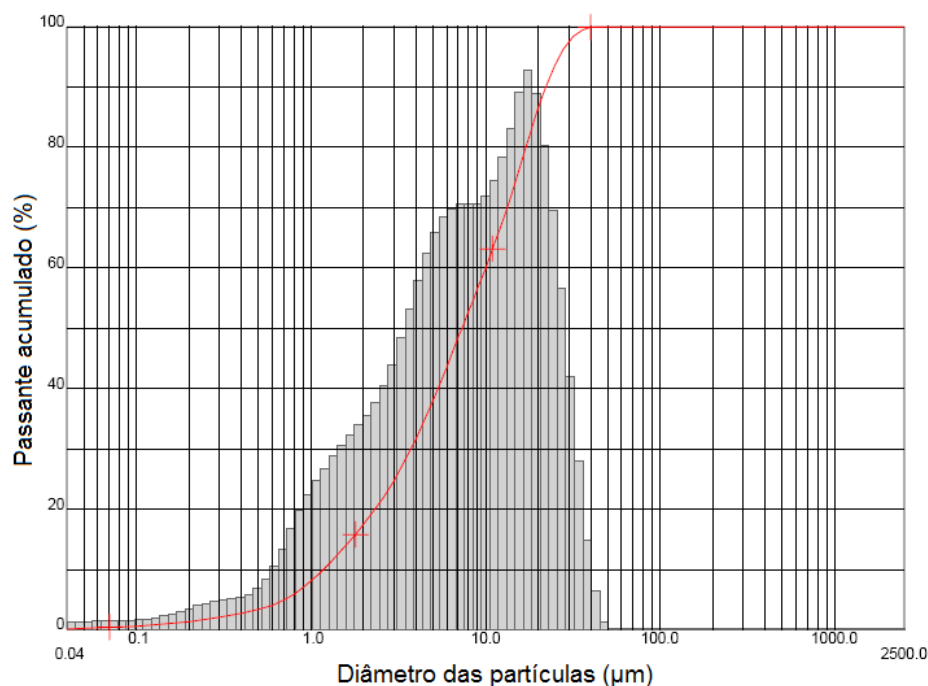


Figura 25 – Distribuição granulométrica da cinza volante após moagem

A composição química da cinza volante foi realizada no Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions (LMDC) de Toulouse. A técnica utilizada foi a espectrometria de absorção atômica para todos os elementos com exceção dos sulfatos que foram analisados por cromatografia iônica e a perda ao fogo por termogravimetria. Os resultados são apresentados na tabela 10.

Tabela 10 – Composição química da cinza volante utilizada na pesquisa

Característica química	Cinza volante (%)
SiO <sub>2</sub>	62,90
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	24,00
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,60
MgO	0,70
CaO	2,70
Na <sub>2</sub> O	0,22
K <sub>2</sub> O	0,81
SO <sub>3</sub>	0,38
Perda ao fogo	1,01

A caracterização por difração de raios X da cinza volante é apresentada na figura 26.

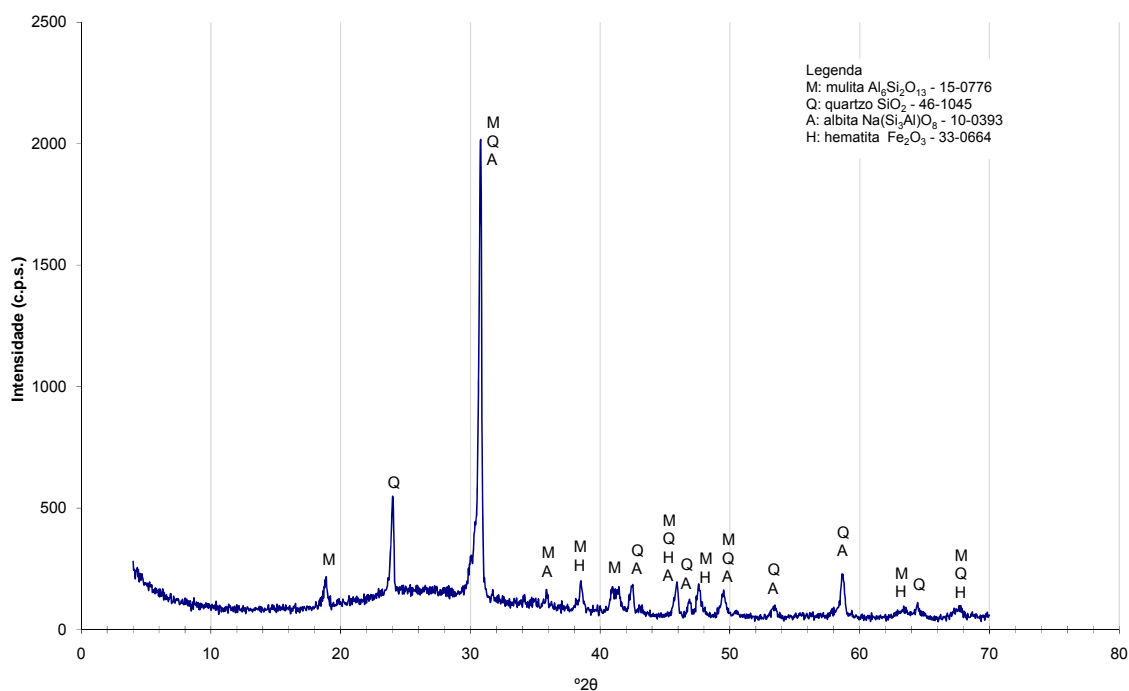


Figura 26 – Difratograma de raios X da cinza volante

Como mostra a figura 26, a cinza volante utilizada possui um halo amorfo e os compostos cristalinos são os comumente encontrados nesse tipo de material.

A massa específica da cinza foi determinada conforme a ABNT (2001) - NBR NM 23 e a área específica (Blaine) segundo a ABNT (1998) – NBR NM 76. Os resultados são apresentados na tabela 11.

Tabela 11 – Caracterização física da cinza volante

Característica	
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,36
Área específica - Blaine (m <sup>2</sup> /kg)	545

### 3.2.3 Agregado Miúdo

O agregado miúdo empregado é uma areia quartzosa proveniente do Rio Jacuí (RS/Brasil), o qual foi caracterizado quanto às suas propriedades físicas, conforme a ABNT (2003) – NBR NM 248 e os resultados são apresentados na tabela 12.

Tabela 12 – Resultados da caracterização física do agregado miúdo

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

### 3.2.4 Água

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

## 3.3 MISTURA DAS ARGAMASSAS

A definição da quantidade de água (H) a ser utilizada nos traços de argamassa foi feita a partir da Lei de Lyse, apresentada na equação 15, de forma que não fosse necessária a adição de



aditivos. Com a quantidade de água fixa, tem-se trabalhabilidades semelhantes, entre as três relações a/c utilizadas.

$$H = \frac{a/c}{1+m} \quad \text{Equação 15}$$

Onde:

H = quantidade de água (%);

a/c = relação água/cimento (kg/kg);

1 + m = massa de materiais secos, sendo o “1” correspondente ao cimento (kg/kg) e “m”, a massa de areia (em argamassas) (kg/kg).

Após alguns testes preliminares a quantidade de água foi fixada em 13,5% e os proporcionamentos de materiais resultaram nos dados da tabela 13. A quantidade de materiais por metro cúbico de argamassa<sup>13</sup> é apresentada na tabela 14. Foram realizadas quatro moldagens de cada traço para os ensaios acelerados e três para os ensaios naturais de carbonatação [(2 cimentos x 3 a/c x 2 idades de cura x 2 tempos de condicionamento) + (2 cimentos x 3 a/c x 3 idades de cura)=42 moldagens].

Tabela 13 – Traços, em massa (kg), para confecção das argamassas

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

Tabela 14 – Quantidade de materiais em kg/m<sup>3</sup>

Identificação	CPI	Cinza volante	Areia	Água
0,40	668,1	0	1309,5	267,3
0,40	480,7	0	1475,6	264,4
0,55	374,8	0	1570,4	262,4
0,55	389,7	259,8	1273,0	259,8
0,70	282,6	188,4	1445,8	259,0
0,70	221,3	147,5	1545,5	258,2

<sup>13</sup> A quantidade de ar incorporado não foi medida, mas para o cálculo das quantidades por m<sup>3</sup> foi considerado 2% de ar incorporado.

A mistura das argamassas foi realizada em argamassadeira de eixo horizontal com capacidade para 80 litros. A seqüência de mistura foi a seguinte:

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

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

## 3.4 MÉTODOS

### 3.4.1 Carbonatação natural

Para os ensaios de carbonatação foram utilizados corpos-de-prova prismáticos com dimensões de 40x40x160mm. Após a mistura, os moldes foram preenchidos em duas camadas e adensados em mesa vibratória (área de 3.364 cm<sup>2</sup>, motor de 3/4cv e 3500rpm) sendo cada camada vibrada por dois períodos de oito segundos/período. Em seguida, as amostras foram levadas à sala de cura úmida ( $UR \geq 95\%$  e temperatura de  $23 \pm 2^\circ\text{C}$ ), onde permaneceram por 24 horas, sendo então desmoldadas.

Depois que as amostras foram retiradas dos moldes, voltaram para a sala de cura, sendo postas em tanques com água saturada de cal pelos períodos especificados de 7, 14 e 28 dias.

Terminada a cura, os corpos-de-prova permaneceram na bancada do laboratório por um período entre 1 e 4 dias (simplesmente por questão de logística) e a seguir foram colocados nos ambientes de exposição natural. A figura 27 mostra um dos ambientes de exposição externa ( $Ext_U$ ), não protegido das intempéries. A figura 28 ilustra o ambiente de exposição à carbonatação natural em sala climatizada. Dados sobre a precipitação, umidade relativa e temperatura médias mensais, da estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) de Porto Alegre (latitude:  $-30,05^\circ$ ; longitude:  $-51,17^\circ$ ; altitude: 46,97 metros), para o período de ensaio natural (de 2003 à 2008) são apresentados no anexo A.



Figura 27 – Corpos-de-prova expostos em ambiente de ensaio natural externo (Ext<sub>U</sub>)



Figura 28 – Corpos-de-prova expostos em ambiente de ensaio natural interno (sala climatizada)

Após os períodos de exposição predefinidos, as amostras foram fraturadas com auxílio de uma prensa e duas barrinhas de aço com 4 mm de diâmetro, posicionados entre o exemplar e os pratos da prensa, no sentido perpendicular ao eixo, para retirada de uma fatia de cerca de dois centímetros para a medida da profundidade carbonatada. O restante das amostras voltava

ao local de ensaio e na fatia retirada era aspergida solução de fenolftaleína a 1%, dissolvida em 70% de álcool etílico e 30% de água destilada. O procedimento de medida da profundidade carbonatada é descrito no item 3.4.4.

### 3.4.2 Carbonatação Acelerada

Corpos-de-prova preparados de forma idêntica aos utilizados para os ensaios de carbonatação natural foram empregados para os ensaios de carbonatação acelerada.

Após os períodos de cura (7 e 28 dias), os corpos-de-prova seguiram para a etapa de acondicionamento, realizado segundo os dois procedimentos descritos a seguir.

#### 3.4.2.1 Acondicionamento em sala climatizada

Neste tipo de procedimento, as amostras foram dispostas sobre grades plásticas, na bancada de uma sala climatizada ( $T=20\pm 1^{\circ}\text{C}$  e  $UR=70\pm 5\%$ ), e sua massa foi monitorada até constância de massa<sup>14</sup> (diferença de 0,1g entre duas leituras consecutivas de 24 horas). A figura 29 ilustra a disposição das amostras durante o período de redução da umidade interna, em sala climatizada.



Figura 29 – Disposição das amostras para acondicionamento em sala climatizada

<sup>14</sup> A RILEM (1999), nas recomendações do TC 116-PCD, estabelece que a constância de massa é atingida quando os corpos-de-prova apresentam diferença igual a 0,1g entre duas leituras consecutivas em um intervalo de 24 horas. O mesmo critério foi adotado para as amostras que foram acondicionadas em sala climatizada.

Logo após a constância de massa, cada amostra foi isolada em uma embalagem impermeável<sup>15</sup>, selada a quente, para equilíbrio da umidade interna. Esse período de redistribuição foi fixado em pelo menos 14 dias (para igualar ao tempo requerido nas recomendações da RILEM). Após o empacotamento as amostras foram pesadas, e repesadas após o término de redistribuição de umidade, como meio de verificar possíveis falhas no fechamento, o que permitiria alguma perda ou ganho de umidade. Essa redistribuição foi realizada no mesmo ambiente do condicionamento com umidade relativa  $70\pm 5\%$  e temperatura de  $20\pm 1^\circ\text{C}$ .

O tempo para atingir o equilíbrio hídrico variou entre 16 e 32 dias, dependendo do tempo de cura, da relação a/c e do tipo de cimento. Em função do cronograma de ensaios (contemplando feriados, finais de semana e a menor quantidade de vezes em que as câmaras de carbonatação seriam abertas), o período de redistribuição de umidade variou entre 11 e 19 dias.

Passado o período de redistribuição de umidade, as embalagens foram abertas e as amostras colocadas nas câmaras de carbonatação. Nas amostras do grupo 1, antes de iniciar o ensaio de carbonatação, de cada proporcionamento de materiais foi retirada uma fatia para verificar se durante o condicionamento as amostras haviam carbonatado ou não, em função de não se ter utilizado uma câmara livre de  $\text{CO}_2$  para este procedimento. A profundidade de carbonatação observada foi inferior ao erro de medição (0,5mm) especificado pela RILEM (1988), em todos os corpos-de-prova. No apêndice A são apresentadas as datas de início e fim de cada etapa do condicionamento, assim como a duração das mesmas. No apêndice B são apresentadas as massas após cura e ao final da etapa de condicionamento em sala climatizada.

#### 3.4.2.2 Precondicionamento conforme a RILEM

As etapas do condicionamento conforme a RILEM TC 116-PCD (1999) foram descritas no item 2.3.3.2.1. O procedimento da RILEM (1999) especifica a umidade de equilíbrio em 75%. Como a umidade de equilíbrio e do ambiente de ensaio desta pesquisa foi de 70%, o detalhamento do procedimento é feito considerando a umidade de 70%.

Para determinação da quantidade de água a ser perdida pelas amostras que seriam submetidas ao ensaio de carbonatação na pré-secagem, foi realizada uma moldagem com condições idênticas às moldagens especificadas para os ensaios de carbonatação. Após cada período de

---

<sup>15</sup> As embalagens utilizadas nesse procedimento são compostas por: poliéster metalizado ( $17\text{g}/\text{m}^2$ ) + polietileno ( $30\text{g}/\text{m}^2$ ).

cura submersa (7 e 28 dias), uma amostra de 40x40x160mm de cada proporcionamento foi seca superficialmente com auxílio de um pano ou papel toalha, pesada e colocada em estufa ventilada a 105°C para determinação da quantidade total de água evaporável ( $W_e$ ) e da concentração da umidade evaporável ( $w_e$ ). Outras duas amostras de cada mistura foram trituradas e passadas nas peneiras de malhas 6,3 mm e 4,8 mm. O material retido na peneira 6,3 mm foi novamente triturado, o retido na peneira 4,8 mm utilizado para o ensaio de dessorção e o material passante pela 4,8 mm foi descartado. Após o equilíbrio a  $70\pm 5\%$ <sup>16</sup> de umidade relativa e temperatura de  $20\pm 1^\circ\text{C}$ , as amostras trituradas foram pesadas e em seguida secas em estufa a 105°C. Com os dados foi possível calcular a quantidade de água evaporável no equilíbrio ( $W_{e,70}$ ) e a concentração da umidade de equilíbrio ( $w_{e,70}$ ) para cada mistura, em cada uma das idades de cura.

Embora os procedimentos de acondicionamento tenham sido realizados para as duas idades de cura, no momento de acondicionar as amostras a serem ensaiadas, após cura de 28 dias, os dados do acondicionamento referentes a esta idade não estavam concluídos. Então foram utilizados os valores determinados para o acondicionamento das amostras curadas por 7 dias, para não se perder todas as amostras do grupo 1 (cura de 28 dias). Quando os parâmetros de acondicionamento aos 28 dias foram concluídos, fez-se a comparação com os de 7 dias, que é apresentada na tabela 15.

---

<sup>16</sup> O intervalo de umidade relativa foi fixado em 5% para mais e para menos sobre o valor desejado (70%). O valor de 2% especificado pela RILEM é muito difícil de ser alcançado na prática.

Tabela 15 – Comparação entre os resultados obtidos e os esperados para o condicionamento da RILEM

Identificação	Cura (dias)	$\frac{\Delta m}{M_0} \times 100$		Diferença na quantidade de água (%)	Diferença de massa sobre a massa do corpo-de-prova (%)	
		Realizado com base de na calibração aos 7 dias	Calculado pela base de equilíbrio aos 28 dias			
Grupo 1 e grupo 3	I40	28	4,84	3,58	35,2	1,26
	I55	28	5,74	4,41	30,2	2,49
	I70	28	6,67	4,89	36,4	1,33
	IV40	28	6,24	3,74	66,8	2,16
	IV55	28	7,57	5,41	39,9	1,79
	IV70	28	7,62	5,49	38,8	2,13
Grupo 2 e grupo 4	I40	7	Os corpos-de-prova curados por 7 dias seguiram a perda de massa correta			
	I55	7				
	I70	7				
	IV40	7				
	IV55	7				
	IV70	7				

$\frac{\Delta m}{M_0} \times 100$  = perda de massa, em porcentagem, com relação à massa inicial das amostras.  $\Delta m$  é a massa a ser perdida, calculada conforme o procedimento da RILEM, apêndice C e  $M_0$  é a massa das amostras após a cura.

Os resultados da última coluna da tabela 15 mostram que a diferença de massa entre a massa atingida e a correspondente ao equilíbrio foi de no máximo 2,5 %. Julgou-se que esta diferença seria aceitável. De fato, constata-se que a diferença entre as quantidades de água é bem mais importante (compreendidas entre 30 e 66%) o que coloca em questão a escolha que foi adotada. De qualquer forma, todas as amostras de um mesmo grupo seguiram o mesmo procedimento. As amostras dos grupos 2 e 4 foram curadas por 7 dias. Como o procedimento da RILEM foi determinado em amostras com esse mesmo tempo de cura, as amostras desses grupos tiveram a perda de massa correta.

A fim de evitar a inserção de mais uma variável no ensaio e como as amostras do grupo 1 foram secas de acordo com os dados obtidos no procedimento após 7 dias de cura, optou-se por utilizar estes dados também para o grupo 3 (igualmente curado por 28 dias). Os dados para determinação e o cálculo dos parâmetros da etapa de condicionamento, das duas idades de cura, encontram-se no apêndice C.

Após a cura das amostras a serem ensaiadas, as mesmas foram secas superficialmente com auxílio de um pano ou papel toalha, pesadas e postas em estufa ventilada a  $50 \pm 1^\circ\text{C}$ . Calculou-

se a massa a ser perdida ( $\Delta m$ ) por cada um dos corpos-de-prova, e depois realizado o monitoramento até atingir a massa requerida, com precisão de 5%. Esta etapa de pré-secagem teve duração de 6 a 32 dias, dependendo do tipo de cimento, relação a/c e do tempo de cura submersa. No apêndice D são apresentadas as massas após cura, o  $\Delta m$  calculado, a massa a ser atingida ao final da etapa de pré-secagem em estufa, conforme os procedimentos da RILEM, bem como os perfis de perda de água durante a pré-secagem.

Atingida a perda de massa desejada, as amostras foram embaladas<sup>17</sup> com selagem a quente, pesadas e então retornaram à estufa para a fase de redistribuição da umidade interna, permanecendo por um período entre 14 e 30 dias, dependendo do tempo de condicionamento que estava sendo analisado. Este procedimento de selagem a quente, bem como a indicação inicial do tipo de embalagem a ser utilizada seguiu a idéia apresentada no trabalho de Venquiaruto (2002).

Antes do ensaio de carbonatação, as amostras foram levadas, ainda embaladas, para a sala climatizada ( $20 \pm 1^\circ\text{C}$ ) onde os ensaios foram realizados, com pelo menos 24 horas de antecedência, para equilíbrio da temperatura. Em seguida, as embalagens foram abertas e os corpos-de-prova colocados nas câmaras de carbonatação. No apêndice A são apresentadas as datas de início e o período de duração de cada procedimento deste tipo de condicionamento.

### 3.4.3 Ensaio de Carbonatação Acelerada

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

A câmara com 6% de  $\text{CO}_2$  é a mesma utilizada por Kulakowski (2002) e Abreu (2004), no entanto, o percentual de  $\text{CO}_2$  utilizado pelas pesquisadoras foi de 5%. Devido a um ajuste nos equipamentos, os ensaios deste trabalho foram realizados com concentração de 6%. O princípio de funcionamento desta câmara foi concebido por John (1995) que em sua tese

---

<sup>17</sup> A RILEM não faz quaisquer referências sobre o tipo de embalagem que deve ser utilizada, nem como as mesmas devem ser seladas, para impedir a troca de umidade com o ambiente a  $50^\circ\text{C}$ . As embalagens utilizadas nesta pesquisa foram testadas preliminarmente e, nesta etapa foram utilizadas embalagens com a seguinte composição: poliéster ( $17\text{g}/\text{m}^2$ ) + adesivo ( $3\text{g}/\text{m}^2$ ) + alumínio ( $21,6\text{g}/\text{m}^2$ ) + adesivo ( $3\text{g}/\text{m}^2$ ) + filme de polietileno ( $90\text{g}/\text{m}^2$ ), as mesmas utilizadas para embalar café em pó à vácuo.



apresenta o projeto da mesma, o qual foi depois adaptado por Kulakowski (2002) e Abreu (2004). A figura 30 apresenta o esquema de montagem da câmara com 6% de CO<sub>2</sub>.

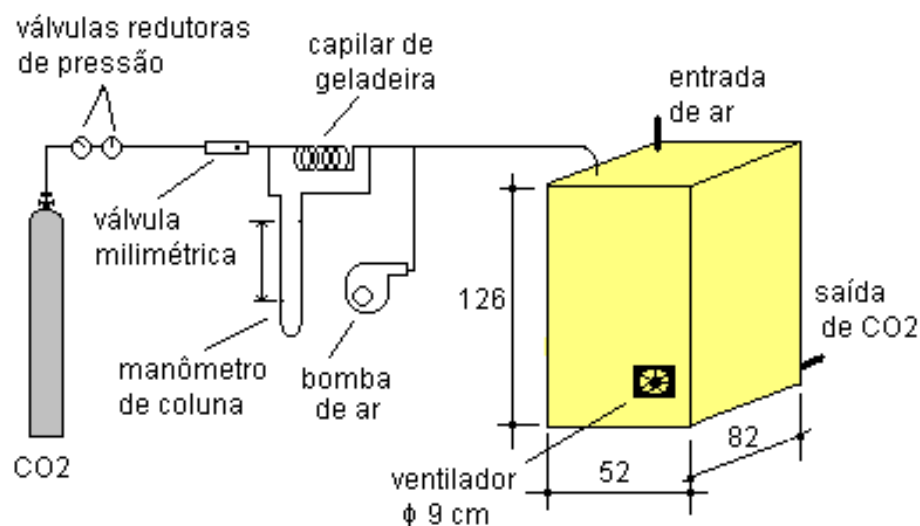


Figura 30 – Esquema de montagem da câmara de carbonatação a 6% de CO<sub>2</sub> (Baseada em: Abreu (2004))

O ar que entra na câmara já está na concentração de 6% de CO<sub>2</sub>, e sua alimentação é contínua, sendo interrompida apenas durante a medição da carbonatação. Uma alteração com relação à figura 30 é que foram instalados outros 3 ventiladores para auxiliar na distribuição da mistura que entra na câmara, ficando dois na parte superior frontal e dois na parte inferior, ao fundo. A figura 31 ilustra os ventiladores da parte superior.



Figura 31 – Ventiladores da parte superior da câmara de 6% de CO<sub>2</sub>

A outra câmara utilizada é chamada de câmara saturada de CO<sub>2</sub>, pois a concentração de CO<sub>2</sub> no seu interior foi sempre igual ou superior a 70%. A entrada de CO<sub>2</sub> é feita na parte inferior e o expurgo, na parte superior. O volume da câmara saturada de CO<sub>2</sub> é de aproximadamente 245 litros, e sua alimentação não é contínua. Depois de fechar a câmara, a válvula do cilindro de CO<sub>2</sub> é aberta com vazão de 5 litros/min. A válvula da parte superior também fica aberta, para saída do ar que está dentro da câmara. Como a massa molar do CO<sub>2</sub> é de 44g/mol e do O<sub>2</sub> é de 32g/mol, ao entrar pela parte inferior da câmara, o CO<sub>2</sub> vai “expulsando” o ar que é mais leve e fica por cima, pela saída superior. Este procedimento, de substituição do ar por CO<sub>2</sub>, sempre teve duração mínima de 30 minutos, ou seja, pelo menos 61% do volume total da câmara eram preenchidos por CO<sub>2</sub>, no entanto, deve também ser levado em consideração, o volume dos corpos-de-prova, o qual foi sempre igual ou superior a 27 litros, o que no final resulta em concentração mínima de 70% de CO<sub>2</sub><sup>18</sup>. Após a troca do ar por CO<sub>2</sub>, as válvulas de saída e do cilindro de CO<sub>2</sub> são fechadas e os ventiladores, responsáveis pela homogeneização da mistura, ligados. Este procedimento é realizado cada vez que a câmara é aberta para medição da carbonatação ou então a cada 7 dias.

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

A cada medição foram retiradas, por fratura, fatias com cerca de 20 mm de espessura dos corpos-de-prova de 40x40x160 mm, com auxílio de uma prensa. Sobre essas fatias foi aspergida solução de fenolftaleína a 1%, dissolvida em 70% de álcool etílico e 30% de água destilada. O restante das amostras foi devolvido às câmaras e reiniciada a alimentação. De cada corpo-de-prova foram realizadas de quatro a cinco medições, em idades diferentes.

As medidas de carbonatação foram realizadas conforme os procedimentos descritos na sequência.

#### 3.4.4 Procedimentos para obtenção dos resultados de profundidade de carbonatação

Todas as amostras fraturadas e aspergidas com a fenolftaleína foram fotografadas com uma câmera fotográfica digital. As medidas de profundidade de carbonatação foram realizadas nas

---

<sup>18</sup> A concentração de CO<sub>2</sub> no interior da câmara não foi medida diretamente porque o equipamento disponível não atende as faixas de CO<sub>2</sub> mais elevadas.

imagens digitais, com auxílio do *software* KS 100 – *Carl Zeiss Vision (realise 3.0)*, de análise de imagens. Kulakowski (2002) também fez uso desse recurso para análise de parte de suas amostras de argamassas, submetidas à carbonatação.

As imagens devem estar acompanhadas de uma escala, o que permite a calibração dos recursos utilizados.

As etapas para realização das medidas de cada imagem são as seguintes:

- a) abertura da imagem no programa de análise de imagens (figura 32);
- b) calibração dimensional das imagens, através da escala que acompanha a imagem;



Figura 32 – Imagem digital aberta no programa de análise

- c) delimitação da área não carbonatada, seguindo os critérios de eliminar os cantos da amostra, por onde o  $\text{CO}_2$  penetra em duas direções e de modo que o retângulo formado no centro da amostra compreenda apenas uma área não carbonatada, a qual seja a maior possível (figura 33);

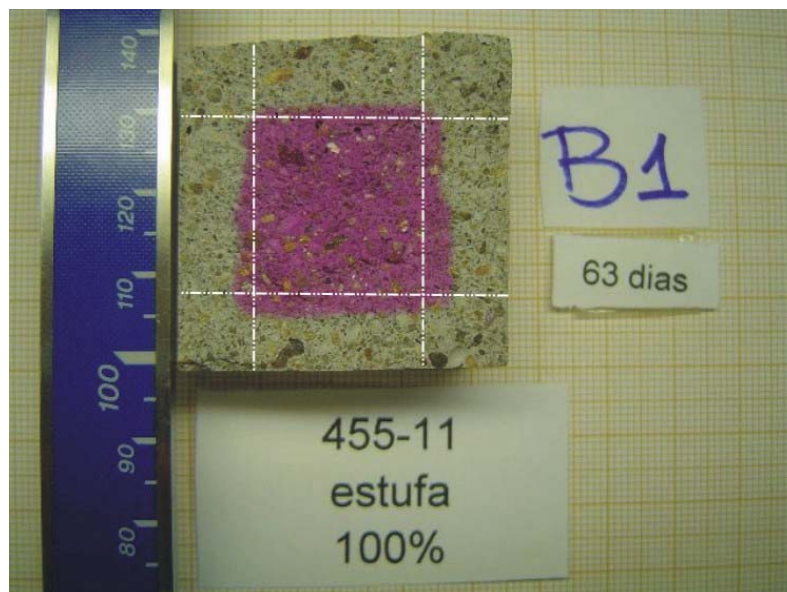


Figura 33 – Imagem com a área não carbonatada delimitada pelas linhas traço ponto, ponto

- d) medição da área carbonatada em cada uma das laterais do corpo-de-prova, delimitada pelas linhas traçadas na figura 33, conforme ilustra a figura 34;

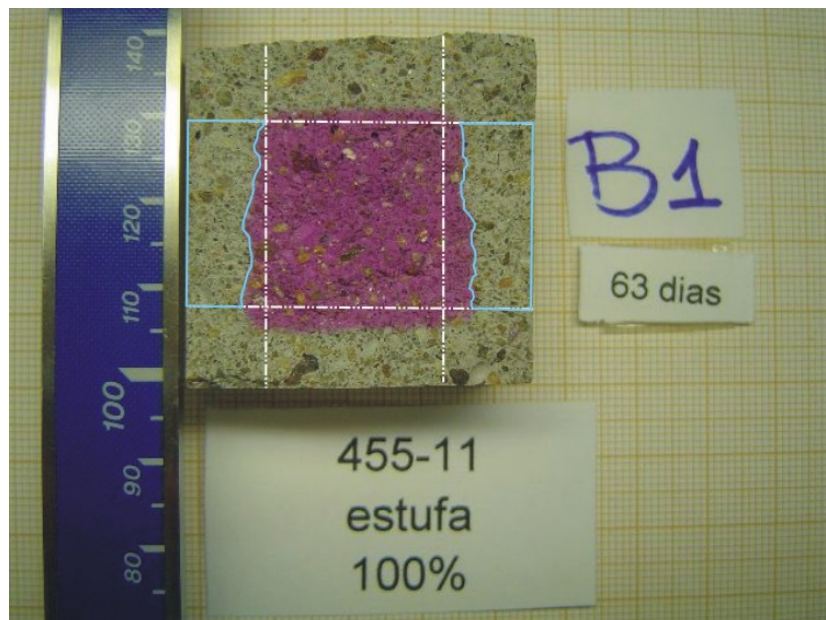


Figura 34 – Imagem com delimitação das áreas carbonatadas em cada uma das laterais (linhas contínuas)

- e) medição da distância entre as duas delimitações do retângulo, conforme figura 35, para cálculo da profundidade de carbonatação média, através da divisão da área por essa distância;

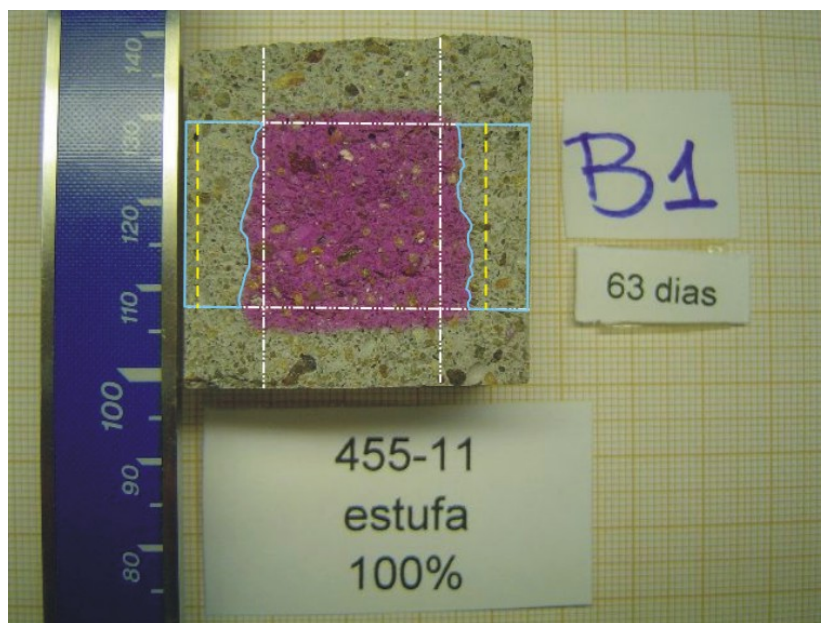


Figura 35 – Imagem com medida da distância (linhas tracejadas), limitada pelas linhas traço, ponto, ponto

- f) medição da maior e menor profundidade de carbonatação em cada lateral (figura 36).

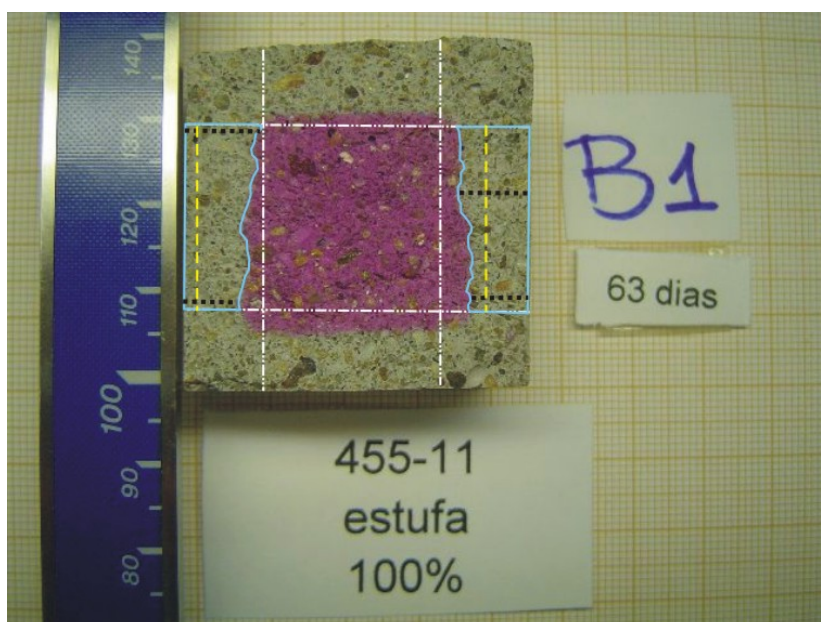


Figura 36 – Imagem com medida da maior e da menor profundidade de carbonatação para cada uma das laterais (linhas pontilhadas)

Na análise dos resultados foram utilizadas as profundidades médias de carbonatação das duas laterais de cada corpo-de-prova, não levando em consideração a base e o topo de moldagem. Como o número de amostras por mistura é de três, e em cada uma delas se obtêm dois resultados (duas laterais), foram totalizados seis resultados para cada mistura, em cada idade de medição.

A dispersão entre os resultados de medida de uma mesma amostra, seja pela repetição do procedimento ou por operadores diferentes, foi menor que o erro de medição especificado pela RILEM (1988), ou seja, menor que 0,5mm.

A dispersão entre as seis medidas de uma mesma mistura foi calculada pelo desvio da média (somatório das diferenças entre o valor medido e a média, dividido pelo número de pontos medidos). Esse desvio foi somado e subtraído da média, dando assim a faixa em que os resultados deveriam estar compreendidos. De uma forma geral, a dispersão foi pequena e a máxima ficou em torno de 15%, e por isso decidiu-se não descartar nenhum ponto.

### 3.4.5 Ensaios complementares de microestrutura

Para verificar alguma característica específica de algum parâmetro e assim buscar o entendimento do mesmo, foram realizados alguns ensaios complementares de microestrutura.

#### 3.4.5.1 Difração de raios X

Por difração de raios X foram analisados: o cimento, a cinza volante e pastas de cimento carbonatadas. As pastas foram feitas com os dois cimentos (CP I e tipo CP IV), na relação a/c 0,70 e carbonatadas nas câmaras de carbonatação (concentrações de CO<sub>2</sub> de 6 % e saturada) e também nos ambientes de exposição natural, não protegidos das intempéries (Ext<sub>U</sub> e Ext<sub>N</sub>). As misturas foram feitas manualmente e depois de 24 horas, postas em cura submersa por 7 dias. Aquelas que foram submetidas à carbonatação acelerada, após cura foram secas em estufa até atingirem a perda de umidade estabelecida para as argamassas, pelo procedimento da RILEM. A carbonatação acelerada nas câmaras teve duração média de 60 dias e, ao natural, cerca de 180 dias.

Após a carbonatação as amostras foram imersas em acetona para remover a água existente nos poros e, em seguida, estocadas em dessecadores sob vácuo e com sílica gel, onde permaneceram até a realização dos ensaios.

Antes do ensaio as amostras foram moídas e passadas na peneira de malha 80  $\mu\text{m}$ . O equipamento usado é um Siemens D5000, 2 theta, passo 0,04, tempo de 2 segundos e tempo de análise de uma hora. O comprimento de onda ( $\lambda$ ) de 0,1788965 nm e tubo de raios X de Cobalto (Co).

A intenção deste ensaio é a comparação de produtos formados nas diferentes condições de ensaio (natural e acelerado).

#### 3.4.5.2 Ensaio de ATG e ATD

As amostras para os ensaios de análise termogravimétrica (ATG) e análise termo-diferencial (ATD) foram extraídas de corpos-de-prova de argamassas que possuíam uma espessura carbonatada, mas cujo núcleo ainda não estava carbonatado, de acordo com a indicação química de pH apresentada pela fenolftaleína.

Foram ensaiadas amostras de CP I, relação a/c 0,40, acondicionadas conforme a RILEM e carbonatadas a 6 % e em câmara saturada de  $\text{CO}_2$ . A escolha da relação a/c 0,40 é justificada pela maior possibilidade de ensaiar camadas em diferentes profundidades e com núcleo não carbonatado, o que é dificultado na relação a/c 0,70.

Depois que as amostras foram retiradas das câmaras de carbonatação, as mesmas foram secas em estufa a  $100^\circ\text{C}$  até constância de massa. Em seguida, foram acondicionadas em dessecadores sob vácuo e com sílica gel, onde permaneceram até a preparação para o ensaio. Foram retiradas duas amostras da região carbonatada, sendo que a primeira camada carbonatada tem cerca de 4 mm e foi retirada a partir da superfície (sup) e a segunda camada carbonatada tem cerca de 3 mm (2ª cam.) e foi retirada entre 2 mm e 5 mm da superfície, mais uma amostra do núcleo, que ainda não estava carbonatado. As amostras foram serradas, moídas e utilizada a fração passante na peneira com abertura de 160  $\mu\text{m}$ . Este procedimento foi realizado poucos instantes antes de se iniciar o ensaio, a fim de evitar a carbonatação suplementar da amostra e alterar o seu resultado.

Estes ensaios foram realizados no INSA de Toulouse. Foram utilizados dois equipamentos: um do tipo Setaram G70, com massa de amostra de 200 mg e cadinho de quartzo; e outro equipamento montado no laboratório a partir de uma balança Sartorius BP121S e de um forno Pekly Hermann com regulador de temperatura Eurotherm, massa da amostra de 2 g e o cadinho de platina, sendo o material inerte para a ATD, a alumina. A taxa de aquecimento foi de  $10^\circ\text{C}/\text{min}$ , para ambos os equipamentos até a temperatura de  $1000^\circ\text{C}$ .

O intuito deste ensaio é o de comparar se existem diferenças com relação à quantidade e temperatura de decomposição dos compostos presentes em amostras ensaiadas em diferentes concentrações de CO<sub>2</sub>.

### 3.4.5.3 Porosimetria por intrusão de mercúrio

Amostras de argamassas carbonatadas e não carbonatadas foram submetidas à porosimetria por intrusão de mercúrio, a fim de se verificar a diferença de porosidade decorrente da carbonatação. Foram escolhidas amostras de ambos os cimentos (CP I e tipo CP IV) e de relação a/c elevada (0,70) para ressaltar o efeito da carbonatação.

As amostras não carbonatadas foram ensaiadas na condição pós condicionamento, dos dois tipos (sala climatizada (SC) e RILEM (R)). Foram utilizados corpos-de-prova do grupo 4 (curados por 7 dias). A figura 37 ilustra o esquema de retirada das amostras não carbonatadas.

Para o corte foi utilizada uma serra de precisão marca Strauss, modelo Isomet. Antes do ensaio todas as amostras foram secas em estufa a 100°C por 24h.

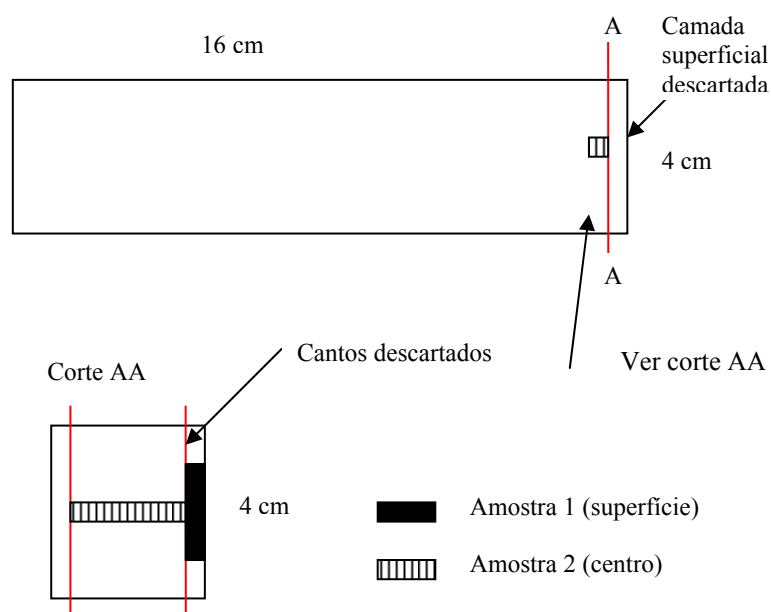


Figura 37 – Esquema de corte das amostras não carbonatadas, submetidas à porosimetria por intrusão de Hg



A camada superficial da seção 40 x 40 mm do corpo-de-prova foi descartada para evitar que a amostra mais externa possuísse a ação simultânea de várias frentes de carbonatação.

Para as amostras carbonatadas, procurou-se verificar a mudança de porosidade em relação à superfície da amostra em direção ao centro. A figura 38 ilustra o esquema de retirada das amostras carbonatadas para o ensaio de porosimetria por intrusão de Hg.

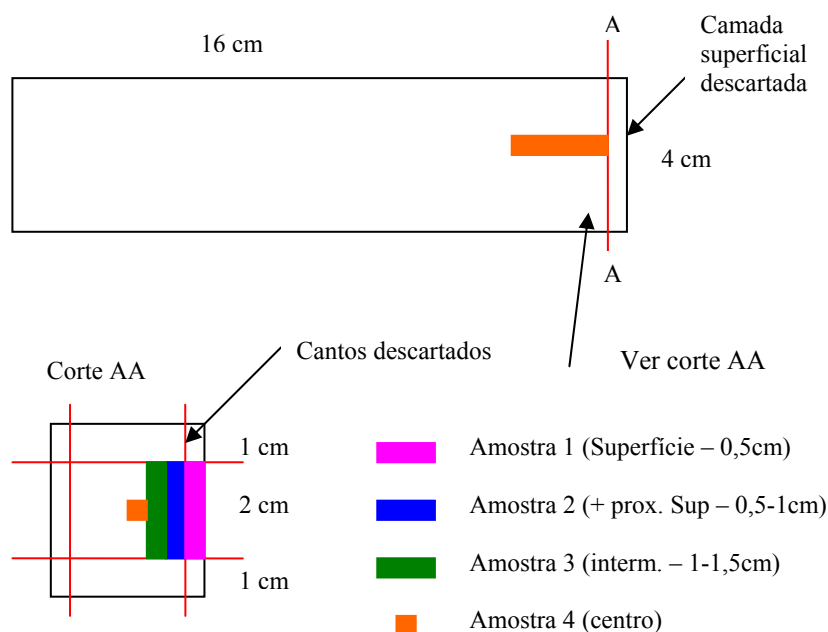


Figura 38 – Esquema de corte das amostras carbonatadas, submetidas à porosimetria por intrusão de Hg

Os cantos foram excluídos no intuito de não utilizar amostras por onde o  $\text{CO}_2$  penetrou em duas direções.

### 3.4.6 Resistência à Compressão Axial

Os ensaios de resistência à compressão axial são bem entendidos no meio científico e podem ser utilizados como forma de verificar possíveis erros no preparo das amostras que servirão para os ensaios principais da pesquisa. Dessa forma, o ensaio foi utilizado para controle das argamassas.

As amostras para o ensaio de resistência à compressão axial foram moldadas conforme a ABNT (1994) nas prescrições da NBR 5738. Foram utilizados moldes metálicos para corpos-de-prova cilíndricos com dimensões de 100x200mm, adensamento manual, em duas camadas

com 15 golpes cada. Ao término da moldagem, os moldes foram colocados na sala de cura úmida ( $UR \geq 95\%$  e temperatura de  $23 \pm 2^\circ\text{C}$ ), onde permaneceram por 24 horas, sendo então desmoldados. Normalmente são utilizados corpos-de-prova de 50x100mm para a resistência à compressão de argamassas, no entanto, a dispersão de resultados é muito elevada e por isso optou-se por amostras maiores.

Depois de retirados dos moldes, os corpos-de-prova foram colocados submersos em água saturada de cal, dentro da sala de cura, permanecendo nessas condições até suas respectivas idades de ensaio. A resistência à compressão axial foi determinada aos 7, 28 e 63 dias de idade, e seguiu as recomendações da AMN (1997), NM 101. A seguir são apresentados os resultados desta série de ensaios experimentais.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados do programa experimental são apresentados e discutidos neste capítulo. Para facilitar a identificação das misturas, principalmente em gráficos e tabelas, foi adotada a seguinte notação:

**I40** = cimento CP I-S, relação a/c de 0,40;

**I55** = cimento CP I-S, relação a/c de 0,55;

**I70** = cimento CP I-S, relação a/c de 0,70;

**IV40** = cimento tipo CP IV, relação a/c de 0,40;

**IV55** = cimento tipo CP IV, relação a/c de 0,55;

**IV70** = cimento tipo CP IV, relação a/c de 0,70;

**SC100** = condicionamento em sala climatizada, carbonatação em câmara saturada (100%) de CO<sub>2</sub>;

**R100** = condicionamento conforme RILEM, carbonatação em câmara saturada (100%) de CO<sub>2</sub>;

**SC6** = condicionamento em sala climatizada, carbonatação com 6% de CO<sub>2</sub>;

**R6** = condicionamento conforme RILEM, carbonatação com 6% de CO<sub>2</sub>;

**Int** = carbonatação natural em ambiente interno, (sala climatizada: T=20°C, UR=70%, CO<sub>2</sub>=0,088%);

**Ext<sub>U</sub>** = carbonatação natural em ambiente externo não protegido das chuvas (CO<sub>2</sub>=0,063%);

**Ext<sub>N</sub>** = carbonatação natural em ambiente externo não protegido das chuvas (CO<sub>2</sub>=0,071%);

A combinação das variáveis compreendidas no presente estudo gerou um número considerável de resultados, possibilitando a realização de inúmeras análises. Entretanto, deu-se ênfase àquelas relacionadas ao objetivo principal do trabalho, ou seja, a comparação da carbonatação acelerada com a carbonatação natural, tanto do ponto de vista de avaliar a possibilidade de prever vida útil a partir de ensaios acelerados, como verificar até que ponto as diferentes condições de execução desses ensaios não distorcem o fenômeno da carbonatação. Os

resultados de profundidade de carbonatação e a influência das variáveis estudadas são apresentados a seguir.

#### 4.1 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS

Para melhor entendimento e visualização da influência de cada variável na profundidade de carbonatação, foi realizado um tratamento estatístico do tipo análise de variância (ANOVA), sendo que o efeito significativo na profundidade de carbonatação tem um nível de confiança de 95%. A análise foi feita separando inicialmente os ensaios naturais e acelerados de carbonatação.

Sabe-se que o tempo de ensaio é um fator estatisticamente significativo para os resultados de profundidade de carbonatação, de forma que para esta análise foi escolhida uma determinada idade de ensaio para as amostras do ensaio natural e outra para o ensaio acelerado. Este procedimento mostrou-se necessário, sobretudo no caso das amostras do ensaio acelerado, em função de não se ter valores para todas as idades em todas as combinações de fatores. Isso acontece porque algumas amostras carbonatam mais rápido e, o número de medidas acaba sendo limitado pelo tamanho do corpo-de-prova.

Em seguida, procedeu-se à modelagem numérica dos resultados de profundidade de carbonatação, através de regressão múltipla. Os modelos de regressão múltipla foram encontrados com auxílio do *software Statgraphics Plus* versão 2.1. Essa modelagem foi realizada considerando os fatores e suas interações que se mostraram significativos para o modelo, ou seja, foram propostas ao programa expressões do tipo: cura x  $\sqrt{\text{tempo}}$ , cimento x cura x  $\sqrt{\text{tempo}}$ , relação a/c x cimento x  $\sqrt{\text{tempo}}$ , e assim sucessivamente até contemplar todas as variáveis e suas interações de primeira ordem. Todos os fatores foram multiplicados pela  $\sqrt{\text{tempo}}$ , assim tem-se que no tempo=0 a profundidade de carbonatação é igual a zero. Ao solicitar que seja feita a regressão múltipla o programa calcula o índice de cada variável e indica se o mesmo é significativo ou não e, ao final, apenas as estatisticamente significativas foram mantidas. As comparações dos resultados experimentais com os resultados obtidos pela modelagem, para cada combinação de variáveis modelada são apresentadas no apêndice E.

O objetivo desta modelagem é eliminar grande parte da variabilidade dos resultados experimentais, e assim, avaliar as tendências do conjunto de valores obtidos e comparar o

comportamento dos ensaios naturais com os ensaios acelerados realizados sob diferentes condições.

#### 4.1.1 Carbonatação natural

Os resultados das profundidades de carbonatação natural ao longo do tempo são apresentados no apêndice F. A análise de variância dos dados obtidos, aos 58 meses<sup>19</sup> de ensaio, gerou os dados da tabela 16.

Tabela 16 – Análise de variância dos resultados de carbonatação natural aos 58 meses de ensaio

Variáveis controladas	SQ	GDL	MQ	Teste F	Valor-p	Significância
tempo de cura	127,00	2	63,50	37,06	0,0000	S
tipo de cimento	1107,89	1	1107,89	646,54	0,0000	S
relação a/c	3436,53	2	1718,26	1002,74	0,0000	S
ambiente de exposição	888,00	2	444,00	259,11	0,0000	S
cura x cimento	50,95	2	25,48	14,87	0,0000	S
cura x relação a/c	208,68	4	52,17	30,44	0,0000	S
cura x ambiente	3,29	4	0,82	0,48	0,7501	NS
cimento x relação a/c	108,26	2	54,13	31,59	0,0000	S
cimento x ambiente	35,36	2	17,68	10,32	0,0000	S
relação a/c x ambiente	184,85	4	46,21	26,97	0,0000	S
erro	510,64	298	1,71			
total	6661,64	323				

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

Os resultados da tabela 16 mostram que todos os fatores estudados são estatisticamente significativos para a profundidade de carbonatação, sendo o fator de maior influência a relação a/c, seguida do tipo de cimento, do ambiente de exposição e, por fim, do tempo de cura.

No ambiente de exposição foram considerados os dois ambientes externos não protegidos das chuvas (Ext<sub>U</sub> e Ext<sub>N</sub>) e o ambiente interno (Int). Para a modelagem numérica os ensaios naturais foram divididos em profundidade de carbonatação natural externa ( $e_{c,Ext}$ ) e interna ( $e_{c,Int}$ ).

Como existem fatores qualitativos (como o tipo de cimento) e valores que não devem ser tomados como absolutos (por exemplo: o tempo de cura de 28 dias não significa que sua

<sup>19</sup> As idades de medida da profundidade de carbonatação natural foram consideradas em meses. Quando transformadas para dias, cada mês foi multiplicado por 30 dias.

influência é 4 vezes o comportamento da cura aos 7 dias), procedeu-se à codificação destes parâmetros para a modelagem, com base nos resultados da análise de variância e das médias de profundidade de carbonatação de cada fator isolado. Os valores são apresentados na tabela 17.

Tabela 17 – Valores reais e codificados das variáveis do ensaio de carbonatação natural

Variáveis controladas	Nível real	Nível codificado	
tempo de cura (dias)	7	0,15	
	14	0,1	
	28	0	
tipo de cimento	CP I	0	
	Tipo CP IV	0,5	
relação a/c	0,4	0,4	
	0,55	0,55	
	0,7	0,7	
ambiente de exposição	Externo	Ext <sub>N</sub>	0,071
		Ext <sub>U</sub>	0,063
	Interno	0,088	
tempo de ensaio (dias)*	0	0	
	1740	1	

\* para idades intermediárias, interpolar o valor codificado

O modelo para as amostras carbonatadas em ambiente externo é apresentado na equação 16, que está ajustada para os valores codificados das variáveis utilizadas. O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) entre os valores experimentais e o modelo foi de 93,4%.

$$e_{c,Ext} = \sqrt{t}(ac(10,72 + 18,72ci + 84tc) + tc(-43,68 + 20,97ci) - 5ci - 21,48a) \quad \text{Equação 16}$$

Onde:

$e_{c,Ext}$  = profundidade de carbonatação das amostras carbonatadas em ambiente externo, não protegido das intempéries (mm);

ac = relação a/c;

ci = tipo de cimento;

tc = tempo de cura;

a = ambiente de exposição externo;

t = tempo do ensaio de carbonatação.

Para a profundidade de carbonatação em ambiente interno, o modelo ajustado aos valores codificados das variáveis é apresentado na equação 17 e o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) foi igual a 95%.

$$e_{c,Int} = \sqrt{t}(ac(12,54 + 35,75ci + 121,55tc) + tc(-63,71 + 31,21ci) - 12,86ci) \quad \text{Equação 17}$$

Onde  $e_{c,Int}$  é a profundidade de carbonatação natural em ambiente interno (sala climatizada), em mm, e os demais fatores são os mesmos apresentados anteriormente (equação 16).

Os resultados dos modelos e a análise de cada fator são realizados no item 4.2.

#### 4.1.2 Carbonatação acelerada

No item 2.5.4 foram expostas as principais conclusões do trabalho de Pauletti (2004), que comprovou que todos os fatores estudados nos ensaios de carbonatação acelerada exercem influência na profundidade de carbonatação. A influência do tempo de redistribuição da umidade no condicionamento foi um fator que, apesar de ser estatisticamente significativo, possui fraca influência nos resultados, o que levou a tomar a decisão de seguir as análises deste trabalho apenas com os grupos de ensaio 1 e 2 (ver figura 21, página 98), onde o tempo de redistribuição foi variável, mas nos quais a idade das amostras no início do ensaio de carbonatação foi a mesma para todas as argamassas estudadas.

Globalmente, a profundidade de carbonatação é maior quando:

- a) o tempo de cura é de 7 dias com relação a 28 dias;
- b) o cimento é o tipo CP IV em relação ao CP I;
- c) aumenta a relação a/c;
- d) o condicionamento é executado conforme a RILEM, comparativamente ao realizado em sala climatizada;
- e) as amostras são carbonatadas com 6% de  $CO_2$  em relação a 100% de  $CO_2$ .

As medidas de profundidade de carbonatação acelerada são apresentadas no apêndice G. Os resultados da análise de variância (ANOVA) dos dados obtidos aos 28 dias de ensaio são apresentados na tabela 18.

Tabela 18 – Análise de variância dos resultados de carbonatação acelerada aos 28 dias de ensaio

Fatores	SQ	GDL	MQ	Teste F	Valor-p	Significância
tempo de cura	0,59	1	0,59	0,57	0,4505	NS
tipo de cimento	588,47	1	588,47	569,08	0,0000	S
relação a/c	2410,62	2	1205,31	1165,59	0,0000	S
precondicionamento	571,95	1	571,95	553,10	0,0000	S
% CO <sub>2</sub>	1373,67	1	1373,67	1328,39	0,0000	S
cura x cimento	27,83	1	27,83	26,91	0,0000	S
cura x relação a/c	3,93	2	1,96	1,90	0,1517	NS
cura x condicionamento	11,01	1	11,01	10,64	0,0012	S
cura x % CO <sub>2</sub>	241,96	1	241,96	233,99	0,0000	S
cimento x relação a/c	57,77	2	27,93	27,93	0,0000	S
cimento x acond.	0,07	1	0,07	0,07	0,7927	NS
cimento x % CO <sub>2</sub>	12,61	1	12,61	12,19	0,0006	S
relação a/c x acond.	22,55	2	11,26	10,90	0,0000	S
relação a/c x % CO <sub>2</sub>	259,96	2	129,98	125,70	0,0000	S
acond. x % CO <sub>2</sub>	53,70	1	53,70	51,93	0,0000	S
erro	276,10	267	1,03			
total	5912,79	287				

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

Os resultados da tabela 18 mostram que para o conjunto de dados considerado, entre os fatores principais, o tempo de cura não exerce influência estatisticamente significativa na profundidade de carbonatação.

A análise da carbonatação acelerada foi feita por conjuntos de dados, ou seja, separada por tipo de condicionamento (sala climatizada - SC ou conforme recomendações da RILEM - R) e concentração de CO<sub>2</sub> do ensaio (6% ou 100%). A figura 39 apresenta o esquema de divisão dos resultados para a análise e elaboração dos modelos numéricos. Uma das razões para fazer essa divisão é a dificuldade de se considerar na modelagem as variáveis qualitativas (explicação no item 4.1.1) e, nesse caso, o tipo de condicionamento constitui uma variável importante a ser avaliada. A concentração de CO<sub>2</sub> também não pode ser tomada como absoluta, uma vez que a profundidade de carbonatação é menor quando a concentração de CO<sub>2</sub> é de 100% com relação à concentração de 6%. Separando essas variáveis por grupos, os efeitos de cada tipo de condicionamento, como também do percentual de CO<sub>2</sub>, não serão confundidos com possíveis falhas no modelo que teria de ajustar todos os pontos em função desses fatores.



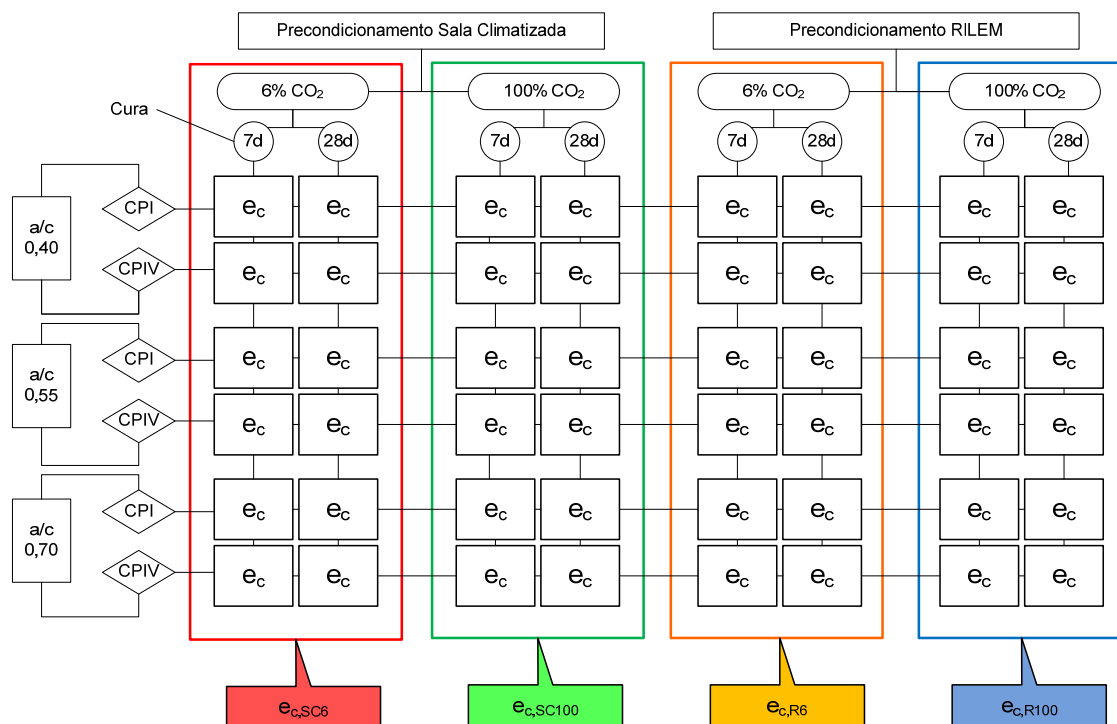


Figura 39 – Esquema ilustrativo da divisão dos ensaios acelerados para a elaboração dos modelos matemáticos e análise dos resultados

A codificação para os modelos de regressão dos ensaios acelerados é apresentada na tabela 19.

Tabela 19 – Valores reais e codificados das variáveis do ensaio de carbonatação acelerada

Variáveis controladas	Nível real	Nível codificado
tempo de cura (dias)	7	0,15
	28	0
tipo de cimento	CP I	0
	Tipo CP IV	0,5
relação a/c	0,4	0,4
	0,55	0,55
	0,7	0,7
tempo de ensaio (dias)*	0	0
	252	1

\* para idades intermediárias, interpolar o valor codificado

Apesar do tempo de cura não ter se mostrado significativo na análise global dos dados de carbonatação acelerada, quando feita a análise estatística para cada um dos grupos para modelagem (figura 39), o tempo de cura teve influência significativa e, por isso, foi considerado no modelo.

O modelo de profundidade de carbonatação das amostras condicionadas em sala climatizada e carbonatadas com 6 % de CO<sub>2</sub> (SC6) é apresentado na equação 18. Os resultados experimentais e do modelo apresentaram um ajuste (R<sup>2</sup>) de 93,2%.

$$e_{c,SC6} = \sqrt{t}(ac(18,99 + 129,05ci + 239,64tc) + tc(-109,05 + 63,59ci) - 53,6ci) \quad \text{Equação 18}$$

Onde:

$e_{c,SC6}$  = profundidade de carbonatação das amostras condicionadas em sala climatizada e carbonatadas com 6% de CO<sub>2</sub> (mm);

ci = tipo de cimento;

ac = relação a/c;

tc = tempo de cura;

t = tempo do ensaio de carbonatação (0 dias=0; 252 dias=1; para valores intermediários, interpolar).

A equação 19 apresenta o modelo de profundidade de carbonatação das amostras condicionadas em sala climatizada e carbonatadas com 100% de CO<sub>2</sub> (SC100), com um coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>) de 90%.

$$e_{c,SC100} = \sqrt{t}(ac(16,5 + 52,32ci + 87,91tc) + tc(-42,56 + 21,47ci) - 20,47ci) \quad \text{Equação 19}$$

$e_{c,SC100}$  = profundidade de carbonatação das amostras condicionadas em sala climatizada e carbonatadas com 100% de CO<sub>2</sub> (mm);

t = tempo do ensaio de carbonatação (0 dias=0; 252 dias=1; para valores intermediários, interpolar).

O modelo que representa a profundidade de carbonatação das amostras condicionadas conforme a RILEM e carbonatadas com 6 % de CO<sub>2</sub> (R6) é apresentado na equação 20. O ajuste dos pontos (R<sup>2</sup>) foi de 96,3%.

$$e_{c,R6} = \sqrt{t}(ac(37,81 + 93,31ci + 142,2tc) - 49,86tc - 38,4ci) \quad \text{Equação 20}$$

Onde:

$e_{c,R6}$  = profundidade de carbonatação das amostras condicionadas conforme a RILEM e carbonatadas com 6% de CO<sub>2</sub> (mm);

t = tempo do ensaio de carbonatação (0 dias=0; 252 dias=1; para valores intermediários, interpolar).

Na equação 21 é apresentado o modelo matemático que ajusta os pontos de profundidade de carbonatação das amostras condicionadas conforme a RILEM e carbonatadas com 100% de CO<sub>2</sub> (R100). O R<sup>2</sup> obtido foi de 92,6%.

$$e_{c,R100} = \sqrt{t}(ac(25,52 + 34,13ci) + 7,97tc - 9,77ci) \quad \text{Equação 21}$$

Onde:

$e_{c,R100}$  = profundidade de carbonatação das amostras condicionadas conforme a RILEM e carbonatadas com 100% de CO<sub>2</sub> (mm);

t = tempo do ensaio de carbonatação (0 dias=0; 252 dias=1; para valores intermediários, interpolar).

Os gráficos de comportamento de cada um dos modelos e a análise dos fatores são apresentados a seguir.

## 4.2 ANÁLISE CONJUNTA DOS RESULTADOS

A interpretação dos resultados foi dividida em função das variáveis estudadas. Primeiramente são analisados os resultados da influência dos fatores isolados (tempo de cura (tc), tipo de cimento (ci) e relação a/c (ac)) e em seguida as interações entre os fatores (tc x ci, tc x ac e ci x ac).

Os gráficos de profundidade de carbonatação (prof. de carbo, em mm) foram traçados em função da raiz quadrada do tempo (tempo de exposição, em dias<sup>0,5</sup>). Para análise dos efeitos principais, o fator que está sendo analisado é variável e os valores das demais entradas do modelo são considerados no seu ponto médio.

### 4.2.1 Influência isolada do tempo de cura

Da figura 40 a figura 45 são apresentados os efeitos isolados do tempo de cura na profundidade de carbonatação de cada um dos grupos de análise. Neste caso, o cimento assume um valor médio (nível codificado=0,25) e a relação a/c também (nível codificado=0,55).

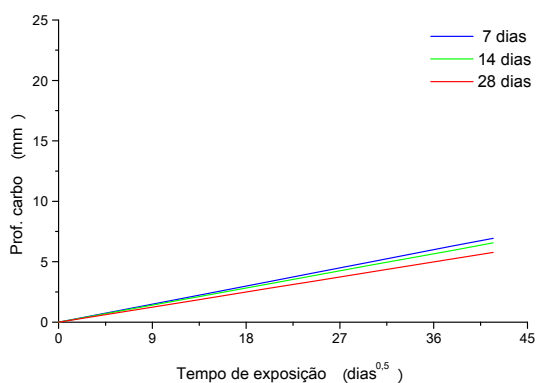


Figura 40 – Efeito isolado do tempo de cura na evolução da  $e_c$  com o tempo para condição natural externo

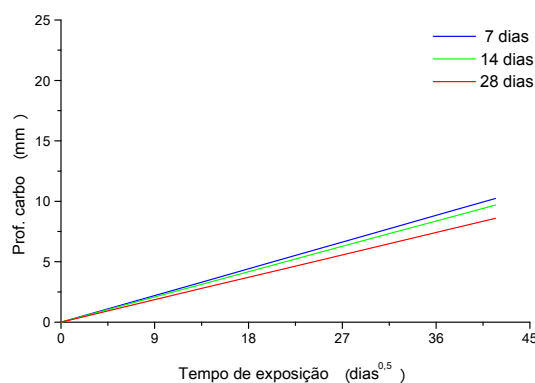


Figura 41 – Efeito isolado do tempo de cura na evolução da  $e_c$  com o tempo para condição natural interno

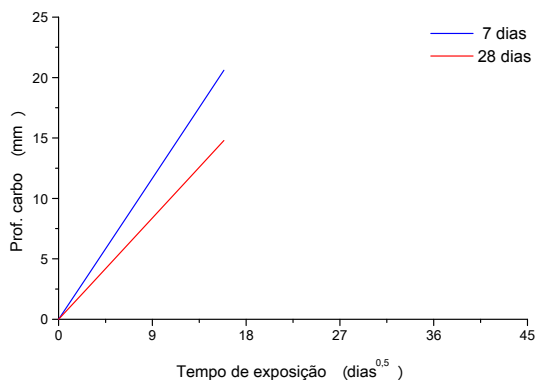


Figura 42 – Efeito isolado do tempo de cura na evolução da  $e_c$  com o tempo para condição SC6

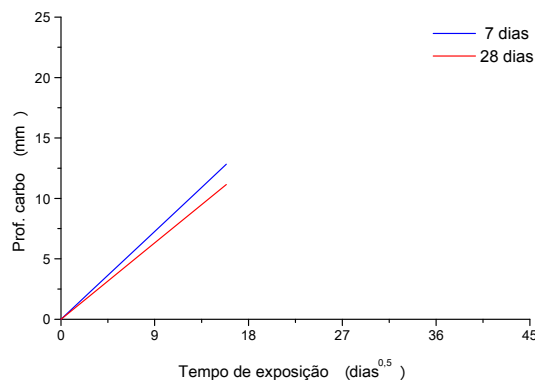


Figura 43 – Efeito isolado do tempo de cura na evolução da  $e_c$  com o tempo para condição SC100

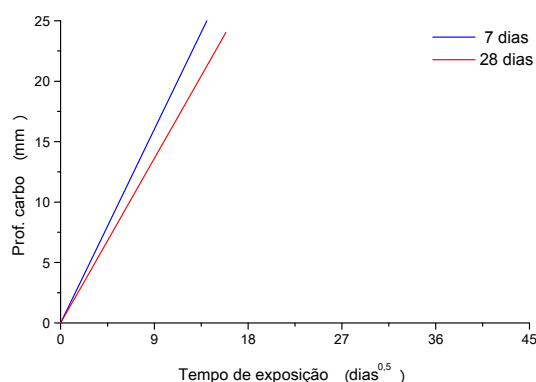


Figura 44 – Efeito isolado do tempo de cura na evolução da  $e_c$  com o tempo para condição R6

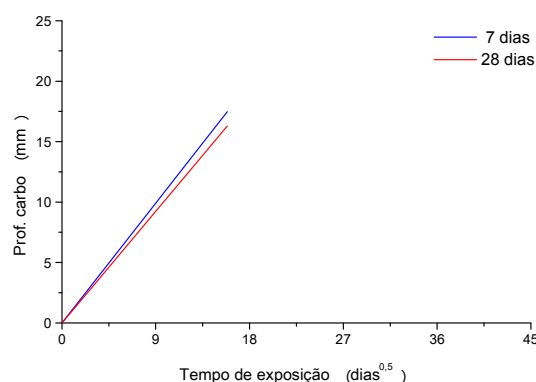


Figura 45 – Efeito isolado do tempo de cura na evolução da  $e_c$  com o tempo para condição R100

Analisando globalmente os resultados da figura 40 a figura 45, pode-se perceber que a influência do tempo de cura na profundidade de carbonatação é regular e que não há inversão de comportamento em nenhum dos casos. O aumento do tempo de cura é inversamente proporcional à profundidade de carbonatação, sendo que a cura por 28 dias diminui a profundidade carbonatada quando comparada com amostras curadas por 7 dias. Isso acontece porque aos 28 dias já houve maior hidratação do cimento, o que diminui a porosidade. Quando uma amostra que foi curada por 7 dias é submetida à carbonatação, haverá competição entre as reações de hidratação e carbonatação, para consumir o hidróxido de cálcio, acelerando a neutralização da solução dos poros do material que é indicada por maiores profundidades de carbonatação. A tabela 20 apresenta um resumo das profundidades de carbonatação (tempo de exposição: natural=58 meses, acelerado=252 dias) com diferentes tempos de cura, para cada uma das condições de ensaio.

Tabela 20 – Influência do tempo de cura para as diferentes condições de ensaio, na  $e_c$  (mm)

Condições do ensaio	7 dias	28 dias	Diferença* (%)
Ext	6,94	5,78	↑20
Int	10,24	8,60	↑20
SC6	20,59	14,79	↑39
SC100	12,83	11,15	↑15
R6	28,28	24,02	↑18
R100	17,48	16,29	↑7

Nota:\*A diferença apresentada mostra como a profundidade de carbonatação é influenciada quando se altera o tempo de cura de 28 dias para 7 dias.

Diferenças semelhantes às da tabela 20 foram encontradas por Lopes (1999) e Monteiro (1996) que mostram que passando a cura de 7 para 28 dias tem-se uma diminuição na profundidade de carbonatação entre 20 e 30%. Cabe ressaltar que quaisquer comparações com dados da literatura devem ser feitas com muita cautela, pois os diversos fatores que envolvem os ensaios de carbonatação influenciam seus resultados e o fato de cada pesquisador adotar uma metodologia específica, por falta de um procedimento padronizado, dificulta e até mesmo impede essas confrontações.

Em condições naturais de carbonatação, o tempo de cura tem a mesma influência nos dois ambientes (Ext e Int). Quando comparados entre si, a carbonatação é, em média, 48% maior em ambiente interno para o mesmo tempo de cura. A principal razão é a condição de equilíbrio da umidade interna das amostras, que no ambiente externo sofre ciclos de molhagem e secagem que dificultam o avanço da frente de carbonatação. Bakker (1993)<sup>20</sup> e Wierig (1984)<sup>21</sup>, ambos citados por Baron, Gagne e Ollivier (1996), verificaram que em ambientes não protegidos das chuvas, a partir de uma determinada profundidade de carbonatação, o avanço do CO<sub>2</sub> é praticamente nulo e a profundidade carbonatada fica constante, pois há um fechamento superficial dos poros pela água, o que impede a difusão do CO<sub>2</sub> e, em consequência, o avanço da frente.

Fazendo a análise da influência do tempo de cura para um mesmo condicionamento (SC ou R) tem-se um aumento médio de 60% na profundidade de carbonatação ao passar a concentração de CO<sub>2</sub> de 100% para 6% quando a cura é de 7 dias e, de 33 a 47% quando a cura é de 28 dias.

Nos ambientes de ensaio com 100% de CO<sub>2</sub>, o tempo de cura influencia menos os resultados de profundidade de carbonatação. Duas hipóteses parecem possíveis:

- a) a forte carbonatação com 100% de CO<sub>2</sub> gera uma quantidade de água maior que nas outras concentrações, o que pode preencher os poros do material, dificultando o acesso do CO<sub>2</sub> e tornando as argamassas mais porosas (curadas por 7 dias) mais semelhantes às mais densas, ou seja, curadas por um período de 28 dias;

---

<sup>20</sup> BAKKER, R. F. M. Model to calculate the rate of carbonation in concrete under different climatic conditions. Technical report, CEMIJ bv Laboratorium, Pays-Bas, 1993.

<sup>21</sup> WIERIG, H. Long time studies on the carbonation of concrete under normal outdoor exposure. In: Proceedings of Rilem Seminar, pages 231-238, Hannover, 1984.

- b) a forte carbonatação com 100% de CO<sub>2</sub> gera uma quantidade de água maior que nas outras concentrações e essa água auxilia para que haja uma hidratação suplementar, diminuindo a diferença entre os dois tempos de cura.

Mesmo que o ambiente de ensaio esteja em equilíbrio de umidade, a água formada na reação de carbonatação pode ter dificuldade de sair do corpo-de-prova, para atingir o equilíbrio hídrico, à medida que a frente de carbonatação se afasta da superfície de entrada do CO<sub>2</sub>.

De forma global, levando em conta apenas o efeito isolado do tempo de cura, se forem comparadas as diferenças entre as diversas condições de ensaio ao se passar de um tempo de cura ao outro, pode-se dizer que a condição de ensaio R6 é a que mais se aproxima das diferenças obtidas na carbonatação natural. Ao final da análise dos fatores e suas interações na profundidade de carbonatação, apresenta-se um resumo da comparação entre a carbonatação natural e a acelerada (item 4.4).

#### 4.2.2 Influência isolada do tipo de cimento

A influência isolada do tipo de cimento na profundidade de carbonatação é apresentada da figura 46 à figura 51, para cada conjunto de variáveis estudadas. As demais variáveis, tempo de cura e relação a/c, estão no ponto médio (0,075 e 0,55, respectivamente).

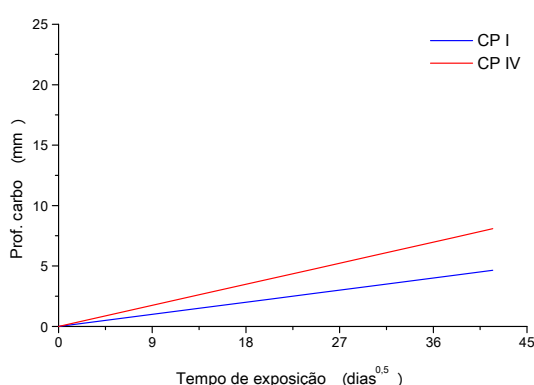


Figura 46 – Efeito isolado do tipo de cimento na evolução da  $e_c$  com o tempo para condição natural externo

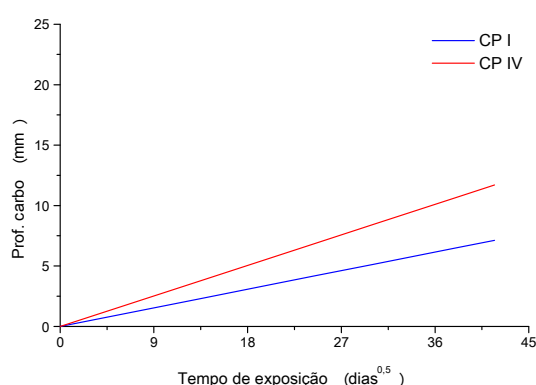


Figura 47 – Efeito isolado do tipo de cimento na evolução da  $e_c$  com o tempo para condição natural interno

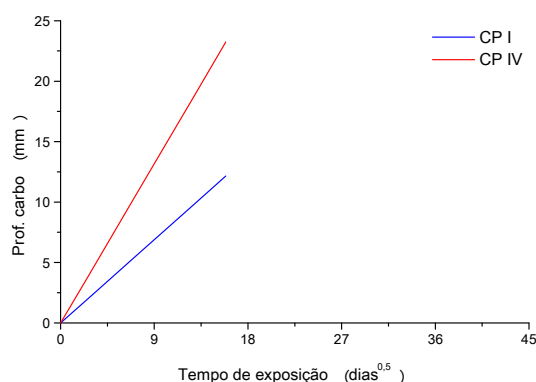


Figura 48 – Efeito isolado do tipo de cimento na evolução da  $e_c$  com o tempo para condição SC6

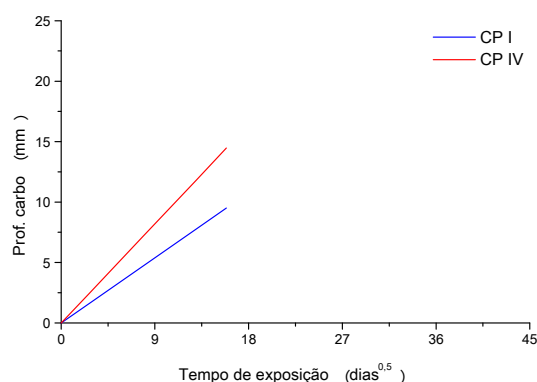


Figura 49 – Efeito isolado do tipo de cimento na evolução da  $e_c$  com o tempo para condição SC100

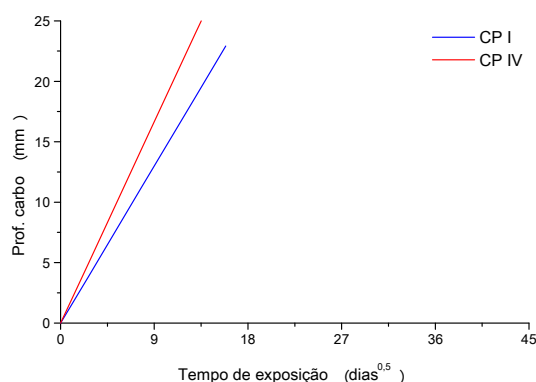


Figura 50 – Efeito isolado do tipo de cimento na evolução da  $e_c$  com o tempo para condição R6

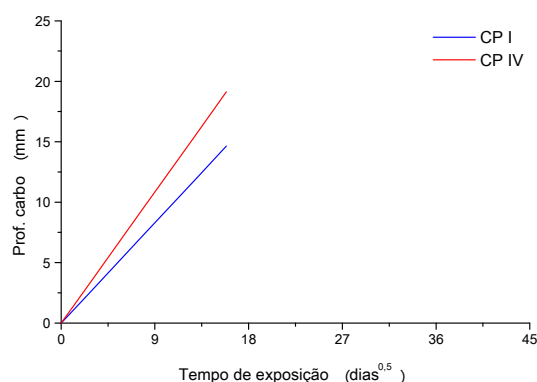


Figura 51 – Efeito isolado do tipo de cimento na evolução da  $e_c$  com o tempo para condição R100

O comportamento do tipo de cimento é o mesmo para todos os conjuntos de variáveis estudadas, sendo a profundidade de carbonatação sempre maior para o cimento tipo CP IV. Diversos trabalhos já verificaram a influência das adições minerais na profundidade de carbonatação (ISAIA; FURQUIN; GASTALDINI, 2009; KULAKOWSKI, 2002; PAPADAKIS, 2000a; SAEKI; MONTEIRO, 2005; SISOMPHON; FRANKE, 2007; ZORNOZA; PAYÁ; GARCÉS, 2009), entre outros.

A tabela 21 apresenta a influência isolada do tipo de cimento na profundidade de carbonatação (tempo de exposição: natural=58 meses, acelerado=252 dias).



Tabela 21 – Influência do tipo de cimento para as diferentes condições de ensaio, na profundidade de carbonatação (mm)

Condições do ensaio	CP I	Tipo CP IV	Diferença* (%)
Ext	4,65	8,08	↓42
Int	7,13	11,70	↓39
SC6	12,15	23,23	↓47
SC100	9,51	14,47	↓34
R6	22,92	29,38	↓22
R100	14,64	19,13	↓23

\*Porcentagem que a carbonatação do CP I é menor que do tipo CP IV

A carbonatação em ambiente natural interno é 53% e 45% maior que no ambiente externo, para o CP I e tipo CP IV, respectivamente.

O objetivo ao utilizar diferentes cimentos, no caso específico deste trabalho, não é verificar qual deles carbonata mais ou menos, mas avaliar se o comportamento obtido para um deles se reproduz no outro quando analisado em diferentes condições de ensaio.

Nos ensaios acelerados o comportamento entre os cimentos têm influências diferentes ao mudar a concentração de CO<sub>2</sub> e o tipo de condicionamento:

Para o CPI: SC6 → SC100: 27%; R6 → R100: 56%; SC6 → R6: 88%.

Para o tipo CPIV: SC6 → SC100: 60%; R6 → R100: 22%; SC6 → R6: 26%.

Se for avaliado apenas o efeito isolado do tipo de cimento, as diferenças entre CP I e tipo CP IV das amostras condicionadas em sala climatizada e carbonatadas com 6% de CO<sub>2</sub> (SC6) são as que mais se assemelham às diferenças obtidas para os ambientes naturais.

#### 4.2.3 Influência isolada da relação a/c

O efeito isolado da relação a/c na profundidade de carbonatação é apresentado da figura 52 à figura 57. O tempo de cura e o tipo de cimento assumem o ponto médio, 0,075 e 0,25, respectivamente.

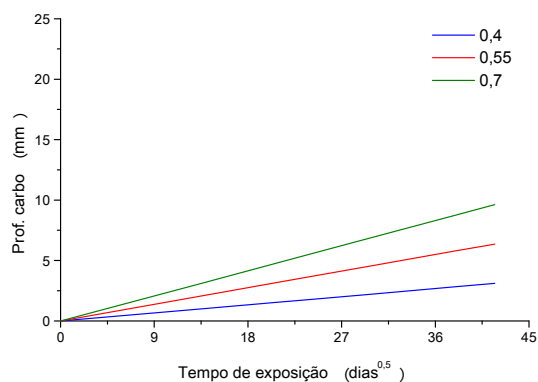


Figura 52 – Efeito isolado da relação  $a/c$  na evolução da  $e_c$  com o tempo para condição natural externo

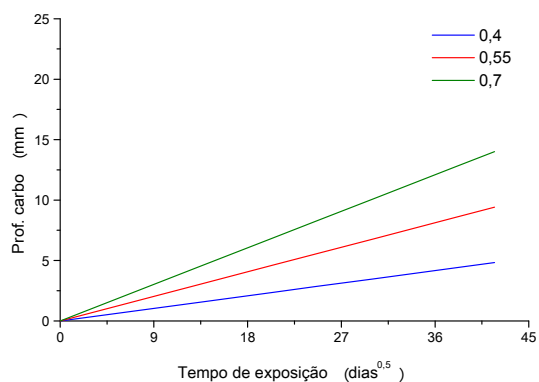


Figura 53 – Efeito isolado da relação  $a/c$  na evolução da  $e_c$  com o tempo para condição natural interno

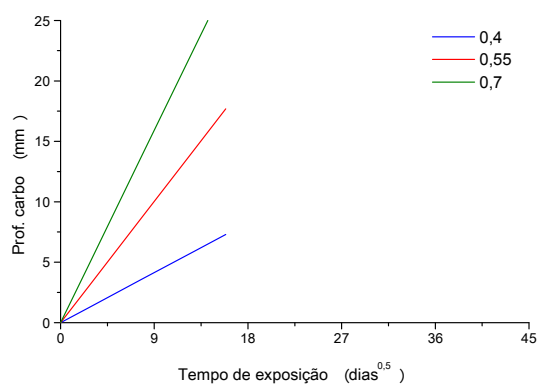


Figura 54 – Efeito isolado da relação  $a/c$  na evolução da  $e_c$  com o tempo para condição SC6

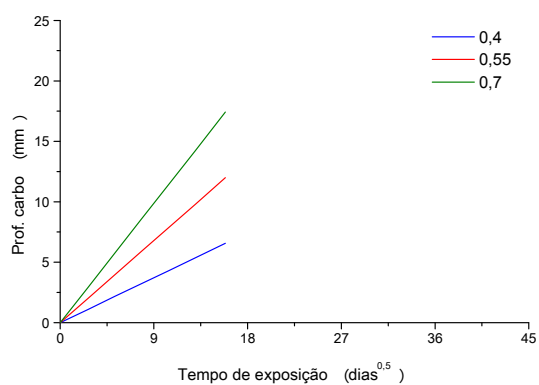


Figura 55 – Efeito isolado da relação  $a/c$  na evolução da  $e_c$  com o tempo para condição SC100

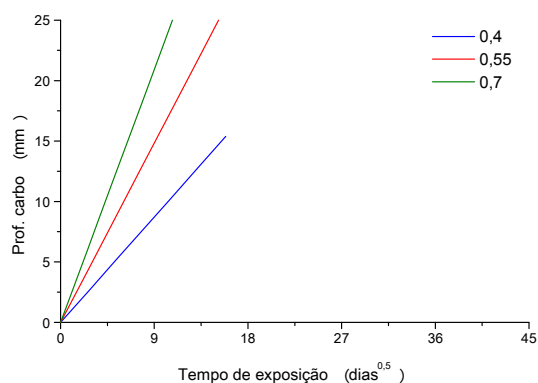


Figura 56 – Efeito isolado da relação  $a/c$  na evolução da  $e_c$  com o tempo para condição R6

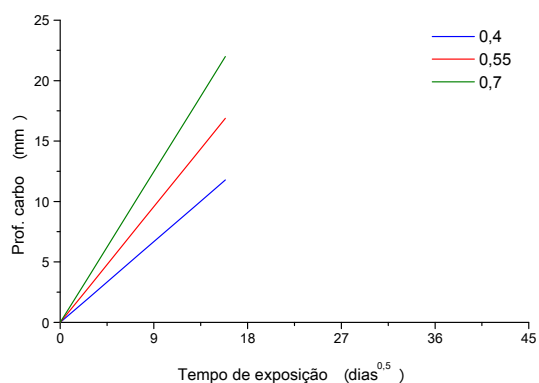


Figura 57 – Efeito isolado da relação  $a/c$  na evolução da  $e_c$  com o tempo para condição R100

Fica evidente a influência da relação a/c na profundidade de carbonatação, como era esperado. A tabela 22 apresenta as profundidades de carbonatação (tempo de exposição: natural=58 meses, acelerado=252 dias) para as relações a/c estudadas nas diferentes condições de ensaio.

Tabela 22 – Influência da relação a/c para as diferentes condições de ensaio, na  $e_c$  (mm)

Condições do ensaio	0,4	0,55	0,7	0,4 → 0,55 (%)	0,55 → 0,7 (%)
Ext	3,11	6,36	9,62	↑104	↑51
Int	4,83	9,42	14,01	↑95	↑48
SC6	7,30	17,69	28,07	↑142	↑58
SC100	6,56	11,99	17,42	↑82	↑45
R6	15,38	26,15	36,92	↑70	↑41
R100	11,78	16,88	21,99	↑43	↑30

O aumento na profundidade de carbonatação é mais acentuado ao passar de uma relação a/c 0,4 para 0,55, quando comparado com o aumento de uma relação a/c 0,55 para 0,7. Este comportamento é verificado para todas as condições de ensaio.

Nos resultados da pesquisa de Kulakowski (2002), a carbonatação foi desprezível para concretos e argamassas menos porosos (relação  $a/agl^{22} \leq 0,45$ ), após 126 dias de carbonatação acelerada (5% CO<sub>2</sub>). Da mesma forma, Venquiaruto (2002) verificou que a carbonatação dos concretos com relação a/agl 0,35, de diversas misturas (referência com CP V, com substituição de 25% do cimento por cinza volante e cinza de casca de arroz e 8% por sílica ativa), foi nula, após 84 dias de exposição ao CO<sub>2</sub> (5% CO<sub>2</sub>). Já os resultados desta pesquisa (tabela 22) mostram que houve carbonatação das amostras com relação a/c de 0,4. Aqui cabe salientar três aspectos:

- a) as condições de cura, condicionamento, concentração de CO<sub>2</sub>, temperatura, umidade de ensaio e materiais utilizados (tipos de cimento, tipo e teor de adições) são diferentes. Nas pesquisas citadas, provavelmente ainda havia hidróxido de cálcio não consumido pelas reações pozolânicas;
- b) o tempo de exposição ao ambiente agressivo foi bastante inferior ao tempo desta pesquisa;

<sup>22</sup> Relação água/aglomerante.

- c) o mecanismo de carbonatação em concretos e argamassas é análogo, mas a carbonatação em argamassas é maior que a carbonatação em concretos.

Essas diferenças entre as pesquisas mostram que a comparação direta dos resultados é difícil de ser feita, uma vez que não há padronização para a realização dos ensaios acelerados de carbonatação.

No caso da carbonatação natural, Possan (2004) mediu as profundidades carbonatadas em concentrações de CO<sub>2</sub> atmosféricas, de concretos com e sem adição de sílica ativa, após 7 anos de exposição em ambiente externo não protegido das chuvas, e constatou que as amostras com relação  $a/agl \leq 0,45$  não apresentaram profundidade carbonatada. Embora os valores de carbonatação natural desta pesquisa sejam pequenos ( $X_{ct}=3,11$  mm, após 58 meses) para a relação  $a/c$  0,4, houve carbonatação. Os estudos realizados por Isaia, Vagheti e Gastaldini (2001) em concretos com diferentes pozolanas e percentuais de substituição, expostos em ambiente interno, mostram que houve carbonatação em alguns casos em que a relação  $a/agl$  foi inferior a 0,45, corroborando os resultados encontrados no presente trabalho.

Khunthongkeaw, Tangtermsirikul e Leelawat (2006) estudaram a carbonatação de concretos e argamassas com diversos teores de substituição do cimento por cinzas volantes. Eles constataram que até 30% de substituição, o coeficiente de carbonatação de concretos e argamassas é similar. Para teores de substituição a partir de 50%, o coeficiente em argamassas é muito maior, e os autores aconselham que não deva ser usado para estimar a carbonatação em concretos, pois estaria superestimando os resultados de carbonatação.

Esta diferença entre os diversos trabalhos é devida ao tipo de material e ao teor de substituição por pozolanas, uma vez que estes fatores influenciam na carbonatação. Outro fator a ser salientado é que em baixas relações  $a/c$  (0,4) a profundidade de carbonatação é mais difícil de ser medida e a possibilidade de se inferir erros é maior.

Avaliando o efeito isolado da relação  $a/c$  nas distintas condições de ensaio, percebe-se que para o condicionamento RILEM, as diferenças entre as relações  $a/c$  são menores, ou seja, o efeito da relação  $a/c$  é diminuído pela condição imposta ao material no condicionamento. Acredita-se que isso seja devido ao fato que no condicionamento RILEM se consegue retirar a água contida nos capilares, que não sairia em temperaturas ambientes. Se em

condições naturais isso não ocorre, ao comparar dois materiais diferentes através da análise dos resultados de um ensaio acelerado podem-se fazer interpretações equivocadas.

Embora os comportamentos sejam os mesmos para todas as condições e as diferenças sejam apenas uma questão de velocidade, essa confrontação com a condição natural torna-se essencial. Vale lembrar que a intenção de se realizar ensaios acelerados, ao final das contas, é conhecer seu comportamento em uma situação real ou fazer previsões de vida útil. Portanto, se em condição natural determinado fenômeno não acontece, não há porque forçá-lo a acontecer nos ensaios acelerados.

Considerando apenas o efeito da relação a/c na profundidade de carbonatação, tanto quando se passa da relação 0,4 para a 0,55, quanto da 0,55 para a 0,7, as diferenças percentuais da condição de ensaio SC6 são as mais próximas da condição natural externa e SC100 da condição natural interna.

#### 4.2.4 Interação tempo de cura e tipo de cimento

Da figura 58 à figura 63 apresenta-se a influência das interações tempo de cura e tipo de cimento na profundidade de carbonatação ao longo do tempo.

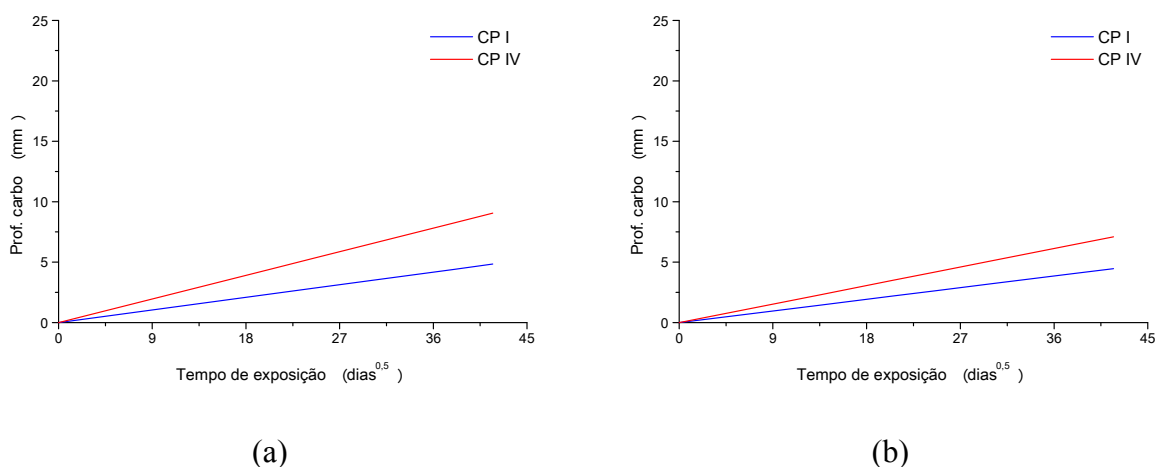


Figura 58 – Interação tempo de cura e tipo de cimento na evolução da  $e_c$  com o tempo para condição natural externo: (a) cura de 7 dias, (b) cura de 28 dias

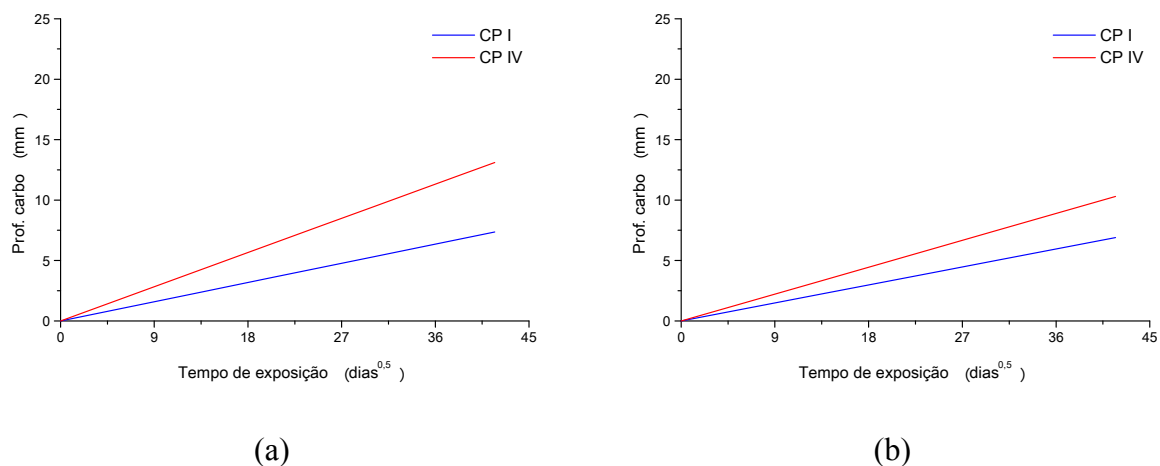


Figura 59 – Interação tempo de cura e tipo de cimento na evolução da  $e_c$  com o tempo para condição natural interno: (a) cura de 7 dias, (b) cura de 28 dias

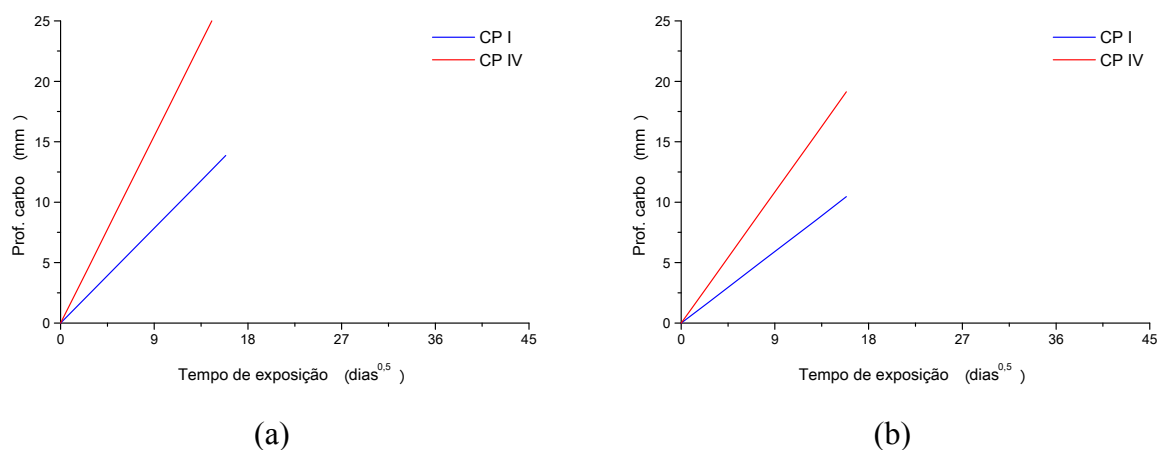


Figura 60 – Interação tempo de cura e tipo de cimento na evolução da  $e_c$  com o tempo para condição SC6: (a) cura de 7 dias, (b) cura de 28 dias

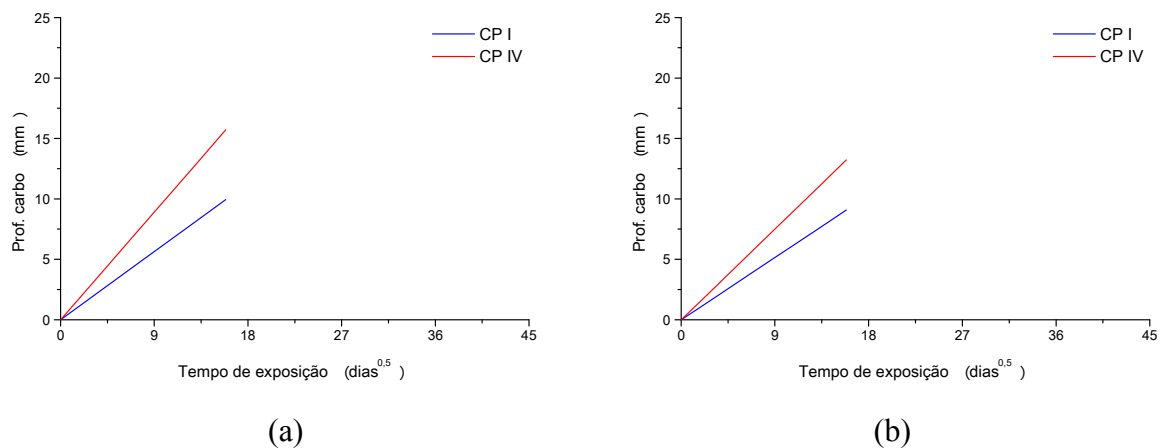


Figura 61 – Interação tempo de cura e tipo de cimento na evolução da  $e_c$  com o tempo para condição SC100: (a) cura de 7 dias, (b) cura de 28 dias

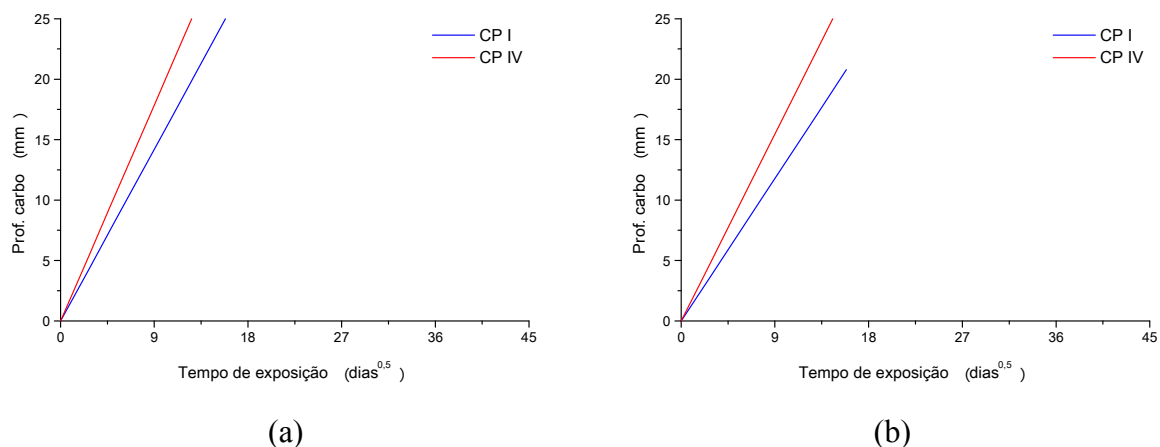


Figura 62 – Interação tempo de cura e tipo de cimento na evolução da  $e_c$  com o tempo para condição R6: (a) cura de 7 dias, (b) cura de 28 dias

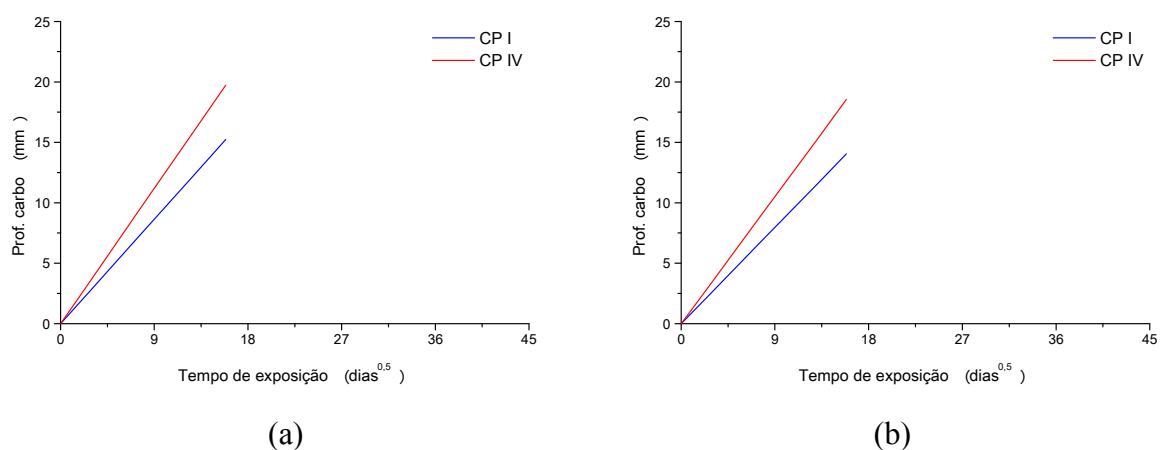


Figura 63 – Interação tempo de cura e tipo de cimento na evolução da  $e_c$  com o tempo para condição R100: (a) cura de 7 dias, (b) cura de 28 dias

As profundidades de carbonatação (tempo de exposição: natural=58 meses, acelerado=252 dias), relacionando o tempo de cura e o tipo de cimento, são apresentadas na tabela 23.

Tabela 23 – Influência da interação tempo de cura e tipo de cimento em diferentes condições de ensaio, na  $e_c$  (mm)

Condições de ensaio	Cura de 7 dias			Cura de 28 dias		
	CP I	CP IV	CP I→CP IV (%)	CP I	CP IV	CP I→CP IV (%)
Ext	4,84	9,05	↑87	4,46	7,10	↑59
Int	7,37	13,11	↑78	6,90	10,30	↑49
SC6	13,86	27,32	↑97	10,45	19,13	↑83
SC100	9,95	15,71	↑58	9,08	13,23	↑46
R6	25,05	31,51	↑26	20,79	27,26	↑31
R100	15,23	19,73	↑30	14,04	18,54	↑32

As diferenças nas profundidades de carbonatação entre o CP I e o tipo CP IV são maiores quando a idade de cura é menor, ou seja, quando se coloca o material em condicionamento e carbonatação sem dar a possibilidade da cinza volante reagir. Quando a cura se dá por 28 dias, daí pode-se dizer que estão sendo comparados materiais com igualdade de relação a/c, pois a cinza volante pode reagir e ser considerada como ligante, senão tem-se 95% de clínquer do CP I contra 60% de clínquer do tipo CP IV. Os resultados de resistência à compressão axial (item 4.6) corroboram essa afirmação, pois aos 28 dias, pode-se dizer que a resistência é a mesma para os dois tipos de cimento. Isso evidencia a necessidade de maiores períodos de cura para cimentos com elevados teores de pozolanas em relação a cimentos puros.

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

Para o tempo de cura de 7 dias o comportamento do SC6 é o mais próximo à condição natural. Para 28 dias é mais difícil de fazer essa afirmação. Nos materiais com adições pozolânicas existe uma combinação entre as reações de hidratação e as reações pozolânicas. Se este material for submetido à carbonatação antes que ocorram as reações de hidratação, haverá mais uma reação ocorrendo simultaneamente e então fica difícil avaliar qual delas terá preferência (MUNTEAN *et al.*, 2005). Por esse motivo, seria interessante que o tempo de 28 dias de cura fosse adotado.



Na interação tempo de cura e tipo de cimento, mais uma vez há uma aproximação do comportamento dos materiais preconditionados conforme a RILEM. Isto é verificado tanto para a cura de 7 dias, quanto para a de 28 dias. Percebe-se também, uma inversão no comportamento das amostras preconditionadas conforme a RILEM (R6 e R100) ao passar do período de cura de 7 dias para 28 dias, comparadas com as demais condições de ensaio. Acredita-se que isto possa estar relacionado com o fato das amostras curadas por 28 dias terem seguido a perda de massa ( $\Delta m$ ), especificada pelo condicionamento RILEM, estipulada para a cura de 7 dias, como foi salientado no item 3.4.2.2 e na tabela 15.

#### 4.2.5 Interação tempo de cura e relação a/c

A influência das interações tempo de cura e relação a/c na profundidade de carbonatação ao longo do tempo é apresentada da figura 64 a figura 69.

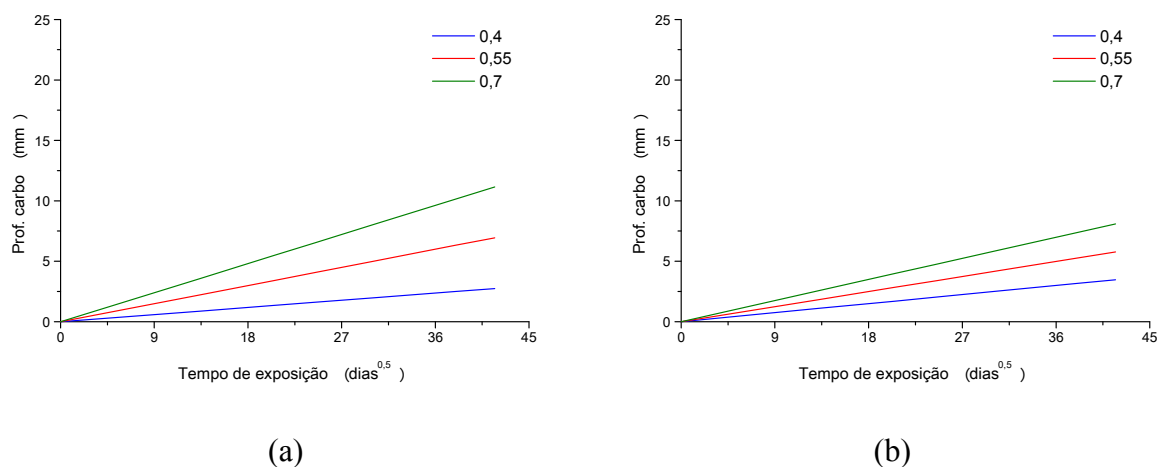


Figura 64 – Interação tempo de cura e relação a/c na evolução da  $e_c$  com o tempo para condição natural externo: (a) cura de 7 dias, (b) cura de 28 dias

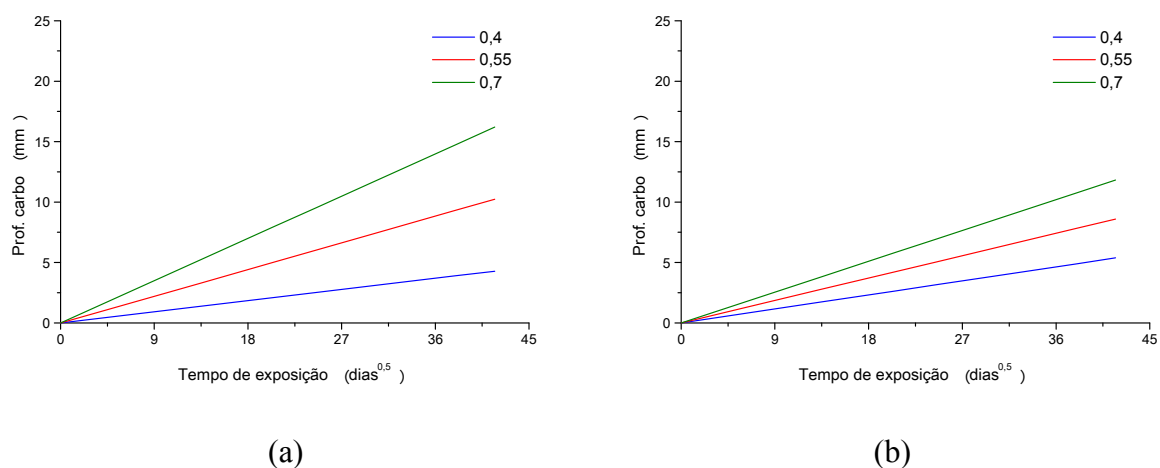


Figura 65 – Interação tempo de cura e relação a/c na evolução da  $e_c$  com o tempo para condição natural interno: (a) cura de 7 dias, (b) cura de 28 dias

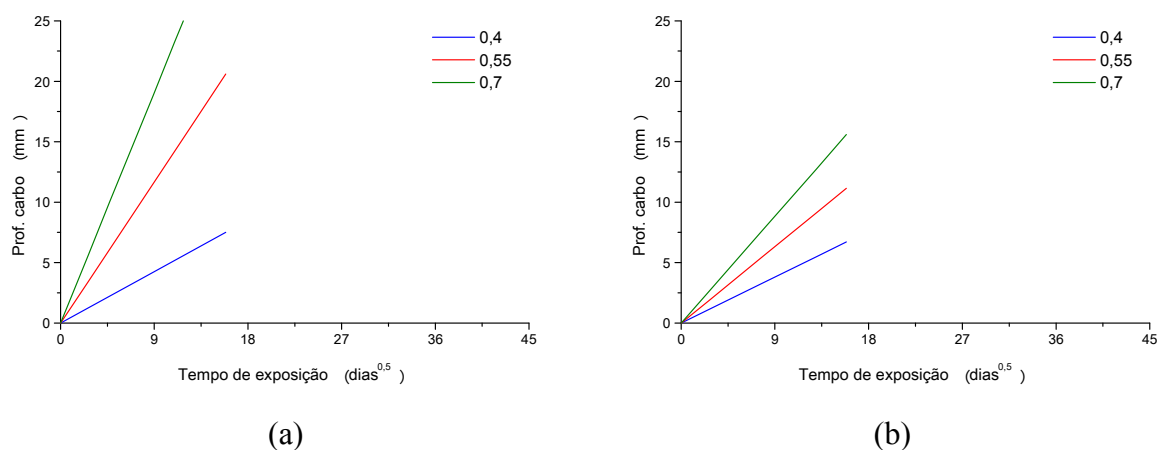


Figura 66 – Interação tempo de cura e relação a/c na evolução da  $e_c$  com o tempo para condição SC6: (a) cura de 7 dias, (b) cura de 28 dias

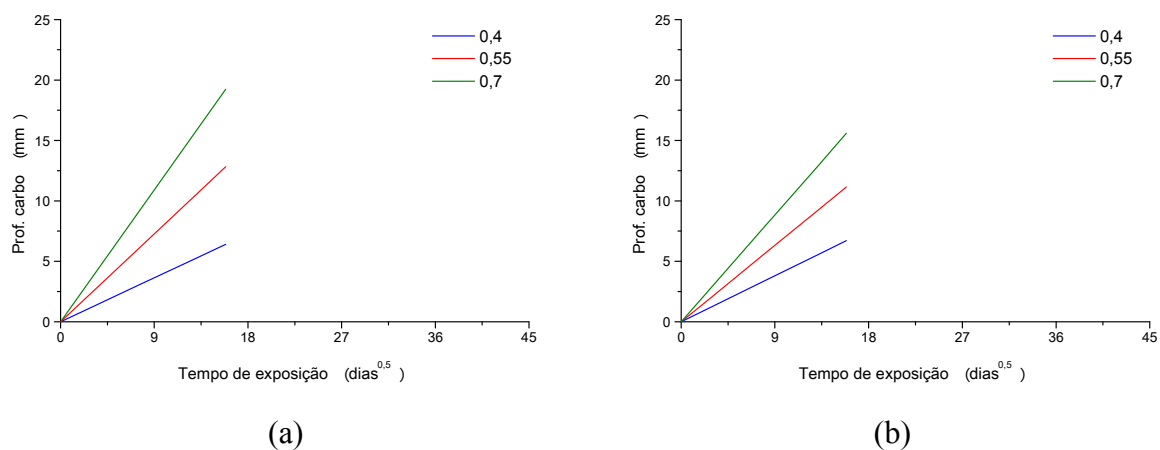


Figura 67 – Interação tempo de cura e relação a/c na evolução da  $e_c$  com o tempo para condição SC100: (a) cura de 7 dias, (b) cura de 28 dias

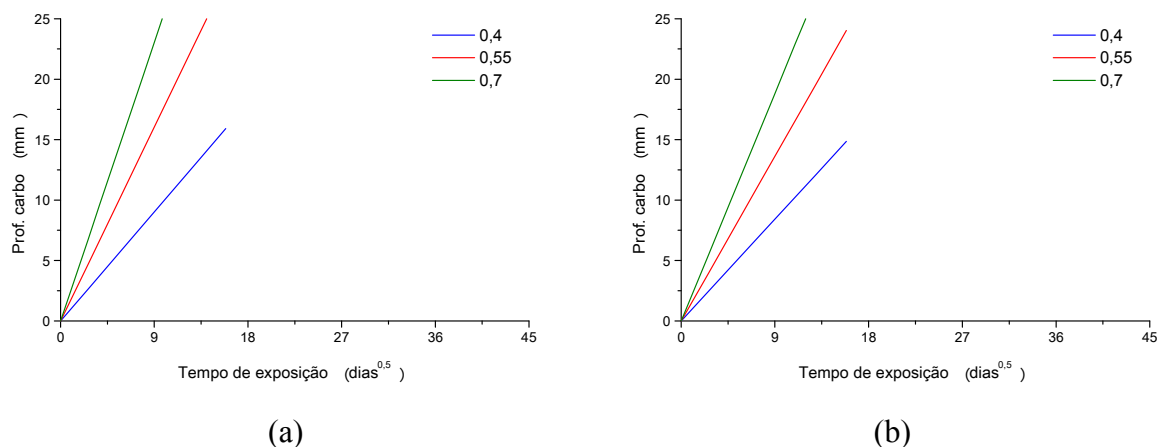


Figura 68 – Interação tempo de cura e relação a/c na evolução da  $e_c$  com o tempo para condição R6: (a) cura de 7 dias, (b) cura de 28 dias

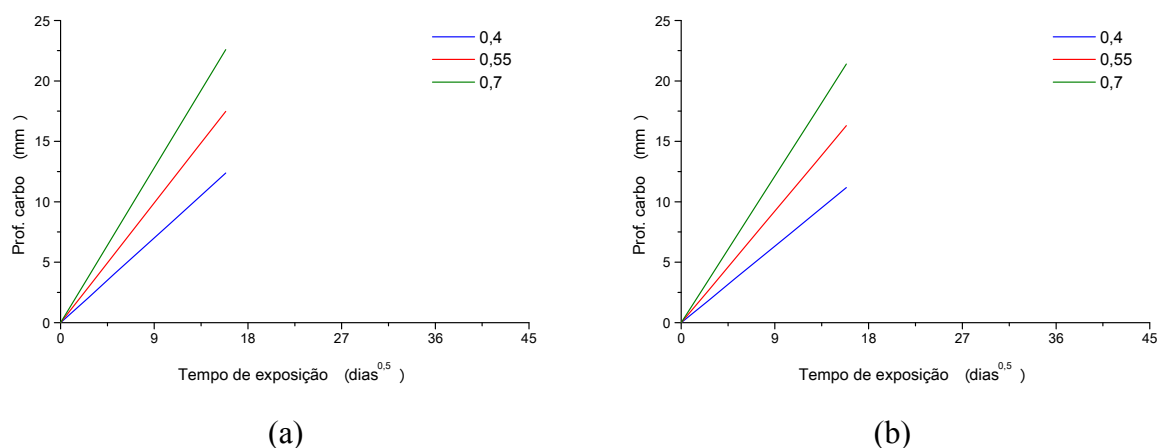


Figura 69 – Interação tempo de cura e relação a/c na evolução da  $e_c$  com o tempo para condição R100: (a) cura de 7 dias, (b) cura de 28 dias

A tabela 24 apresenta as profundidades de carbonatação (tempo de exposição: natural=58 meses, acelerado=252 dias) da interação entre o tempo de cura e a relação a/c.

Tabela 24 – Influência da interação tempo de cura e relação a/c, para as diferentes condições de ensaio, na  $e_c$  (mm)

Condição ensaio	Cura de 7 dias					Cura de 28 dias				
	0,40	0,55	0,70	0,4-0,55 (%)	0,55-0,7 (%)	0,40	0,55	0,70	0,4-0,55 (%)	0,55-0,7 (%)
Ext	2,74	6,94	11,15	↑153	↑60	3,47	5,78	8,09	↑66	↑40
Int	4,28	10,24	16,20	↑139	↑58	5,38	8,60	11,82	↑60	↑37
SC6	7,51	20,59	33,67	↑174	↑64	7,10	14,79	22,48	↑108	↑52
SC100	6,41	12,83	19,24	↑100	↑50	6,72	11,15	15,59	↑66	↑40
R6	15,91	28,28	40,65	↑78	↑44	14,86	24,02	33,19	↑62	↑38
R100	12,38	17,48	22,59	↑41	↑29	11,18	16,29	21,39	↑46	↑31

Passando do ambiente externo para o interno tem-se um aumento de 47% na profundidade de carbonatação para a cura de 7 dias, relação  $a/c$  de 0,55. Para a cura de 28 dias esse valor é de 48%. Esta semelhança indica que o comportamento tende a ser o mesmo em ambiente natural, para ambos os tempos de cura.

Novamente se observa a inversão de comportamento para a condição de ensaio R100, ou seja, as diferenças entre as relações  $a/c$  são maiores para cura de 28 dias, enquanto que para todas as demais condições têm-se diferenças mais expressivas para cura de 7 dias. Acredita-se que essa inversão possa estar relacionada com o fato das amostras curadas por 28 dias terem seguido a perda de massa ( $\Delta m$ ), especificada pelo condicionamento RILEM, determinada para a cura de 7 dias, como foi salientado no item 3.4.2.2 e na tabela 15.

A comparação da diferença entre os distintos ambientes indica que, se a cura for realizada por 7 dias, a condição que mais se assemelha à natural é a das amostras do grupo SC6. Para a cura de 28 dias, seriam os grupos SC100 e R6.

Aqui, novamente, a diferença do grupo SC6 com cura de 28 dias é semelhante à ao comportamento natural após 7 dias de cura.

#### 4.2.6 Interação tipo de cimento e relação $a/c$

A influência das interações tipo de cimento e relação  $a/c$  na profundidade de carbonatação ao longo do tempo é apresentada da figura 70 a figura 75.

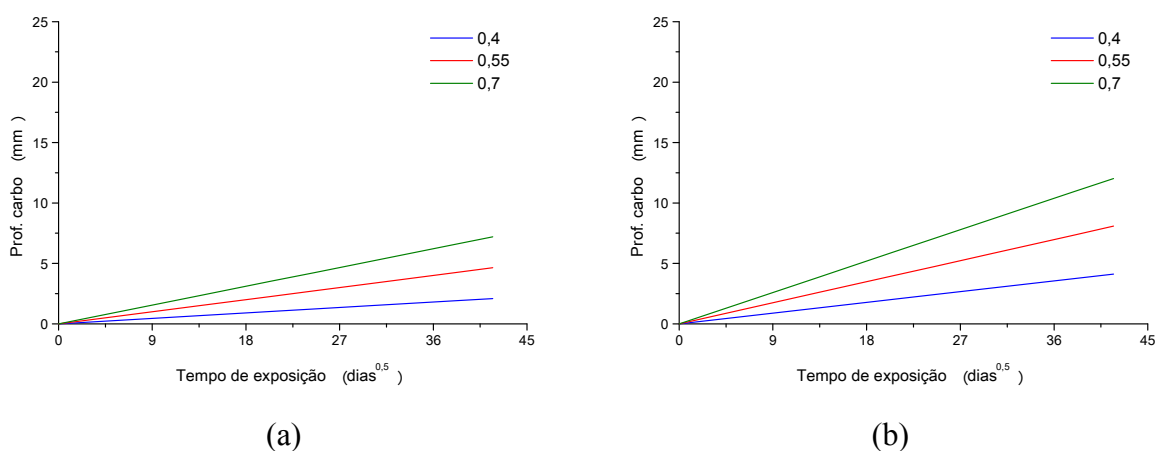


Figura 70 – Interação tipo de cimento e relação  $a/c$  na evolução da  $e_c$  com o tempo para condição natural externo: (a) CP I, (b) tipo CP IV

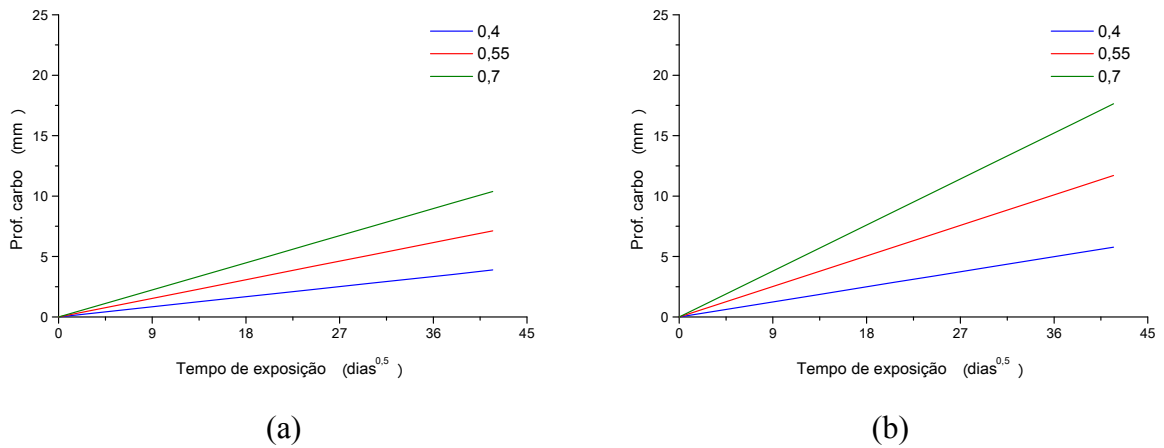


Figura 71 – Interação tipo de cimento e relação a/c na evolução da  $e_c$  com o tempo para condição natural interno: (a) CP I, (b) tipo CP IV

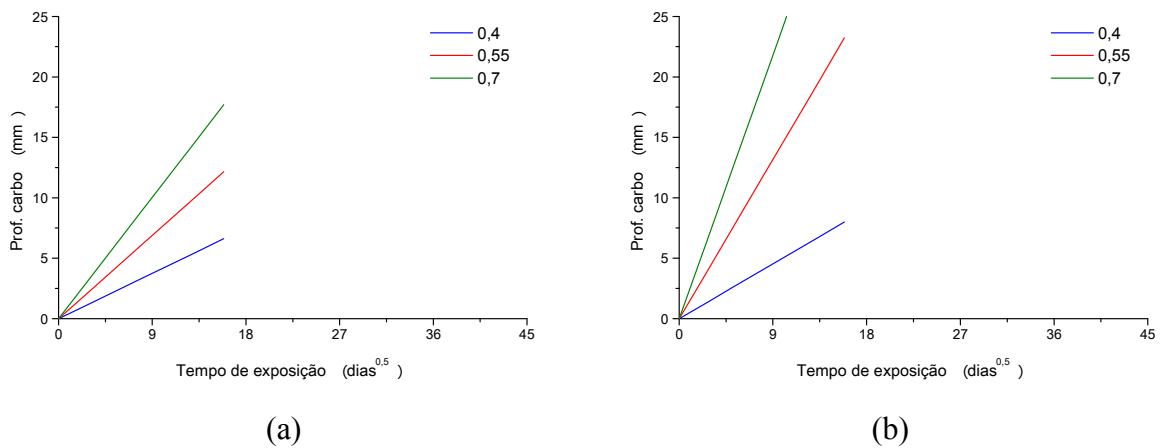


Figura 72 – Interação tipo de cimento e relação a/c na evolução da profundidade  $e_c$  com o tempo para condição SC6: (a) CP I, (b) tipo CP IV

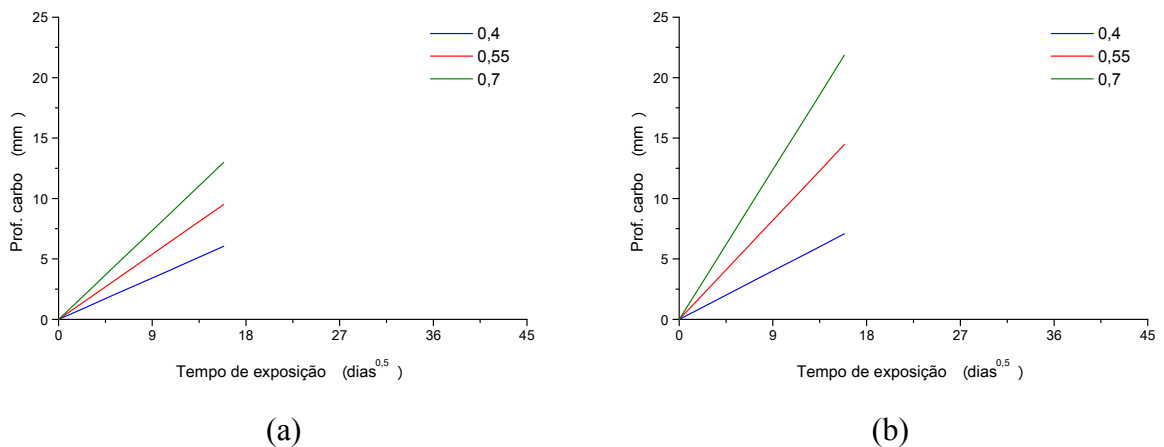


Figura 73 – Interação tipo de cimento e relação a/c na evolução da  $e_c$  com o tempo para condição SC100: (a) CP I, (b) tipo CP IV

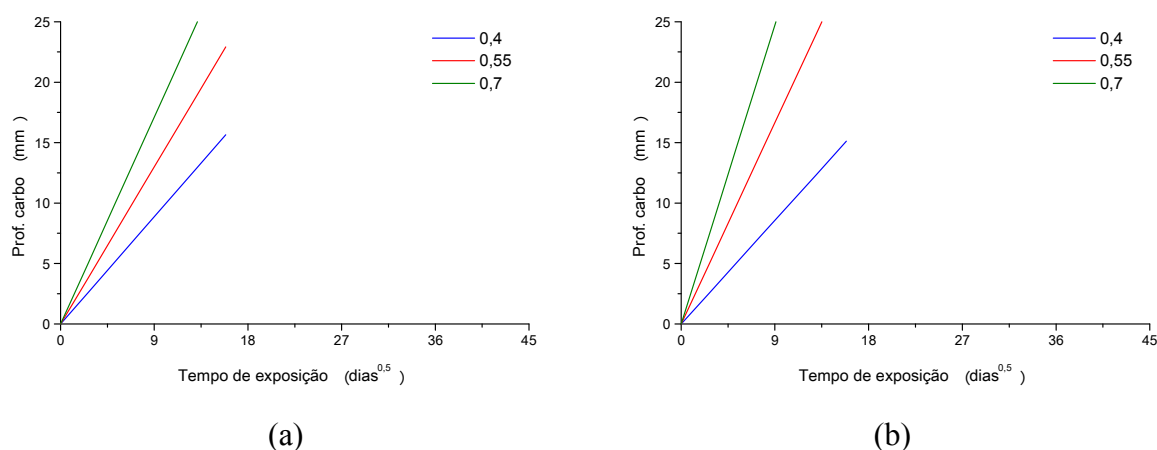


Figura 74 – Interação tipo de cimento e relação a/c na evolução da  $e_c$  com o tempo para condição R6: (a) CP I, (b) tipo CP IV

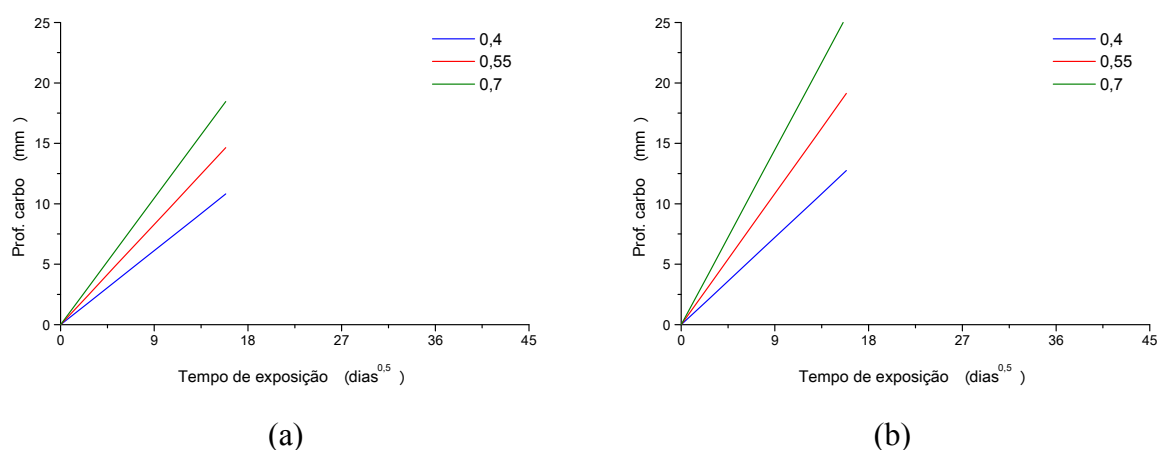


Figura 75 – Interação tipo de cimento e relação a/c na evolução da  $e_c$  com o tempo para condição R100: (a) CP I, (b) tipo CP IV

As profundidades de carbonatação (tempo de exposição: natural=58 meses, acelerado=252 dias) da interação entre o tipo de cimento e a relação a/c são apresentadas na tabela 25.

Tabela 25 – Influência da interação tipo de cimento e relação a/c para as diferentes condições de ensaio, na  $e_c$  (mm)

Condição ensaio	CP I					Tipo CP IV				
	0,40	0,55	0,70	0,4-0,55 (%)	0,55-0,7 (%)	0,40	0,55	0,70	0,4-0,55 (%)	0,55-0,7 (%)
Ext	2,09	4,65	7,20	↑122	↑55	4,12	8,08	12,03	↑96	↑49
Int	3,89	7,13	10,38	↑83	↑46	5,77	11,70	17,63	↑103	↑51
SC6	6,61	12,15	17,70	↑84	↑46	8,00	23,23	38,45	↑190	↑66
SC100	6,05	9,51	12,98	↑57	↑36	7,08	14,47	21,86	↑104	↑51
R6	15,65	22,92	30,19	↑46	↑32	15,12	29,38	43,65	↑94	↑49
R100	10,81	14,64	18,46	↑35	↑26	12,75	19,13	25,52	↑50	↑33

Muito semelhante ao comportamento apresentado na interação anterior (tempo de cura x relação a/c), também neste caso, para o cimento CP I, a condição que mais se assemelha à condição natural é o SC6 e para o tipo CP IV, os grupos SC100 e R6 estão mais próximos. Quando as diferenças são muito minimizadas ou maximizadas com relação às diferenças obtidas nas condições naturais, pode ser um indicativo que houve algum tipo de alteração no fenômeno e o material não está representando a sua condição na realidade.

Colocando a cura no ponto médio, o cimento tipo CP IV fica prejudicado, pois o tempo de cura é importante para este cimento, e isso é mais marcante para elevadas relações a/c (0,55 e 0,7), o que está em concordância com os resultados da maior parte da literatura, entre elas Dal Molin (1995), que concluiu que as relações a/c maiores são mais afetadas pela diminuição do tempo de cura. A diferença do tipo CP IV ao passar da relação a/c 0,4 para 0,55 na condição SC6 é consideravelmente elevada (190%), pois se o cimento não está hidratado, a profundidade de carbonatação cresce demais ao aumentar a relação a/c.

O efeito das interações colocando algum dos fatores no ponto médio pode ser interessante para avaliar uma determinada variável, mas por vezes, pode também dificultar a visualização de certa combinação de fatores. Na sequência são apresentados os coeficientes de aceleração calculados para alcançar a mesma profundidade de carbonatação ao se estabelecer um conjunto de fatores (tempo de cura, tipo de cimento e relação a/c) bem definidos.

### 4.3 COEFICIENTES DE ACELERAÇÃO

O coeficiente de aceleração é um valor adimensional e representa o número de vezes que o ensaio em condições naturais é acelerado quando realizado em ambiente com elevada concentração de CO<sub>2</sub>. A equação 22 apresenta a relação para cálculo do coeficiente de aceleração.

$$c_a = \frac{t_n}{t_a} \quad \text{Equação 22}$$

Onde:

$c_a$  = coeficiente de aceleração (adimensional);

$t_n$  = tempo de ensaio em condições naturais de carbonatação (dias, semanas, meses ou anos);

$t_a$  = tempo de ensaio em condições aceleradas de carbonatação (dias, semanas, meses ou anos).

A unidade de tempo a ser introduzida no cálculo pode ser uma unidade de tempo qualquer, desde que seja a mesma para as duas condições de ensaio.

Os coeficientes de aceleração estabelecidos são válidos para os mesmos materiais e condições de ensaio para os quais foram calculados, e enquanto os ensaios acelerados não forem feitos de forma padronizada, estes coeficientes não devem ser generalizados para situações diversas. Na tabela 26 são apresentados os coeficientes de aceleração para os tempos de cura de 7 e 28 dias, para os cimentos CP I e tipo CP IV na relação a/c 0,55, nas diferentes condições de ensaio. A profundidade de carbonatação na condição natural interna foi definida como referência e assim, os coeficientes de aceleração foram calculados tomando por base esta condição.

Tabela 26 – Coeficientes de aceleração para a relação a/c=0,55 com diferentes tempos de cura, tipos de cimento e condições de ensaio

Condição ensaio	Cura de 7 dias				Cura de 28 dias			
	CP I 4,84 mm		Tipo CP IV 9,05 mm		CP I 4,46 mm		Tipo CP IV 7,10 mm	
	dias	$c_a$	dias	$c_a$	dias	$c_a$	dias	$c_a$
Ext	4039,7	0,43	3649,3	0,48	4166,8	0,42	3659,8	0,48
Int	1740	1	1740	1	1740	1	1740	1
SC6	71,3	24,4	58,0	30,0	110,0	15,8	73,0	23,8
SC100	138,3	12,6	175,6	9,9	145,6	12,0	152,8	11,4
R6	21,8	79,7	43,6	39,9	27,8	62,7	36,0	48,4
R100	59,0	29,5	111,2	15,6	60,9	28,6	77,8	22,4

As diferenças entre os coeficientes de aceleração para os ensaios acelerados chegam a ser de mais de seis vezes entre o maior (R6) e o menor (SC100). Os resultados da tabela 26 deixam claro que o coeficiente de aceleração depende fortemente das condições em que o ensaio acelerado foi realizado (principalmente o condicionamento e o teor de  $CO_2$ ).

Os coeficientes de aceleração, quando se passa da condição natural externa não protegida das chuvas, para natural interna variam de acordo com o tipo de cimento, e para os exemplos calculados, os valores estão compreendidos entre 1,3 e 2,4. Ensaio de carbonatação natural por 20 anos, feitos por Kokubu e Nagataki (1989), indicam que a carbonatação em ambiente interno é de 2 a 4 vezes maior que a carbonatação em ambiente externo.



Os resultados de Ho e Lewis (1987) apresentam um coeficiente de aceleração de 52,1 entre amostras carbonatadas em ambiente de laboratório (23°C e 50% de UR) e em câmara acelerada com 4% de CO<sub>2</sub>.

Possan (2004) encontrou coeficientes de aceleração de 30,9 e 35,4 para concretos de relação a/c 0,8, feitos com cimento CP V e CP V com substituição de 20% por sílica ativa, respectivamente. A condição natural ensaiada foi ambiente externo não protegido das intempéries e o ensaio acelerado com 5% de CO<sub>2</sub> e umidade relativa de 70%.

No caso de generalização das condições naturais de ensaio, os coeficientes de aceleração devem ser calculados a partir do ambiente natural interno, pois é esta a condição natural mais agressiva, e tomando-la para base de cálculo, estar-se-á a favor da segurança.

Os resultados desta e de outras pesquisas mostram que os coeficientes de aceleração são bastante afetados pelas condições de ensaio e pelos materiais e proporcionamentos utilizados, de forma que, para se valer desses coeficientes para transpor os resultados de ensaios acelerados para condições naturais, é preciso padronizar os ensaios acelerados e formar um banco de dados que possibilite a predição a partir dos coeficientes de aceleração.

Enquanto não houver condições de traduzir os resultados acelerados para a prática por meio dos coeficientes de aceleração, o mais indicado é fazê-lo por intermédio de modelos de predição, que levarão em conta os fatores envolvidos no ensaio, em cada condição. A utilização de dois modelos de predição da carbonatação é apresentada no capítulo 5.

#### 4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE OS RESULTADOS DE PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO

As profundidades de carbonatação acelerada com 100% de CO<sub>2</sub> são sempre inferiores que as encontradas em 6%. De uma forma geral, na comparação com os ensaios naturais, os grupos com 100% de CO<sub>2</sub> sempre apresentaram diferenças que ficaram distantes dos resultados naturais. A hipótese de que em elevadas concentrações de CO<sub>2</sub> (maiores que 50%) o potencial de carbonatação é mais forte, e vai gerar muita água, obstruindo parcial ou totalmente os poros do material e impedindo a difusão do CO<sub>2</sub>, põe em dúvida os resultados obtidos em ensaios com esses teores. Ensaios realizados em ambientes com umidades relativas mais baixas (40-50%) poderiam favorecer a carbonatação com elevadas concentrações de CO<sub>2</sub>, mas

neste caso é preciso verificar se o fenômeno não será alterado e se pode ser transposto para condições naturais.

Com relação ao condicionamento, no entendimento desta autora, este procedimento deve dar condições para a realização dos ensaios acelerados de carbonatação. Esta etapa não deve ser negligenciada, pois interfere fortemente nos resultados obtidos. É preciso tomar cuidado para não danificar ou alterar quaisquer características do material, sendo que o objetivo é apenas levar o corpo-de-prova ao equilíbrio hídrico, a fim de favorecer as reações de carbonatação. No entanto, se para alcançar este equilíbrio impõem-se condições que provocam microfissuração ou forcem situações que não venham a ocorrer na prática, estar-se-á interferindo nos resultados e alterando a interpretação dos mesmos. No caso de condicionamentos com temperaturas de cerca de 50°C (como é o caso do procedimento da RILEM), é possível retirar dos poros capilares mais finos água que dificilmente sairia em condições naturais de umidade e temperatura. Se esta condição não vai ocorrer naturalmente, não há porque forçar essa situação só para se ter uma condição hídrica conhecida e/ou uniforme. Ao pensar que a condição entre os materiais não é a mesma e que a comparação não seria justa, é dessa mesma forma que se comportaria na realidade.

É claro que as concentrações de CO<sub>2</sub> dos ensaios acelerados também não são encontradas na prática, mas estas são necessárias para acelerar o processo. Entre estas, deve-se escolher a que mais se assemelha às condições naturais, que forma os mesmos produtos, se possível, e que mantém o comportamento entre os diferentes materiais assim como ocorre na prática.

Os resultados de profundidade de carbonatação, obtidos da comparação entre as diferentes condições de ensaio acelerado com os ensaios naturais, indicam maior semelhança das seguintes condições:

- a) efeito isolado do tempo de cura (tc): R6;
- b) efeito isolado do tipo de cimento (ci): SC6;
- c) efeito isolado da relação a/c (ac): SC6;
- d) interação tc e ci – 7 dias: SC6; 28 dias: SC100. Para cura de 28 dias, comportamento SC6 similar ao natural com cura de 7 dias;
- e) interação tc e ac – 7 dias: SC6; 28 dias: SC100 e R6. Para cura de 28 dias, comportamento SC6 similar ao natural com cura de 7 dias;

f) interação ci e ac – CP I: SC6; tipo CP IV: SC100 e R6.

A condição de ensaio acelerado com condicionamento em sala climatizada e carbonatação com 6% de CO<sub>2</sub> parece ser, entre as condições investigadas, a que melhor reproduz os resultados dos ensaios naturais de carbonatação. Talvez a velocidade das reações de carbonatação não seja máxima nessa condição, mas o que se deseja é que seja condizente com a ocorrida em situações naturais de exposição.

Além dos fatores acima citados, o procedimento de condicionamento deve ser claro e de fácil execução, para que seja seguido pelos pesquisadores e então, os resultados sejam obtidos de forma padronizada. Independentemente do procedimento a ser adotado, não devem ficar dúvidas da necessidade ou não de moldagens prévias, da idade exata de cada etapa, dos materiais auxiliares (como embalagens, soluções para controle de umidade, entre outros) a serem utilizados, bem como da forma de medição da profundidade carbonatada e o erro aceitável, que deve ser compatível com a forma de medição.

Na seqüência são apresentados os resultados dos ensaios complementares de microestrutura.

## 4.5 ENSAIOS COMPLEMENTARES DE MICROESTRUTURA

Os ensaios de microestrutura são complementares e pontuais e, foram realizados no intuito de verificar o comportamento de algum aspecto específico. O procedimento e as condições de cada ensaio foram descritas no capítulo 3.4.5. A seguir são apresentados os resultados e a discussão destes ensaios de microestrutura.

### 4.5.1 Difração de raios X

Os resultados do ensaio de difração de raios X das pastas de cimento CP I carbonatadas nas condições: natural (0,063% de CO<sub>2</sub> (Ext<sub>U</sub>)), 6% de CO<sub>2</sub> e em câmara saturada de CO<sub>2</sub>, são apresentados na figura 76, e, das pastas de cimento tipo CP IV, na figura 77, lembrando que para ambos os cimentos, as condições de carbonatação foram idênticas.

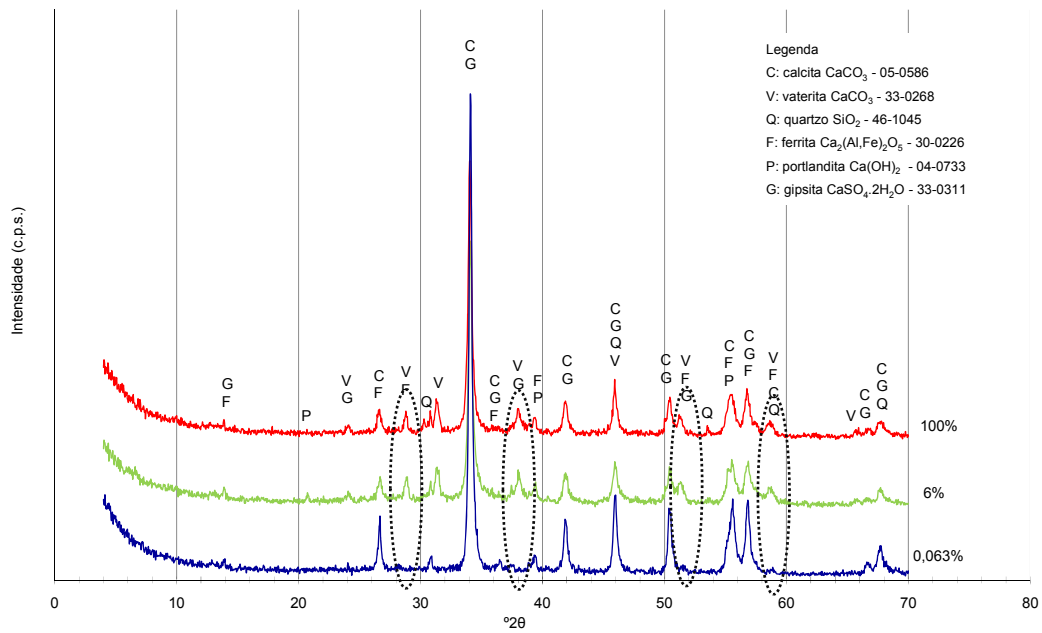


Figura 76 – Difratoograma das pastas de cimento CP I carbonatadas em diferentes ambientes

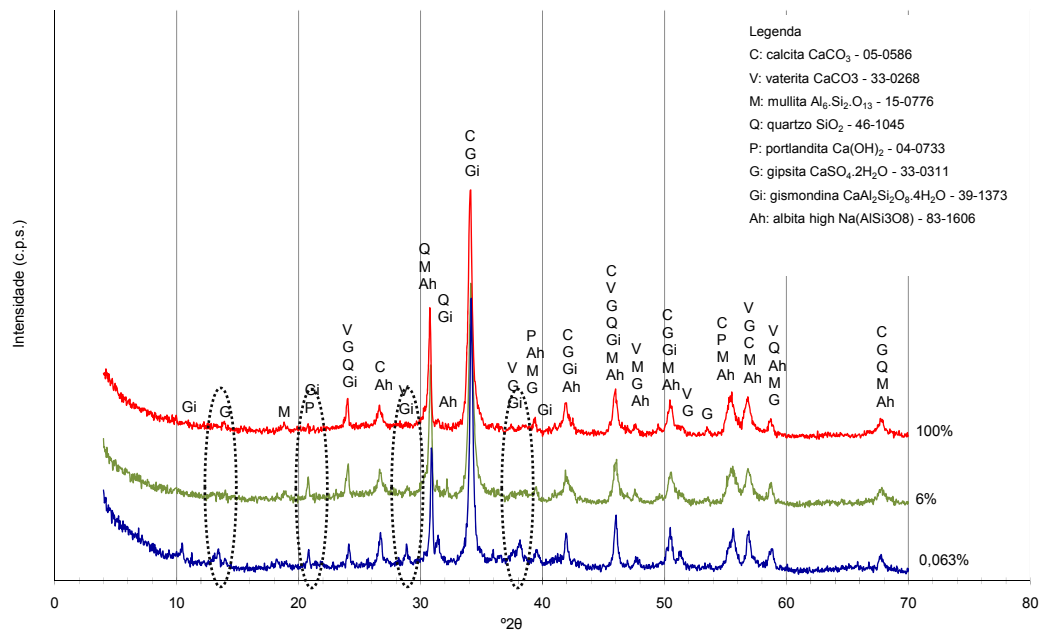


Figura 77 – Difratoograma das pastas de cimento tipo CP IV carbonatadas em diferentes ambientes

O difratograma das pastas de cimento CP I (figura 76) indica a presença de vaterita nas amostras carbonatadas nos ensaios acelerados (6% e 100% de CO<sub>2</sub>), enquanto que o composto não foi detectado quando a carbonatação ocorre em concentrações naturais de CO<sub>2</sub>. A gipsita aparece nas amostras carbonatadas nas condições: natural e em 6% de CO<sub>2</sub>. Portlandita remanescente foi encontrada na amostra carbonatada com 6% de CO<sub>2</sub>.

Para o cimento tipo CP IV (figura 77), verificou-se a presença de vaterita na condição de carbonatação natural, mas não nas condições aceleradas, contrariamente ao que ocorreu para o cimento CPI. Detectou-se ainda a presença de gipsita nas três condições de carbonatação, e, de portlandita remanescente nas amostras carbonatadas com 0,063% e 6% de CO<sub>2</sub>. Outro composto encontrado na amostra de cimento tipo CP IV, carbonatada ao natural foi a gismondina.

No trabalho realizado por Castellote *et al.* (2009), com percentuais de CO<sub>2</sub> de 0,03, 3, 10 e 100%, em pastas de cimento CP I, não foi encontrada vaterita para nenhuma das concentrações de CO<sub>2</sub> estudadas. Hyvert (2009) também não verificou a presença deste composto para nenhum dos três cimentos estudados (CP I, CP II e CP III franceses, semelhantes aos cimentos CP I, CP II e CP III brasileiros), nas concentrações de CO<sub>2</sub> de 0,03 e 50%. Hoppe Filho (2008), analisando amostras de concreto de CP V e 50% CP V + 50% CV carbonatadas com 5% de CO<sub>2</sub>, não verificou a presença de vaterita, sendo a única diferença entre as duas amostras a presença de gismondina, na mistura de cimento e cinza volante.

A presença de portlandita em amostras carbonatadas, corrobora a idéia de Grandet (1975), de formação de uma camada bastante impermeável que dificulta o acesso do CO<sub>2</sub> para consumir totalmente o cristal de hidróxido de cálcio. No entanto, em concentrações de CO<sub>2</sub> mais elevadas (100%) os cristais foram totalmente consumidos ou a quantidade remanescente é muito pequena com relação aos demais compostos e não pode ser detectada por este tipo de análise, o que também está de acordo com a literatura (CASTELLOTE *et al.*, 2009; HYVERT, 2009). Apesar da vaterita não ter sido detectada em trabalhos de outros pesquisadores, no presente trabalho aparece nas amostras de CP I carbonatadas com 6% e 100% de CO<sub>2</sub>, o que é confirmado pelo ensaio de ATG, mostrado na sequência.

#### 4.5.2 ATG e ATD

Os resultados de ATG apresentados são os obtidos no ensaio realizado no equipamento que utiliza 200 mg de amostra, descrito no item 3.4.5.2. As amostras utilizadas foram acondicionadas conforme a RILEM e demais características são apresentadas a seguir.

A figura 78 apresenta o gráfico de ATG de uma argamassa de cimento CP I e relação a/c 0,40 submetida à carbonatação com 6% de CO<sub>2</sub> (duas camadas) e uma amostra da região não carbonatada (NC). A primeira camada carbonatada tem cerca de 4 mm e foi retirada a partir da superfície (sup). A segunda camada carbonatada tem cerca de 3 mm (2ª cam) e foi retirada entre 2 mm e 5 mm da superfície.

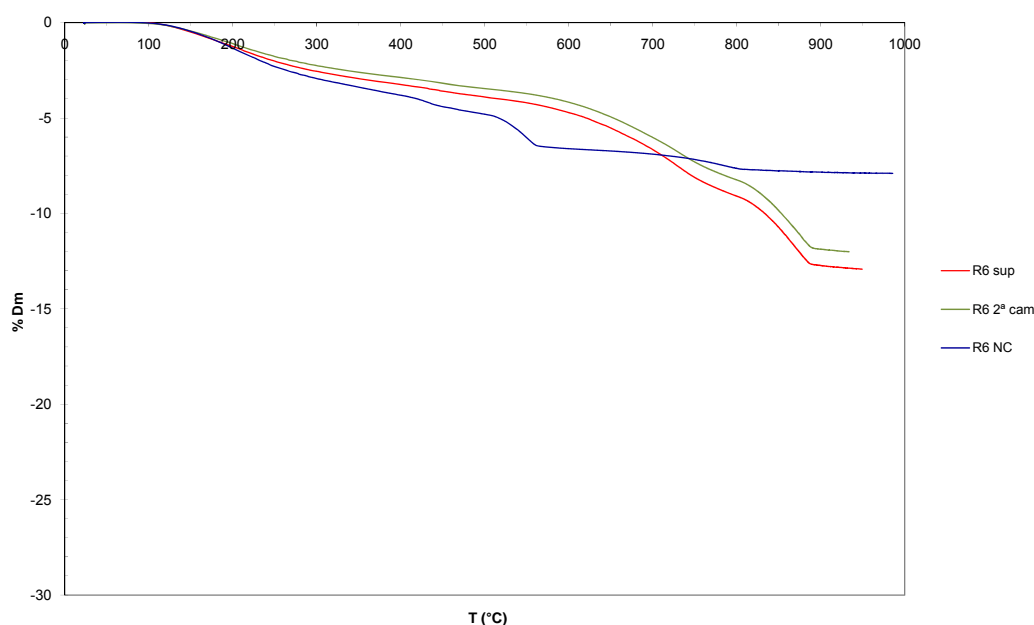


Figura 78 – ATG de argamassa de CP I e relação a/c 0,40 em duas camadas carbonatadas com 6% de CO<sub>2</sub> (R6 sup e R6 2ª cam) e no núcleo não carbonatado (R6 NC)

A figura 78 mostra que a perda de massa para a camada superficial e para a segunda camada apresenta o mesmo comportamento, diferindo do núcleo, não carbonatado. Os valores das perdas de massa foram calculados pelas derivadas das curvas de temperatura em relação ao tempo ( $dTG/dt$ ), encontrando assim a quantificação apresentada na tabela 27.

A figura 79 apresenta o gráfico de ATG de uma argamassa de cimento tipo CP IV e a relação a/c 0,40 submetida à carbonatação com 100% de CO<sub>2</sub> (uma camada), retirada a partir da superfície (sup) e uma amostra da região não carbonatada (NC). Não foi possível representar o resultado da amostra da segunda camada (2ª cam) carbonatada, pois houve um problema nas leituras do equipamento durante o ensaio.

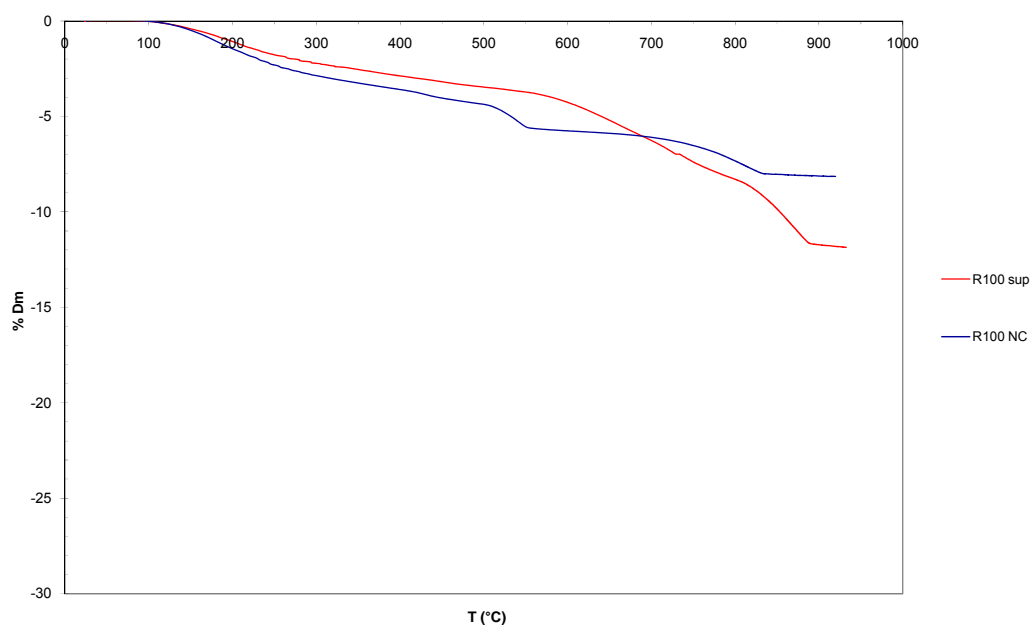


Figura 79 – ATG de argamassa de CP I e relação a/c 0,40 em uma camada carbonatada com 100% de CO<sub>2</sub> (R100 sup) e no núcleo não carbonatado (R100 NC)

Os intervalos de temperatura onde houve perda de massa, apresentados na figura 79, são os mesmos obtidos para a amostra carbonatada com 6% de CO<sub>2</sub>. A quantificação da perda de massa é apresentada na tabela 27.

Tabela 27 – Perda de massa por ATG das amostras de CP I carbonatadas com 6% e 100% de CO<sub>2</sub> e do núcleo não carbonatado

amostra	1 (800-900)	2 (800-700)	3 (600-500)	4 (500-400)	perda de CO <sub>2</sub> (%)
R6 sup	-3,5	-2,0		-0,3	5,7
R6 2ª cam	-3,6	-2,2		-0,4	6,0
R6 NC	-0,9		-1,7	-0,7	0,9
R100 sup	-3,5	-2,3		-0,3	5,5
R100 2ª cam		-1,7		-0,4	(erro no ensaio)
R100 NC	-2,1		-1,3	-0,5	2,1

Os dados da tabela 27 indicam que a perda de  $\text{CO}_2$ , em percentual, das amostras não carbonatadas é bastante inferior às demais, o que era de se esperar. A perda de massa entre 400 e 500°C corresponde ao  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , sendo superior para as amostras não carbonatadas. A faixa de 500 a 600°C apresenta perda de massa apenas para as amostras não carbonatadas e está relacionada à decomposição das formas amorfas do  $\text{CaCO}_3$ . Entre 700 e 800°C tem-se a decomposição das fases metaestáveis, vaterita e aragonita. E, na faixa de temperatura entre 800 e 900°C a decomposição associada a um tipo de  $\text{CaCO}_3$  bem cristalizado, a calcita. Essa interpretação foi feita de acordo com o indicado por Thiery (2005).

A decomposição de formas amorfas do  $\text{CaCO}_3$ , apresentada apenas para as amostras não carbonatadas (entre 500 e 600°C) é devida a carbonatos presentes na composição do cimento (fíler), mas não se descarta a hipótese que a amostra “não carbonatada” já poderia estar em fase de carbonatação, e por isso, possuir carbonatos ainda mal cristalizados.

A perda de massa entre 700 e 800°C corrobora os resultados de DRX que detectaram a presença de vaterita em amostras carbonatadas com 6% e 100% de  $\text{CO}_2$ .

Com relação às duas camadas carbonatadas (sup e 2ª cam), não fica evidente qualquer tipo de comportamento de que estariam aumentando ou diminuindo as quantidades de carbonatos, ou de portlandita, quando mais próximo ou distante da superfície da amostra.

A diferença mais visível entre as amostras carbonatadas com 6% e 100% de  $\text{CO}_2$  está na quantidade de massa perdida na amostra não carbonatada, na faixa de temperatura entre 800-900°C. Parte dessa perda de massa é atribuída à presença de fíler na amostra, também detectado na análise química e no difratograma de raios X do cimento CP I. No entanto, as amostras foram constituídas com os mesmos materiais e quantidades, e, a diferença apresentada é consequência do ensaio de carbonatação em diferentes concentrações de  $\text{CO}_2$ . Como esta faixa de temperatura corresponde à decomposição de cristais de calcita bem cristalizados, sugere-se que na amostra carbonatada com 100% de  $\text{CO}_2$ , que teve a maior perda de massa nessa faixa de temperatura, o  $\text{CO}_2$  tenha conseguido agir mais intensamente, ou seja, penetrado mais nos cristais de portlandita, embora ainda não fosse a quantidades suficientes para atingir o ponto de viragem do indicador químico de pH.

Para os ensaios de ATD foram utilizadas amostras das mesmas camadas utilizadas para o ensaio de ATG. A quantidade de material foi de 2 g e o equipamento utilizado foi descrito no item 3.4.5.2. A figura 80 mostra as curvas de ATD para a argamassa de cimento CP I e



relação a/c 0,40, submetida à carbonatação com 6% de CO<sub>2</sub> (duas camadas: sup e 2ª cam) e uma amostra da região não carbonatada (NC). A figura 81 mostra as curvas de ATD para a argamassa de cimento CP I e relação a/c 0,40, submetida à carbonatação com 100% de CO<sub>2</sub> (duas camadas: sup e 2ª cam) e uma amostra da região não carbonatada (NC).

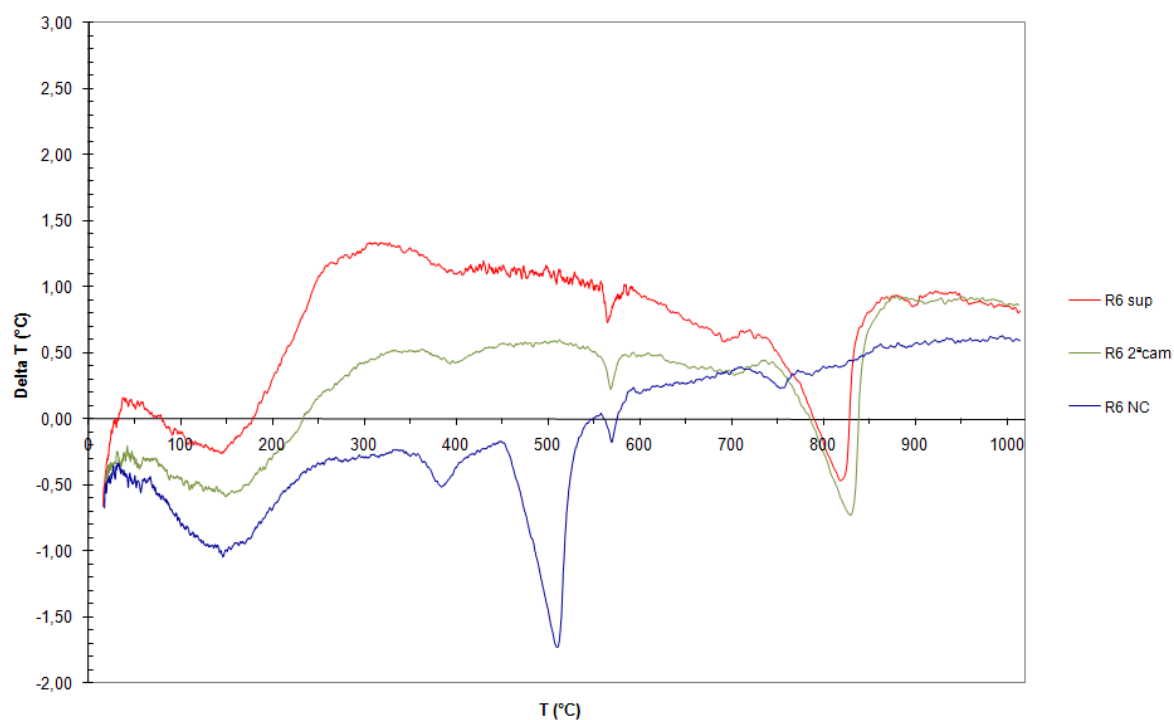


Figura 80 – ATD de argamassa de CP I e relação a/c 0,40 em duas camadas carbonatadas com 6% de CO<sub>2</sub> (R6 sup e R6 2ª cam) e no núcleo não carbonatado (R6 NC)

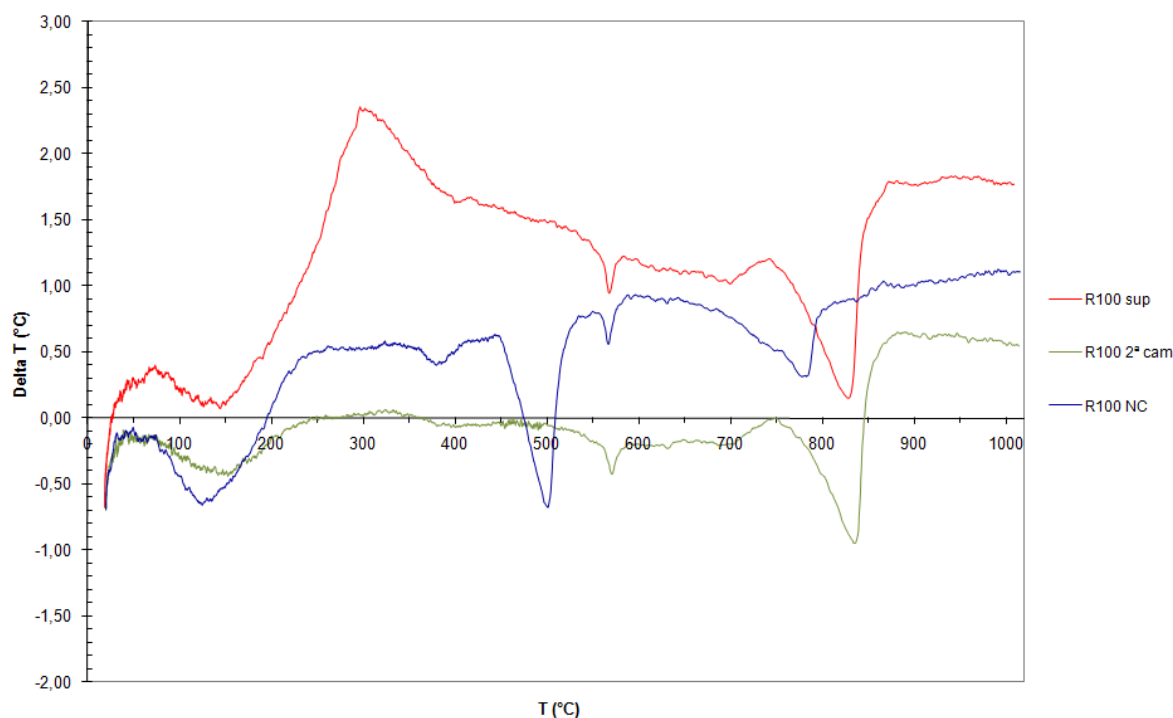


Figura 81 – ATD de argamassa de CP I e relação a/c 0,40 em duas camadas carbonatadas com 100% de CO<sub>2</sub> (R100 sup e R100 2<sup>a</sup> cam) e no núcleo não carbonatado (R100 NC)

As curvas de ATD confirmam os resultados da ATG. Nas curvas de ATD fica mais evidente a perda de massa por volta dos 100-200°C, que corresponde à partida da água quimicamente combinada na forma de hidratos, para os dois tipos de cimento, tanto nas amostras carbonatadas, quanto nas não carbonatadas.

Também nas curvas de ATD aparece um pico por volta dos 800°C, nas amostras não carbonatadas, sendo que este é maior para a amostra que foi submetida à concentração de CO<sub>2</sub> mais elevada (100%), corroborando os resultados da ATG.

#### 4.5.3 Porosidade por intrusão de mercúrio

Foram comparadas amostras não carbonatadas dos dois tipos de condicionamento, sala climatizada (SC) e conforme a RILEM (R), curadas por 7 dias antes de serem submetidas aos condicionamentos. A figura 82 apresenta o volume de mercúrio intrudido e a figura 83 a distribuição dos poros para o cimento CP I e tipo CP IV, relação a/c 0,70, condicionadas em sala climatizada (SC) e conforme a RILEM (R).

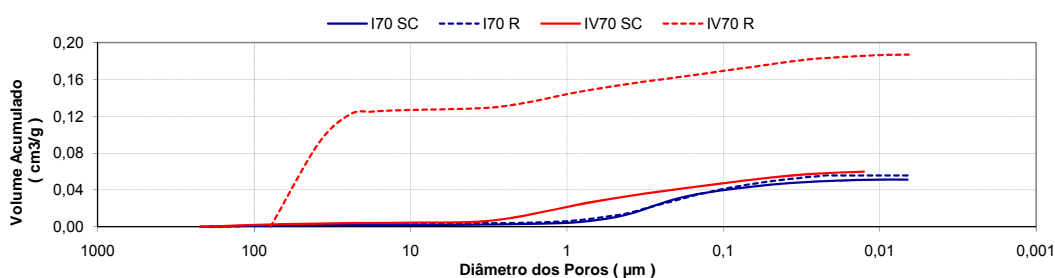


Figura 82 – Volume de mercúrio intrudido em argamassas de CP I e tipo CP IV, após acondicionamento em sala climatizada (SC) e conforme RILEM (R) (amostras não carbonatadas)

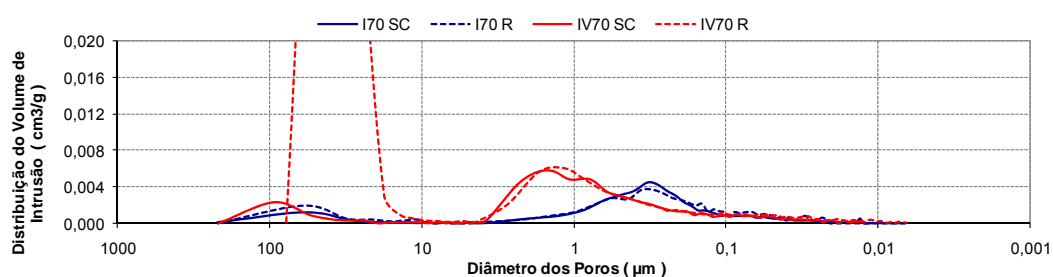


Figura 83 – Distribuição dos poros por volume de mercúrio intrudido em argamassas de CP I e tipo CP IV, após acondicionamento em sala climatizada (SC) e conforme RILEM (R) (amostras não carbonatadas)

A figura 82 mostra que o volume de mercúrio intrudido para a amostra feita com cimento tipo CP IV acondicionada conforme a RILEM é superior às demais amostras. Esse resultado é um indicativo de que as amostras acondicionadas conforme a RILEM sofrem alterações com relação ao que ocorre em condições naturais, corroborando as diferenças encontradas nas análises de profundidade de carbonatação discutidas no item 4.2. No entanto, não se podem fazer generalizações com base nos resultados de uma amostra e, seriam necessários mais ensaios para confirmar essa hipótese.

O volume total de poros para o CP I é praticamente o mesmo para ambos os acondicionamentos.

Na distribuição dos poros (figura 83), o cimento tipo CP IV apresenta maior volume de poros de maior diâmetro, o que está de acordo com o conhecimento difundido na literatura de que o tempo de cura de 7 dias não é suficiente para este cimento. Nessa idade, a cinza volante nem começou a reagir e, por isso, a comparação não está sendo feita em igualdade de relação a/c,

pois o cimento tipo CP IV possui menos clínquer. Uma análise realizada nessas condições poderia conduzir à falsa interpretação de que o cimento tipo CP IV teria poros maiores, quando na realidade essa porosidade será refinada pelas reações pozolânicas (MASSAZZA, 1998<sup>23</sup> *apud* HOPPE FILHO, 2008).

Também foram ensaiadas amostras carbonatadas (precondicionamento RILEM e 6% de CO<sub>2</sub> – R6) e não carbonatadas feitas com cimento CP I e tipo CP IV. Para cada uma das condições (C e NC) foram ensaiadas amostras extraídas da camada superficial (0-5 mm) e do núcleo das amostras de 4x4x16 cm, com o intuito de verificar possíveis diferenças de porosidade nessas duas partes dos corpos-de-prova. A figura 84 e a figura 86 apresentam o volume de mercúrio intrudido nas amostras feitas com cimento CP I e tipo CP IV, respectivamente. A figura 85 e a figura 87 mostram a distribuição dos poros para as amostras de CP I e tipo CP IV, respectivamente.

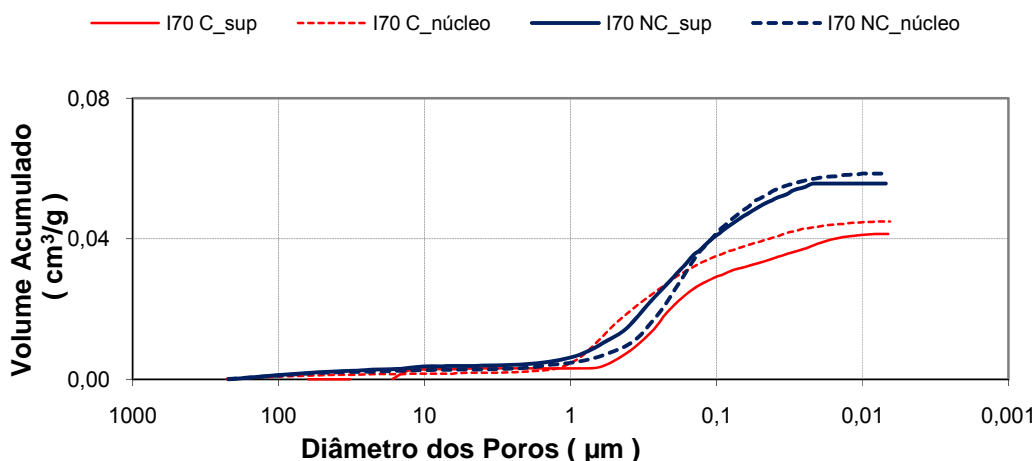


Figura 84 – Volume de mercúrio intrudido em argamassas de CP I, carbonatadas e não carbonatadas, extraídas a partir da superfície (sup) e do núcleo (núcleo) das amostras de 4x4x16 cm

<sup>23</sup> MASSAZZA, F. **Pozzolana and pozzolanic cements**. In: *Lea's chemistry of cement and concrete*. Edited by Peter C. Hewlett. Fourth Edition. 1998.

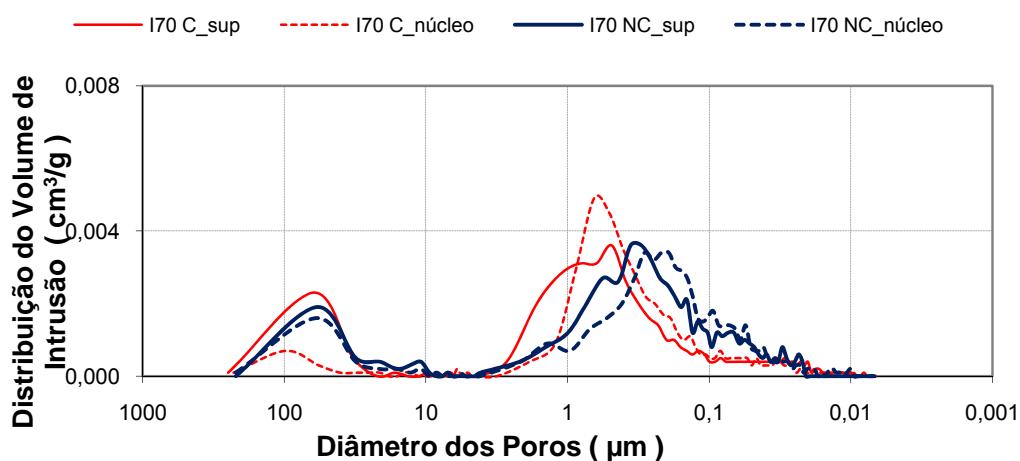


Figura 85 – Distribuição dos poros por volume de mercúrio intrudido em argamassas de CP I, carbonatadas (C) e não carbonatadas (NC), extraídas a partir da superfície (sup) e do núcleo (núcleo) das amostras de 4x4x16 cm

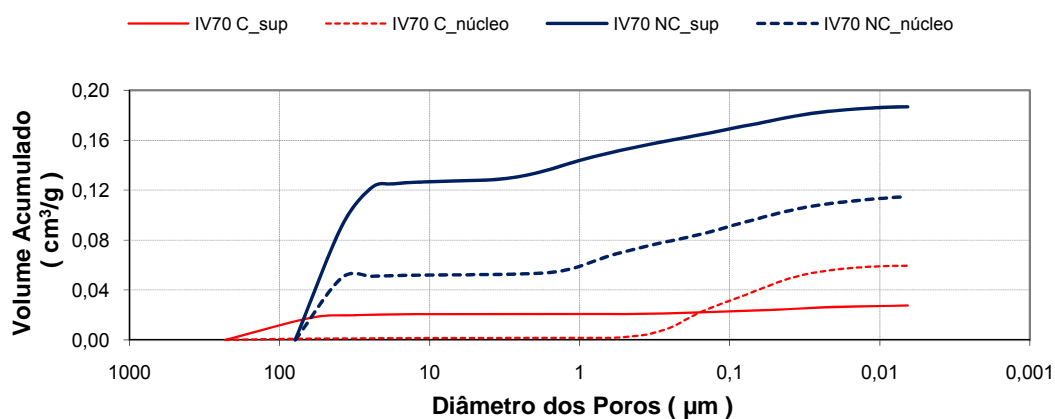


Figura 86 – Volume de mercúrio intrudido em argamassas de tipo CP IV, carbonatadas (C) e não carbonatadas (NC), extraídas a partir da superfície (sup) e do núcleo (núcleo) das amostras de 4x4x16 cm

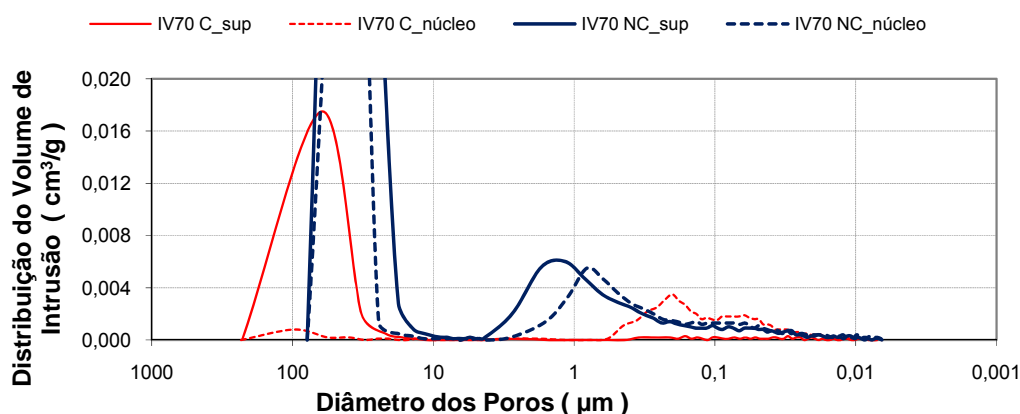


Figura 87 – Distribuição dos poros por volume de mercúrio intrudido em argamassas de tipo CP IV, carbonatadas (C) e não carbonatadas (NC), extraídas a partir da superfície (sup) e do núcleo (núcleo) das amostras de 4x4x16 cm

Observando a figura 84 e a figura 86, pode-se concluir que o volume total de mercúrio intrudido nas amostras carbonatadas é inferior àquele intrudido nas amostras não carbonatadas, como esperado. O volume intrudido para as amostras de CP I, tanto da superfície, quanto do núcleo, é de cerca de  $0,04 \text{ cm}^3/\text{g}$ . Para as amostras de tipo CP IV, a amostra da superfície tem intrusão de aproximadamente  $0,025 \text{ cm}^3/\text{g}$  e do núcleo  $0,06 \text{ cm}^3/\text{g}$ , o que não permite estabelecer um comportamento padrão de acordo com a posição em que as amostras foram extraídas. As amostras carbonatadas tem maior quantidade de poros mais finos, menores que  $1 \mu\text{m}$  (figura 85 e figura 87), o que também está de acordo com a literatura (HOPPE FILHO, 2008; HYVERT, 2009).

#### 4.5.4 Considerações finais sobre os ensaios de microestrutura

Através do ensaio de Difração de raios X se pretendia verificar se havia alguma diferença nos compostos formados entre as diferentes condições de ensaio. Nas amostras ensaiadas para este trabalho é possível dizer que não foi significativa essa diferença (entre 6% e 100% de  $\text{CO}_2$ ). Conforme visto na revisão bibliográfica (item 2.1.3), os carbonatos podem se alterar e no final se transformarem em calcita, o que também dificulta encontrar produtos diferentes, mesmo que em sua formação fossem distintos. Apesar de não ter sido constatado um comportamento padrão (mesmos compostos formados para mesmas concentrações de  $\text{CO}_2$ ), em concentrações naturais de  $\text{CO}_2$  não foi detectada a presença de vaterita (CP I).

Os resultados da difração de raios X estão em consonância com os ensaios de ATG e ATD que, também permitiram verificar a presença de carbonatos no núcleo das amostras, indicadas como não carbonatadas pela fenolftaleína, em quantidades superiores para as que foram expostas a 100% de CO<sub>2</sub> com relação a 6%.

Os valores obtidos para os ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio estão de acordo com o difundido pela literatura específica. No entanto, faz-se necessário analisar uma quantidade maior de amostras para que os resultados encontrados possam ser considerados padrão de comportamento do material e das condições do ensaio (tipo de condicionamento).

Os ensaios de microestrutura realizados neste trabalho são indicativos e válidos para os materiais utilizados nesta pesquisa. Para que se possam fazer generalizações, faz-se necessário ampliar a gama de amostras e condições de ensaio.

#### 4.6 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os ensaios de resistência à compressão axial foram utilizados apenas como parâmetro de controle da execução das misturas. A tabela 19 apresenta a média de 3 repetições do ensaio de resistência à compressão axial para cada grupo de moldagem e seus respectivos coeficientes de variação (CV)<sup>24</sup>. Os resultados de cada medida são apresentados no apêndice H.

Tabela 19 – Resultados médios da resistência à compressão axial dos 7 grupos de ensaio, em cada idade de ruptura e seus coeficientes de variação

Idade de ruptura (dias)		Médias da resistência à compressão axial ( $f_c$ ), em MPa e coeficiente de variação (CV), em %											
		I40		I55		I70		IV40		IV55		IV70	
		$f_c$	CV	$f_c$	CV	$f_c$	CV	$f_c$	CV	$f_c$	CV	$f_c$	CV
Grupo 1	7	32,7	8,8	24,4	5,5	15,4	6,5	30,6	3,8	19,6	1,2	12,7	2,0
	28	37,7	13,1	29,3	0,2	18,9	4,9	38,0	20,2	29,4	5,4	20,9	3,4
	63	44,1	7,3	32,1	5,3	20,4	2,2	50,8	4,0	33,1	5,6	27,6	1,4
Grupo 2	7	32,3	0,6	22,8	4,3	15,9	1,8	29,1	1,6	18,6	1,4	12,4	9,5
	28	38,2	0,8	28,4	3,5	19,0	2,6	41,9	2,7	28,1	6,4	20,2	6,8
	63	42,9	0,7	30,3	3,3	19,6	4,1	50,5	3,8	36,7	4,3	26,9	1,4

<sup>24</sup> O coeficiente de variação (CV) é obtido dividindo o desvio padrão, pela média dos resultados obtidos.

Idade de ruptura (dias)		Médias da resistência à compressão axial ( $f_c$ ), em MPa e coeficiente de variação (CV), em %											
		I40		I55		I70		IV40		IV55		IV70	
		$f_c$	CV	$f_c$	CV	$f_c$	CV	$f_c$	CV	$f_c$	CV	$f_c$	CV
Grupo 3*	7	31,7	22,1	23,4	1,8	16,0	4,1	25,9	1,4	19,5	0,4	12,5	3,5
	28	41,2	2,5	27,5	1,3	21,9	3,9	40,0	5,3	29,0	8,7	21,6	1,5
	63	40,9	7,0	29,2	2,3	21,7	1,4	44,6	3,8	33,9	1,1	28,2	3,9
Grupo 4	7	30,5	14,4	23,2	3,9	15,5	2,5	29,5	2,1	18,7	3,2	12,2	2,5
	28	34,6	16,0	29,1	2,3	18,2*	0,2	42,8	13,8	30,0	6,2	20,6*	2,2
	63	44,9	1,3	31,8	2,8	18,2*	1,9	49,7	5,0	37,9	3,8	26,0*	2,2
Natural 1	7	34,2	4,8	23,3	7,5	18,4	7,0	30,8	3,3	18,7	2,4	17,9	1,9
	28	38,1	3,6	29,0	2,4	21,3	9,3	44,0	4,7	28,0	4,2	26,2	5,9
	63	42,7	4,8	27,7	-	23,9	3,6	55,5	1,9	38,6	-	35,5	5,9
Natural 2	7	33,1	3,1	23,0	2,6	19,1	1,8	30,1	2,5	18,8	5,0	12,1	0,9
	28	41,4	1,0	28,3	0,9	22,4	2,6	43,1	3,0	29,6	2,8	19,9	4,2
	63	45,0	2,0	27,8	5,3	23,9	2,7	52,6	3,8	36,9	6,0	26,1	1,0
Natural 3	7	33,1	3,4	24,4	1,9	17,7	6,6	30,0	2,5	22,2	0,7	13,0	6,3
	28	41,5	1,5	28,3	11,0	21,4	5,6	46,5	2,2	32,2	14,1	21,2	5,2
	63	44,8	1,4	30,2	7,1	18,6	13,4	49,5	14,5	40,5	2,9	27,2	3,4

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

Com exceção de alguns pontos isolados (G1-I40-28d; G1-IV40-28d; G3-I40-7d; G4-I40-7,28d; G4-IV40-28d; N3-I55-28d; N3-I70-63d; N3-IV40-63d; N3-IV55-63d), o coeficiente de variação da resistência à compressão axial das amostras foi aceitável (<10,0%). Esses resultados corroboram a escolha do tamanho das amostras (100 x 200 mm).

A figura 88 ilustra a resistência à compressão axial média com relação à idade de ruptura, para os quatro grupos de moldagem do ensaio acelerado de carbonatação. A figura 89 apresenta a resistência à compressão axial média com relação à idade de ruptura, para os três grupos de moldagem do ensaio natural de carbonatação.



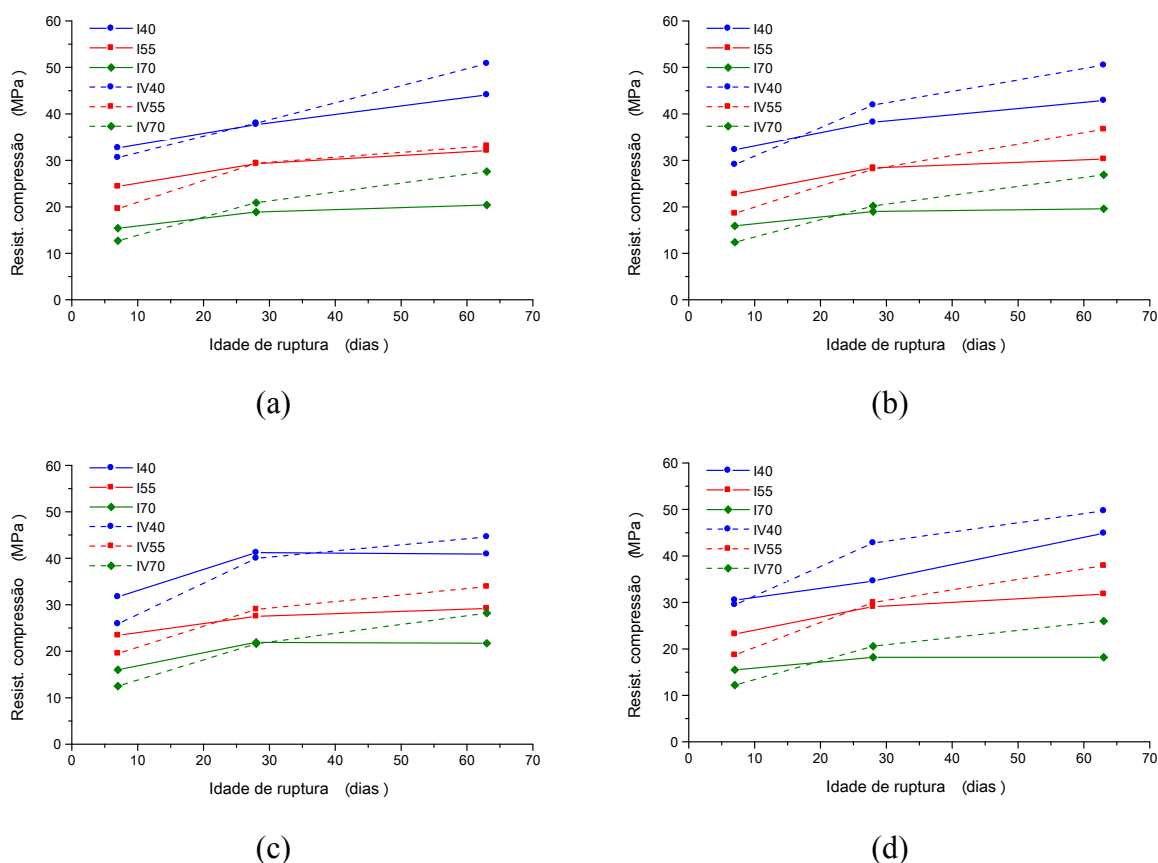


Figura 88 – Resistência à compressão axial média com relação à idade de ruptura, (a) grupo 1, (b) grupo 2, (c) grupo 3 e (d) grupo 4

Analisando a figura 88 e a figura 89 percebe-se que a resistência à compressão axial aumenta com a idade de ruptura e diminui com o aumento da relação  $a/c$ . Com relação ao tipo de cimento, após 7 dias de cura o CP I apresenta resistências ligeiramente superiores às do tipo CP IV, aos 28 dias as resistências são praticamente as mesmas e, aos 63 dias os valores para o tipo CP IV são cerca de 20% maiores para a relação  $a/c$  de 0,40 e em torno de 35% maiores para as relações  $a/c$  0,55 e 0,70.

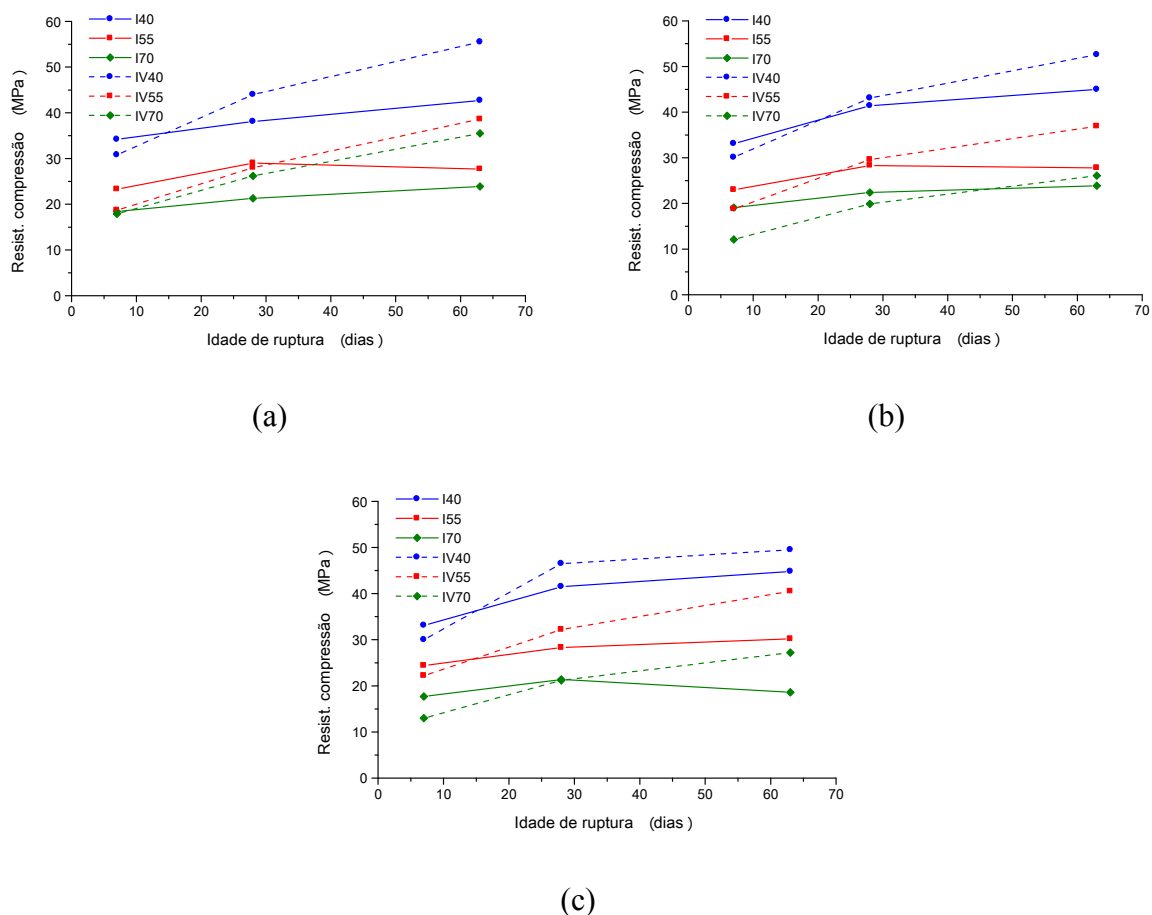


Figura 89 – Resistência à compressão axial média com relação à idade de ruptura, (a) natural 1, (b) natural 2 e (c) natural 3

Os resultados obtidos estão dentro do esperado com relação a todas as variáveis (tipo de cimento, relação  $a/c$ , idade de ruptura), o que indica que houve rigor na moldagem e as argamassas são adequadas para os ensaios propostos. Os diferentes tipos de cimento, para os diferentes grupos e mesma relação  $a/c$ , apresentam a mesma classe de resistência aos 28 dias.

Em seguida são feitas as considerações finais deste capítulo.

#### 4.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE OS RESULTADOS OBTIDOS

A modelagem numérica dos resultados de profundidade de carbonatação teve um bom ajuste ( $R^2 \geq 90\%$ ) com as equações de regressão múltipla, para todos os grupos analisados, e permitiu avaliar a tendência do comportamento das distintas condições de ensaio.

As condições de ensaio analisadas mostram que as amostras preconditionadas em sala climatizada e carbonatadas com 6% de CO<sub>2</sub> (SC6) são, em geral, as que apresentam o comportamento mais próximo ao encontrado nas condições naturais de exposição. A combinação R100 em nenhuma das análises foi apontada como a combinação mais próxima da condição natural. Os resultados dos grupos com 100% de CO<sub>2</sub> são questionáveis, uma vez que parece haver um potencial de reação importante, o que vai gerar muita água obstruindo parcial ou totalmente os poros do material, impedindo a difusão do CO<sub>2</sub>.

Os coeficientes de aceleração são uma forma simples de transpor os resultados de ensaios acelerados para a prática. No entanto, os valores apresentados no item 4.3 mostram que enquanto não houver padronização dos procedimentos de ensaio acelerado de carbonatação, não será possível realizar previsões confiáveis, pois a variação do coeficiente de aceleração entre diferentes condições de ensaio, nas condições avaliadas neste trabalho, chega a ser de seis vezes. Enquanto isso, o melhor é fazer uso de modelos de previsão, como é mostrado a seguir, no capítulo 5.

Embora a comparação dos resultados de carbonatação natural com carbonatação acelerada tenha indicado que a condição acelerada que mais se assemelha à condição real é a SC6, para as simulações dos modelos de previsão foram utilizados os dados dos grupos R6 e R100 com cura de 28 dias (grupo 1, RILEM, da figura 21, página 98). Essa decisão foi tomada por dois motivos: primeiro, por este grupo de dados possuir uma condição hídrica bem definida e conhecida, e segundo, a análise conjunta dos resultados de carbonatação foi realizada depois das simulações no modelo. Os dados de carbonatação natural utilizados são os obtidos em ambiente interno (sala climatizada, T=20°C e UR=70%), com cura de 28 dias.

Tanto as análises de DRX quanto as de ATG/ATD indicam a presença de outras formas alotrópicas do CaCO<sub>3</sub> além da calcita. Os resultados de resistência à compressão mostram o comportamento esperado e indicam que as argamassas foram feitas com o rigor requerido para o uso a que foram propostas.

## 5. MODELAGEM DA CARBONATAÇÃO

Apesar do grande número de pesquisas realizadas sobre a carbonatação acelerada, ainda há dúvidas de como relacionar as profundidades de carbonatação medidas nesses ensaios com a carbonatação natural. Assim, não é possível deduzir, por um simples coeficiente de proporcionalidade, a profundidade de carbonatação natural a partir de um ensaio acelerado (SANJUÁN; ANDRADE; CHEYREZY, 2003). A passagem de um tipo de ensaio para o outro por coeficientes de aceleração não é pertinente. A razão principal para explicar esta dificuldade é que entre a carbonatação natural e a carbonatação acelerada, a pressão de CO<sub>2</sub> não é a única variável que intervém no processo de carbonatação. Em particular, as trocas de umidade entre o material e o ambiente agem sobre a carbonatação de acordo com cinéticas que dependem do conteúdo em CO<sub>2</sub>. Para prever a carbonatação natural a partir de ensaios acelerados, é aconselhável modelar as cinéticas de carbonatação, mas não é simples, porque a carbonatação do concreto é um fenômeno complexo, o qual depende de numerosos fatores, como a difusão do dióxido de carbono no material, a natureza mineralógica dos constituintes, a umidade e temperatura do ambiente de exposição, assim como o grau de saturação do material (ISGOR; RAZAQPUR, 2004).

Segundo Muntean *et al.* (2005) e Thiery (2005), os modelos podem ser classificados em duas categorias: os modelos empíricos, e os modelos complexos, que procuram descrever a carbonatação em toda sua complexidade.

O primeiro modelo de predição, concebido por autores como Smolczyk (1969), Hamada (1969), Meyer (1969), Alexandre (1976), exprime uma relação de proporcionalidade entre a profundidade de carbonatação e a raiz quadrada do tempo (equação 23):

$$e_c = K\sqrt{t} \quad \text{Equação 23}$$

Onde:

$e_c$  = profundidade carbonatada;

$t$  = tempo de exposição;

$K$  = constante que depende das unidades, das condições limites e do material (TUUTTI, 1982).

De acordo com Andrade (1992),  $K$  é uma constante cujo valor pode ser determinado medindo a profundidade carbonatada após um tempo de exposição  $t$  da estrutura. Uma vez conhecido  $K$ , pode-se prever a velocidade de avanço da frente de carbonatação. Neville (1997) denomina  $K$  como “coeficiente de carbonatação”. No entanto, esta relação não permite prever a carbonatação natural a partir de um ensaio acelerado, pois não é capaz de relacionar o coeficiente  $K$  com a pressão de  $\text{CO}_2$ .

Segundo Muntean *et al.* (2005), os modelos complexos simulam o processo de carbonatação numericamente e baseiam-se nas leis de conservação de massa de  $\text{CO}_2$  e de água, acopladas. Seu uso não é trivial, e muitas vezes, conduz a problemas de identificação dos parâmetros. Os autores ainda enfatizam que o processo de carbonatação pode ser completamente diferente de acordo com as condições experimentais e que não há modelos que levem em conta todos os efeitos, o que faz com que as interpretações dos ensaios acelerados sejam limitadas. Sanjuán, Andrade e Cheyrezy (2003) salientam que são necessários mais ensaios do mesmo material com diferentes concentrações de  $\text{CO}_2$  e umidades relativas para melhorar a compreensão do fenômeno.

## 5.1 REVISÃO DOS MODELOS DE CARBONATAÇÃO

Miragliota e Rougeau (2002), Ait-Mokhtar e Delmi (2002), Thiery (2005) e Hyvert (2009) fizeram um resumo dos trabalhos de modelagem da carbonatação natural e acelerada. Os modelos que eles apresentam são os seguintes:

Modelo de Ying-Yu e Qui-Dong (1987);

Modelo de Papadakis, Vayenas e Fardis (1989, 1991b);

Modelo de Saetta, Schrefler e Vitaliani (1993);

Modelo de Bakker (1993)<sup>25</sup>;

Modelo de Van Balen e Van Gemert (1994);

Modelo de Jiang *et al.* (1996);

---

<sup>25</sup> BAKKER, R. F. M. "Model to calculate the rate of carbonation resistance of concrete under different climatic conditions", Rapport du CEMIJ bv Laboratorium, Ijmuiden (Pays-Bas), 1993, 16 pages.

Modelo de Sickert (1997);  
Modelo de Funk (1997);  
Modelo do CEB (1997);  
Modelo de Al-Akchar, Baroghel-Bouny e Raharinaivo (1998);  
Modelo de Badouix *et al.* (1998);  
Modelo do Duracrete (1999);  
Modelo de Miragliota (2000);  
Modelo de Jiang, Lin e Cai (2000);  
Modelo de Thiery *et al.* (2004);  
Modelo de Bary e Sellier (2004);  
Modelo de Thiery (2005);  
Modelo de Duprat, Sellier e Nguyen (2006).

Outros podem ainda ser encontrados:

Modelo de Papadakis (2000a);  
Modelo de Isgor e Razaqpur (2004);  
Modelo de Saetta e Vitaliani (2004, 2005);  
Modelo de Castellote e Andrade (2008);  
Modelo de Hyvert (2009);  
Modelo de Possan (200?)

No presente trabalho são apresentados alguns dos modelos mais citados na literatura.

### 5.1.1 O modelo de Ying-Yu e Qui-Dong (1987)

Este modelo foi escolhido por ser um dos primeiros a fazer referência à pressão de CO<sub>2</sub> e à quantidade de produtos carbonatáveis contidos no concreto. Segundo Ying-Yu e Qui-Dong (1987), a carbonatação natural ou acelerada do cimento em um concreto ou em uma argamassa é comparável.

Os autores fazem duas considerações:

- a) da superfície do concreto até a frente de carbonatação, a concentração de CO<sub>2</sub> tem uma distribuição linear;

- b) a carbonatação dos materiais cimentícios é uma reação química controlada pela difusão.

As amostras que estão submetidas à carbonatação podem ser divididas em três zonas: a zona carbonatada, a zona em processo de carbonatação e a zona não carbonatada. Os autores descrevem a difusão do CO<sub>2</sub> em cada zona por meio de equações diferenciais baseadas na lei de Fick, deduzindo que a profundidade de carbonatação ( $\xi$ ) que pode ser escrita em função do tempo  $t$  na forma (equação 24):

$$\xi = Q \cdot t^{\frac{1}{2}} \quad \text{Equação 24}$$

$Q$  é o coeficiente de carbonatação, dado pela equação 25:

$$Q = a_1 \cdot \left( \frac{2 \cdot C_1}{KP} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{Equação 25}$$

Onde:

$a_1$  = coeficiente de difusão do CO<sub>2</sub> no material carbonatado;

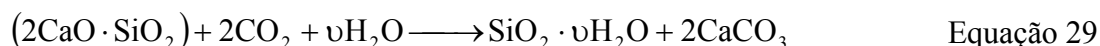
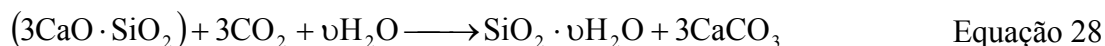
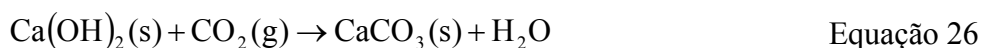
KP = quantidade de CO<sub>2</sub> absorvida pelo material por unidade de volume;

$C_1$  = pressão parcial do CO<sub>2</sub> da atmosfera onde se encontra o material.

Os autores propõem uma relação entre o coeficiente de difusão do CO<sub>2</sub> e a porosidade correspondente ao tamanho dos poros superiores a 3200 nm. Este modelo não considera a influência da quantidade de CO<sub>2</sub> sobre as reações químicas de carbonatação. A forma de como o tipo de cimento é levado em consideração não é clara, sendo que somente a quantidade de CO<sub>2</sub> absorvível pelo termo KP é considerada. Por fim, os autores supõem que as equações utilizadas são apropriadas para a carbonatação natural e que outros pesquisadores provaram isso, mas uma confrontação com resultados de carbonatação natural não foi feita.

### 5.1.2 O modelo de Papadakis, Vayenas e Fardis (1989, 1991b)

Este é um dos primeiros modelos que considera a química da carbonatação. Papadakis, Vayenas e Fardis (1989, 1991b) apresentam um modelo baseado nas equações de equilíbrio de massa do CO<sub>2</sub>, de Ca(OH)<sub>2</sub>, dos C-S-H e dos silicatos de cálcio anidros (C<sub>3</sub>S e C<sub>2</sub>S):



Os autores indicam que as equações acima são simplificadas, pois não apresentam os detalhes do que se passa realmente na fase líquida. Por fim, eles propõem a equação 30 que dá a profundidade de carbonatação em função do tempo:

$$x_c = \sqrt{\frac{2 \cdot [\text{CO}_2]^0 \cdot D_{e,\text{CO}_2,c} \cdot t}{[\text{Ca(OH)}_2]^0 + 3[\text{CSH}]^0 + 3[\text{C}_3\text{S}]^0 + 2[\text{C}_2\text{S}]^0}} \quad \text{Equação 30}$$

Onde:

$x_c$  = profundidade de carbonatação (m);

$[\text{CO}_2]$  = concentração molar do  $\text{CO}_2$  ( $\text{mol}/\text{m}^3$ );

$D_{e,\text{CO}_2,c}$  = coeficiente de difusão efetivo do  $\text{CO}_2$  no material carbonatado ( $\text{m}^2/\text{s}$ );

$t$  = tempo (s);

$[\text{Ca(OH)}_2]$ ,  $[\text{CSH}]$  = concentração molar dos hidratos ( $\text{mol}/\text{m}^3$ );

$[\text{C}_3\text{S}]$ ,  $[\text{C}_2\text{S}]$  = concentração molar dos anidros ( $\text{mol}/\text{m}^3$ ).

O índice 0 é relativo às concentrações iniciais ( $t=0$ ).

Este modelo é simples de ser aplicado e foi validado pelos autores para ensaios acelerados. Em outra publicação, os pesquisadores (PAPADAKIS; VAYENAS; FARDIS, 1989, 1991b) explicam que a carbonatação dos anidros pode ser negligenciada e que os termos relativos aos silicatos  $\text{C}_3\text{S}$  e  $\text{C}_2\text{S}$  podem ser suprimidos do modelo. No mesmo artigo, eles propõem um modelo para a atividade pozolânica baseado na observação que os óxidos das pozolanas e do clínquer são os mesmos, mas com diferentes proporções e composições mineralógicas. Eles estimam que os produtos da atividade pozolânica sejam os mesmos da hidratação do CP I e que a principal diferença concerne à fração vítrea da pozolana que vai reagir com a portlandita formada pela hidratação do CP I. Os produtos formados pelas reações pozolânicas são



somados aos do cimento para entrar no modelo proposto na equação 30. Os autores consideram que a hidratação do clínquer e a reação da fase vítrea da pozolana são totais.

Esta segunda versão do modelo também foi validada para os ensaios acelerados com boa concordância, mas não foi testada com dados de carbonatação natural. As duas versões do modelo não consideram as condições de umidade relativa, nem a mudança de porosidade devida à carbonatação.

### 5.1.3 O modelo de Bakker (1993) citado por Miragliota e Rougeau (2002)

O interesse particular por este modelo é que ele considera os ciclos de molhagem e secagem, condição dos ensaios do presente trabalho.

Bakker (1993) *apud* Miragliota e Rougeau (2002) propôs um modelo para avaliar a carbonatação do concreto submetido a condições climáticas variáveis no tempo. Para isso, ele propõe combinar:

A profundidade de carbonatação  $x_c$  (m) (equação 31):

$$x_c = A \cdot \sqrt{t} \quad \text{Equação 31}$$

Na qual o coeficiente A é dado pela equação 32:

$$A = \sqrt{\frac{2 \cdot D_c \cdot (C_1 - C_2)}{a}} \quad \text{Equação 32}$$

Onde:

$t$  = tempo de exposição (s);

$D_c$  = coeficiente de difusão efetivo do  $\text{CO}_2$  ( $\text{m}^2/\text{s}$ );

$C_1 - C_2$  = diferença de concentração de  $\text{CO}_2$  entre o exterior e a frente de carbonatação ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

$a$  = quantidade de substâncias carbonatáveis ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).

Sendo a profundidade de secagem  $x_t$  (m) (equação 33):

$$x_t = B \cdot \sqrt{t} \quad \text{Equação 33}$$

Na qual o coeficiente B é dado pela equação 34:

$$B = \sqrt{\frac{2 \cdot D_v \cdot (C_3 - C_4)}{b}} \quad \text{Equação 34}$$

Onde:

$D_v$  = coeficiente de difusão efetiva do vapor de água ( $m^2/s$ );

$C_3 - C_4$  = diferença de umidade entre o exterior e a frente de secagem ( $kg/m^3$ );

$b$  = quantidade de água evaporável ( $kg/m^3$ ).

Após  $n$  ciclos de molhagem-secagem, a profundidade de carbonatação segue uma lei do tipo (equação 35):

$$x_c(n) = A \cdot \sqrt{t_{\text{eff}(n)}} \quad \text{Equação 35}$$

Sendo  $t_{\text{eff}(n)}$ , o tempo efetivo de carbonatação que se escreve como na equação 36:

$$t_{\text{eff}(n)} = \sum_{i=1}^n t_d(i) - \left( \frac{x_c(i-1)}{B} \right)^2 \quad \text{Equação 36}$$

Onde:

$t_d(i)_{1 \leq i \leq n}$  representa a duração do  $i^{\text{ésimo}}$  período de secagem, e  $\left( \frac{x_c(i-1)}{B} \right)^2$  a duração necessária para  $i^{\text{ésima}}$  secagem a fim de que a frente de secagem atinja a frente de carbonatação correspondente ao  $(i-1)^{\text{ésimo}}$  ciclo.

De acordo com Miragliota e Rougeau (2002), o cálculo da profundidade de carbonatação não é feito com a idade real do material, mas com o tempo “eficaz” que corresponde à duração na qual a carbonatação do concreto pode ocorrer. A idade do concreto levada em conta no cálculo é então, o tempo de exposição do concreto no qual se retira a soma dos períodos de molhagem e de secagem.

O modelo de Bakker (1993) é interessante porque leva em conta os ciclos de molhagem e secagem que inserem as flutuações do estado de saturação do concreto de cobrimento. No

entanto, o modelo não considera a influência da pressão de CO<sub>2</sub> e não permite a predição da carbonatação natural a partir de um ensaio acelerado (MIRAGLIOTA; ROUGEAU, 2002; HYVERT, 2009).

#### 5.1.4 O modelo do CEB (1997)

O modelo de predição da carbonatação natural desenvolvido pelo CEB *Task Group 5.1* é baseado na lei de difusão de Fick e na hipótese que as reações de hidratação e pozolânicas já estão completas antes do início da carbonatação. Trata-se de um modelo empírico.

A profundidade de carbonatação é calculada de acordo com a equação 37:

$$d_c = \sqrt{2 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot \Delta c} \cdot \sqrt{\frac{D_{nom}}{a} \cdot t} \cdot \left(\frac{t_0}{t}\right)^n \quad \text{Equação 37}$$

Onde:

$d_c$  = profundidade carbonatada;

$D_{nom}$  = coeficiente de difusão do concreto em um ambiente bem definido (20°C, 65% umidade relativa);

$\Delta c$  = diferença de concentração de CO<sub>2</sub> entre a frente de carbonatação e no ar, é usualmente a concentração de CO<sub>2</sub> no ar;

$k_1$  = parâmetro que corresponde à umidade média do concreto;

$k_2$  = parâmetro para descrever as condições de cura;

$k_3$  = parâmetro para descrever a influência da moldagem (leva em conta as variações locais da relação a/c);

$n$  = parâmetro para as condições do micro-clima, descrição da exposição à água ( $n=0$  para as condições internas e  $n \leq 0,3$  para as condições externas expostas às intempéries);

$t_0$  = período de referência (por exemplo, um ano);

$t$  = tempo.

O termo  $a$  é a quantidade de CO<sub>2</sub> necessária para a carbonatação completa do material que é dada pela equação 38:

$$a = 0,75 \cdot C \cdot \text{CaO} \cdot \alpha_H \cdot \frac{M_{\text{CO}_2}}{M_{\text{CaO}}} \quad \text{Equação 38}$$

Onde:

C = quantidade de cimento no material (kg/m<sup>3</sup>);

CaO = quantidade de CaO no cimento (%);

$\alpha_H$  = grau de hidratação (%);

M = massas molares (mol/m<sup>3</sup>).

$D_{\text{nom}}$  é obtido a partir dos resultados de Wierig (1984) citado pelo CEB (1997), para uma umidade padrão. A umidade média do material é tida em conta por um coeficiente  $k_1$  e os ciclos de molhagem e secagem pelo coeficiente  $n$  que é dado em função da classe do ambiente. A difusão do material saturado é negligenciada. Os coeficientes  $k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$  dependem da exposição, das condições de cura, da orientação solar de exposição das superfícies e do meio de exposição (protegido ou não das intempéries). No boletim n°238 do CEB (1997) os valores destes coeficientes são tabelados para as combinações dos fatores citados anteriormente.

A vantagem deste modelo é que ele permite de prever a carbonatação em função das condições do ambiente. Ele é simples de aplicar, mas como todo modelo empírico, deve ser utilizado com cuidado. Além disso, seria necessário calibrar os coeficientes com outros dados experimentais para então fornecer previsões de qualidade.

### 5.1.5 Conclusões sobre os modelos de carbonatação descritos da literatura

Os modelos de carbonatação citados não foram testados no presente estudo. Segundo Miragliota e Rougeau (2002), Aït-Mokhtar e Delmi (2002), Thiery (2005) e Hyvert (2009), os modelos existentes são, em geral, ou muito complexos e difíceis de aplicar, ou simples demais e não consideram toda a complexidade do fenômeno de carbonatação. Em geral, eles também não levam em conta, a natureza do aglomerante. Do ponto de vista do projeto desta pesquisa, o seu principal defeito é que não permitem a previsão da carbonatação natural a partir de ensaios acelerados.

Na sequência, será apresentado e avaliado o modelo desenvolvido por Bary e Sellier (2004) e modificado por Duprat, Sellier e Nguyen (2006). O referido modelo é complexo, com

numerosas entradas. Seu objetivo é a predição da carbonatação descrevendo ao máximo o conjunto de fenômenos envolvidos. Em seguida, será analisado o modelo de Hyvert (2009), cujos parâmetros de entrada são menores e mais simples de determinar. Seu objetivo é a predição da carbonatação natural a partir de ensaios acelerados. Estes modelos foram escolhidos por terem sido desenvolvidos no LMDC de Toulouse, pelo fato das primeiras aplicações parecerem promissoras, e haver a necessidade de realizar uma validação mais completa.

## 5.2 O MODELO DE DUPRAT, SELLIER E NGUYEN (2006)

O objetivo deste modelo é descrever da forma mais precisa possível, os diferentes fenômenos que interferem na carbonatação de materiais cimentícios. A base deste modelo é a resolução das equações de conservação da massa de dióxido de carbono e da massa de água. Ele junta assim, a secagem à carbonatação. Como será mostrado, este modelo descreve toda a complexidade dos fenômenos e faz intervir numerosas variáveis de entrada, relativas à química do material, à sua microestrutura, ao seu estado de umidade, às suas propriedades de transporte e às suas condições de exposição. Após uma breve apresentação do modelo, será discutida a sua aplicação fazendo algumas simulações.

A equação 39 comanda o transporte do dióxido de carbono por difusão:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \varphi(1 - S_r) \frac{M_c}{RT} p_c \right) + \text{div} \left( f_D D_c \frac{M_c}{RT} \text{grad}(p_c) \right) - Q_c = 0 \quad \text{Equação 39}$$

Onde:

$\varphi$  = porosidade do material;

$S_r$  = grau de saturação do material;

$p_c$  = pressão parcial de  $\text{CO}_2$  na fase gasosa;

$D_c$  = coeficiente de difusão do  $\text{CO}_2$  no ar;

$M_c$  = massa molar do  $\text{CO}_2$ ;

$R$  = constante dos gases perfeitos;

$T$  = temperatura (suposta constante e igual a 293 K);

$Q_c$  = termo fonte;

$f_D$  = fator que traduz o efeito global da porosidade e do grau de saturação do material sobre o coeficiente de difusão do  $\text{CO}_2$ .

No primeiro termo, a concentração de  $\text{CO}_2$  é expressa em função da pressão parcial, por meio da equação dos gases perfeitos, em  $\text{kg/m}^3$  de material. A concentração do  $\text{CO}_2$  é levada ao volume de material, de onde resulta a multiplicação pela porosidade e a fração volumétrica de gás presente nos poros.

No segundo termo, figura o gradiente de concentração de  $\text{CO}_2$ , motor da difusão, e o coeficiente de difusão efetivo do  $\text{CO}_2$  na fase gasosa do material. Este último é expresso na forma de um produto do coeficiente de difusão no ar, por um fator  $f_D$ , que leva em conta a microestrutura do material e seu estado de saturação. Millington (1959)<sup>26</sup> *apud* Thiery *et al.* (2004) propõe calcular  $f_D$  pela equação 40:

$$f_D = \varphi^a (1 - S_r)^b \quad \text{Equação 40}$$

Onde  $a$  e  $b$  são coeficientes escalares, cujos respectivos valores de 2,74 e 4,2 foram propostos por Thiery *et al.* (2004).

O terceiro termo é um termo fonte, que corresponde ao consumo de  $\text{CO}_2$  à medida que este penetra no material. Ele é proporcional à concentração de cálcio contida na fase sólida. Este terceiro termo considera a taxa de saturação sobre a dissolução do  $\text{CO}_2$  na solução intersticial, e por consequência, a velocidade de descalcificação dos produtos hidratados. No modelo, os cristais de portlandita são assimilados a esferas de raio  $r_0$ . De acordo com a sua dissolução, a portlandita é contornada por uma camada de calcita que atrapalha a dissolução e a acessibilidade do  $\text{CO}_2$  à portlandita (o modelo considera um coeficiente de difusão na camada de calcita igual a  $1,2 \cdot 10^{-13} \text{m}^2/\text{s}$ ). Os autores fazem a mesma consideração de Thiery *et al.* (2004), que a taxa de dissolução (por exemplo, de carbonatação) máxima da portlandita é de 50%. Esta taxa de carbonatação corresponderia ao ponto de viragem da fenolftaleína. No modelo, os C-S-H não se carbonatam antes do consumo total da portlandita carbonatável, por causa do seu pH de equilíbrio ser inferior. Grandet (1975), citado por Houst (1993), diz que somente o C-S-H e a etringita podem se carbonatar totalmente e que a carbonatação da portlandita será em um primeiro instante limitada a 50 ou 60%. O autor explica que este limite

<sup>26</sup> MILLINGTON, R. J. Gas diffusion in porous media. **Science** **130**, 1959, pp 100-102.

se justifica pela dimensão dos cristais, sobre os quais o cálcio se adere perfeitamente para formar uma camada pouco permeável ao CO<sub>2</sub> e que uma posterior moagem destes cristais parcialmente carbonatados permitiria a continuação da reação. Esta afirmação corrobora a escolha de consumo inicial de 50% de Ca(OH)<sub>2</sub> feita pelos autores do modelo. No entanto, cabe ressaltar que o fato de se formar uma camada pouco permeável em torno do cristal de portlandita significa que o acesso ao CO<sub>2</sub> será reduzido, e em consequência, o coeficiente de difusão do CO<sub>2</sub> também será reduzido. Mas, isso não impede que a reação continue ocorrendo e que o cristal possa ser totalmente consumido.

A equação 41 comanda o transporte de água.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varphi S_r \rho_w) + \text{div} \left( \frac{f_k K \rho_w}{v_w} \frac{RT}{M_w} \frac{1}{h(S_r)} \frac{dh(S_r)}{dS_r} \text{grad}(S_r) \right) - Q_w = 0 \quad \text{Equação 41}$$

Onde:

$\rho_w$  = massa específica da água;

$v_w$  = viscosidade cinemática da água;

$K$  = permeabilidade do material;

$f_k$  = fator que traduz a influência do grau de saturação sobre a permeabilidade à água;

$M_w$  = massa molar da água;

$h(S_r)$  = expressão da umidade relativa em função da taxa de saturação;

$Q_w$  = termo fonte.

As leis de Darcy e de Kelvin são utilizadas nas equações de conservação de massa de água assim como um termo que é diretamente proporcional à velocidade de descalcificação da portlandita ( $Q_w$ ). Os autores do modelo fazem uso de uma isoterma de absorção-dessorção  $h(S_r)$  para descrever o equilíbrio hídrico do material.

As equações constituem um sistema de equações diferenciais não-lineares acopladas. Elas foram desenvolvidas de forma a chegar à forma clássica da equação de calor e a resolução se apóia sobre a formulação térmica de Galerkin para a discretização no espaço, e o método de Euler explícito para a discretização no tempo.

A porosidade e a concentração molar da portlandita e dos géis de C-S-H são recalculadas a cada final de passo de tempo, para utilização no passo de tempo posterior, no qual são consideradas constantes.

As simulações são realizadas com auxílio do *software Castem* e as saídas são:

- A profundidade de carbonatação em função do tempo;
- Os perfis de consumo de portlandita e de C-S-H;
- A evolução da porosidade e do grau de saturação.

Após esta apresentação das bases do modelo de Duprat, Sellier e Nguyen (2006), a etapa seguinte mostra os parâmetros de entrada para a simulação. Considerou-se necessário mostrar o importante número de entradas a serem consideradas para sua utilização, sobretudo por sua incidência nos resultados simulados.

### 5.2.1 As entradas do modelo

Para simular um ensaio de carbonatação, é necessário fornecer ao modelo as seguintes variáveis de entrada:

- **Isoterma de absorção-dessorção:** relação de equilíbrio entre o grau de saturação do material e a umidade relativa do ambiente. Baroghel-Bouny (1994) estima que o tempo necessário para a obtenção de uma isoterma de dessorção é de aproximadamente um ano. No modelo intervém a expressão  $h(S_r)$ . A isoterma utilizada é a obtida por dessorção por Baroghel-Bouny (1999).
- **Coefficiente de difusão efetivo do CO<sub>2</sub> – D<sub>c</sub> (m<sup>2</sup>/s).** É o produto de  $f_D$  pelo coeficiente de difusão do CO<sub>2</sub> no ar. O termo  $f_D$  é difícil de determinar porque depende da microestrutura do material e o estado de saturação da porosidade.
- **Permeabilidade relativa do material no estado são – K<sub>0</sub> (m<sup>2</sup>).** Sua medida direta é complicada, mas pode ser também calculada conforme Van Genuchten (1980)<sup>27</sup> citado por Bary e Sellier (2004) e Thierry *et al.* (2004).

---

<sup>27</sup> VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Scientific Society Am. Proceedings...*, 44, 1980, p. 892-898.



- **Porosidade acessível à água –  $p_0$** . A medida é realizada simplesmente segundo um ensaio padronizado (AFPC-AFREM, 1997).

- **Quantidade inicial de  $\text{Ca(OH)}_2 - \text{Ca(OH)}_{2i}$  ( $\text{mol/m}^3$ )**: é calculada a partir da composição do material, do cimento e do grau de hidratação.

- **Rio das esferas de portlandita –  $r_0$  (m)**:

Na realidade, os cristais de portlandita são de forma hexagonal (figura 90 e figura 91). Os autores recomendam valores compreendidos entre 30 e 60  $\mu\text{m}$ . Estes valores são dados para pastas de cimento para as relações a/c variando de 0,45 a 0,60 (CHAUSSADENT *et al.*, 2000). Seria mais apropriado considerar a superfície do cristal e calcular o raio de uma esfera de superfície equivalente.

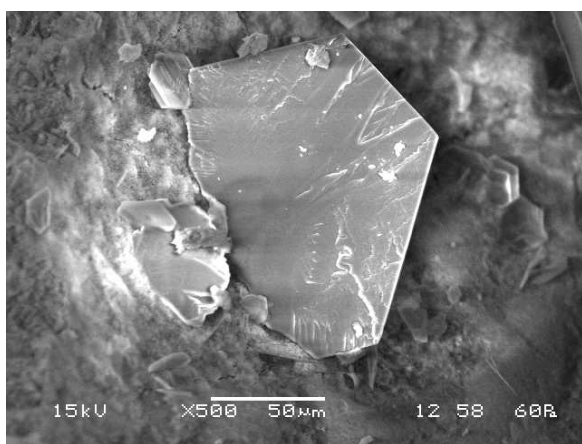


Figura 90 – Cristais de portlandita em argamassa de CP I, a/c 0,70

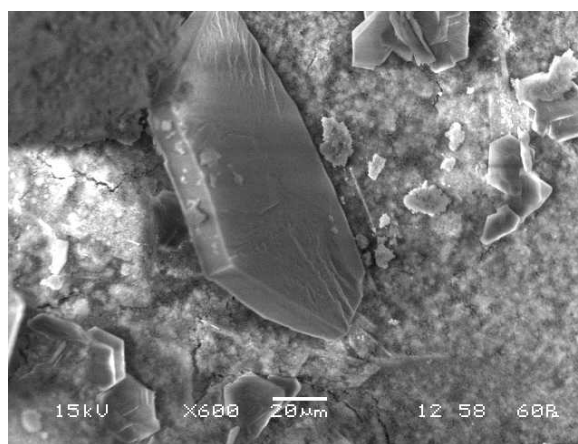


Figura 91 – Cristais de portlandita em argamassa de CP I, a/c 0,70

- **Grau de saturação inicial –  $S_{r0}$** : estado de saturação das amostras antes do início dos ensaios. Estes valores podem ser determinados por pesagem ou a partir de isoterma.

- **Pressão inicial de  $\text{CO}_2 - p_{c0}$  (Pa)** na amostra: o valor utilizado é o indicado na literatura, constante e igual a  $1.10^{-10}$  Pa.

- **Quantidade inicial de C-S-H –  $\text{CSH}_i$  ( $\text{mol/m}^3$ )**: determinada a partir da composição do material e do cimento.

- **Grau de saturação do material –  $S_{r\_atm}$** : corresponde à saturação do ar na superfície do corpo-de-prova e constitui uma condição no limite da amostra.

- **Pressão inicial do CO<sub>2</sub> no ar – p<sub>c\_atm</sub> (Pa):** é a pressão do CO<sub>2</sub> no experimento.
- **Tempo de carbonatação – t<sub>car</sub> (dias):** duração do experimento, da exposição ao ambiente agressivo.

### 5.2.2 Resultados das simulações

Como se acabou de mostrar (no item 5.2.1), este modelo exige um grande número de entradas. Antes de conduzir uma campanha sistemática de medidas nas amostras desta pesquisa, foi feito um estudo de sensibilidade com relação a duas grandezas particularmente difíceis de medir: o coeficiente de difusão efetivo do CO<sub>2</sub> e o raio das esferas de portlandita. Para conduzir o estudo, as outras entradas do modelo foram fixadas e, simulada a carbonatação acelerada com 6% de CO<sub>2</sub>. Estas grandezas são apresentadas na tabela 28 e são comuns para todas as simulações.

Tabela 28 – Dados de entrada comuns para o modelo de carbonatação

Parâmetro	Valores utilizados
K <sub>0</sub> (m <sup>2</sup> )	1,00.10 <sup>-20</sup>
p <sub>0</sub>	0,196
Ca(OH) <sub>2i</sub> (mol/m <sup>3</sup> )	4370
m	0,45
a	2,74
b	4,2
S <sub>r0</sub>	0,256
p <sub>c0</sub> (Pa)	1,00.10 <sup>-10</sup>
CSH <sub>i</sub> (mol/m <sup>3</sup> )	1846
S <sub>r_atm</sub>	0,256
p <sub>c_atm</sub> (Pa)	1,00.10 <sup>5</sup>

Nesta simulação, o material foi considerado em equilíbrio hídrico com a câmara de carbonatação. Os graus de saturação S<sub>r0</sub> e S<sub>r\_atm</sub> são então idênticos. A isoterma de desorção escolhida foi a proposta por Baroghel-Bouny *et al.* (1999). A carbonatação foi simulada para 4 materiais onde o coeficiente de difusão do CO<sub>2</sub> e o tamanho dos cristais de portlandita são apresentados na tabela 29.

Tabela 29 – Dados de entrada para os diferentes materiais

Parâmetro	material A	material B	material C	material D
$D_c$ (m <sup>2</sup> /s)	$1,00 \cdot 10^{-5}$	$1,00 \cdot 10^{-5}$	$2,00 \cdot 10^{-5}$	$1,80 \cdot 10^{-5}$
$r_0$ (m)	$3,00 \cdot 10^{-5}$	$6,00 \cdot 10^{-5}$	$6,00 \cdot 10^{-5}$	$4,50 \cdot 10^{-5}$

Os resultados das simulações são apresentados na figura 92 na forma de curvas, expressando a variação das profundidades carbonatadas em função do tempo.

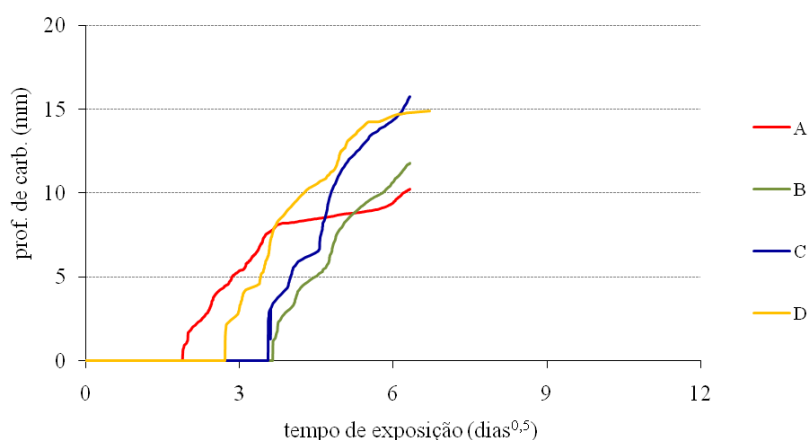


Figura 92 – Resultados das simulações com o modelo de Duprat, Sellier e Nguyen (2006)

As curvas obtidas apresentam um tempo de retardo ao final do qual inicia a carbonatação. Isto se explica pela escolha do critério adotado para a carbonatação: no modelo, o material é dito carbonatado quando 50% da portlandita são consumidos. O tempo de retardo é o tempo necessário para carbonatar a portlandita situada na superfície do material. Para o mesmo coeficiente de difusão do CO<sub>2</sub>, o tempo de retardo do material B que tem os maiores cristais de portlandita é maior que do material A. Para o mesmo tamanho de cristais de portlandita, o material C onde o coeficiente de difusão é maior, para um tempo de retardo ligeiramente menor que para o material B. Este parâmetro tem menor influência que o precedente sobre o tempo de retardo, o que é mostrado na comparação dos resultados entre os materiais C e D.

Após uma breve fase de crescimento rápido da profundidade de carbonatação, esta segue uma lei que se pode facilmente assimilar a uma função em raiz quadrada do tempo. A inclinação deste regime é fortemente ligada ao coeficiente de difusão do CO<sub>2</sub>. As curvas dos materiais A

e B são os praticamente as mesmas, e dos materiais C e D são vizinhas e mais elevadas que as anteriores.

Para o material A se observa que o regime em raiz quadrada do tempo muda rapidamente de inclinação. Uma mudança de inclinação é também observada um pouco mais tarde para o material D. Os autores do modelo explicam este resultado pela redução da velocidade de difusão do  $\text{CO}_2$  na camada de calcita que cerca os cristais de portlandita. Para uma dada duração de reação da portlandita, quanto mais os cristais são pequenos, mais a quantidade de calcita formada é importante e mais a diminuição da velocidade do regime de difusão toma importância. Neste caso, a mudança de inclinação interfere mais cedo.

As curvas assim obtidas pelas simulações podem ser analisadas logicamente, mas ao se interessar pelos valores obtidos para a profundidade de carbonatação, se constata que as diferenças obtidas são bastante importantes levando em conta as flutuações relativamente limitadas dadas às grandezas de entrada onde a medida é complicada. Por exemplo, ao se comparar as profundidades de carbonatação previstas para os quatro materiais testados após duas semanas de carbonatação acelerada, os resultados variam entre 5 e 10 mm, o que é considerável.

### 5.2.3 Conclusões sobre o modelo de Duprat, Sellier e Nguyen (2006)

O modelo de Duprat, Sellier e Nguyen (2006) é baseado na descrição rigorosa dos fenômenos que intervêm no ensaio de carbonatação. Isto conduz a um sistema de equações difíceis de serem resolvidas e faz intervir um grande número de dados sobre o material. As simulações feitas sobre um ensaio acelerado mostram que os resultados são muito sensíveis às grandezas difíceis de medir, tais como o coeficiente de difusão do  $\text{CO}_2$  e o tamanho dos cristais de portlandita. O poder preditivo deste modelo é então limitado e decidiu-se avaliar o modelo simplificado desenvolvido por Hyvert (2009).

## 5.3 O MODELO DE CARBONATAÇÃO DE HYVERT (2009)

Hyvert (2009) propôs a utilização de um modelo simplificado de carbonatação para prever a profundidade de carbonatação natural a partir de ensaios acelerados. O modelo foi desenvolvido a partir de três tipos de cimento Portland (CP I, CP II e CP III franceses, muito

semelhantes aos cimentos CP I, CP II e CP III brasileiros). Na sequência, é proposta sua adaptação para o caso dos cimentos pozolânicos.

### 5.3.1 Apresentação do modelo de Hyvert

Este modelo é baseado nos mesmos fundamentos do modelo de Duprat, Sellier e Nguyen (2006), mas sua formulação é simplificada, pois não leva em consideração os movimentos de água no material em curso de carbonatação. Do ponto de vista prático, isto corresponde à situação na qual se viu situado o programa experimental deste trabalho, saber o caso onde o ensaio acelerado é realizado em corpos-de-prova previamente condicionados para estarem em equilíbrio hídrico com a câmara de carbonatação, sem alterar o fenômeno. O modelo de Hyvert (2009) deveria permitir a dedução, a partir das medidas da profundidade de carbonatação acelerada, das profundidades de carbonatação obtidas em equilíbrio hídrico com o ar atmosférico e a temperatura do ensaio. Na equação de conservação de massa de água, o termo fonte traduz a formação de água que resulta da carbonatação dos hidratos. Assim, mesmo se o material está em equilíbrio hídrico com a câmara antes do ensaio, este equilíbrio é rompido pelo deslocamento de água devida à carbonatação. O modelo negligencia este termo fonte e considera então que o material e a câmara de carbonatação permanecem em equilíbrio hídrico durante todo o ensaio.

O modelo de carbonatação proposto por Hyvert (2009) supõe que a carbonatação avança como uma frente. Se não há troca de umidade entre o material e o ar do ambiente, a profundidade de carbonatação é dada pela integração da equação de conservação de massa de  $\text{CO}_2$ . O autor supõe que a quantidade de  $\text{CO}_2$  que chega ao nível da frente (em  $x_c$ ) durante o tempo  $dt$  é totalmente consumida pela reação de carbonatação do material compreendido entre as profundidades  $x_c$  e  $x_c+dx_c$ , o que se traduz por um avanço  $dx_c$  desta frente (ver a figura 93).

Se o gradiente de pressão é constante entre 0 e  $x_c$  e vale  $\frac{P_0}{x_c}$ , a equação de conservação pode

ser escrita (equação 42):

$$Q \cdot dx = \frac{D_{\text{CO}_2}}{R.T} \cdot \frac{P_0}{x_c} \cdot dt \quad \text{Equação 42}$$

Onde:

$Q$  = quantidade de cálcio carbonatável no material ( $\text{mol/m}^3$  de material);

$x_c$  = profundidade carbonatada (m);

$D_{\text{CO}_2}$  = coeficiente de difusão do  $\text{CO}_2$  na zona carbonatada ( $\text{m}^2/\text{s}$ );

$P_0$  = pressão parcial de  $\text{CO}_2$  na superfície do material (Pa);

$t$  = tempo (s);

$R$  = constante dos gases perfeitos ( $\text{J/mol/K}$ );

$T$  = temperatura (K).

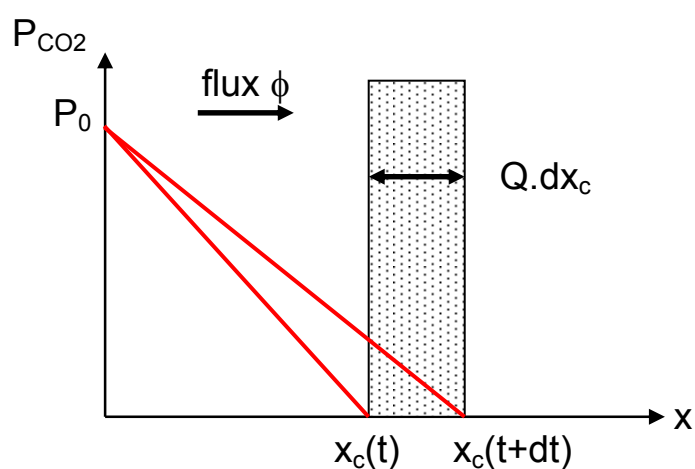


Figura 93 – Difusão do  $\text{CO}_2$  com a frente de carbonatação

A integração da equação 42 conduz à equação 43, bem conhecida:

$$x_c = \sqrt{\frac{2 \cdot D_{\text{CO}_2} \cdot P_0 \cdot t}{Q \cdot R \cdot T}} \quad \text{Equação 43}$$

Para um tempo  $t_0$  fixo a equação 43 é igual à equação 44:

$$x_c = K \cdot \sqrt{P_0} \quad \text{Equação 44}$$

Onde  $K$  é dado pela equação 45:

$$K = \sqrt{\frac{2 \cdot D_{\text{CO}_2} \cdot t_0}{Q \cdot R \cdot T}} \quad \text{Equação 45}$$

Teoricamente, K é independente da pressão de CO<sub>2</sub>.

Para verificar este resultado, o autor do modelo realizou ensaios de carbonatação com 0,03%, 10%, 25% e 50% de CO<sub>2</sub>. Ele mostra que K varia com a pressão de CO<sub>2</sub>, o que invalida a equação 45 e não o permite prever a carbonatação natural a partir dos ensaios acelerados.

Hyvert (2009) constatou que na zona carbonatada, a portlandita, a etringita e os aluminatos são completamente consumidos tanto para as baixas pressões de CO<sub>2</sub> (0,03%), quanto para as altas pressões (50%). Como dito anteriormente, apesar da formação de uma camada superficial pouco permeável em torno do cristal de portlandita, isto não significa que o cristal não possa ser totalmente consumido. O autor supõe então, que a portlandita, a fase AF<sub>m</sub> e a fase AF<sub>t</sub> são carbonatáveis, independente de qual seja a pressão de CO<sub>2</sub>. A equação 46, dá as quantidades de cálcio carbonatável (expressas em mol por unidade de volume de material) contido nesses três hidratos:

$$Q1 = (CH + 4 \cdot AF_m + 6 \cdot AF_t) \cdot \varphi_p \quad \text{Equação 46}$$

Onde:

Q1 = número de moles de cálcio contidos nos três tipos de hidratos (a portlandita, a etringita e os aluminatos) (mol/l de material);

CH = número de moles de cálcio carbonatável na portlandita (mol/l de pasta);

AF<sub>m</sub> = número de moles de cálcio carbonatável nos monosulfoaluminatos (mol/l de pasta);

AF<sub>t</sub> = número de moles de cálcio carbonatável na etringita (mol/l de pasta);

φ<sub>p</sub> = fração de pasta no material (l de pasta de cimento/l de material).

Hyvert (2009) mostrou por DRX que os anidros não se carbonatam. Ao contrário, Castellote *et al.* (2009) mediram por três técnicas diferentes (<sup>29</sup>M.A.S-RMN, ATG e DRX) os produtos resultantes dos ensaios de carbonatação de pastas de cimento com quatro teores de CO<sub>2</sub> (0,03%, 3%, 10% e 100%) e eles constataram que após a carbonatação, ainda há cimento anidro e etringita para os teores de CO<sub>2</sub> de 0,03% e 3%; para 10% de CO<sub>2</sub>, a etringita desaparece e resta uma pequena quantidade de cimento anidro; para 100% de CO<sub>2</sub>, a etringita

e o cimento anidro desaparecem completamente. Como já discutido na revisão da literatura (item 2.1.2), para que ocorra a carbonatação dos anidros, é necessária a presença de água, que inicialmente vai hidratar os compostos e então estes poderão de carbonatar. A quantidade de água formada nas reações de carbonatação em diferentes concentrações de CO<sub>2</sub> pode influenciar esse processo de maneiras diferentes e, por isso, conduzir a resultados distintos. Na sequência, será feita a mesma suposição de Hyvert (2009), que somente os hidratos formados durante a hidratação podem se carbonatar, ou seja, não será adotada a suposição de hidratação do cimento anidro com a água gerada na carbonatação.

De acordo com o autor do modelo, quando se aumenta a concentração de CO<sub>2</sub>, se aumenta também a quantidade de produtos formados pela carbonatação (calcita). Este resultado foi igualmente observado por Castellote *et al.* (2009). Segundo Hyvert (2009), os ensaios de ATG e DRX mostram que, para as altas pressões de dióxido de carbono, o suplemento de calcita é formado pela carbonatação dos C-S-H. Estes resultados podem explicar a diminuição da porosidade determinada pela porosimetria por intrusão de mercúrio, e é razoável de se admitir que o coeficiente de difusão do CO<sub>2</sub> na zona carbonatada depende da pressão parcial de CO<sub>2</sub>. A quantidade Q1 de cálcio carbonatável, contida na portlandita, na etringita e no monossulfatoaluminato, é somada então à quantidade Q2 contida nos C-S-H. Este valor depende da quantidade de C-S-H e da pressão de CO<sub>2</sub>, e pode ser escrita conforme a equação 47:

$$Q2 = C2 \cdot f_Q(P_{CO_2}) \cdot \varphi_p \quad \text{Equação 47}$$

Onde:

Q2 = quantidade molar de cálcio do C-S-H carbonatável a uma pressão parcial de CO<sub>2</sub> P<sub>CO2</sub> (em mol/l de material);

C2 = número de moles de cálcio no C-S-H do material (mol/l de pasta);

f<sub>Q</sub>(P<sub>CO2</sub>) = função buscada, fornece a fração de cálcio carbonatável no C-S-H em função da pressão de exposição (adimensional).

No modelo, o número de moles de cálcio no C-S-H do material considerado (mol/l de material considerado) é levado em conta por C2' (mol/ litro de material considerado), na equação 48:



$$C2' = C2 \cdot \varphi_p \quad \text{Equação 48}$$

A carbonatação do C-S-H insere uma diminuição do coeficiente de difusão do CO<sub>2</sub> na zona carbonatada, que pode ser levada em conta pela equação 49:

$$D_{CO_2} = \frac{D_{CO_2}^0}{f_D(Q2)} \quad \text{Equação 49}$$

Onde:

$D_{CO_2}$  = coeficiente de difusão do CO<sub>2</sub> (m<sup>2</sup>/s) na zona carbonatada e malta pressão;

$D_{CO_2}^0$  = coeficiente de difusão do CO<sub>2</sub> na zona carbonatada para uma exposição em pressão natural de CO<sub>2</sub> (m<sup>2</sup>/s);

$f_D(Q2)$  = função procurada, depende da quantidade de cálcio carbonatável a partir do C-S-H (adimensional).

Segundo Sellier (2006), o sistema apresentado na equação 50 permite estimar a quantidade de hidratos produzidos no caso de um cimento CP I, no momento em que a hidratação é completa:

$$\begin{cases} \text{CaO} = \text{CH} + 1,65 \cdot \text{CSH} + 4 \cdot \text{AF}_m + 6 \cdot \text{AF}_t (\text{ou } 3 \cdot \text{C}_3\text{AH}_6) \\ \text{SiO}_2 = \text{CSH} \\ 2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 = 2 \cdot \text{AF}_t (\text{ou } 2 \cdot \text{C}_3\text{AH}_6) + 2 \cdot \text{AF}_m \\ \text{SO}_3 = 3 \cdot \text{AF}_t (\text{ou } 0 \cdot \text{C}_3\text{AH}_6) + \text{AF}_m \end{cases} \quad \text{Equação 50}$$

Onde:

CH = quantidade molar de portlandita (mol/l de pasta de cimento);

CSH = quantidade molar de C-S-H (C/S=1,65) (mol/l de pasta de cimento);

AF<sub>m</sub> = quantidade molar de monosulfoaluminato (mol/l de pasta de cimento);

AF<sub>t</sub> = quantidade molar de trissulfoaluminato (mol/l de pasta de cimento);

C<sub>3</sub>AH<sub>6</sub> = quantidade molar de hexahidrato (mol/l de pasta de cimento);

CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SO<sub>3</sub> = quantidade molar de óxidos contidos no cimento anidro (mol/l de pasta de cimento).

O sistema supõe inicialmente a presença de etringita, mas, se a quantidade de sulfato de cálcio é muito pequena, ele supõe a formação do hexahidrato (COLLEPARDI *et al.*, 1979).

Para calcular as quantidades de cálcio carbonatável, leva-se em consideração um determinado grau de hidratação do cimento no momento em que inicia a carbonatação. A quantidade de produtos formados é então calculada supondo que todos os hidratos do cimento possuem o mesmo grau de hidratação.

Para calcular os produtos formados por outros cimentos, Hyvert (2009) faz referência ao trabalho de Sisomphon e Franke (2007).

Para as funções  $f_Q$  e  $f_D$ , Hyvert (2009) sugere a equação 51 e a equação 52, respectivamente:

$$f_Q(P_{CO_2}) = \left( \frac{P_{CO_2}}{P_{atm}} \right)^n \quad \text{Equação 51}$$

$$f_D(Q_2) = 1 + \alpha \cdot Q_2 \quad \text{Equação 52}$$

Onde  $\alpha$  e  $n$  são parâmetros a serem calibrados. Como as quantidades  $Q_1$  e  $C_2'$  levam em conta a composição do cimento, o autor do modelo considera que os parâmetros  $\alpha$  e  $n$  não dependem do tipo de cimento, nem da composição do material (concreto, argamassa). Segundo o autor, o parâmetro  $n$  reflete somente a "afinidade química" dos C-S-H com vistas à pressão de  $CO_2$  enquanto que  $\alpha$  reflete a influência sobre a difusão do  $CO_2$ , na diminuição da porosidade devida à carbonatação dos C-S-H.

Se estas equações forem inseridas na equação de equilíbrio de  $CO_2$ , obtém-se a equação 53:

$$\left( \varphi_g + \frac{C_2'}{P_{atm}} \cdot \left( \frac{P_{CO_2}}{P_{atm}} \right)^{n-1} \right) \cdot \frac{\partial P_{CO_2}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left( \frac{D_{CO_2}^0}{R \cdot T \cdot \left( 1 + \alpha \cdot C_2' \cdot \left( \frac{P_{CO_2}}{P_{atm}} \right)^n \right)} \cdot \frac{\partial P_{CO_2}}{\partial x} \right) \quad \text{Equação 53}$$

Onde  $\varphi_g$  é a fração volumétrica gasosa dos poros do material,  $P_{atm}$  a pressão atmosférica e  $P_{CO_2}$  a pressão de  $CO_2$  na fase gasosa. O coeficiente  $D_{CO_2}^0$  depende da porosidade do material. Esta equação deve ser resolvida com as condições limite da equação 54:

$$\begin{cases} P_{CO_2}(0, t) = P_0 \\ -\frac{D_{CO_2}}{R \cdot T} \cdot \left( \frac{\partial P_{CO_2}}{\partial x} \right)_{x=x_c} = Q1 \cdot \frac{dx_c}{dt} \end{cases} \quad \text{Equação 54}$$

A segunda das condições limite expressa a carbonatação dos produtos Q1 que ocorre independentemente da pressão. Assim, em baixas pressões, a solução da equação 53 tende para aquela obtida tradicionalmente, sem levar em conta a pressão. Encontra-se então a solução clássica onde a profundidade carbonatada é proporcional à raiz quadrada do tempo. Quando a pressão aumenta, a solução se distancia desta solução de referência e o sistema [equação 53-equação 54] não tem mais solução analítica. Todavia, com o objetivo de obter uma solução analítica aceitável, é proposta uma aproximação. Esta consiste em destacar; que a quantidade de  $CO_2$  consumida entre  $x = 0$  e  $x = x_c$  é dada pela equação 55:

$$I2 = \int_0^{x_c} C2' \cdot \left( \frac{P_{CO_2}}{P_{atm}} \right)^n dx \quad \text{Equação 55}$$

Admitindo-se que o perfil pode ser aproximado por uma forma linear do tipo (equação 56):

$$P_{CO_2} = P_0 \cdot \left( 1 - \frac{x}{x_c} \right) \quad \text{Equação 56}$$

Então se tem a equação 57:

$$I2 = \frac{C2'}{n+1} \cdot \left( \frac{P_0}{P_{atm}} \right)^n \cdot x_c \quad \text{Equação 57}$$

Neste ponto, o autor propõe um balanço de massa global sobre o conjunto da zona carbonatada. Este consiste em escrever que o fluxo que penetra no material em  $x=0$ , serve por um lado para aumentar  $I_2$ , e por outro, faz avançar a frente, como na equação 58:

$$\frac{D_{CO_2}^0}{R \cdot T \cdot \left(1 + \alpha \cdot C_2' \cdot \left(\frac{P_0}{P_{atm}}\right)^n\right)} \cdot \frac{P_0}{x_c} \cdot dt = \left( \frac{C_2'}{n+1} \cdot \left(\frac{P_0}{P_{atm}}\right)^n + Q_1 \right) \cdot dx_c \quad \text{Equação 58}$$

Após a integração, se obtém a equação 59:

$$x_c(t) = \sqrt{\frac{2 \cdot D_{CO_2}^0 \cdot P_0 \cdot t}{R \cdot T \cdot \left(1 + \alpha \cdot C_2' \cdot \left(\frac{P_0}{P_{atm}}\right)^n\right) \cdot \left(\frac{C_2'}{n+1} \cdot \left(\frac{P_0}{P_{atm}}\right)^n + Q_1\right)}} \quad \text{Equação 59}$$

A equação 59 representa o modelo de carbonatação proposto por Hyvert (2009). Na calibração<sup>28</sup> feita pelo autor, os valores encontrados para as argamassas por ele estudadas, são apresentados na tabela 30.

Tabela 30 – Valores encontrados para os parâmetros a serem calibrados

Argamassa à base de	CEM I	CEM II	CEM III
$D_{CO_2}^0$ ( $10^{-8}$ m <sup>2</sup> /s)	5,7	6,0	7,2
$\alpha$ (l/mol)	23,5		
n (adimensional)	0,67		

Fonte: Hyvert (2009)

Uma análise mais aprofundada destes resultados e as considerações sobre o modelo são feitas no final do capítulo.

<sup>28</sup> A calibração é feita minimizando a soma dos erros quadrados entre os resultados experimentais e os calculados pelo modelo.

### 5.3.2 Adaptações do modelo simplificado

#### 5.3.2.1 Caso dos cimentos comuns

As quantidades carbonatáveis de cada hidrato do cimento levadas em conta no modelo são função do grau de hidratação, o que torna a sua determinação muito importante. Os ensaios de carbonatação foram feitos após cura úmida de 28 dias, seguida de condicionamento de cerca de 40 dias. Pode-se considerar como primeira aproximação, que o grau de hidratação é próximo do obtido após um tempo infinito. Diversos trabalhos sobre o grau de hidratação do cimento foram analisados: o de Waller (2000), o de Wang, Zhang e Sun (2004) e o de Buffo-Lacarrière (2007).

Waller (2000) apresenta um modelo para calcular o grau de hidratação dos cimentos sem adições minerais, a partir de medidas do calor liberado na hidratação do cimento, conforme a equação 60:

$$\alpha_c(\infty) = 1 \cdot \exp[-A \cdot a/c] \quad \text{Equação 60}$$

Onde:

$\alpha_c(\infty)$  = grau de hidratação máximo do cimento, após um tempo considerado infinito, ou seja, quando a hidratação acaba;

A = constante determinada minimizando a soma das diferenças quadradas entre as previsões do modelo e os resultados obtidos pelo autor e outros pesquisadores (PARRY-JONES *et al.*, 1988; JUSTNES *et al.*, 1992). Este valor é igual a 3,3;

a/c = relação água/cimento.

Buffo-Lacarrière (2007) também apresenta um modelo para a hidratação dos cimentos, cujos resultados estão de acordo com os dados experimentais apresentados por Waller (2000). No entanto, este modelo necessita diversos parâmetros de entrada, tais como:

- o volume de hidratos produzidos pela hidratação do cimento;
- a massa específica dos anidros;
- a energia de ativação dos anidros;
- o calor liberado pela hidratação;
- a quantidade de água consumida pela hidratação completa;
- três parâmetros de calibração da lei da cinética.

O modelo de Buffo-Lacarrière (2007) é operado no *software Castem*, o que o torna mais difícil de ser aplicado quando comparado ao modelo de Waller (2000).

Os resultados encontrados por Waller (2000) para o CP I são semelhantes aos valores experimentais encontrados na literatura e próximos dos fornecidos pelo modelo de Buffo-Lacarrière (2007). Em face disso, decidiu-se utilizar o modelo mais simples, o de Waller, para calcular o grau de hidratação do CP I.

#### 5.3.2.2 Caso dos cimentos pozolânicos

Como dito no item 3.2.1, no presente trabalho fez-se uso de um cimento composto por 60% de CP I e 40% de cinza volante, o qual é aqui chamado de cimento tipo CPI IV<sup>29</sup>. Para modelar sua hidratação, a reação da parte constituída pelo CP I será separada da reação pozolânica. Esta convenção permite calcular as quantidades de hidratos formados, sem descrever a cronologia das reações.

A hidratação da pasta de cimento tipo CP IV é então dividida em duas etapas:

Etapa 1: hidratação do CP I contido no cimento (60%);

Etapa 2: reação pozolânica.

Para esta segunda etapa, considera-se apenas a parte vítrea (ou amorfa) da sílica da cinza volante, pois somente essa fração é responsável pela reação pozolânica. Do mesmo modo, a cinza volante forma certa quantidade de  $AF_m$  e de  $C_3AH_6$ , e para isso também se considera que estes hidratos provêm apenas da parte amorfa dos óxidos que podem reagir ( $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ ) e o  $SO_3$ .

Por hipótese, a relação C/S do C-S-H secundário escolhida é igual a 1. Esta escolha é baseada nos dados da literatura (WANG; ZHANG; SUN, 2004) que indicam valores que abrangem este valor de 1.

A quantidade de C-S-H secundário formado a partir das reações pozolânicas é obtido levando em conta o valor mínimo entre as duas quantidades dadas pela equação 61:

---

<sup>29</sup> A notação adotada aqui é convencional: não se trata de um cimento industrial, mas uma mistura de dois compostos que se assemelham a um CP IV, sem ser um propriamente dito. A taxa de 40% de cinza volante foi escolhida para respeitar a conformidade da mistura para três normas: a brasileira (ABNT, 1991 – NBR 5736), a francesa (NF EN 197-1) e a americana (ASTM, 1998 – C595) que definem os cimentos pozolânicos.

$$\min\{[CH]_c; [SiO_2]_{CV}\} = [CSH]_{sec} \quad \text{Equação 61}$$

Onde:

$CH_c$  = quantidade de portlandita gerada pela hidratação do CP I;

$SiO_{2CV}$  = quantidade de sílica reativa contida na cinza volante;

$[CSH]_{sec}$  = quantidade de C-S-H secundário formado pela reação pozolânica.

Em um primeiro momento, se supõe uma hidratação completa dos compostos anidros reativos e em seguida é aplicado um grau de hidratação único para o conjunto de hidratos para estimar as quantidades formadas. No parágrafo seguinte, é discutido o cálculo do grau de hidratação a ser considerado.

Para os cimentos pozolânicos, Waller (2000) propõe também um método de cálculo do grau de hidratação do cimento contido na mistura. Para isso, o autor considera um termo redutor ( $\delta$ ) da relação a/c com relação ao modelo anterior apresentado para o CP I, como mostrado na equação 62:

$$\alpha_c(\infty) = 1 - \exp[-A \cdot (E/C - \delta)] \quad \text{Equação 62}$$

$\delta$  é determinado conforme a equação 63:

$$\delta = D_z \cdot \min\left[\frac{z}{c}; \frac{x \cdot \alpha_c(\infty)}{x_z}\right] \cdot \exp(F \cdot a/c) \quad \text{Equação 63}$$

Onde:

$D_z$  = coeficiente de proporcionalidade entre a quantidade de água absorvida e a quantidade de pozolana que reagiu. Este valor é determinado minimizando a soma dos erros quadrados entre as medidas e as previsões do modelo (g/g);

$z$  = quantidade inicial de pozolana, em g;

$c$  = quantidade inicial de cimento, em g;

$x$  = quantidade de portlandita produzida durante a hidratação completa de um grama de cimento, em g/g;

$\alpha_c$  = grau de hidratação do cimento, em %;

$x_z$  = quantidade de portlandita consumida por um grama de pozolana, g/g;

F = constante que não depende do tipo de pozolana, calibrada sobre o conjunto de resultados correspondente aos 45 concretos do estudo experimental do autor (adimensional).

Para obter o valor de  $\alpha_c(\infty)$  contido na equação 63, o autor calculou inicialmente o grau de hidratação do cimento sem adição, ou seja, sem o termo de ( $\delta = 0$ ); em seguida foi determinado  $\delta$  conforme a equação 63 e recalculado  $\alpha_c(\infty)$  pela equação 62. Assim procedeu por interação, considerando para o cálculo de  $\delta$ , o valor de  $\alpha_c$  obtido na interação precedente até que o erro entre dois valores sucessivos de  $\alpha_c$  não fosse mais significativo. Fazendo esse procedimento o pesquisador encontrou os seguintes valores:  $D_z = 0,4$  g/g e  $F = 1,6$ .

Para calcular a quantidade x de portlandita ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), em g/g, produzida durante a hidratação completa de um grama de cimento, Waller (2000) apresenta a equação 64:

$$x = 0,42 \cdot \varphi_{C_3S} + 0,13 \cdot \varphi_{C_2S} \quad \text{Equação 64}$$

Onde:

$\varphi_{C_3S}$  = quantidade de  $C_3S$  do cimento (%);

$\varphi_{C_2S}$  = quantidade de  $C_2S$  do cimento (%).

Waller (2000) ressalta que para um cimento Portland comum, o valor de x fica em torno de 0,3 g/g de cimento hidratado. O autor fornece também um valor para a quantidade de portlandita consumida por um grama de cinza volante ( $x_z$ ): 1 g de portlandita/g de CV.

No presente trabalho, considerou-se este valor muito elevado e não se sabe se ele se refere à cinza volante total ou somente a fração reativa. Por isso, calculou-se  $x_z$  supondo uma fração de  $\text{SiO}_2$  reativo na cinza volante igual a 42% (resultado encontrado por Hoppe Filho (2008)):

Massa molar:  $\text{CaO} = 56,1\text{g}$

$\text{SiO}_2 = 60,1\text{g}$

Se for considerar  $\rightarrow \text{SiO}_{2(\text{CV})} + 1 \text{ CH} = \text{CSH} \quad \rightarrow \quad \text{Então: } \frac{1 \times 74,1}{60,1} = 1,23\text{g CH / g SiO}_2$

Se em 1g de CV têm-se 0,42 g de  $\text{SiO}_2$  reativo  $\rightarrow 1 \text{ g SiO}_2 \text{ reativo} = 1/0,42 \text{ g CV}$

Então:



$$\frac{1,23\text{g CH}}{\frac{1}{0,42}\text{g CV}} = 0,52\text{g CH / g CV}$$

Waller (2000) calibrou seu modelo para encontrar os coeficientes  $D_z$  e  $F$  utilizando  $x_z = 1$  g  $\text{Ca(OH)}_2/\text{g CV}$ . Como se considerou inadequado o valor de  $x_z$  por ele utilizado, o mesmo ocorre para os valores dos outros coeficientes calibrados com esse valor.

No modelo de Waller (2000), quanto mais se aumenta a quantidade de cinza volante, mais o grau de hidratação do cimento contido na mistura decresce, pois sobra menos clínquer a ser hidratado, diminuindo a hidratação da mistura. Ao contrário do que diz Waller (2000), Wang, Zhang e Sun (2004) mostram que o grau de hidratação aumenta com a quantidade de cinza volante o que é explicado pelo papel que a cinza tem de atuar como ativadora da hidratação do cimento. Estes últimos autores propõem um modelo de hidratação das pastas de cimento com cinzas volantes onde as variáveis de entrada são a composição química do cimento e da cinza volante, as relações  $\text{CaO/SiO}_2$  do cimento e da cinza volante, a porosidade por intrusão de mercúrio e a quantidade de  $\text{Ca(OH)}_2$ . Os autores não comparam os resultados encontrados aplicando o modelo com ensaios experimentais, nem aos resultados de outras pesquisas.

O grau de hidratação global vai depender do tipo de adição, da sua finura e reatividade. O interesse no caso específico deste trabalho, diz respeito ao grau de hidratação final, e portanto, decidiu-se considerar que o grau de hidratação do clínquer no tipo CP IV é o mesmo que no CP I. Para as reações pozolânicas, considerou-se que a quantidade de C-S-H secundário é determinada pela quantidade de sílica reativa e pela quantidade de portlandita produzida pela hidratação dos 60% de CP I (após aplicação do grau de hidratação calculado anteriormente). Estes cálculos são fundamentados em hipóteses bastante fortes, mas os valores obtidos podem ser facilmente alterados assim que o estado de conhecimento sobre as reações nos cimentos compostos permitir. Obtém-se assim uma versão modificada do modelo de Hyvert no caso de cimentos pozolânicos. Este modelo de carbonatação modificado é aplicado utilizando os resultados experimentais do presente trabalho.

### 5.3.3 Aplicação do modelo aos dados desta pesquisa

Vale lembrar que, os resultados de profundidade de carbonatação utilizados para as simulações neste modelo são: para o ensaio natural, o ambiente interno (sala climatizada:  $20^\circ\text{C}$  e  $\text{UR}=70\%$ ) e para o ensaio acelerado, grupo 1, RILEM, (figura 21, página 98).

Lembra-se que foram utilizados dois cimentos na presente pesquisa: CP I e tipo CP IV (60% CP I + 40% CV). A composição química do cimento CP I (tabela 9) e da cinza volante (tabela 10) utilizados permitem calcular os parâmetros Q1 (equação 46) e C2' (equação 48).

Com a composição das argamassas (kg/m<sup>3</sup>), apresentada na tabela 14, e as massas molares (g/mol) dos elementos químicos presentes no cimento (tabela 31) e dos óxidos (tabela 32) calcula-se a composição do cimento em moles/kg de cimento.

Tabela 31 – Valores das massas molares, em g/mol

Elemento químico	Massa molar
Fe	55,80
Al	27,00
Ca	40,10
O	16,00
S	32,10
H	1,00
Si	28,10
Na	23,00
K	39,10
Mg	24,30

Tabela 32 – Massas molares dos óxido do cimento, em g/mol

Elemento	Massa molar
SiO <sub>2</sub>	60,1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	102,0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	159,6
MgO	40,3
CaO	56,1
Na <sub>2</sub> O	62,0
K <sub>2</sub> O	94,2
SO <sub>3</sub>	80,1
H <sub>2</sub> O	18,0

A primeira etapa consiste em calcular a composição do cimento em moles/kg de cimento. Por exemplo, para o Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:

Em 100% cimento → 2,79% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>  
 1kg cimento → 0,0279 kg Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ou 27,9g

Ou seja, 0,175 moles de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

O mesmo cálculo é feito para os outros compostos. Os resultados são mostrados na tabela 33. A segunda coluna apresenta os dados para as argamassas de CP I. A composição do tipo CP IV pode ser obtida somando a terceira coluna (contribuição da parte de 60% de CP I) e a quarta coluna (40% de cinza volante).

Tabela 33 – Composição do cimento, em moles/kg de cimento

Elemento	100% CP I	60% CP I	40% cinza volante
SiO <sub>2</sub>	3,12	1,87	4,19
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,42	0,25	0,94
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,17	0,10	0,12
MgO	1,00	0,60	0,07
CaO	10,9	6,54	0,19
Na <sub>2</sub> O	0,01	0,01	0,01
K <sub>2</sub> O	0,08	0,05	0,03
SO <sub>3</sub>	0,39	0,23	0,02
H <sub>2</sub> O	2,43	1,46	0,22

Para calcular a composição da pasta em moles, deve-se conhecer a massa de cimento por litro de pasta. As proporções unitárias dos materiais constam na tabela 13.

Lembra-se que as massas específicas ( $\gamma$ ) dos materiais são iguais a: 3,11 g/cm<sup>3</sup> para o CP I, 2,36 g/cm<sup>3</sup> para a cinza volante, 2,75 g/cm<sup>3</sup> para o tipo CP IV e 2,63 g/cm<sup>3</sup> para a areia.

A equação 65 permite encontrar a quantidade de cimento em um m<sup>3</sup> de concreto:

$$C = \frac{1 - v}{\frac{c}{\gamma_c} + \frac{s}{\gamma_s} + \frac{g}{\gamma_g} + \frac{e}{\gamma_e}} \quad \text{Equação 65}$$

Onde:

C = consumo de cimento kg/m<sup>3</sup> de concreto;

c = massa relativa de cimentos no concreto =1 (kg/kg de cimento);

s = massa relativa de areia no concreto (kg/kg de cimento);

g = massa relativa de brita no concreto (kg/kg de cimento);

v = volume de ar aprisionado (m<sup>3</sup>);

e = massa relativa de água no concreto (kg/kg de cimento);

$\gamma_c$  = massa específica do cimento (kg/m<sup>3</sup>);

$\gamma_s$  = massa específica da areia (kg/m<sup>3</sup>);

$\gamma_g$  = massa específica da brita ( $\text{kg/m}^3$ );

$\gamma_e$  = massa específica da água ( $\text{kg/m}^3$ );

Assim, si se deseja calcular a quantidade de cimento para  $1 \text{ m}^3$  de pasta, se retira a areia e a brita da equação 65 e se obtém a equação 66:

$$C = \frac{1 - v}{\frac{c}{\gamma_c} + \frac{e}{\gamma_e}} \quad \text{Equação 66}$$

O ar aprisionado não foi medido e foi suposto ser igual a 2%. Por exemplo, para o cimento CP I e relação a/c igual a 0,40, tem-se:

$$C = \frac{1000 - 20}{\frac{1}{3,11} + \frac{0,4}{1}} = 1358 \text{ kg/m}^3 = 1,36 \text{ kg/l}$$

Para cada litro de pasta, serão utilizados 1,36 kg de cimento. Para as outras composições, obtêm-se os resultados da tabela 34.

Tabela 34 – Massa de cimento por litro de pasta (kg/l)

Identificação	massa de cimento kg/l pasta
I40	1,36
I55	1,12
I70	0,96
IV40	1,28
IV55	1,07
IV70	0,92

Seguindo o mesmo princípio, ter-se-á:

Em 1 kg de cimento, têm-se 0,175 moles de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  o que significa 0,238 moles de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ /litro de pasta.

Para os outros compostos, os resultados para os cimentos CP I e tipo CP IV são apresentados na tabela 35.

Tabela 35 – Composição do cimento, em moles/kg de cimento

Elemento	CP I a/c=0,40	60% CP I a/c=0,40	40% cinza volante a/c=0,40
SiO <sub>2</sub>	4,24	2,40	5,37
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,57	0,33	1,21
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,24	0,13	0,15
MgO	1,36	0,77	0,09
CaO	14,8	8,39	0,25
Na <sub>2</sub> O	0,02	0,01	0,02
K <sub>2</sub> O	0,11	0,06	0,04
SO <sub>3</sub>	0,53	0,30	0,02
H <sub>2</sub> O	3,30	1,87	0,29
Elemento	CP I a/c=0,55	60% CP I a/c=0,55	40% cinza volante a/c=0,55
SiO <sub>2</sub>	3,51	1,87	4,19
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,48	0,25	0,94
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,20	0,10	0,12
MgO	0,12	0,60	0,07
CaO	12,26	6,54	0,19
Na <sub>2</sub> O	0,01	0,01	0,01
K <sub>2</sub> O	0,09	0,05	0,03
SO <sub>3</sub>	0,44	0,23	0,02
H <sub>2</sub> O	2,73	1,46	0,22
Elemento	CP I a/c=0,70	60% CP I a/c=0,70	40% cinza volante a/c=0,70
SiO <sub>2</sub>	2,99	1,72	3,86
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,41	0,23	0,87
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,17	0,10	0,11
MgO	0,96	0,55	0,06
CaO	10,46	6,03	0,18
Na <sub>2</sub> O	0,01	0,01	0,01
K <sub>2</sub> O	0,08	0,05	0,03
SO <sub>3</sub>	0,37	0,21	0,02
H <sub>2</sub> O	2,33	1,34	0,21

Na sequência, são estimados os produtos de hidratação de acordo com o sistema da equação 50. Os resultados para o cimento CP I são apresentados na tabela 36.

Tabela 36 – Composição da pasta quando 100% do cimento são hidratados, em moles/kg de cimento

Fase 1 hidratação total CP I	100% CP I a/c=0,40	100% CP I a/c =0,55	100% CP I a/c =0,70
Afm	0,53	0,44	0,37
Hexa	0,28	0,24	0,20
CSH C/S 1,65	4,24	3,51	2,99
CH	4,86	4,02	3,43
SiO <sub>2</sub> anidro	0,00	0,00	0,00

De acordo com a equação 60 apresentada por Waller (2000), o grau de hidratação do cimento CP I para as relações a/c de 0,40, 0,55 e 0,70 são  $\alpha_{c,140}=0,73$ ;  $\alpha_{c,155}=0,84$  e  $\alpha_{c,170}=0,90$ , respectivamente.

Levando em consideração estes graus de hidratação, a composição final é calculada e apresentada na tabela 37.

Tabela 37 – Composição da pasta após a aplicação do grau de hidratação do cimento, em moles/kg de cimento

Composição final	100% CP I a/c=0,40	100% CP I a/c=0,55	100% CP I a/c=0,70
Afm	0,38	0,37	0,34
Hexa	0,21	0,20	0,18
CSH C/S 1,65	3,09	2,95	2,69
CH	3,54	3,38	3,09
SiO <sub>2</sub> anidro	1,14	0,56	0,30

No caso do cimento tipo CP IV, o cálculo da hidratação da pasta de cimento foi dividido em três etapas:

Etapa 1: formação dos aluminatos (Afm e Hexa);

Etapa 2: hidratação do CP I contido neste cimento (60%);

Etapa 3: reação pozolânica.

Na etapa 1, os resultados obtidos aplicando a equação 50, são apresentados na tabela 38.

Tabela 38 – Formação dos aluminatos da pasta se 100% do cimento e da cinza vítrea são hidratados em moles/kg de cimento

Etapa 1 : formação dos aluminatos	60% CP I a/c=0,40	40% CV <sup>30</sup> a/c =0,40	60% CP I a/c =0,55	40% CV a/c =0,55	60% CP I a/c =0,70	40% CV a/c =0,70
Afm	0,30	0,02	0,25	0,02	0,21	0,02
Hexa	0,16	0,29	0,13	0,24	0,12	0,21

A etapa 2, de acordo com a equação 50 dá os resultados apresentados na tabela 39.

Tabela 39 – Composição da pasta se 100% do CP I contido no tipo CP IV é hidratado, em moles/kg de cimento

Etapa 2 : hidratação total do CP I	60% CP I a/c=0,40	60% CP I a/c =0,55	60% CP I a/c =0,70
CSH C/S 1,65	2,40	2,01	1,72
CH	2,75	2,30	1,98
SiO <sub>2</sub> anidro	0,00	0,00	0,00

Após a aplicação do grau de hidratação para a fração correspondente ao CP I têm-se a composição mostrada na tabela 40.

Tabela 40 – Composição da pasta após aplicação do grau de hidratação do cimento, em moles/kg de cimento

Hidratação do CP I	60% CP I a/c=0,40	60% CP I a/c =0,55	60% CP I a/c =0,70
Afm	0,22	0,21	0,19
Hexa	0,12	0,11	0,10
CSH C/S 1,65	1,75	1,69	1,55
CH	2,01	1,93	1,78
SiO <sub>2</sub> anidro	0,65	0,32	0,17

Na etapa 3 são estimados os produtos das reações pozolânicas de acordo com a equação 61. Lembra-se que somente a fase vítrea da sílica pode reagir para formar C-S-H secundário e que, considera-se a reação máxima dada pela equação 61. Os resultados são apresentados na tabela 41.

<sup>30</sup> Para este cálculo considera-se apenas a fração vítrea dos compostos para a formação dos aluminatos.

Tabela 41 – Composição da pasta após as reações pozolânicas, em moles/kg de cimento

Etapa 3: reações pozolânicas	40% CV a/c=0,40	40% CV a/c =0,55	40% CV a/c =0,70
CSH <sub>sec</sub> C/S=1	2,01	1,93	1,78
CH	0,00	0,00	0,00
SiO <sub>2</sub> anidro	1,58	1,07	0,80

Finalmente, adicionando as quantidades de aluminatos do cimento com os da cinza volante obtém-se a composição final apresentada na tabela 42.

Tabela 42 – Composição da pasta de tipo CP IV após a aplicação do grau de hidratação do cimento e das reações pozolânicas, em moles/kg de cimento

Composição final	60% CP I + 40% CV – a/c=0,40	60% CP I + 40% CV – a/c=0,55	60% CP I + 40% CV – a/c=0,70
Afm	0,24	0,23	0,21
Hexa	0,40	0,35	0,31
CSH C/S=1,65	1,75	1,69	1,55
CSH <sub>sec</sub> C/S=1	2,01	1,93	1,78
CH	0,00	0,00	0,00
SiO <sub>2</sub> anidro	2,23	1,39	0,97

Para calcular as quantidades Q1 e C2', deve-se conhecer a fração de pasta no material ( $\phi_p$ , em litro de pasta de cimento/litro de material). Por exemplo, na mistura de CP I e a/c=0,40, com as proporções da tabela 14, têm-se:

$$\phi_p = \frac{668,1}{3110} + \frac{267,3}{1000} = 0,491 \text{ litros de pasta/litro de argamassa}$$

Para as outras argamassas têm-se os resultados da tabela 43.

Tabela 43 – Quantidade de pasta de cimento por litro de argamassa (litro/litro)

Identification	litro pasta/litro argamassa
I40	0,49
I55	0,43
I70	0,39
IV40	0,51
IV55	0,44
IV70	0,40



As quantidades Q1 e C2' são calculadas utilizando a equação 46 e a equação 48. Para o exemplo que vem sendo utilizado (CP I, a/c=0,40):

$$Q1 = (CH + 4 \cdot AF_m + 3 \cdot Hexa) \cdot \varphi_p = (3,54 + 4 \cdot 0,38 + 3 \cdot 0,21) \cdot 0,49 = 2,79 \text{ moles/l argamassa}$$

$$C2' = CSH \cdot C/S \cdot \varphi_p = 3,09 \cdot 1,65 \cdot 0,49 = 2,50 \text{ moles/l argamassa}$$

Os resultados para as demais argamassas são apresentados na tabela 44.

Tabela 44 – Valores dos parâmetros Q1 e C2' para as argamassas utilizadas

Identificação	Q1 (mol/l argamassa)	C2' (mol/l argamassa)
I40	2,79	2,50
I55	2,35	2,09
I70	1,95	1,73
IV40	1,10	2,50
IV55	0,87	2,08
IV70	0,71	1,74

Conhecendo os valores dos coeficientes  $\alpha$  e  $n$ , a equação 59 permite então calcular a profundidade de carbonatação. Em seu trabalho, Hyvert (2009) calculou  $\alpha$  e  $n$  e o autor defende que estes valores são independentes da natureza do cimento e da formulação do material. Utilizando os valores de  $\alpha$  (23,5) e  $n$  (0,67) encontrados por Hyvert (2009), calculou-se o coeficiente de difusão do CO<sub>2</sub> para cada argamassa minimizando os erros quadrados entre os resultados experimentais e os valores simulados para cada ponto de medição, ou seja, para cada idade e cada pressão parcial de CO<sub>2</sub>. Os coeficientes de difusão  $D^0_{CO_2}$  assim encontrados são apresentados na tabela 45:

Tabela 45 – Coeficientes de difusão do CO<sub>2</sub> calculados pelo modelo quando se utilizam os valores de  $\alpha$  e  $n$  encontrados por Hyvert (2009)

Identificação	$D^0_{CO_2}$ (10 <sup>-8</sup> m <sup>2</sup> /s)
I40	1,45
I55	2,59
I70	4,70
IV40	1,15
IV55	2,52
IV70	2,87
$\Sigma$ erros = 1082,9	

Os gráficos da figura 94 à figura 99 apresentam os valores experimentais das profundidades de carbonatação e os calculados pelo modelo, para o CP I e o tipo CP IV, para as três concentrações de CO<sub>2</sub> (0,088%, 6% e 100%), respectivamente.

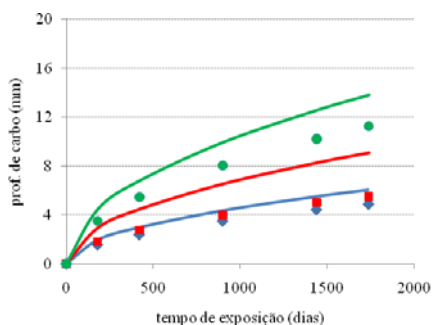


Figura 94 –  $e_c$  experimental e calculadas pelo modelo – CP I e 0,088% CO<sub>2</sub>

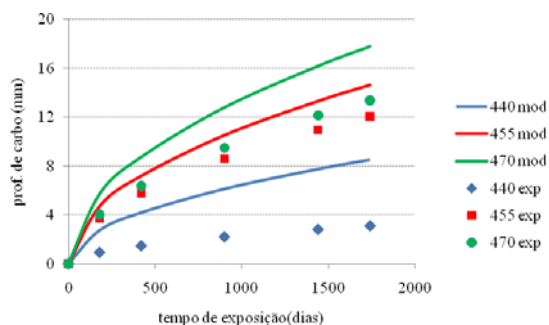


Figura 95 –  $e_c$  experimental e calculadas pelo modelo – tipo CP IV e 0,088% CO<sub>2</sub>

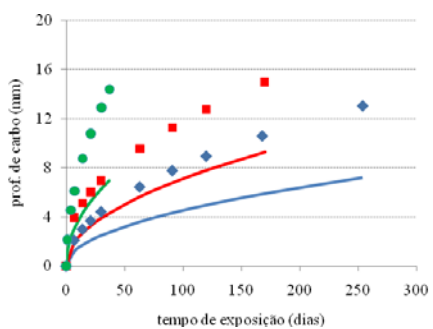


Figura 96 –  $e_c$  experimental e calculadas pelo modelo – CP I e 6% CO<sub>2</sub>

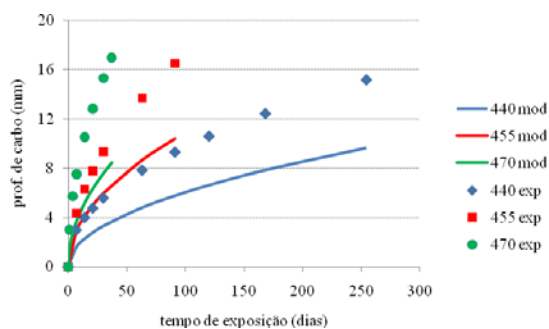


Figura 97 –  $e_c$  experimental e calculadas pelo modelo – tipo CP IV e 6% CO<sub>2</sub>

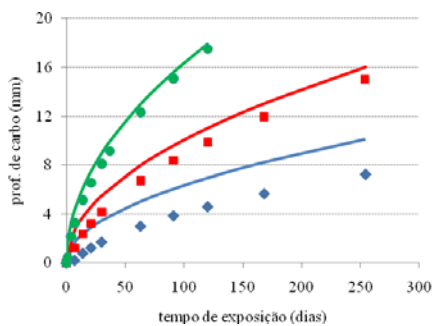


Figura 98 –  $e_c$  experimental e calculadas pelo modelo – CP I e 100% CO<sub>2</sub>

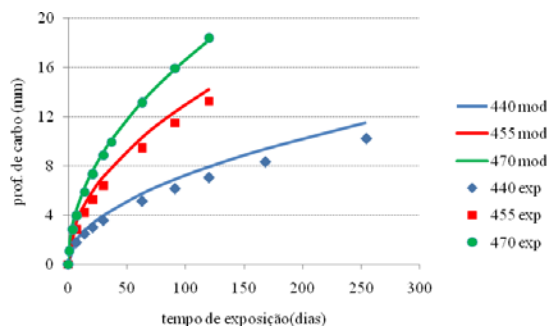


Figura 99 –  $e_c$  experimental e calculadas pelo modelo – tipo CP IV e 100% CO<sub>2</sub>

Analisando as figuras, nota-se que os resultados simulados não coincidem totalmente com os dados experimentais. Isto tenderia a invalidar a sequência proposta por Hyvert (2009). Na realidade, os ensaios da presente pesquisa foram realizados com condições de umidade diferentes dos realizados por Hyvert (2009) e isto tenderia a mostrar que se  $\alpha$  e  $n$  são independentes do aglomerante e da pressão, os valores encontrados por Hyvert (2009) para uma umidade relativa de 60% não podem ser mantidos para estes ensaios feitos em 70% UR, ou que se deseja conservar os valores de  $\alpha$  e  $n$  como estão, então seria necessário levar em conta a variação de umidade no modelo. O modelo foi então reutilizado não supondo mais que os valores de  $\alpha$  e  $n$  seriam os encontrados por Hyvert (2009) e fez-se uma nova calibragem. Os novos valores de  $\alpha$  e  $n$  obtidos assim como os coeficientes de difusão, para o caso particular das argamassas e condições experimentais deste trabalho são apresentados na tabela 46.

Tabela 46 – Valores de  $\alpha$ ,  $n$  e dos coeficientes de difusão do  $\text{CO}_2$  calculados pelo modelo quando são calibrados também  $\alpha$  e  $n$

Identificação	$D^0_{\text{CO}_2}$ ( $10^{-9}$ m <sup>2</sup> /s)
I40	4,14
I55	8,58
I70	22,6
IV40	2,54
IV55	7,37
IV70	11,5
$\alpha$ (l/mol) = 16,25	
$n$ (adimensional) = 6,71	
$\Sigma$ erros = 78,5	

Os ensaios acelerados permitem assim calcular o coeficiente de difusão do  $\text{CO}_2$  na zona carbonatada a uma pressão de  $\text{CO}_2$  em condições naturais. Na prática, se desejar calcular a profundidade de carbonatação natural a partir de um ensaio acelerado, procede-se como se acabou de mostrar e leva-se o valor de  $D^0_{\text{CO}_2}$  calculado para a equação 59 que se aplica com a pressão de  $\text{CO}_2$  correspondente às condições naturais.

Os gráficos da figura 100 à figura 105 apresentam os valores experimentais e os calculados pelo modelo quando se deixa  $\alpha$  e  $n$  variar, para o CP I e o tipo CP IV, para as três concentrações de  $\text{CO}_2$  (0,088%, 6% e 100%), respectivamente.

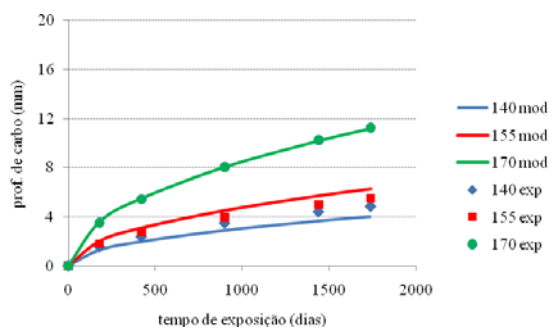


Figura 100 –  $e_c$  experimental e calculadas pelo modelo – CP I e 0,088%  $\text{CO}_2$

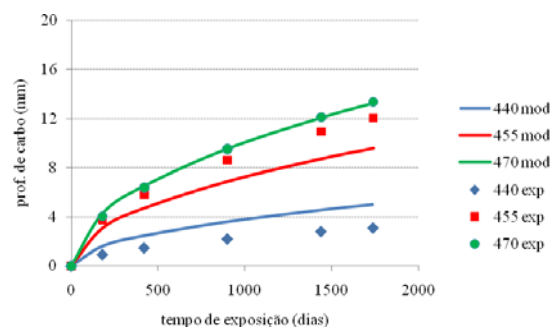


Figura 101 –  $e_c$  experimental e calculadas pelo modelo – tipo CP IV e 0,088%  $\text{CO}_2$

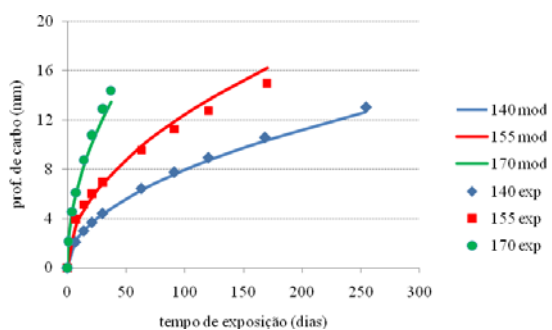


Figura 102 –  $e_c$  experimental e calculadas pelo modelo – CP I e 6%  $\text{CO}_2$

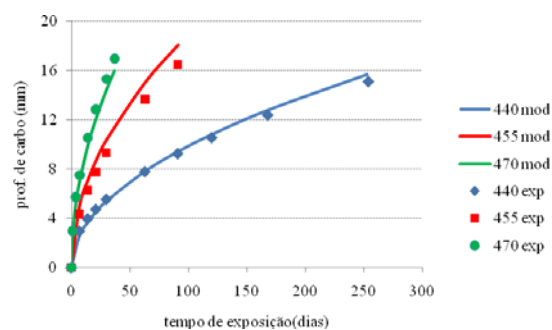


Figura 103 –  $e_c$  experimental e calculadas pelo modelo – tipo CP IV e 6%  $\text{CO}_2$

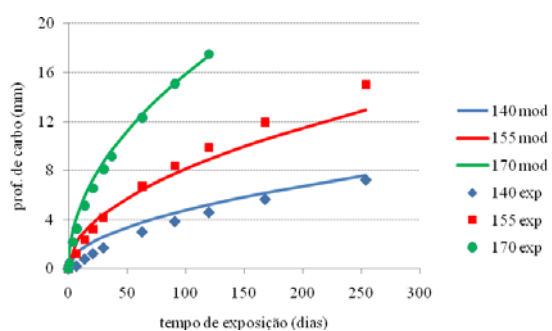


Figura 104 –  $e_c$  experimental e calculadas pelo modelo – CP I e 100%  $\text{CO}_2$

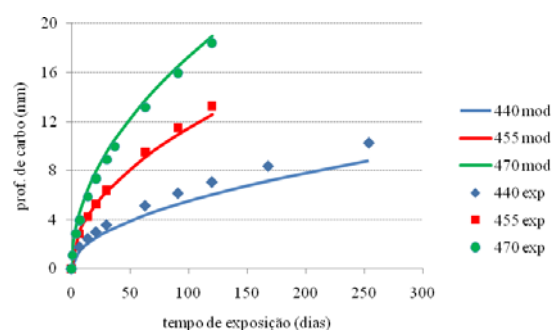


Figura 105 –  $e_c$  experimental e calculadas pelo modelo – tipo CP IV e 100%  $\text{CO}_2$

Estas figuras mostram uma boa correlação entre os resultados experimentais e os calculados pelo modelo de carbonatação. O modelo considera corretamente a influência das variáveis do presente estudo (pressão de  $\text{CO}_2$ , natureza do aglomerante, relação a/c).

Os coeficientes de difusão do CO<sub>2</sub> obtidos são inferiores aos encontrados utilizando os valores de  $\alpha$  e  $n$  propostos pelo autor do modelo. Isto se explica pelo fato que a umidade relativa escolhida para os ensaios é superior à utilizada por Hyvert (2009). Esta análise é baseada nos resultados de Houst (1993) que mediu os coeficientes de difusão do oxigênio e do dióxido de carbono em argamassas, em função da umidade relativa para diferentes relações cimento/areia (c/a). Na tabela 47 são apresentados os valores dos coeficientes de difusão do CO<sub>2</sub> encontrados por Houst (1993).

Tabela 47 – Coeficientes de difusão do CO<sub>2</sub> para as argamassas

Umidade relativa (%)	$D_{CO_2} \pm$ desvio padrão (m <sup>2</sup> /s)		
	c/a=0,25	c/a=0,43	c/a=0,67
55	$(7,0 \pm 1,2) \cdot 10^{-8}$	$(1,1 \pm 0,8) \cdot 10^{-8}$	$(2,7 \pm 0,3) \cdot 10^{-8}$
76	$(6,7 \pm 1,2) \cdot 10^{-8}$	$(7,0 \pm 6,0) \cdot 10^{-9}$	$(2,2 \pm 0,1) \cdot 10^{-8}$
86	$(6,2 \pm 1,5) \cdot 10^{-8}$	$(8,0 \pm 9,2) \cdot 10^{-9}$	$(1,5 \pm 0,0) \cdot 10^{-8}$

Fonte: Houst (1993)

Os resultados obtidos mostram bem que o aumento da umidade relativa é acompanhado de uma redução do coeficiente de difusão do CO<sub>2</sub>. Os dados de Houst (1993) corroboram as diferenças encontradas entre os valores de Hyvert (2009) e os da presente pesquisa. Além disso, para as relações a/c análogas (0,5), os coeficientes de difusão de Houst (1993) são da mesma ordem de grandeza dos aqui encontrados. Os desvios são provavelmente devidos às diferenças da natureza dos materiais e dos aglomerantes.

As simulações apresentadas parecem representar corretamente os resultados experimentais. Todavia, duas críticas podem ser feitas. A primeira diz respeito à forte sensibilidade do parâmetro  $n$  aos valores escolhidos para as características físico-químicas como o grau de hidratação, a relação C/S do C-S-H e a fração da fase vítrea da cinza. A título de exemplo, a tabela 48 ilustra esta forte sensibilidade, tanto para o valor da relação C/S como da quantidade de C-S-H secundário. Pode-se ter valores bastante elevados de  $n$ .

Tabela 48 – Valores de  $\alpha$  e  $n$  para diferentes parâmetros de entrada

parâmetro	C/S=1	C/S=1,2	C/S=1,2
	CSH <sub>s, IV40</sub> = 2,01 (mol/l)	CSH <sub>s, IV40</sub> = 2,01 (mol/l)	CSH <sub>s, IV40</sub> = 2,41 (mol/l)
	CSH <sub>s, IV55</sub> = 1,93 (mol/l)	CSH <sub>s, IV55</sub> = 1,93 (mol/l)	CSH <sub>s, IV55</sub> = 2,32 (mol/l)
	CSH <sub>s, IV70</sub> = 1,78 (mol/l)	CSH <sub>s, IV70</sub> = 1,78 (mol/l)	CSH <sub>s, IV70</sub> = 2,13 (mol/l)
$\alpha$	16,25	17,31	18,11
$n$	6,71	17,22	393,50

Mesmo se isto não conduz a diferenças importantes sobre os resultados das simulações, estes valores elevados de  $n$  colocam um problema quanto ao senso físico do modelo, o que constitui a segunda crítica possível. Retomando a equação 59, o denominador contém dois termos relatados na equação 67. O primeiro traduz a contribuição física da carbonatação do C-S-H em função da pressão de  $\text{CO}_2$ . A primeira parte do segundo termo traduz o efeito químico da quantidade de C-S-H carbonatável sobre a profundidade carbonatada. Se for considerada uma concentração de  $\text{CO}_2$  de 100%, vê-se que quanto mais  $n$  é aumentado, mais esse segundo termo diminui e menos é considerada a carbonatação do C-S-H.

$$\left( 1 + \alpha \cdot C2' \cdot \left( \frac{P_0}{P_{\text{atm}}} \right)^n \right) \cdot \left( \frac{C2'}{n+1} \cdot \left( \frac{P_0}{P_{\text{atm}}} \right)^n + Q1 \right) \quad \text{Equação 67}$$

Os valores elevados de  $n$  obtidos na calibração talvez possam ser explicados pela escolha incorreta da equação 52 que não daria uma variação do coeficiente de difusão em função da quantidade de C-S-H suficientemente forte em função da pressão. Dessa forma, outra lei de variação será testada e o modelo retomado.

#### 5.3.4 Proposta de melhoria do modelo

O modelo foi concebido considerando uma variação linear do coeficiente de difusão do  $\text{CO}_2$  (equação 52 que influencia na equação 49). Para haver um impacto mais importante da pressão sobre a redução da difusão foi considerado uma variação exponencial do coeficiente de difusão. Fazendo esta modificação, a equação 52 torna-se a equação 68:

$$f_D(Q2) = \exp(\alpha \cdot Q2) \quad \text{Equação 68}$$

E  $\alpha$  e  $n$  permanecem como parâmetros a serem calibrados. Se for feita a mudança na equação de balanço de  $\text{CO}_2$  (equação 54) obtém-se a equação 69:

$$\left( \phi_g + \frac{C_2'}{P_{\text{atm}}} \cdot \left( \frac{P_{\text{CO}_2}}{P_{\text{atm}}} \right)^{n-1} \right) \cdot \frac{\partial P_{\text{CO}_2}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left( \frac{D_{\text{CO}_2}^0}{R \cdot T \cdot \exp \left( \alpha \cdot C_2' \cdot \left( \frac{P_{\text{CO}_2}}{P_{\text{atm}}} \right)^n \right)} \cdot \frac{\partial P_{\text{CO}_2}}{\partial x} \right) \quad \text{Equação 69}$$

Então, a equação 58 torna-se equação 70:

$$\frac{D_{\text{CO}_2}^0}{R \cdot T \cdot \exp \left( \alpha \cdot C_2' \cdot \left( \frac{P_0}{P_{\text{atm}}} \right)^n \right)} \cdot \frac{P_0}{x_c} \cdot dt = \left( \frac{C_2'}{n+1} \cdot \left( \frac{P_0}{P_{\text{atm}}} \right)^n + Q1 \right) \cdot dx_c \quad \text{Equação 70}$$

Após a integração, o modelo modificado se apresenta sob a forma da equação 71:

$$x_c(t) = \sqrt{\frac{2 \cdot D_{\text{CO}_2}^0 \cdot P_0 \cdot t}{R \cdot T \cdot \exp \left( \alpha \cdot C_2' \cdot \left( \frac{P_0}{P_{\text{atm}}} \right)^n \right) \cdot \left( \frac{C_2'}{n+1} \cdot \left( \frac{P_0}{P_{\text{atm}}} \right)^n + Q1 \right)}} \quad \text{Equação 71}$$

Uma nova simulação foi feita, com este novo modelo e os resultados são apresentados da figura 106 à figura 111 e na tabela 49.

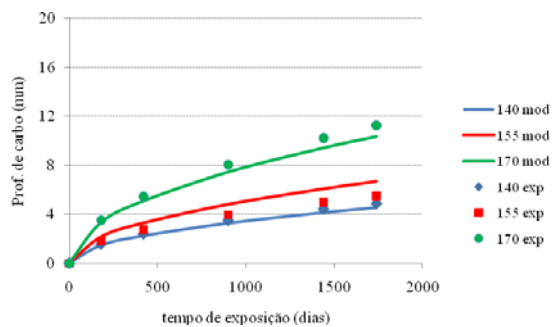


Figura 106 –  $e_c$  experimental e calculadas pelo modelo – CP I e 0,088%  $\text{CO}_2$

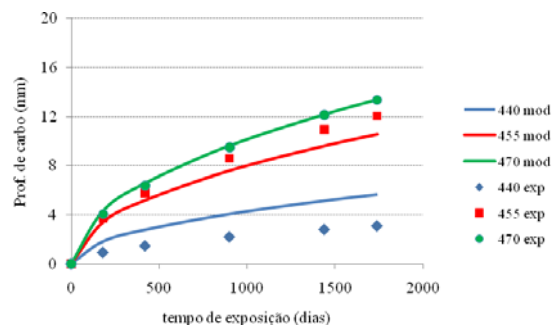


Figura 107 –  $e_c$  experimental e calculadas pelo modelo – tipo CP IV e 0,088%  $\text{CO}_2$

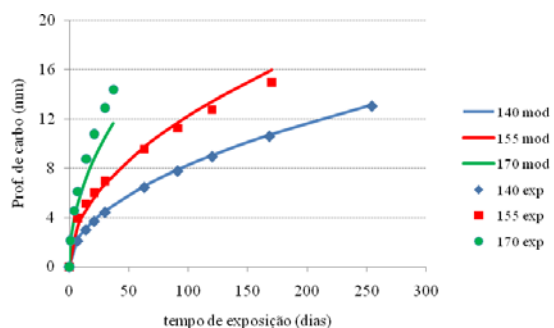


Figura 108 –  $e_c$  experimental e calculadas pelo modelo – CP I e 6%  $\text{CO}_2$

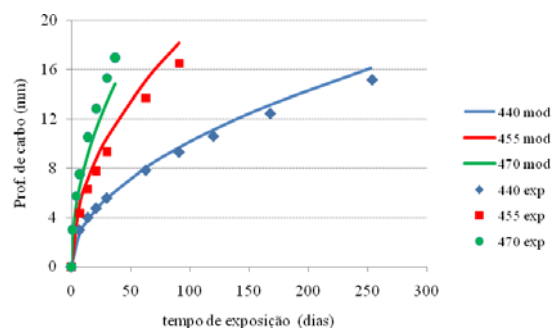


Figura 109 –  $e_c$  experimental e calculadas pelo modelo – tipo CP IV e 6%  $\text{CO}_2$

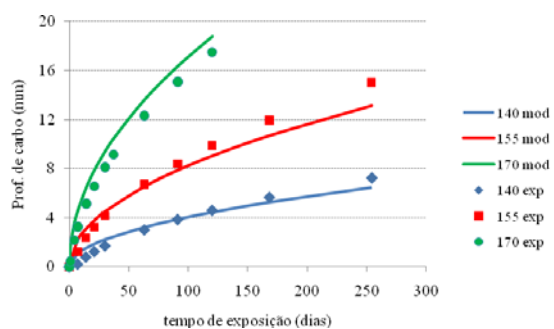


Figura 110 –  $e_c$  experimental e calculadas pelo modelo – CP I e 100%  $\text{CO}_2$

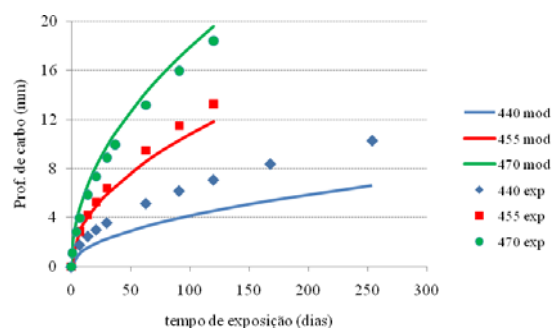


Figura 111 –  $e_c$  experimental e calculadas pelo modelo – tipo CP IV e 100%  $\text{CO}_2$



Tabela 49 – Valores de  $\alpha$ , n e dos coeficientes de difusão do CO<sub>2</sub> calculados pelo modelo modificado

Identificação	D <sup>0</sup> <sub>CO2</sub> (10 <sup>-9</sup> m <sup>2</sup> /s)
I40	5,40
I55	9,73
I70	19,3
IV40	3,30
IV55	8,97
IV70	11,7
$\alpha$ (l/mol) = 1,63	
n (adimensional) = 1,13	
$\Sigma$ erros = 160,5	

Os gráficos da figura 106 à figura 111 mostram uma boa correlação entre os resultados experimentais e a predição do modelo. As simulações não são melhores que no modelo anterior, mas a descrição física parece mais correta. Os coeficientes de difusão encontrados, com exceção da mistura I70 são ligeiramente superiores aos anteriores. Mas é preciso notar que o parâmetro n, que tem o mesmo significado que no modelo anterior, é menor e assim o impacto químico da quantidade de C-S-H carbonatável é levada em conta em altas pressões. Por outro lado, os valores dos parâmetros são muito menos sensíveis aos dados físico-químicos (grau de hidratação, relação C/S do C-S-H e fração da vítrea da cinza) como mostram os dados da tabela 50.

Tabela 50 – Valores de  $\alpha$  e n para diferentes parâmetros de entrada no modelo modificado

parâmetro	C/S=1	C/S=1,2	C/S=1,2
	CSH <sub>s, IV40</sub> = 2,01 (mol/l)	CSH <sub>s, IV40</sub> = 2,01 (mol/l)	CSH <sub>s, IV40</sub> = 2,41 (mol/l)
	CSH <sub>s, IV55</sub> = 1,93 (mol/l)	CSH <sub>s, IV55</sub> = 1,93 (mol/l)	CSH <sub>s, IV55</sub> = 2,32 (mol/l)
	CSH <sub>s, IV70</sub> = 1,78 (mol/l)	CSH <sub>s, IV70</sub> = 1,78 (mol/l)	CSH <sub>s, IV70</sub> = 2,13 (mol/l)
$\alpha$	1,65	1,54	1,46
n	1,13	1,18	1,27

Enfim, uma nova simulação foi realizada a partir dos resultados experimentais de Hyvert(2009) conduzindo a valores de  $\alpha$  e n respectivamente de 1,7 e 0,22. O valor de  $\alpha$  é então sensivelmente o mesmo que o obtido com os materiais deste estudo (1,63), o que tende a provar a estabilidade de calibração sobre este parâmetro. O valor de n, ao contrário, é inferior aos dados na tabela 50. Este valor parece baixo com relação ao obtido sobre os dados experimentais deste trabalho, mas é preciso lembrar que diversos parâmetros são diferentes

entre os dois estudos (relação C/S, grau de hidratação, reações com as adições, umidade relativa dos ensaios...). Estas diferenças podem explicar o desvio observado sobre n.

Para conhecer a resposta do modelo para diferentes concentrações de CO<sub>2</sub>, foi simulada a profundidade de carbonatação após 91 dias de exposição, para os dois cimentos (CP I e tipo CP IV) e as três relações a/c (0,40, 0,55, 0,70). Os resultados para o CP I são apresentados na figura 112 e para o tipo CP IV na figura 113.

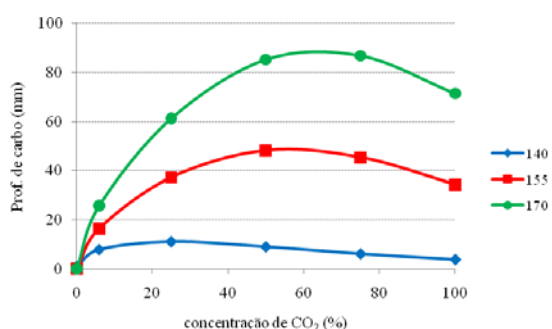


Figura 112 – Comportamento do modelo modificado com a variação da pressão de CO<sub>2</sub> para o CP I

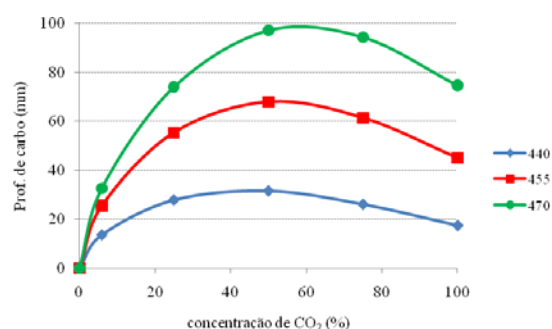


Figura 113 – Comportamento do modelo modificado com a variação da pressão de CO<sub>2</sub> para o tipo CP IV

Percebe-se que o modelo indica um aumento da profundidade de carbonatação até a porcentagem de CO<sub>2</sub> de cerca de 60% e em seguida uma diminuição até 100% de CO<sub>2</sub>. Este comportamento corresponde bem aos resultados encontrados na prática e discutidos na revisão da literatura (item 2.3.2.2) e no capítulo 4.

### 5.3.5 Utilização prática do modelo

A predição da carbonatação natural a uma determinada temperatura  $\theta$  e umidade relativa UR consiste inicialmente em efetuar um ensaio de carbonatação acelerada. Este ensaio é realizado em uma câmara regulada com uma pressão  $P_0$  de CO<sub>2</sub> conhecida, a uma temperatura  $\theta$  e a uma umidade relativa UR. Antes do ensaio, os corpos-de-prova do material considerado são condicionados de maneira que estejam em equilíbrio hídrico com esta umidade UR. As medidas das profundidades de carbonatação são em seguida efetuadas em diferentes tempos de exposição obtendo-se assim a função  $x_c(t)$ .

Na sequência se aplica a equação 71 aos resultados experimentais após ter determinado as quantidades Q1 e C2' a partir da composição do aglomerante e das proporções da mistura. Para isto se faz a hipótese que os valores dos parâmetros  $\alpha$  e n são independentes da natureza do cimento e da composição do material. O coeficiente de difusão  $D_{CO_2}^0$  é calculado ajustando os dados experimentais sobre o modelo. A mesma equação 71 aplicada com este coeficiente de difusão e a pressão do CO<sub>2</sub> natural permitem a predição da profundidade de carbonatação ao final de um tempo de exposição t escolhido.

Aplicando, por exemplo, o modelo à argamassa I55. Considerando os ensaios de carbonatação acelerada com 6 % ou 100% de CO<sub>2</sub> e retendo os valores de  $\alpha$  e n da tabela 49, o ajuste dá os valores de  $D_{CO_2}^0$  (ver a tabela 51). As profundidades de carbonatação calculadas pelo modelo e as medidas após 58 meses (4,83 anos) são dadas nesta mesma tabela.

Tabela 51 – Comparação entre os valores calculados e a aplicação prática do modelo utilizando  $\alpha$  e n fixados anteriormente ( tabela 49)

Ensaio acelerado com	$D_{CO_2}^0$ (m <sup>2</sup> /s)	Profundidade de carbonatação natural (mm)	
		calculada	medida
6% de CO <sub>2</sub>	$9,18 \cdot 10^{-9}$	6,50	5,50
100 % de CO <sub>2</sub>	$1,14 \cdot 10^{-8}$	7,25	

Se a hipótese segundo a qual  $\alpha$  e n são constantes não for aceita, procura-se calibrar os três valores de  $\alpha$ , n e  $D_{CO_2}^0$  com o ensaio acelerado realizado. Nestas condições, cada ensaio acelerado dá valores de  $\alpha$ , n e  $D_{CO_2}^0$  diferentes que são apresentados na tabela 52. Cada conjunto de dados permite então prever a profundidade de carbonatação natural ao final de 58 meses. Os resultados são mostrados na tabela 52.

Tabela 52 – Comparação entre os valores calculados e da aplicação prática do modelo recalibrando  $\alpha$  e n

Ensaio acelerado com	$D_{CO_2}^0$ (m <sup>2</sup> /s)	$\alpha$	n	Profundidade de carbonatação natural (mm)	
				calculada	medida
6% de CO <sub>2</sub>	$1,22 \cdot 10^{-8}$	1,73	0,79	7,43	5,50
100 % de CO <sub>2</sub>	$9,11 \cdot 10^{-9}$	1,39	0,00	1,10	

O valor experimental da profundidade de carbonatação para a argamassa I55, após 58 meses de exposição natural é de 5,5mm. Os resultados da tabela 51 e da tabela 52 mostram que é preferível utilizar os valores de  $\alpha$  e  $n$  calibrados sobre o conjunto total de dados. Seria conveniente validar este resultado com um material que não foi utilizado para calibração dos parâmetros  $\alpha$  e  $n$ .

No momento da utilização do modelo para uma predição, deve-se lembrar que os valores encontrados são aplicáveis a materiais testados nas mesmas condições que as utilizadas na calibração.

### 5.3.6 Validação do modelo modificado com concretos

O modelo foi testado para os concretos a fim de avaliar sua aplicação neste caso. Os valores de  $\alpha$  e  $n$  encontrados anteriormente foram conservados para esta simulação, ou seja,  $\alpha=1,63$  e  $n=1,13$ .

Os concretos testados foram feitos com cimento CP V para o concreto de referência (REF), e com um cimento composto por uma mistura de 75% em massa do cimento CP V anterior e de 25% de cinza volante (25CV). Três relações água/aglomerante foram escolhidas (0,34 - 0,44 e 0,57).

Os resultados experimentais de carbonatação foram retirados da literatura (ISAIA *et al.*, 2001). As condições dos ensaios acelerados: UR entre 60 e 70%, temperatura entre 20 e 26°C, concentração de CO<sub>2</sub> de 10%. O ensaio de carbonatação natural foi feito em laboratório, com umidade relativa compreendida entre 40 e 90% e uma temperatura variando entre 12°C (inverno) e 35°C (verão). Como a concentração de CO<sub>2</sub> não foi indicada, adotou-se o valor de 0,088% escolhido anteriormente. Os parâmetros de entrada do modelo foram calculados como para as argamassas a partir da composição mineralógica do aglomerante e da formulação do concreto.

Com os resultados de carbonatação acelerada aplicou-se o modelo modificado para determinar os coeficientes de difusão do CO<sub>2</sub> e em seguida predizer a carbonatação natural. A figura 114 apresenta os resultados para o concreto de referência e a figura 115 para o concreto com cinza volante. Os coeficientes de difusão do CO<sub>2</sub> e as profundidades de carbonatação preditas assim como as medidas são apresentados na tabela 53.

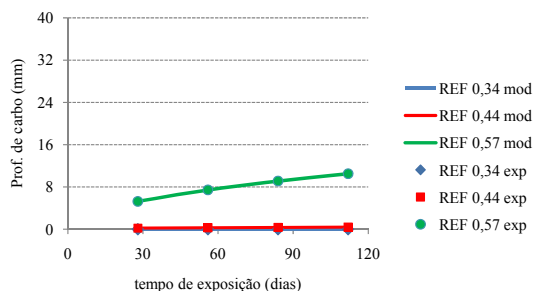


Figura 114 –  $e_c$  experimental e calculadas pelo modelo – CP I e 10%  $\text{CO}_2$

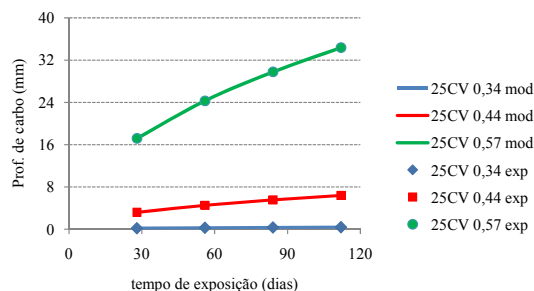


Figura 115 –  $e_c$  experimental e calculadas pelo modelo – 25% CV e 10%  $\text{CO}_2$

Tabela 53 – Coeficientes de difusão do  $\text{CO}_2$  calculados para os concretos de Isaia *et al.* (2001) e comparação entre as profundidades de carbonatação medidas e previstas pelo modelo

Identificação	$D_{\text{CO}_2}^0$ ( $\text{m}^2/\text{s}$ )	Profundidade de carbonatação medida (mm)	Profundidade de carbonatação calculada (mm)
Ref-0,34	0,00	0	0
Ref-0,44	$4,03 \cdot 10^{-12}$	0,1	0,1
Ref-0,57	$2,39 \cdot 10^{-9}$	1,2	2,8
25CV-0,34	$2,83 \cdot 10^{-12}$	1	0,1
25CV-0,44	$4,90 \cdot 10^{-10}$	2,7	1,8
25CV-0,57	$1,24 \cdot 10^{-8}$	6	9,5
$\alpha$ (l/mol)	1,63	Predição após dois anos de carbonatação natural com 0,088% de $\text{CO}_2$	
n (adimensional)	1,13		
$\Sigma$ erros	0,000		
% $\text{CO}_2$ utilizado	10%		

As simulações de carbonatação acelerada são bastante próximas dos dados experimentais. O modelo pode então ser utilizado para os concretos em que as condições experimentais sejam idênticas às utilizadas para o cálculo dos parâmetros  $\alpha$  e n. No entanto, da carbonatação natural não foi muito boa. Duas explicações são possíveis:

- a) as medidas efetuadas após dois anos sobre os concretos não são muito precisas pois as profundidades de carbonatação são pequenas nesta idade e a presença dos agregados dificulta a medida;

- b) as condições climáticas da carbonatação natural não são constantes e então o modelo faz a hipótese que são estáveis e idênticas às da carbonatação acelerada.

### 5.3.7 Resumo das modificações feitas no modelo inicial

O modelo de carbonatação desenvolvido por Hyvert (2009) foi adaptado aos cimentos contendo cinza volante. Para isso é considerada sucessivamente a hidratação do clínquer, à qual se aplica o grau de hidratação calculado (equação 60) e as reações pozolânicas (equação 61). A relação C/S do C-S-H secundário é escolhida para ser inferior àquela do C-S-H primário. A melhoria feita neste trabalho poderia considerar a influência da natureza e da quantidade de adições nos cimentos pela escolha da relação C/S.

Uma segunda modificação consiste no impacto da carbonatação do C-S-H sobre o cálculo do coeficiente de difusão do CO<sub>2</sub>. Originalmente, o modelo considera uma variação linear do coeficiente de redução da difusão em função da quantidade de C-S-H carbonatável (equação 52). Ora, pode-se pensar que a redução da difusão, devida à diminuição de porosidade associada à carbonatação do C-S-H é mais sensível que a pressão que não é traduzida pelo modelo inicial. É por isso que foi proposta uma alteração por uma função exponencial (equação 68). Isto também possibilitou tornar as simulações mais estáveis ao estudo realizado dos parâmetros.

Com estas modificações, o modelo pode ser utilizado para diferentes tipos de cimento e permite a predição da carbonatação natural de argamassas ou concretos em laboratório com umidade controlada. Esta predição é feita sobre a base de dados experimentais de carbonatação acelerada obtidos em materiais análogos, testados após um condicionamento à umidade do laboratório, nas câmaras de carbonatação reguladas com esta mesma umidade.

## 5.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE OS MODELOS

Para prever a carbonatação natural de um material podem-se usar modelos que simulam o ensaio de carbonatação baseados na físico-química do fenômeno ou utilizar modelos que fazem a transposição dos ensaios acelerados para a carbonatação natural. As duas

possibilidades foram utilizadas neste trabalho. Os resultados experimentais da carbonatação natural obtidos em argamassas foram apresentados no capítulo 4.

O modelo de Duprat, Sellier e Nguyen (2006) poderia substituir os ensaios de carbonatação, pois ele permite simular o fenômeno em toda a sua complexidade. Este modelo pode levar em conta qualquer condição de ensaio e então, predizer os ensaios naturais se as condições limite são conhecidas. O inconveniente de sua aplicação reside no grande número de entradas, por vezes difíceis de mensurar, que são necessárias fornecer. Além disso, o modelo é bastante sensível a cada variável de entrada. Se o mesmo é potencialmente ideal, no estado de conhecimento atual das grandezas de entrada, ele é dificilmente explorável. Seria ainda necessário integrar a temperatura para poder representar corretamente a carbonatação natural ao longo de vários anos, o que complicaria ainda mais o modelo.

O modelo simplificado apresentado por Hyvert (2009) e que foi modificado neste trabalho, é como seu nome indica, simples de utilizar, pois permite predizer a carbonatação natural a partir de um ensaio acelerado. Sua principal característica que está na base de sua origem é que não considera as transferências termo-hídricas. Esta simplificação constitui uma limitação, sobretudo quando diz respeito à predição da carbonatação natural *in situ* (que os modelos complexos também têm dificuldade de reproduzir corretamente). O modelo simplificado permite classificar os materiais cimentícios do ponto de vista de sua durabilidade face à carbonatação (em condições conhecidas), o que é um avanço interessante.

Adicionar o efeito local da umidade e os seus reflexos sobre a carbonatação tornaria este modelo complexo, o que não é o objetivo. Uma melhoria possível a este modelo simplificado poderia consistir no gerenciamento de níveis diferentes de umidade, mas constantes, nos corpos-de-prova (por meio de uma modificação da expressão do coeficiente de difusão). Isto não implicaria em outra medida, mas para incorporar este fator, seria conveniente realizar ensaios acelerados em diversas umidades constantes 50, 60, 70%, etc. Além disso, isto permitira também fixar um par de valores para  $\alpha$  e  $n$  e assim minimizar a incerteza sobre a sua calibração. Assim, o modelo seria mais estável para a predição de diversos aglomerantes e condições de ensaio.

O estudo da carbonatação visa sua aplicação aos concretos. O modelo simplificado foi desenvolvido a partir de argamassas, mas, de acordo com uma primeira tentativa de validação, o mesmo parece perfeitamente adaptado à predição da carbonatação de concretos. As decisões

tomadas com relação ao grau de hidratação e às reações pozolânicas podem sempre ser melhoradas. A validação para outros tipos de adições minerais resta a demonstrar. Isto pode constituir o objetivo de pesquisas futuras. Os resultados obtidos são a princípio satisfatórios, pois o modelo simplificado leva em conta a influência da concentração de CO<sub>2</sub> até 100% e é adaptado a diversos tipos de aglomerantes.



## 6. CONCLUSÕES GERAIS

Os ensaios acelerados, de uma forma geral, são realizados com o intuito de reduzir o tempo necessário para saber como determinado material se comportaria em condições reais de exposição. Durante muito tempo os ensaios acelerados de carbonatação foram conduzidos sem padronização, e acredita-se, sem o devido conhecimento da influência de se acelerar o fenômeno de forma indiscriminada. Muitas pesquisas foram realizadas, mas os resultados não podem ser comparados entre si, dificultando a formação de um banco de dados que possa ser usado para a previsão de vida útil. A confrontação com resultados de carbonatação natural se torna importante para verificar se o comportamento em condições de exposição mais agressivas pode ou não, provocar algum tipo de distorção dos comportamentos já conhecidos (com relação ao tempo de cura, relação a/c, entre outros) e resultados diferentes de quando o fenômeno ocorre em condições naturais de exposição. Torna-se essencial saber até que ponto esses ensaios podem representar a realidade e deles extrair informações consistentes que possam ser utilizadas sem alteração das características que estão sendo investigadas. A comunidade científica deve se conscientizar de que os ensaios acelerados devem ser representativos das condições naturais, não só no caso da carbonatação, mas para todo e qualquer processo acelerado com o intuito de antecipar reações e a ocorrência de determinado fenômeno.

Com o objetivo de estimar a profundidade de carbonatação natural a partir de ensaios acelerados e de modelos de predição, este trabalho contemplou uma série de ensaios experimentais e simulações em dois modelos de predição da carbonatação.

No programa experimental foram estudadas argamassas moldadas com cimentos CP I-S e tipo CP IV, nas relações água/cimento de 0,40, 0,55 e 0,70. Os corpos-de-prova submetidos à carbonatação natural foram curados por períodos de 7, 14 e 28 dias, e então colocados em três ambientes de exposição: um deles interno (sala climatizada com temperatura de 20°C, umidade relativa de 70% e concentração de CO<sub>2</sub> de 0,088%) e dois ambientes externos não protegidos das intempéries (Ext<sub>U</sub>=0,063% de CO<sub>2</sub> e Ext<sub>N</sub>=0,071% de CO<sub>2</sub>). As amostras

carbonatadas em ensaio acelerado foram curadas por períodos de 7 e 28 dias, sem seguida foram acondicionadas em sala climatizada ou conforme os procedimentos da RILEM e por fim carbonatadas em câmaras com 6% e 100% de CO<sub>2</sub>.

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

Um dos modelos de predição utilizado é complexo e capaz de representar o fenômeno da carbonatação em toda sua complexidade. O outro modelo é simplificado e tem por objetivo a predição da carbonatação natural a partir de ensaios acelerados.

Os resultados dos ensaios de carbonatação natural e acelerada, bem como dos modelos de predição levaram às conclusões apresentadas a seguir, lembrando que as mesmas são válidas para as condições investigadas na presente pesquisa.

## 6.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS ENSAIOS EXPERIMENTAIS DE CARBONATAÇÃO

As variáveis como o tempo de cura, o tipo de cimento e a relação a/c apresentaram o comportamento esperado, tanto para os ensaios naturais, quanto para os acelerados de carbonatação. Também não foi verificada nenhuma inversão de tendência desses fatores na evolução da carbonatação com o tempo. A carbonatação aumenta ao diminuir o tempo de cura, é maior para o cimento tipo CP IV quando comparada com o CP I e, cresce com o aumento da relação a/c. Embora os comportamentos sejam os mesmos para todas as condições e as diferenças entre ensaios naturais e acelerados sejam apenas uma questão de velocidade, essa confrontação com a condição natural é essencial. Vale lembrar que a intenção de se realizar ensaios acelerados, ao final das contas, é conhecer seu comportamento em uma situação real ou fazer previsões de vida útil. Portanto, se em condição natural determinado fenômeno não acontece, não há porque forçá-lo a acontecer nos ensaios acelerados.

Salientou-se no início do trabalho, a falta de consenso sobre dois aspectos que influenciam os resultados da profundidade de carbonatação acelerada: o percentual de CO<sub>2</sub> e o acondicionamento.

Com relação ao percentual de CO<sub>2</sub>, as profundidades de carbonatação acelerada com 100% de CO<sub>2</sub> são sempre inferiores às encontradas nos ensaios com 6%. Com os resultados obtidos e com base na literatura, coloca-se a hipótese que a quantidade de água gerada pela reação nessa concentração é muito elevada, provocando a obstrução parcial ou total dos poros com água, dificultando a difusão do CO<sub>2</sub> e, conseqüentemente, o avanço a frente de carbonatação. Para acelerar as reações de carbonatação é inevitável o uso de concentrações de CO<sub>2</sub> mais elevadas que as encontradas na atmosfera, no entanto, a escolha deste parâmetro deve ser baseada na maior semelhança com as condições naturais.

Com relação ao condicionamento, infere-se que esta etapa não deve ser negligenciada, e que a mesma interfere fortemente nos resultados obtidos. Exatamente por isso, é preciso ter precaução na escolha deste procedimento, para evitar que ocorram distorções no fenômeno e interpretações errôneas das respostas.

Os resultados de profundidade de carbonatação, obtidos da comparação entre as diferentes condições de ensaio acelerado com os ensaios naturais, indicam maior semelhança das seguintes condições:

- a) efeito isolado do tempo de cura (tc): R6;
- b) efeito isolado do tipo de cimento (ci): SC6;
- c) efeito isolado da relação a/c (ac): SC6;
- d) interação entre tc e ci – 7 dias: SC6; 28 dias: SC100. Para cura de 28 dias, comportamento SC6 similar ao natural com cura de 7 dias;
- e) interação entre tc e ac – 7 dias: SC6; 28 dias: SC100 e R6. Para cura de 28 dias, comportamento SC6 similar ao natural com cura de 7 dias;
- f) interação entre ci e ac – CP I: SC6; tipo CP IV: SC100 e R6.

Das condições de ensaio acelerado investigadas, percebeu-se comportamento distinto, em alguns casos, das respostas provenientes das amostras condicionadas conforme a RILEM, principalmente quando carbonatadas com 100% de CO<sub>2</sub>. A literatura indica que o uso de temperaturas em torno de 50°C pode provocar microfissuração superficial. Essas alterações nos materiais a serem ensaiados, embutirão diferenças nos resultados de carbonatação, diferenciando seu comportamento quando relacionadas com situações reais de exposição.

O procedimento da RILEM é trabalhoso e não está bem especificado. Deveria constar a necessidade de moldagem prévia, o tipo de embalagem a ser utilizada e como fazer o fechamento, tipo e tempo de cura. A suposição de início do ensaio aos 28 dias é incompatível com a necessidade de atingir o equilíbrio hídrico das amostras em ambiente com as condições predefinidas nesse período. No procedimento em sala climatizada não é necessária a redistribuição de umidade, uma vez que ao alcançar o equilíbrio hídrico, a umidade das amostras já está redistribuída. No entanto, este condicionamento possui a desvantagem de não se conhecer o estado hídrico de cada amostra antes do ensaio de carbonatação, que no caso de utilização em modelos de predição pode representar um problema. A importância deste fator deve ser discutida pela comunidade científica de acordo com a utilização dos dados.

Faz-se necessário um questionamento sobre a utilização dos resultados de ensaios acelerados de carbonatação, levando em conta a sua representatividade em condições reais.

Os resultados desta pesquisa podem ser analisados e correlacionados de outras formas, a fim de verificar se as conclusões permanecem as mesmas.

Os coeficientes de aceleração encontrados podem variar mais de seis vezes entre uma condição de ensaio e outra. Com os dados que se dispõe hoje, não é possível estimar a vida útil das estruturas de concreto armado frente à carbonatação, através de coeficientes de aceleração, pois os ensaios acelerados foram realizados sem padronização. No estado de conhecimento atual, a melhor maneira de prever a carbonatação se faz por meio de modelos de predição.

## 6.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS MODELOS DE PREDIÇÃO

O modelo de Duprat, Sellier e Nguyen (2006) permite simular o fenômeno de carbonatação em toda a sua complexidade, podendo levar em conta qualquer condição de ensaio. A dificuldade maior reside no grande número de entradas, difíceis de mensurar, que são necessárias para realizar uma simulação. A medição desses parâmetros, por vezes mais complicados de determinar que o próprio ensaio de carbonatação, inviabiliza o uso corrente desta ferramenta de predição.

O modelo simplificado apresentado por Hyvert (2009) é simples de ser utilizado e permite prever a carbonatação natural a partir de um ensaio acelerado. O fato de não considerar as transferências termo-hídricas está na base de sua simplicidade. Entende-se que isto constitui uma limitação, sobretudo para a predição da carbonatação natural *in situ*, no entanto, considera-se um avanço importante na transposição dos resultados de carbonatação acelerada para condições conhecidas de exposição natural.

O modelo originalmente concebido foi adaptado para a utilização de cimentos com adições pozolânicas. Além disso, a equação que considera a difusão do CO<sub>2</sub> foi alterada, a fim de tornar o modelo mais estável a pequenas variações na escolha dos parâmetros a serem considerados (grau de hidratação do cimento, relação C/S do C-S-H, fração vítrea da pozolana, entre outros). Os coeficientes  $n$  e  $\alpha$  poderiam ser fixados em função da umidade relativa, sendo que para isso seria necessário realizar ensaios em diversas umidades constantes (50, 60, 70%, entre outras), para calibrar esses coeficientes e diminuir a incerteza sobre eles.

A primeira tentativa de utilização do modelo modificado em concretos é promissora, todavia, ainda carece de uma validação mais ampla. As decisões tomadas com relação ao grau de hidratação e às reações pozolânicas podem ser melhoradas desde que se avance no conhecimento sobre o assunto. Os resultados obtidos são a princípio satisfatórios, pois o modelo simplificado leva em conta a influência da concentração de CO<sub>2</sub> até 100% e é adaptável a diversos tipos de aglomerantes.

### 6.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Baseando-se nos resultados encontrados, na comparação entre ensaios naturais e acelerados de carbonatação e nas condições investigadas neste estudo, a tendência seria indicar:

- a) que o tempo de cura para os ensaios acelerados de carbonatação seja de 28 dias, pois nessa idade os cimentos com adições têm a possibilidade de serem comparados em igualdade de relação a/c com cimentos sem ou com poucas adições;
- b) que o tipo de acondicionamento mais adequado é o realizado em sala climatizada, uma vez que essa condição se assemelha muito à condição natural (de acordo com a análise feita neste estudo), sem provocar microfissuração, nem a retirada de água dos capilares, que não sairia em condições normais de

umidade e temperatura, entre outros fatores a serem considerados quando as amostras são submetidas a temperaturas mais elevadas (como 50°C);

- c) que a concentração de CO<sub>2</sub> mais recomendada está na ordem de 6%, pois nesses teores há a aceleração do fenômeno, sem maiores interferências da quantidade de água e carbonatos gerados pela reação de carbonatação.

Espera-se que este trabalho possa contribuir para o entendimento dos ensaios de carbonatação e auxiliar a comunidade científica na tomada de decisões para a elaboração de um procedimento normalizado para os ensaios acelerados de carbonatação. Dessa forma, poder-se-á dar início à formação de um banco de dados com resultados de carbonatação, somando os esforços de muitos pesquisadores.

#### 6.4 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Investigar a ordem de consumo dos hidratos, pela carbonatação, em ensaios acelerados com concentrações de CO<sub>2</sub> da ordem de 5%, bem como em condições naturais de exposição.

Realizar pesquisas com percentuais de CO<sub>2</sub> entre 1% e 20% para descobrir até que ponto a reação de carbonatação é acelerada.

Comparar os produtos de carbonatação formados em ensaios acelerados com os formados em condições naturais.

Verificar as hipóteses de que a carbonatação com elevadas concentrações de CO<sub>2</sub> (100%) liberam mais água, provocando uma hidratação suplementar ou impedindo o avanço da frente de carbonatação, através de comparações da porosidade em diferentes etapas do ensaio de carbonatação.

Medir a porosidade dos materiais antes e após a etapa de condicionamento a fim de avaliar a influência deste procedimento.

Testar o modelo simplificado de carbonatação proposto por Hyvert (2009) e modificado por Pauletti (2009) para materiais cimentícios com diferentes adições minerais (metacaolim, sílica ativa, cinza de casca de arroz).

Aperfeiçoar os cálculos para determinação do grau de hidratação de cimentos contendo adições pozolânicas.

Testar as equações propostas no modelo de Hyvert (2009) e propor melhorias para o mesmo.

Realizar ensaios de carbonatação acelerada em diferentes umidades de equilíbrio a fim de obter dados para calibração de  $\alpha$  e  $n$  do modelo de carbonatação simplificado.

Testar o modelo de carbonatação simplificado com os dados das amostras que foram condicionadas em sala climatizada para verificar a possibilidade de correlação com os dados experimentais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

AÏT-MOKHTAR, A.; DELMI, M. **Partie 3.2: Compléments bibliographiques - Modèles de carbonation pour les CPA et CLC**. p.141-159. Rapport final, La Rochelle: Université de La Rochelle, 2002.

ALEXANDRE, J. Vitesse de carbonation (Rate of carbonation). RILEM COLLOQUIUM ON CARBONATION OF CONCRETE. **Anais...** . Paper 3.1, 1976.

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

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Manual of Concrete Practice** Part 1 – 1991. Materials and General Properties of Concrete, Committee 222. Detroit, Michigan, 1991, 11p.

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

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

ANDRADE, C. **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras**. São Paulo: PINI, 1992.

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

ASOCIACIÓN MERCOSUR DE NORMALIZACIÓN. **NM 101:96**: Concreto: Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. [s. l.], 1997.

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

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

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



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

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

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

ASSOCIATION FRANÇAISE POUR LA CONSTRUCTION (AFPC)-ASSOCIATION FRANÇAISE DE RECHERCHES ET D'ESSAIS SUR LES MATÉRIAUX ET LES CONSTRUCTIONS (AFREM). Détermination de la masse volumique apparente et de la porosité accessible à l'eau, **Compte-rendu des journées techniques de l'AFPC-AFREM**, Durabilité des Bétons, Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité, AFPC-AFREM, 11 et 12 décembre 1997, Toulouse, p. 121-124.

ATIS, C. D. Heat evolution of high-volume fly ash concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 5, p. 751-756, 2002.

BAHADOR, S.; JONG, H. C. Effect of preconditioning of concrete under accelerated test. Our World in Concrete and Structure. **Anais...** p.127-134. Singapore, 2006.

BAI, J.; WILD, S.; SABIR, B. B. Sorptivity and strength of air-cured and water-cured PC-PFA-MK concrete and the influence of binder composition on carbonation depth. **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 11, p. 1813-182, 2002.

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

BARIN, D. S. **Carbonatação e absorção capilar em concretos de cimento Portland branco com altos teores de adição de escória de alto forno e ativador químico**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, 2008.

BAROGHEL-BOUNY, V. **Caractérisation des pâtes de ciment et des bétons - Méthodes analyse, interprétations**. Paris: Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 1994.

BAROGHEL-BOUNY, V.; MAINGUY, M.; LASSABATERE, T.; COUSSY, O. Characterization and identification of equilibrium and transfer moisture properties for ordinary and high-performance cementitious materials. **Cement and Concrete Research**, v. 29, n. 8, p. 1225-1238, 1999.

BARON, J.; GAGNE, R.; OLLIVIER, J. P. Viser la durabilité. **Les bétons – Bases et données pour leur formulation**. p.307-320, 1996.

BARY, B.; SELIER, A. Coupled moisture--carbon dioxide-calcium transfer model for carbonation of concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 10, p. 1859-1872, 2004.

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

BLANCO-VARELA, M. T.; AGUILERA, J.; MARTÍNEZ-RAMÍREZ, S. Effect of cement C<sub>3</sub>A content, temperature and storage medium on thaumasite formation in carbonated mortars. **Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 4, p. 707-715, 2006.

BOURGUIGNON, K. M. B. G. **Influência da resistência à compressão na carbonatação de concretos com diferentes teores de escória de alto-forno**. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2004.

BOUZOUBAË, N.; ZHANG, M.-H.; MALHOTRA, V. M.; GOLDEN, D. Blended fly ash cements - a review. **ACI Materials Journal**, v. 96, n. 6, p. 641-650, 1999.

BRANCA, C.; FRATESI, R.; MORICONI, G.; SIMONCINI, S. Influence of fly ash on concrete carbonation and rebar corrosion. MALHOTRA, V. MALHOTRA, V. M. (Ed.) International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, 4th, 1992. **Anais...**, (SP 132-14).. v. 1, p.245-256. Istanbul: ACI, 1993.

BUFFO-LACARRIÈRE, L.; SELIER, A.; ESCADEILLAS, G.; TURATSINZE, A. Multiphase finite element modeling of concrete hydration. **Cement and Concrete Research**, v. 37, n. 2, p. 131-138, 2007.

CADORE, W. W. **Estudo da carbonatação da camada de cobrimento de protótipos de concreto com altos teores de adições minerais e cal hidratada**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, 2008.

CASTEL, A.; ARLIGUIE, G.; CHAUSSADENT, T.; BAROGHEL-BOUNY, V. La microfissuration superficielle a-t-elle une influence sur la profondeur de carbonatation des bétons? **Revue Française de Génie Civil**, Transferts dans les bétons et durabilité. v. 5, n. 2-3, p. 231-248, 2001.

CASTELLOTE, M.; ANDRADE, C. Modelling the carbonation of cementitious matrixes by means of the unreacted-core model, UR-CORE. **Cement and Concrete Research**, v. 38, n. 12, p. 1374-1384, 2008.

CASTELLOTE, M.; ANDRADE, C.; TURRILLAS, X.; *et al.* Accelerated carbonation of cement pastes in situ monitored by neutron diffraction. **Cement and Concrete Research**, v. 38, n. 12, p. 1365-1373, 2008.

CASTELLOTE, M.; FERNANDEZ, L.; ANDRADE, C.; ALONSO, C. Chemical changes and phase analysis of OPC pastes carbonated at different CO<sub>2</sub> concentrations. **Materials and Structures**, v. 42, n. 4, p. 515-525, 2009.

CEUKELAIRE, L. D.; VAN NIEUWENBURG, D. Accelerated carbonation of a blast-furnace cement concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 23, n. 2, p. 442-452, 1993.

CHAUSSADENT, T. Analyse des mécanismes de carbonatation du béton. **Comptes-Rendu des Journées Techniques - AFPC-AFREM DURABILITE DES BETONS**, Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité.. p.75-86. Toulouse, 1997.

CHAUSSADENT, T.; BAROGHEL-BOUNY, V.; HORNAIN, H.; et al. Effect of water-cement ratio of cement pastes on microstructural characteristics related to carbonation process. 5th CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete. **Anais...**, (SP 192-32).. p.523-537. Barcelone, 2000.

CHEN, S.; SUN, W.; ZHANG, Y.; GUO, F. Carbonation depth prediction of fly ash concrete subjected to 2-and 3-dimensional CO<sub>2</sub> attack. **Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China**, v. 2, n. 4, p. 395-400, 2008.

CLAISSE, P. A.; EL-SAYAD, H. I.; SHAABAN, I. G. Permeability and Pore Volume of Carbonated Concrete. **ACI Materials Journal**, v. 96, n. 3, p. 378-381, 1999.

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

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

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON (CEB). Task Groups 5.1. New approach to durability design : an example for carbonation induced corrosion. **Bulletim 238**, 1997.

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

DALLA LANA, E. F. **Carbonatação da camada de cobrimento de protótipos de concreto com cinza volante e cal**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, 2005.

DAMIDOT, D.; BARNETT, S. J.; GLASSER, F. P.; MACPHEE, D. E. Investigation of the CaO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub>–CaSO<sub>4</sub>–CaCO<sub>3</sub>–H<sub>2</sub>O system at 25°C by thermodynamic calculation. **Advances in Cement Research**, v. 16, n. 2, p. 69-76, 2004.

DELMI, M. M. Y. **Étude de l'hydratation et du couplage carbonatation-échanges hydriques dans les mortiers et bétons**. Thèse de doctorat, Université de La Rochelle, La Rochelle, 2004.

- DHIR, R. K.; HEWLETT, P. C.; CHAN, Y. N. Near-surface characteristics of concrete: prediction of carbonation resistance. **Magazine of Concrete Research**, v. 41, n. 148, p. 137-143, 1989.
- DIAMOND, S. Thaumasite in Orange County, Southern California: an inquiry into the effect of low temperature. **Cement and Concrete Composites**, v. 25, n. 8, p. 1161-1164, 2003.
- DUPRAT, F.; SELIER, A.; NGUYEN, X. S. Incidence de l'incertitude sur l'état hydrique du béton dans la carbonatation: approche probabiliste. TRANSFERT 2006 – Propriétés de Transferts des Géomatériaux. **Anais...** . Lille, 2006.
- FARCAS, F.; TOUZÉ, P. La spectrométrie infrarouge à transformée de Fourier (I.R.T.F.). Une méthode intéressante pour la caractérisation des ciments. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, (230) :77-88, 2001.
- FATTUHI, N. I. Concrete carbonation as influenced by curing regime. **Cement and Concrete Research**, v. 18, n. 3, p. 426-430, 1988.
- FIGUEIREDO, C. R. **Estudo da carbonatação em estruturas de concreto armado em Brasília – Avaliação de pilares**. Tese de doutorado, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2004.
- FORRESTER, J. A. Measurement of Carbonation. In: RILEM COLLOQUIUM ON CARBONATION OF CONCRETE **Proceedings...** [s.l., s.ed], 1976. Paper 2.1, 5p.
- FU, X.; WANG, Z.; TAO, W.; et al. Studies on blended cement with a large amount of fly ash. **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 7, p. 1153-1159, 2002.
- GERVAIS, C.; GARRABRANTS, A. C.; SANCHEZ, F.; et al. The effects of carbonation and drying during intermittent leaching on the release of inorganic constituents from a cement-based matrix. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 1, p. 119-131, 2004.
- GLASSER, F. P.; Matschei. Interactions between Portland cement and carbon dioxide. 12th International Congress on the Chemistry of Cement. **Anais...** . Montreal, 2007.
- GRANDET, J. **Contribution à l'étude de la prise et de la carbonatation des mortiers au contact des matériaux poreux**. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, 1975.
- HAMADA, M. Neutralization of concrete and corrosion of reinforcing steel. INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THE CHEMISTRY OF CEMENT, 5th, 1968. **Anais...** , part. III. v. III, p.343-369. Tokyo, 1969.
- HELENE, P. R. L. **Corrosão em armaduras para concreto armado**. São Paulo: Pini: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1986. 47p.

HIDALGO, A.; DOMINGO, C.; GARCIA, C.; *et al.* Microstructural changes induced in Portland cement-based materials due to natural and supercritical carbonation. **Journal of Materials Science**, v. 43, n. 9, p. 3101-3111, 2008.

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

HOPPE FILHO, J. **Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto**. Tese de doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

HOPPE, A. E. **Carbonatação em concreto com cinza de casca de arroz sem moagem**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, 2008.

HOUST, Y. F. **Diffusion de gaz, carbonatation et retrait de la pâte de ciment durcie**. Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Lausanne, 1993.

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

HOUST, Y. F.; WITTMANN, F. H. Depth profiles of carbonates formed during natural carbonation. **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 12, p. 1923-1930, 2002.

HYVERT, N. **Application de l'approche probabiliste à la durabilité des produits préfabriqués en béton**. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, 2009.

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

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

ISAIA, G. C.; FURQUIN, P. R. V.; GASTALDINI, A. L. G. Análise estatística de variáveis influentes na microestrutura e durabilidade de concretos com adições minerais. **Ambiente Construído**, v. 9, n. 1, p. 7-23, 2009.

ISAIA, G. C.; GASTALDINI, A. L. G.; MORAES, R. Physical and pozzolanic action of mineral additions on the mechanical strength of high-performance concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 25, n. 1, p. 69-76, 2003.

ISAIA, G. C.; VAGHETTI, M. A.; GASTALDINI, A. L. Carbonatação acelerada e natural do concreto com alto teor de pozolanas: um estudo preliminar. In CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 43°, 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu, 2001, 16p.

ISGOR, O. B.; RAZAQPUR, A. G. Finite element modeling of coupled heat transfer, moisture transport and carbonation processes in concrete structures. **Cement and Concrete Composites**, v. 26, n. 1, p. 57-73, 2004.

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

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

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

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

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

KHUNTHONGKEAW, J.; TANGTERMSIRIKUL, S.; LEELAWAT, T. A study on carbonation depth prediction for fly ash concrete. **Construction and Building Materials**, v. 20, n. 9, p. 744-753, 2006.

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

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

KOKUBU, M.; NAGATAKI, S. Carbonation of concrete with fly ash and corrosion of reinforcements in 20-years tests. MALHOTRA, V. M. (Ed.) International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, 3rd. **Anais...**, (SP 114-14).. v. 1, p.315-329. Trondheim: American Concrete Institute, 1989.

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

LAMMERTIJN, S.; BELIE, N. D. Porosity, gas permeability, carbonation and their interaction in high-volume fly ash concrete. **Magazine of Concrete Research**, v. 60, n. 7, p. 535-545, 2008.

LARA, P. L. O. **Análise da relação entre propriedades de transporte de água e os mecanismos de corrosão das armaduras**. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2003.

LEVY, S. M. **CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA DURABILIDADE DE CONCRETOS, PRODUZIDOS COM RESÍDUOS DE CONCRETO E ALVENARIA**. Tese em co-tutela (Doutorado em Engenharia), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

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

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

MARTINEZ-RAMIREZ, S.; SANCHEZ-CORTES, S.; GARCIA-RAMOS, J. V.; et al. Micro-Raman spectroscopy applied to depth profiles of carbonates formed in lime mortar. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 12, p. 2063-2068, 2003.

MATSCHER, T.; LOTHENBACH, B.; GLASSER, F. P. The role of calcium carbonate in cement hydration. **Cement and Concrete Research**, v. 37, n. 4, p. 551-558, 2007.

MEDEIROS, M. H. F. **Estruturas de concreto com corrosão de armaduras por carbonatação: comparação de argamassas de reparo quanto à proteção do aço**. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

MEHTA, P. K. Durability of concrete - Fifty years of progress? Durability of Concrete Second International Conference. **Anais...**, (SP-126).. p.1-31. Montreal: [s.l.], ACI, 1991.

MEYER, A. Investigations on the carbonation of concrete. INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THE CHEMISTRY OF CEMENT, 5th, 1968. **Anais...**, (Supplementary Paper III - 52).. v. III, p.394-401. Tokyo, 1969.

MIRAGLIOTA, R.; ROUGEAU, P. **Partie 3.1: Modélisation des processus de carbonatation - Synthèse bibliographique.** p.117-140. Rapport final, Epernon: CERIB, 2002.

MONTEIRO, E. C. B. **Estudo da capacidade de proteção de alguns tipos de cimentos nacionais, em relação à corrosão de armaduras sob a ação conjunta de CO<sub>2</sub> e íons cloretos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia), Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 1996.

MUNTEAN, A.; BÖHM, M. Interface conditions for fast-reaction fronts in wet porous mineral materials: the case of concrete carbonation. **Journal of Engineering Mathematics.** 2009.

MUNTEAN, A.; MEIER, S. A.; PETER, M. A.; et al. **A note on limitations of the use of accelerated concrete-carbonation tests for service-life predictions.** p.1-15. Universität Bremen, 2005.

NEPOMUCENO, A. A. **Comportamiento de los morteros de reparacion frente la carbonatacion y a la penetracion de cloruros en estructuras de hormigon armado dañadas por corrosion de armaduras. Estudio mediante la tecnica de resistencia de polarizacion.** Tesis (doctoral), Escuela Tecnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad politecnica de Madrid, Madrid, 1992.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concretp** (S. E. Giannusso, Trad.). 2e éd. São Paulo: PINI, 1997.

NGALA, V. T.; PAGE, C. L. Effects of carbonation on pore structure and diffusional properties of hydrated cement pastes. **Cement and Concrete Research**, v. 27, n. 7, p. 995-1007, 1997.

OHGA, H.; NAGATAKI, S. Prediction of carbonation depth of concrete with fly ash. MALHOTRA, V. M. (Ed.) International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag an Natural Pozzolans in Concrete, 3rd. **Anais...**, (SP 114-12).. v. 1, p.275-294. Trondheim: American Concrete Institute, 1989.

PAPADAKIS, V. G. Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress. **Cement and Concrete Research**, v. 30, n. 2, p. 291-299, 2000a.

PAPADAKIS, V. G. Effect of fly ash on Portland cement systems: Part II. High-calcium fly ash. **Cement and Concrete Research**, v. 30, n. 10, p. 1647-1654, 2000b.

PAPADAKIS, V. G.; FARDIS, M. N.; VAYENAS, C. G. Hydration and Carbonation of Pozzolanic Cements. **ACI Materials Journal**, v. 89, n. 2, p. 119-130, 1992.

PAPADAKIS, V. G.; VAYENAS, C. G.; FARDIS, M. N. A reaction engineering approach to the problem of concrete carbonation. **AIChE Journal**, v. 35, n. 10, p. 1639-1650, 1989.



PAPADAKIS, V. G.; FARDIS, M. N.; VAYENAS, C. G. Fundamental concrete carbonation model and application to durability of reinforced concrete. In: DURABILITY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS. **Anais...** . p.27-38. London, 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, 1991b.

PARROTT, L. Moisture conditioning and transport properties of concrete test specimens. **Materials and Structures**, v. 27, n. 8, p. 460-468, 1994.

PARROTT, L. J. A review of carbonation in reinforced concrete. . Wexham Springs, Cement and Concrete Association, 1987.

PAULETTI, C.; DAL MOLIN, D. C. C.; KAZMIERCZAK, C. S. Ensaio acelerados de carbonatação com diferentes tempos de sazonalidade. 48º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. **Anais...** v. CD-Room. Rio de Janeiro, 2006.

PAULETTI, C.; POSSAN, E.; DAL MOLIN, D. C. C. Carbonatação acelerada: estado da arte das pesquisas no Brasil. **Ambiente Construído**, v. 7, n. 4, p. 7-20, 2007.

PAULETTI, C. **Análise comparativa de procedimentos para ensaios acelerados de carbonatação**. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

PETER, M. A.; MUNTEAN, A.; MEIER, S. A.; BÖHM, M. Competition of several carbonation reactions in concrete: A parametric study. **Cement and Concrete Research**, v. 38, n. 12, p. 1385-1393, 2008.

PIHLAJAVAARA, S. Some results of the effect of carbonation on the porosity and pore size distribution of cement paste. **Materials and Structures**, v. 1, n. 6, p. 521-527, 1968.

PIHLAJAVAARA, S. E. Carbonation, engineering properties and effects of carbonation on concrete structures. RILEM COLLOQUIUM ON CARBONATION OF CONCRETE. **Anais...** . Athènes, 1976.

POSSAN, E. **Previsão de vida útil de estruturas de concreto armado: estudo do período de iniciação da corrosão desencadeada por carbonatação**. Tese de doutorado, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

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

REUNION INTERNATIONALE DE LABORATOIRES D'ESSAIS ET MATERIAUX.  
CPC-18: Measurement of hardened concrete carbonation depth. (RILEM Recommendations CPC-18). **Materials and Structures**, [s. n.], p. 453-455, 1988.

\_\_\_\_\_. TC 116-PCD: Permeability of concrete as a criterion of its durability: tests for gas permeability of concrete. (RILEM Recommendation TC 116-PCD). **Materials and Structures**, v. 32, p. 174-179, Apr 1999.

ROUGEAU, P. Les résultats d'essais croisés AFREM: « Essai de carbonatation accélérée ». **Comptes-Rendu des Journées Techniques - AFPC-AFREM DURABILITE DES BETONS**, Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité.. p.87-103. Toulouse, 1997.

ROY, S. K.; POH, K. B.; NORTHWOOD, D. O. Durability of concrete--accelerated carbonation and weathering studies. **Building and Environment**, v. 34, n. 5, p. 597-606, 1999.

RUSSELL, D.; BASHEER, P. A. M.; RANKIN, G. I. B.; LONG, A. E. Effect of relative humidity and air permeability on prediction of the rate of carbonation of concrete. **Structures & Buildings**, v. 146, n. 3, p. 319 - 326, 2001.

SAEKI, T.; MONTEIRO, P. J. M. A model to predict the amount of calcium hydroxide in concrete containing mineral admixtures. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 10, p. 1914-1921, 2005.

SAETTA, A. V.; SCHREFLER, B. A.; VITALIANI, R. V. The carbonation of concrete and the mechanism of moisture, heat and carbon dioxide flow through porous materials. **Cement and Concrete Research**, v. 23, n. 4, p. 761-772, 1993.

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.; 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, n. 4, p. 571-579, 2004.

SAETTA, A. V.; VITALIANI, R. V. Experimental investigation and numerical modeling of carbonation process in reinforced concrete structures: Part II. Practical applications. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 5, p. 958-967, 2005.

SANJUÁN, M. A.; ANDRADE, C.; CHEYREZY, M. Concrete carbonation tests in natural and accelerated conditions. **Advances in Cement Research**, v. 15, n. 4, p. 171-180, 2003.

SANJUÁN, M. A.; DEL OLMO, C. Carbonation resistance of one industrial mortar used as a concrete coating. **Building and Environment**, v. 36, n. 8, p. 949-953, 2001.

SARRÍA, J. J. **Efecto de los parâmetros ambientales en la velocidad de corrosión Del acero embebido en el hormigón. Incidência de la fisuración del recubrimiento.** 1997. 243f. Tesis (Doctoral) – Universidad Politécnica de Madrid, Madrid-España, 1997.

SEIDLER, N. **Efeito de adições pozolânicas na alcalinidade e consumo de hidróxido de cálcio durante a hidratação e carbonatação de materiais cimentícios.** Dissertação (Mestrado em Engenharia), Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

SELLIER, A. **Modélisations numériques pour la durabilité des ouvrages de génie civil.** Mémoire D'Habilitation à Diriger des Recherches, Université Paul Sabatier, Toulouse, 2006.

SIERRA, A. **O processo de carbonatação no concreto em função dos tipos de cimento e agregados.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Escola de Engenharia, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 1996.

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

SISOMPHON, K.; FRANKE, L. Carbonation rates of concretes containing high volume of pozzolanic materials. **Cement and Concrete Research**, v. 37, n. 12, p. 1647-1653, 2007.

SMOLCZYK, H. G. Discussion of principal paper of carbonation of concrete by Hamada. INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THE CHEMISTRY OF CEMENT, 5th , 1968. **Anais...** p.369-384. Tokyo, 1969.

SMOLCZYK, H. G. Physical and chemical phenomena of carbonation. RILEM COLLOQUIUM ON CARBONATION OF CONCRETE. **Anais...** , Paper 1.1.. p.10p. Athènes: [s. ed], 1976.

SPERB, J. E. K. **Carbonatação e absorção capilar de concretos com adições minerais e ativadores químicos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, 2003.

STEPKOWSKA, E. T.; PÉREZ-RODRÍGUEZ, J. L.; SAYAGUÉS, M. J.; MARTÍNEZ-BLANES, J. M. Calcite, vaterite and aragonite forming on cement hydration from liquid and gaseous phase. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 73, n. 1, p. 247-269, 2003.

STEPKOWSKA, E.; AVILES, M.; BLANES, J.; PEREZ-RODRIGUEZ, J. Gradual transformation of Ca(OH)<sub>2</sub> into CaCO<sub>3</sub> on cement hydration. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 87, n. 1, p. 189-198, 2007.

STUMPP, M. J. **Carbonatação de concretos com altos teores de adições minerais e cal hidratada.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, 2003.

THIERY, M. **Modélisation de la carbonatation atmosphérique des bétons - Prise en compte des effets cinétiques et de l'état hydrique**. Thèse de doctorat, École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 2005.

THIERY, M.; DANGLA, P.; VILLAIN, G.; PLATRET, G. A prediction model for concrete carbonation based on coupled CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O-ions transfers and chemical reactions. , TT1-58. Lyon, 2005.

THIERY, M.; DANGLA, P.; VILLAIN, G.; et al. Modelling of the atmospheric carbonation of cementitious materials. **Bulletim des Laboratoires des Ponts et Chaussées**, v. 252-253, n. ref. 4535, p. 153-187, 2004.

TUUTTI, K. **Corrosion of steel in concrete**. Thèse, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, 1982.

UOMOTO, T.; TAKADA, Y. Factors affecting concrete carbonation rate. DURABILITY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS, 6th. **Anais...**, E. & F.N. SPON. S. Nagasaki, T. Nireki and F. Tomosawa, 1993.

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

VAN GERVEN, T.; VAN BAELEN, D.; DUTRÉ, V.; VANDECASSTEELE, C. Influence of carbonation and carbonation methods on leaching of metals from mortars. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 1, p. 149-156, 2004.

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

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

VILLAIN, G.; THIERY, M. Gammadensimetry: A method to determine drying and carbonation profiles in concrete. **NDT & E International**, v. 39, n. 4, p. 328-337, 2006.

VILLAIN, G.; THIERY, M.; PLATRET, G. Measurement methods of carbonation profiles in concrete: Thermogravimetry, chemical analysis and gammadensimetry. **Cement and Concrete Research**, v. 37, n. 8, p. 1182-1192, 2007.

WALLER, V. **Relations entre composition des bétons, exothermie en cours de prise et résistance en compression**. Rapport issu de la thèse de doctorat, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 2000.

WANG, A.; ZHANG, C.; SUN, W. Fly ash effects: II. The active effect of fly ash. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 11, p. 2057-2060, 2004.

WOLF, J. **Estudo sobre a durabilidade de concretos de alta resistência com adições de microssílica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1991.

WOLF, J.; DAL MOLIN, D. C. C. Carbonatação de argamassas e concretos: Fatores intervenientes. SIMPÓSIO SOBRE PATOLOGIA DAS EDIFICAÇÕES: PREVENÇÃO E RECUPERAÇÃO. **Anais...** p.118-133. Porto Alegre: UFRGS, 1989.

YING-YU, L.; QUI-DONG, W. The mechanism of carbonation of mortars and the dependence of carbonation on pore structure. CONCRETE DURABILITY. **Anais...**, (SP 100-98).. p.1915-1943. Detroit: [s. ed.], 1987.

ZHANG, X.; WU, K.; YAN, A. Carbonation property of hardened binder pastes containing super-pulverized blast-furnace slag. **Cement and Concrete Composites**, v. 26, n. 4, p. 371-374, 2004.

ZORNOZA, E.; PAYÁ, J.; GARCÉS, P. Carbonation rate and reinforcing steel corrosion rate of OPC/FC3R/FA mortars under accelerated conditions. **Advances in Cement Research**, v. 21, n. 1, p. 15-22, 2009.

**APÊNDICE A – Data de início e período de duração, de cada etapa dos procedimentos que antecederam os ensaios acelerados de carbonatação**

Tabela A1: relação das datas e duração de algumas etapas do programa experimental

Ident.	Moldagem (A)	Início prec. (B)	B-A dias	Fim prec. (C)	C-B dias	Fim redist. (D)	D-C dias	Início carbo. (E)	E-B dias	
Grupo 1	I40 SC	06/10/03	03/11/03	28	04/12/03	31	15/12/03	11	15/12/03	70
	I40 R	06/10/03	03/11/03	28	13/11/03	10	10/12/03	27	15/12/03	70
	I55 SC	07/10/03	04/11/03	28	04/12/03	30	15/12/03	11	15/12/03	69
	I55 R	07/10/03	04/11/03	28	10/11/03	6	10/12/03	30	15/12/03	69
	I70 SC	08/10/03	05/11/03	28	04/12/03	29	15/12/03	11	15/12/03	68
	I70 R	08/10/03	05/11/03	28	12/11/03	7	10/12/03	28	15/12/03	68
	IV40 SC	06/10/03	03/11/03	28	05/12/03	32	15/12/03	10	15/12/03	70
	IV40 R	06/10/03	03/11/03	28	21/11/03	18	10/12/03	19	15/12/03	70
	IV55 SC	07/10/03	04/11/03	28	04/12/03	30	15/12/03	11	15/12/03	69
	IV55 R	07/10/03	04/11/03	28	25/11/03	21	10/12/03	15	15/12/03	69
	IV70 SC	08/10/03	05/11/03	28	04/12/03	29	15/12/03	11	15/12/03	68
	IV70 R	08/10/03	05/11/03	28	18/11/03	13	10/12/03	22	15/12/03	68
Grupo 2	I40 SC	24/11/03	01/12/03	7	23/12/03	22	07/01/04	15	07/01/04	44
	I40 R	24/11/03	01/12/03	7	15/12/03	14	05/01/04	21	07/01/04	44
	I55 SC	25/11/03	02/12/03	7	23/12/03	21	07/01/04	15	07/01/04	43
	I55 R	25/11/03	02/12/03	7	12/12/03	10	05/01/04	24	07/01/04	43
	I70 SC	27/11/03	04/12/03	7	23/12/03	19	07/01/04	15	07/01/04	41
	I70 R	27/11/03	04/12/03	7	10/12/03	6	05/01/04	26	07/01/04	41
	IV40 SC	24/11/03	01/12/03	7	19/12/03	18	07/01/04	19	07/01/04	44
	IV40 R	24/11/03	01/12/03	7	12/12/03	11	05/01/04	24	07/01/04	44
	IV55 SC	25/11/03	02/12/03	7	19/12/03	17	07/01/04	19	07/01/04	43
	IV55 R	25/11/03	02/12/03	7	10/12/03	8	05/01/04	26	07/01/04	43
	IV70 SC	26/11/03	03/12/03	7	19/12/03	16	07/01/04	19	07/01/04	42
	IV70 R	26/11/03	03/12/03	7	10/12/03	7	05/01/04	26	07/01/04	42
Grupo 3	I40 SC	09/12/03	06/01/04	28	30/01/04	24	13/02/04	14	13/02/04	66
	I40 R	09/12/03	06/01/04	28	14/01/04	8	28/01/04	14	29/01/04	51
	I55 SC	10/12/03	07/01/04	28	30/01/04	23	13/02/04	14	13/02/04	65
	I55 R	10/12/03	07/01/04	28	16/01/04	9	02/02/04	17	03/02/04	55
	I70 SC	11/12/03	08/01/04	28	04/02/04	27	18/02/04	14	18/02/04	69
	I70 R	11/12/03	08/01/04	28	19/01/04	11	02/02/04	14	03/02/04	54
	IV40 SC	09/12/03	06/01/04	28	30/01/04	24	13/02/04	14	13/02/04	66
	IV40 R	09/12/03	06/01/04	28	05/02/04	30	20/02/04	15	26/02/04	79
	IV55 SC	10/12/03	07/01/04	28	04/02/04	28	18/02/04	14	18/02/04	70
	IV55 R	10/12/03	07/01/04	28	09/02/04	33	25/02/04	16	26/02/04	78
	IV70 SC	11/12/03	08/01/04	28	04/02/04	27	18/02/04	14	18/02/04	69
	IV70 R	11/12/03	08/01/04	28	05/02/04	28	20/02/04	15	26/02/04	77
Grupo 4	I40 SC	26/01/04	02/02/04	7	26/02/04	24	13/03/04	16	11/03/04	45
	I40 R	26/01/04	02/02/04	7	10/02/04	8	25/02/04	15	26/02/04	31
	I55 SC	27/01/04	03/02/04	7	26/02/04	23	11/03/04	14	11/03/04	44
	I55 R	27/01/04	03/02/04	7	10/02/04	7	25/02/04	15	26/02/04	30
	I70 SC	28/01/04	04/02/04	7	26/02/04	22	11/03/04	14	11/03/04	43
	I70 R	28/01/04	04/02/04	7	10/02/04	6	25/02/04	15	26/02/04	29
	IV40 SC	26/01/04	02/02/04	7	26/02/04	24	11/03/04	14	11/03/04	45
	IV40 R	26/01/04	02/02/04	7	13/02/04	11	27/02/04	14	02/03/04	36
	IV55 SC	27/01/04	03/02/04	7	26/02/04	23	11/03/04	14	11/03/04	44
	IV55 R	27/01/04	03/02/04	7	16/02/04	13	01/03/04	14	02/03/04	35
	IV70 SC	28/01/04	04/02/04	7	26/02/04	22	11/03/04	14	11/03/04	43
	IV70 R	28/01/04	04/02/04	7	12/02/04	8	27/02/04	15	02/03/04	34

**APÊNDICE B – Massa após cura e ao final da secagem em sala climatizada  
( $20\pm 1^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{UR}=70\pm 5\%$ ), dos grupos 1 e 2**



Tabela B1: massa após cura e massa atingida ao final do período de condicionamento em sala climatizada, para o grupo 1

Ident.	m <sub>o</sub>	m <sub>f</sub>	Ident.	m <sub>o</sub>	m <sub>f</sub>	Ident.	m <sub>o</sub>	m <sub>f</sub>
I40-01	593,1	583,7	I55-01	593,9	578,9	I70-01	581,7	560,0
I40-02	597,2	587,5	I55-02	580,0	564,8	I70-02	584,5	562,9
I40-03	609,4	599,8	I55-03	580,9	565,4	I70-03	586,3	565,0
I40-04	605,0	593,9	I55-04	590,5	575,4	I70-04	581,9	560,3
I40-05	609,7	598,7	I55-05	582,3	567,1	I70-05	581,4	559,8
I40-06	616,5	605,7	I55-06	586,9	572,0	I70-06	574,1	552,7
I40-07	588,3	578,9	I55-07	584,6	570,0	I70-07	576,5	555,0
I40-08	588,6	579,1	I55-08	591,3	576,0	I70-08	581,8	560,0
I40-09	592,3	582,9	I55-09	595,3	580,3	I70-09	577,8	556,8
I40-19	602,4	593,6	I55-19	585,0	570,2	I70-19	577,1	555,6
I40-20	600,4	591,3	I55-20	590,1	575,3	I70-20	576,1	554,5
I40-21	591,5	582,4	I55-21	591,3	576,8	I70-21	583,9	562,6
I40-22	601,0	590,9	I55-22	594,7	579,1	I70-22	584,8	562,7
I40-23	607,1	596,7	I55-23	599,2	583,8	I70-23	586,8	564,3
I40-24	597,8	587,6	I55-24	587,5	572,1	I70-24	581,0	559,5
I40-25	601,9	592,4	I55-25	588,8	573,5	I70-25	582,6	559,8
I40-26	600,7	591,3	I55-26	585,6	569,9	I70-26	584,0	560,7
I40-27	609,0	599,4	I55-27	586,4	570,7	I70-27	573,4	551,1
IV40-01	583,8	573,5	IV55-01	583,4	565,0	IV70-01	576,5	552,3
IV40-02	588,4	578,2	IV55-02	587,6	569,0	IV70-02	568,5	545,2
IV40-03	580,8	570,9	IV55-03	583,6	565,4	IV70-03	567,4	544,3
IV40-04	603,7	592,3	IV55-04	580,7	563,1	IV70-04	569,3	544,9
IV40-05	604,7	593,6	IV55-05	592,2	573,9	IV70-05	574,3	548,8
IV40-06	598,4	587,5	IV55-06	582,2	564,2	IV70-06	568,7	543,3
IV40-07	595,4	585,2	IV55-07	583,2	565,7	IV70-07	583,6	560,4
IV40-08	596,5	586,6	IV55-08	579,5	562,0	IV70-08	576,3	552,5
IV40-09	590,0	579,9	IV55-09	575,9	557,9	IV70-09	569,9	546,7
IV40-19	587,8	577,3	IV55-19	577,5	559,4	IV70-19	574,2	550,0
IV40-20	589,8	579,3	IV55-20	581,3	563,7	IV70-20	573,0	548,6
IV40-21	588,5	578,3	IV55-21	580,4	562,9	IV70-21	567,7	543,8
IV40-22	585,4	574,5	IV55-22	582,6	565,3	IV70-22	577,0	551,5
IV40-23	590,1	579,5	IV55-23	576,1	558,5	IV70-23	568,8	544,6
IV40-24	587,0	576,3	IV55-24	582,0	564,3	IV70-24	575,1	549,0
IV40-25	609,7	598,7	IV55-25	588,5	570,7	IV70-25	588,8	563,9
IV40-26	604,5	593,4	IV55-26	583,1	565,1	IV70-26	574,6	549,6
IV40-27	598,8	587,8	IV55-27	587,8	569,6	IV70-27	580,8	555,6

m<sub>o</sub> = massa do corpo-de-prova, ao final do período de cura submersa, em (g);

m<sub>f</sub> = massa do corpo-de-prova, ao final do período de condicionamento em sala climatizada, em (g);

Tabela B2: massa após cura e massa atingida ao final do período de condicionamento em sala climatizada, para o grupo 2

Ident.	m <sub>o</sub>	m <sub>f</sub>	Ident.	m <sub>o</sub>	m <sub>f</sub>	Ident.	m <sub>o</sub>	m <sub>f</sub>
I40-01	597,3	587,6	I55-01	593,3	578,7	I70-01	584,6	564,3
I40-02	595,5	587,7	I55-02	583,1	569,0	I70-02	571,9	551,7
I40-03	598,3	588,8	I55-03	588,9	575,2	I70-03	572,5	552,1
I40-04	597,3	587,7	I55-04	589,4	574,1	I70-04	572,7	553,8
I40-05	586,9	577,6	I55-05	588,8	573,3	I70-05	564,7	545,8
I40-06	595,6	586,0	I55-06	576,7	571,6	I70-06	574,1	555,1
I40-07	593,3	584,1	I55-07	588,8	573,1	I70-07	574,3	553,7
I40-08	599,3	589,7	I55-08	587,5	571,8	I70-08	576,8	556,0
I40-09	592,0	582,6	I55-09	586,6	571,1	I70-09	582,5	561,9
I40-19	609,9	600,5	I55-19	590,5	575,0	I70-19	569,2	549,5
I40-20	602,6	592,8	I55-20	590,6	574,9	I70-20	571,3	551,4
I40-21	609,2	599,2	I55-21	589,5	574,1	I70-21	572,7	553,1
I40-22	589,6	579,8	I55-22	583,9	569,6	I70-22	574,7	555,1
I40-23	588,7	578,8	I55-23	576,2	561,7	I70-23	584,1	563,3
I40-24	604,9	595,1	I55-24	585,9	571,4	I70-24	582,9	562,7
I40-25	586,1	576,4	I55-25	585,1	571,4	I70-25	580,5	561,0
I40-26	586,1	576,4	I55-26	593,0	578,3	I70-26	574,3	555,1
I40-27	585,2	575,4	I55-27	597,7	583,1	I70-27	577,3	557,8
IV40-01	576,1	561,6	IV55-01	583,5	559,9	IV70-01	580,3	554,0
IV40-02	584,8	570,5	IV55-02	582,2	557,9	IV70-02	579,6	553,2
IV40-03	576,5	562,2	IV55-03	588,4	559,9	IV70-03	580,2	553,8
IV40-04	585,9	571,7	IV55-04	583,2	559,9	IV70-04	573,3	545,3
IV40-05	580,7	566,5	IV55-05	583,0	559,9	IV70-05	578,5	550,5
IV40-06	584,5	570,2	IV55-06	585,8	563,1	IV70-06	573,8	545,7
IV40-07	590,2	575,4	IV55-07	577,2	554,5	IV70-07	572,5	545,2
IV40-08	592,9	578,0	IV55-08	579,7	557,2	IV70-08	572,5	544,5
IV40-09	598,4	583,6	IV55-09	585,7	563,2	IV70-09	579,9	551,5
IV40-19	590,5	575,6	IV55-19	580,9	557,4	IV70-19	575,8	547,9
IV40-20	593,4	578,4	IV55-20	587,2	563,5	IV70-20	573,1	545,5
IV40-21	597,9	582,9	IV55-21	587,9	564,2	IV70-21	582,7	554,3
IV40-22	582,0	567,2	IV55-22	579,8	556,5	IV70-22	590,3	561,2
IV40-23	580,6	565,8	IV55-23	581,2	557,8	IV70-23	579,7	550,6
IV40-24	586,1	571,4	IV55-24	574,8	551,6	IV70-24	596,0	566,6
IV40-25	576,6	562,0	IV55-25	585,5	561,9	IV70-25	585,4	555,5
IV40-26	585,5	570,8	IV55-26	586,1	562,3	IV70-26	583,9	553,6
IV40-27	578,2	563,5	IV55-27	589,5	566,1	IV70-27	578,6	547,8

m<sub>o</sub> = massa do corpo-de-prova, ao final do período de cura submersa, em (g);

m<sub>f</sub> = massa do corpo-de-prova, ao final do período de condicionamento em sala climatizada, em (g);

**APÊNDICE C – Parâmetros da etapa de condicionamento, conforme  
recomendações da RILEM (1999), no TC 116-PCD**

Tabela C1: Parâmetros da etapa de condicionamento, conforme recomendações da RILEM, para cura de 7 dias

Ident.	$m_o$ (g)	$m_{d(1)}$ (g)	$W_e$ (g)	$w_e$	$m_{e,70}$ (g)	$m_{d(2)}$ (g)	$W_{e,70}$ (g)	$w_{e,70}$	$\Delta m$ (g)
I40	607,9	556,3	51,60	0,0928	730,5	702,5	28,00	0,0399	29,4272
I55	598,8	547,6	51,20	0,0935	749,1	726,8	22,30	0,0307	34,3983
I70	584,7	533,9	50,80	0,0951	699,6	684,5	15,10	0,0221	39,0222
IV40	588,8	535,4	53,40	0,0997	651,9	632,2	19,70	0,0312	36,7164
IV55	582,0	527,2	54,80	0,1039	660,0	646,8	13,20	0,0204	44,0408
IV70	579,5	528,1	51,40	0,0973	614,2	605,9	8,30	0,0137	44,1658

Tabela C2: Parâmetros da etapa de condicionamento, conforme recomendações da RILEM, para cura de 28 dias

Ident.	$m_o$ (g)	$m_{d(1)}$ (g)	$W_e$ (g)	$w_e$	$m_{e,70}$ (g)	$m_{d(2)}$ (g)	$W_{e,70}$ (g)	$w_{e,70}$	$\Delta m$ (g)
I40	582,0	532,4	49,60	0,0932	769,3	729,9	39,40	0,0540	20,8610
I55	584,9	536,9	48,00	0,0894	748,1	718,4	29,70	0,0413	25,8035
I70	581,4	535,1	46,30	0,0865	686,4	664,2	22,20	0,0334	28,4150
IV40	572,1	520,3	51,80	0,0996	791,8	748,1	43,70	0,0584	21,4069
IV55	586,0	534,0	52,00	0,0974	687,5	662,3	25,20	0,0380	31,6817
IV70	576,3	526,0	50,30	0,0956	694,6	670,8	23,80	0,0355	31,6375

$m_o$  = massa do corpo-de-prova no fim da cura, em (g);

$m_{d(1)}$  = massa do corpo-de-prova após secagem em estufa (a 105°C), em (g);

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

$w_e$  = concentração da umidade evaporável, (adimensional);

$m_{e,70}$  = massa do material triturado, após equilíbrio na sala climatizada (temperatura de 20°C e umidade relativa de 70%), em (g);

$m_{d(2)}$  = massa do material triturado após secagem em estufa (a 105°C), em (g);

$W_{e,70}$  = quantidade de água de equilíbrio a 70±5% de umidade relativa, em (g);

$w_{e,70}$  = concentração de umidade de equilíbrio, (adimensional);

$\Delta m$  = massa a ser perdida pelo corpo-de-prova a ser ensaiado, em (g).

**APÊNDICE D – Massa após cura,  $\Delta m$  calculado, massa a ser atingida e massa final atingida ao término do condicionamento conforme os procedimentos da RILEM, dos grupos 1 e 2**

Tabela D1: massa após cura,  $\Delta m$ , massa a ser atingida e massa ao final do condicionamento, para G1-I40 e G1-IV40

Ident.	$m_0$	$\Delta m$	$m_0$ (G1)	$\Delta m$ (G1)	$m_0$ (G1) - $\Delta m$ (G1)	$m_f$ (G1)
I40-10	607,9	29,4272	595,8	28,8415	567,0	567,8
I40-11	607,9	29,4272	603,6	29,2190	574,4	575,8
I40-12	607,9	29,4272	596,0	28,8511	567,1	568,3
I40-13	607,9	29,4272	606,3	29,3497	577,0	576,7
I40-14	607,9	29,4272	598,4	28,9673	569,4	570,6
I40-15	607,9	29,4272	592,6	28,6866	563,9	564,9
I40-16	607,9	29,4272	601,7	29,1271	572,6	573,5
I40-17	607,9	29,4272	595,5	28,8269	566,7	567,8
I40-18	607,9	29,4272	597,8	28,9383	568,9	570,0
I40-28	607,9	29,4272	593,8	28,7446	565,1	566,4
I40-29	607,9	29,4272	594,8	28,7931	566,0	566,7
I40-30	607,9	29,4272	597,8	28,9383	568,9	569,9
I40-31	607,9	29,4272	610,6	29,5579	581,0	581,9
I40-32	607,9	29,4272	606,8	29,3740	577,4	578,5
I40-33	607,9	29,4272	594,2	28,7640	565,4	566,8
I40-34	607,9	29,4272	605,4	29,3062	576,1	576,1
I40-35	607,9	29,4272	601,5	29,1174	572,4	572,4
I40-36	607,9	29,4272	608,7	29,4659	579,2	578,4
IV40-10	588,8	36,7164	595,0	37,1030	557,9	559,5
IV40-11	588,8	36,7164	604,4	37,6892	566,7	568,5
IV40-12	588,8	36,7164	597,0	37,2277	559,8	561,6
IV40-13	588,8	36,7164	600,8	37,4647	563,3	565,2
IV40-14	588,8	36,7164	601,0	37,4772	563,5	564,9
IV40-15	588,8	36,7164	602,5	37,5707	564,9	566,2
IV40-16	588,8	36,7164	583,6	36,3921	547,2	548,6
IV40-17	588,8	36,7164	593,6	37,0157	556,6	558,4
IV40-18	588,8	36,7164	585,6	36,5169	549,1	550,6
IV40-28	588,8	36,7164	595,3	37,1217	558,2	559,6
IV40-29	588,8	36,7164	589,1	36,7351	552,4	554,0
IV40-30	588,8	36,7164	586,4	36,5667	549,8	551,4
IV40-31	588,8	36,7164	596,1	37,1716	558,9	560,2
IV40-32	588,8	36,7164	599,5	37,3836	562,1	563,7
IV40-33	588,8	36,7164	587,8	36,6540	551,1	552,9
IV40-34	588,8	36,7164	594,5	37,0718	557,4	559,2
IV40-35	588,8	36,7164	579,7	36,1489	543,6	545,0
IV40-36	588,8	36,7164	599,0	37,3525	561,6	563,5

$m_0$  = massa do corpo-de-prova, utilizado na determinação dos parâmetros para condicionamento, no fim da cura, em (g);

$\Delta m$  = massa a ser perdida pelo corpo-de-prova com massa igual a  $m_0$ , em (g);

$m_0$  (G1) = massa do corpo-de-prova do grupo 1, no fim da cura, em (g);

$\Delta m$  (G1) = massa a ser perdida pelo corpo-de-prova do grupo 1, em (g);

$m_0$  (G1) -  $\Delta m$  (G1) = massa a ser atingida pelo corpo-de-prova do grupo 1, em (g);

$m_f$  (G1) = massa atingida pelo corpo-de-prova do grupo 1, em (g).

Tabela D2: massa após cura,  $\Delta m$ , massa a ser atingida e massa ao final do condicionamento, para G1-I55 e G1-IV55

Ident.	$m_0$	$\Delta m$	$m_0$ (G1)	$\Delta m$ (G1)	$m_0$ (G1) - $\Delta m$ (G1)	$m_f$ (G1)
I55-10	598,8	34,3983	589,2	33,8468	555,4	556,9
I55-11	598,8	34,3983	590,4	33,9158	556,5	556,9
I55-12	598,8	34,3983	578,0	33,2034	544,8	546,0
I55-13	598,8	34,3983	585,1	33,6113	551,5	553,1
I55-14	598,8	34,3983	583,5	33,5194	550,0	551,0
I55-15	598,8	34,3983	584,3	33,5653	550,7	552,4
I55-16	598,8	34,3983	592,9	34,0594	558,8	559,3
I55-17	598,8	34,3983	588,9	33,8296	555,1	555,4
I55-18	598,8	34,3983	585,3	33,6228	551,7	552,3
I55-28	598,8	34,3983	587,5	33,7492	553,8	554,7
I55-29	598,8	34,3983	580,7	33,3585	547,3	548,2
I55-30	598,8	34,3983	576,8	33,1345	543,7	543,9
I55-31	598,8	34,3983	579,4	33,2839	546,1	545,9
I55-32	598,8	34,3983	585,6	33,6400	552,0	552,2
I55-33	598,8	34,3983	574,9	33,0254	541,9	543,2
I55-34	598,8	34,3983	599,4	34,4328	565,0	566,6
I55-35	598,8	34,3983	591,5	33,9789	557,5	558,3
I55-36	598,8	34,3983	595,5	34,2087	561,3	561,1
IV55-10	582,0	44,0408	581,3	43,9878	537,3	539,2
IV55-11	582,0	44,0408	582,5	44,0786	538,4	540,0
IV55-12	582,0	44,0408	583,6	44,1619	539,4	541,2
IV55-13	582,0	44,0408	588,4	44,5251	543,9	545,6
IV55-14	582,0	44,0408	583,7	44,1694	539,5	541,7
IV55-15	582,0	44,0408	567,8	42,9663	524,8	526,8
IV55-16	582,0	44,0408	591,0	44,7218	546,3	548,2
IV55-17	582,0	44,0408	580,8	43,9500	536,9	538,4
IV55-18	582,0	44,0408	580,6	43,9349	536,7	538,1
IV55-28	582,0	44,0408	577,7	43,7154	534,0	536,1
IV55-29	582,0	44,0408	576,5	43,6246	532,9	534,1
IV55-30	582,0	44,0408	575,6	43,5565	532,0	534,1
IV55-31	582,0	44,0408	590,6	44,6916	545,9	548,1
IV55-32	582,0	44,0408	590,8	44,7067	546,1	548,1
IV55-33	582,0	44,0408	586,6	44,3889	542,2	543,7
IV55-34	582,0	44,0408	582,0	44,0408	538,0	539,9
IV55-35	582,0	44,0408	581,8	44,0257	537,8	539,9
IV55-36	582,0	44,0408	588,9	44,5629	544,3	546,3

$m_0$  = massa do corpo-de-prova, utilizado na determinação dos parâmetros para condicionamento, no fim da cura, em (g);

$\Delta m$  = massa a ser perdida pelo corpo-de-prova com massa igual a  $m_0$ , em (g);

$m_0$  (G1) = massa do corpo-de-prova do grupo 1, no fim da cura, em (g);

$\Delta m$  (G1) = massa a ser perdida pelo corpo-de-prova do grupo 1, em (g);

$m_0$  (G1) -  $\Delta m$  (G1) = massa a ser atingida pelo corpo-de-prova do grupo 1, em (g);

$m_f$  (G1) = massa atingida pelo corpo-de-prova do grupo 1, em (g).

Tabela D3: massa após cura,  $\Delta m$ , massa a ser atingida e massa ao final do condicionamento, para G1-I70 e G1-IV70

Ident.	$m_0$	$\Delta m$	$m_0$ (G1)	$\Delta m$ (G1)	$m_0$ (G1) - $\Delta m$ (G1)	$m_f$ (G1)
I70-10	584,7	39,0222	567,5	37,8743	529,6	531,0
I70-11	584,7	39,0222	583,6	38,9488	544,7	546,4
I70-12	584,7	39,0222	582,3	38,8620	543,4	544,5
I70-13	584,7	39,0222	569,1	37,9811	531,1	532,6
I70-14	584,7	39,0222	586,1	39,1156	547,0	548,8
I70-15	584,7	39,0222	579,7	38,6885	541,0	542,4
I70-16	584,7	39,0222	574,6	38,3481	536,3	536,7
I70-17	584,7	39,0222	574,2	38,3214	535,9	537,1
I70-18	584,7	39,0222	572,4	38,2013	534,2	536,0
I70-28	584,7	39,0222	570,0	38,0411	532,0	532,9
I70-29	584,7	39,0222	582,8	38,8954	543,9	544,7
I70-30	584,7	39,0222	590,3	39,3959	550,9	551,2
I70-31	584,7	39,0222	574,7	38,3548	536,3	538,2
I70-32	584,7	39,0222	571,1	38,1146	533,0	534,5
I70-33	584,7	39,0222	576,3	38,4616	537,8	539,6
I70-34	584,7	39,0222	574,5	38,3415	536,2	536,4
I70-35	584,7	39,0222	576,1	38,4482	537,7	539,4
I70-36	584,7	39,0222	579,3	38,6618	540,6	541,0
IV70-10	579,5	44,1658	571,0	43,5180	527,5	528,9
IV70-11	579,5	44,1658	570,6	43,4875	527,1	528,3
IV70-12	579,5	44,1658	572,1	43,6018	528,5	529,7
IV70-13	579,5	44,1658	587,1	44,7450	542,4	543,8
IV70-14	579,5	44,1658	572,7	43,6475	529,1	530,0
IV70-15	579,5	44,1658	572,4	43,6247	528,8	530,3
IV70-16	579,5	44,1658	570,4	43,4723	526,9	529,0
IV70-17	579,5	44,1658	568,5	43,3275	525,2	527,0
IV70-18	579,5	44,1658	576,7	43,9524	532,7	534,9
IV70-28	579,5	44,1658	572,8	43,6552	529,1	530,4
IV70-29	579,5	44,1658	573,0	43,6704	529,3	531,0
IV70-30	579,5	44,1658	576,8	43,9600	532,8	534,9
IV70-31	579,5	44,1658	567,9	43,2817	524,6	526,4
IV70-32	579,5	44,1658	558,6	42,5729	516,0	517,8
IV70-33	579,5	44,1658	567,0	43,2131	523,8	525,9
IV70-34	579,5	44,1658	573,1	43,6780	529,4	531,1
IV70-35	579,5	44,1658	577,8	44,0362	533,8	534,9
IV70-36	579,5	44,1658	577,9	44,0439	533,9	535,4

$m_0$  = massa do corpo-de-prova, utilizado na determinação dos parâmetros para condicionamento, no fim da cura, em (g);

$\Delta m$  = massa a ser perdida pelo corpo-de-prova com massa igual a  $m_0$ , em (g);

$m_0$  (G1) = massa do corpo-de-prova do grupo 1, no fim da cura, em (g);

$\Delta m$  (G1) = massa a ser perdida pelo corpo-de-prova do grupo 1, em (g);

$m_0$  (G1) -  $\Delta m$  (G1) = massa a ser atingida pelo corpo-de-prova do grupo 1, em (g);

$m_f$  (G1) = massa atingida pelo corpo-de-prova do grupo 1, em (g).



Tabela D4: massa após cura,  $\Delta m$ , massa a ser atingida e massa ao final do condicionamento, para G2-I40 e G2-IV40

Ident.	$m_o$	$\Delta m$	$m_o$ (G2)	$\Delta m$ (G2)	$m_o$ (G2) - $\Delta m$ (G2)	$m_f$ (G2)
I40-10	607,9	29,4272	593,0	28,7059	564,3	563,0
I40-11	607,9	29,4272	597,2	28,9092	568,3	567,4
I40-12	607,9	29,4272	589,0	28,5123	560,5	560,0
I40-13	607,9	29,4272	599,5	29,0206	570,5	570,0
I40-14	607,9	29,4272	596,5	28,8753	567,6	566,8
I40-15	607,9	29,4272	600,2	29,0545	571,1	570,7
I40-16	607,9	29,4272	585,8	28,3574	557,4	556,1
I40-17	607,9	29,4272	592,7	28,6914	564,0	563,2
I40-18	607,9	29,4272	584,2	28,2799	555,9	555,0
I40-28	607,9	29,4272	600,6	29,0738	571,5	570,8
I40-29	607,9	29,4272	596,6	28,8802	567,7	567,1
I40-30	607,9	29,4272	584,9	28,3138	556,6	557,9
I40-31	607,9	29,4272	594,0	28,7543	565,2	563,8
I40-32	607,9	29,4272	592,6	28,6866	563,9	562,1
I40-33	607,9	29,4272	600,6	29,0738	571,5	572,7
I40-34	607,9	29,4272	596,2	28,8608	567,3	565,7
I40-35	607,9	29,4272	591,0	28,6091	562,4	561,3
I40-36	607,9	29,4272	594,4	28,7737	565,6	563,9
IV40-10	588,8	36,7164	580,9	36,2238	544,7	546,6
IV40-11	588,8	36,7164	584,2	36,4296	547,8	550,0
IV40-12	588,8	36,7164	585,6	36,5169	549,1	550,6
IV40-13	588,8	36,7164	582,5	36,3235	546,2	547,7
IV40-14	588,8	36,7164	588,2	36,6790	551,5	552,8
IV40-15	588,8	36,7164	586,2	36,5543	549,6	552,0
IV40-16	588,8	36,7164	593,0	36,9783	556,0	557,4
IV40-17	588,8	36,7164	588,7	36,7102	552,0	553,9
IV40-18	588,8	36,7164	587,6	36,6416	551,0	553,3
IV40-28	588,8	36,7164	574,6	35,8309	538,8	538,4
IV40-29	588,8	36,7164	589,5	36,7601	552,7	552,7
IV40-30	588,8	36,7164	583,0	36,3547	546,6	547,8
IV40-31	588,8	36,7164	583,8	36,4046	547,4	546,8
IV40-32	588,8	36,7164	588,7	36,7102	552,0	551,2
IV40-33	588,8	36,7164	585,5	36,5106	549,0	550,0
IV40-34	588,8	36,7164	585,9	36,5356	549,4	549,5
IV40-35	588,8	36,7164	582,6	36,3298	546,3	547,7
IV40-36	588,8	36,7164	577,6	36,0180	541,6	541,1

$m_o$  = massa do corpo-de-prova, utilizado na determinação dos parâmetros para condicionamento, no fim da cura, em (g);

$\Delta m$  = massa a ser perdida pelo corpo-de-prova com massa igual a  $m_o$ , em (g);

$m_o$  (G2) = massa do corpo-de-prova do grupo 2, no fim da cura, em (g);

$\Delta m$  (G2) = massa a ser perdida pelo corpo-de-prova do grupo 2, em (g);

$m_o$  (G2) -  $\Delta m$  (G2) = massa a ser atingida pelo corpo-de-prova do grupo 2, em (g);

$m_f$  (G2) = massa atingida pelo corpo-de-prova do grupo 2, em (g).

Tabela D5: massa após cura,  $\Delta m$ , massa a ser atingida e massa ao final do condicionamento, para G2-I55 e G2-IV55

Ident.	$m_0$	$\Delta m$	$m_0$ (G2)	$\Delta m$ (G2)	$m_0$ (G2) - $\Delta m$ (G2)	$m_f$ (G2)
I55-10	598,8	34,3983	597,4	34,3179	563,1	564,8
I55-11	598,8	34,3983	579,4	33,2839	546,1	547,6
I55-12	598,8	34,3983	597,4	34,3179	563,1	561,5
I55-13	598,8	34,3983	585,9	33,6573	552,2	552,7
I55-14	598,8	34,3983	577,1	33,1517	543,9	543,4
I55-15	598,8	34,3983	582,3	33,4505	548,8	548,1
I55-16	598,8	34,3983	589,7	33,8755	555,8	554,5
I55-17	598,8	34,3983	579,1	33,2666	545,8	547,0
I55-18	598,8	34,3983	583,2	33,5022	549,7	546,8
I55-28	598,8	34,3983	588,8	33,8238	555,0	553,8
I55-29	598,8	34,3983	582,7	33,4734	549,2	548,9
I55-30	598,8	34,3983	592,0	34,0077	558,0	557,9
I55-31	598,8	34,3983	580,3	33,3356	547,0	547,8
I55-32	598,8	34,3983	591,3	33,9675	557,3	558,0
I55-33	598,8	34,3983	578,8	33,2494	545,6	546,1
I55-34	598,8	34,3983	581,0	33,3758	547,6	547,5
I55-35	598,8	34,3983	587,4	33,7434	553,7	553,7
I55-36	598,8	34,3983	584,7	33,5883	551,1	550,6
IV55-10	582,0	44,0408	575,4	43,5414	531,9	533,5
IV55-11	582,0	44,0408	578,2	43,7532	534,4	535,9
IV55-12	582,0	44,0408	584,7	44,2451	540,5	540,6
IV55-13	582,0	44,0408	581,6	44,0105	537,6	538,0
IV55-14	582,0	44,0408	587,2	44,4343	542,8	544,9
IV55-15	582,0	44,0408	592,9	44,8656	548,0	549,3
IV55-16	582,0	44,0408	578,2	43,7532	534,4	536,0
IV55-17	582,0	44,0408	580,6	43,9349	536,7	538,2
IV55-18	582,0	44,0408	580,8	43,9500	536,9	538,6
IV55-28	582,0	44,0408	576,3	43,6095	532,7	533,2
IV55-29	582,0	44,0408	580,7	43,9424	536,8	538,4
IV55-30	582,0	44,0408	591,7	44,7748	546,9	547,6
IV55-31	582,0	44,0408	579,7	43,8668	535,8	537,9
IV55-32	582,0	44,0408	580,2	43,9046	536,3	537,2
IV55-33	582,0	44,0408	580,0	43,8895	536,1	537,7
IV55-34	582,0	44,0408	584,8	44,2527	540,5	541,1
IV55-35	582,0	44,0408	592,5	44,8354	547,7	549,9
IV55-36	582,0	44,0408	571,5	43,2462	528,3	529,7

$m_0$  = massa do corpo-de-prova, utilizado na determinação dos parâmetros para condicionamento, no fim da cura, em (g);

$\Delta m$  = massa a ser perdida pelo corpo-de-prova com massa igual a  $m_0$ , em (g);

$m_0$  (G2) = massa do corpo-de-prova do grupo 2, no fim da cura, em (g);

$\Delta m$  (G2) = massa a ser perdida pelo corpo-de-prova do grupo 2, em (g);

$m_0$  (G2) -  $\Delta m$  (G2) = massa a ser atingida pelo corpo-de-prova do grupo 2, em (g);

$m_f$  (G2) = massa atingida pelo corpo-de-prova do grupo 2, em (g).

Tabela D6: massa após cura,  $\Delta m$ , massa a ser atingida e massa ao final do condicionamento, para G2-I70 e G2-IV70

Ident.	$m_0$	$\Delta m$	$m_0$ (G2)	$\Delta m$ (G2)	$m_0$ (G2) - $\Delta m$ (G2)	$m_f$ (G2)
I70-10	584,7	39,0222	574,9	38,3682	536,5	538,2
I70-11	584,7	39,0222	583,0	38,9087	544,1	545,4
I70-12	584,7	39,0222	578,6	38,6151	540,0	540,2
I70-13	584,7	39,0222	574,9	38,3682	536,5	537,3
I70-14	584,7	39,0222	577,7	38,5550	539,1	540,4
I70-15	584,7	39,0222	585,5	39,0756	546,4	547,5
I70-16	584,7	39,0222	578,3	38,5951	539,7	538,2
I70-17	584,7	39,0222	573,7	38,2881	535,4	536,5
I70-18	584,7	39,0222	578,5	38,6084	539,9	541,1
I70-28	584,7	39,0222	579,7	38,6885	541,0	542,2
I70-29	584,7	39,0222	575,0	38,3748	536,6	537,6
I70-30	584,7	39,0222	572,8	38,2280	534,6	536,4
I70-31	584,7	39,0222	579,7	38,6885	541,0	541,8
I70-32	584,7	39,0222	572,5	38,2080	534,3	532,6
I70-33	584,7	39,0222	587,8	39,2291	548,6	548,0
I70-34	584,7	39,0222	577,6	38,5484	539,1	537,8
I70-35	584,7	39,0222	568,2	37,9210	530,3	529,0
I70-36	584,7	39,0222	574,2	38,3214	535,9	534,8
IV70-10	579,5	44,1658	575,7	43,8762	531,8	533,0
IV70-11	579,5	44,1658	583,8	44,4935	539,3	540,0
IV70-12	579,5	44,1658	579,9	44,1963	535,7	536,2
IV70-13	579,5	44,1658	576,9	43,9676	532,9	534,2
IV70-14	579,5	44,1658	578,6	44,0972	534,5	536,0
IV70-15	579,5	44,1658	580,3	44,2268	536,1	538,0
IV70-16	579,5	44,1658	584,4	44,5392	539,9	541,1
IV70-17	579,5	44,1658	569,7	43,4189	526,3	526,8
IV70-18	579,5	44,1658	583,9	44,5011	539,4	540,8
IV70-28	579,5	44,1658	571,6	43,5637	528,0	529,1
IV70-29	579,5	44,1658	576,7	43,9524	532,7	533,5
IV70-30	579,5	44,1658	577,4	44,0058	533,4	535,0
IV70-31	579,5	44,1658	568,2	43,3046	524,9	526,7
IV70-32	579,5	44,1658	590,4	44,9965	545,4	545,6
IV70-33	579,5	44,1658	581,9	44,3487	537,6	539,6
IV70-34	579,5	44,1658	580,9	44,2725	536,6	538,1
IV70-35	579,5	44,1658	569,1	43,3732	525,7	527,1
IV70-36	579,5	44,1658	573,2	43,6857	529,5	530,8

$m_0$  = massa do corpo-de-prova, utilizado na determinação dos parâmetros para condicionamento, no fim da cura, em (g);

$\Delta m$  = massa a ser perdida pelo corpo-de-prova com massa igual a  $m_0$ , em (g);

$m_0$  (G2) = massa do corpo-de-prova do grupo 2, no fim da cura, em (g);

$\Delta m$  (G2) = massa a ser perdida pelo corpo-de-prova do grupo 2, em (g);

$m_0$  (G2) -  $\Delta m$  (G2) = massa a ser atingida pelo corpo-de-prova do grupo 2, em (g);

$m_f$  (G2) = massa atingida pelo corpo-de-prova do grupo 2, em (g).

**APÊNDICE E – Comparativo entre os resultados experimentais de profundidade de carbonatação e os obtidos pela modelagem matemática para cada uma das condições de exposição e variáveis estudadas**

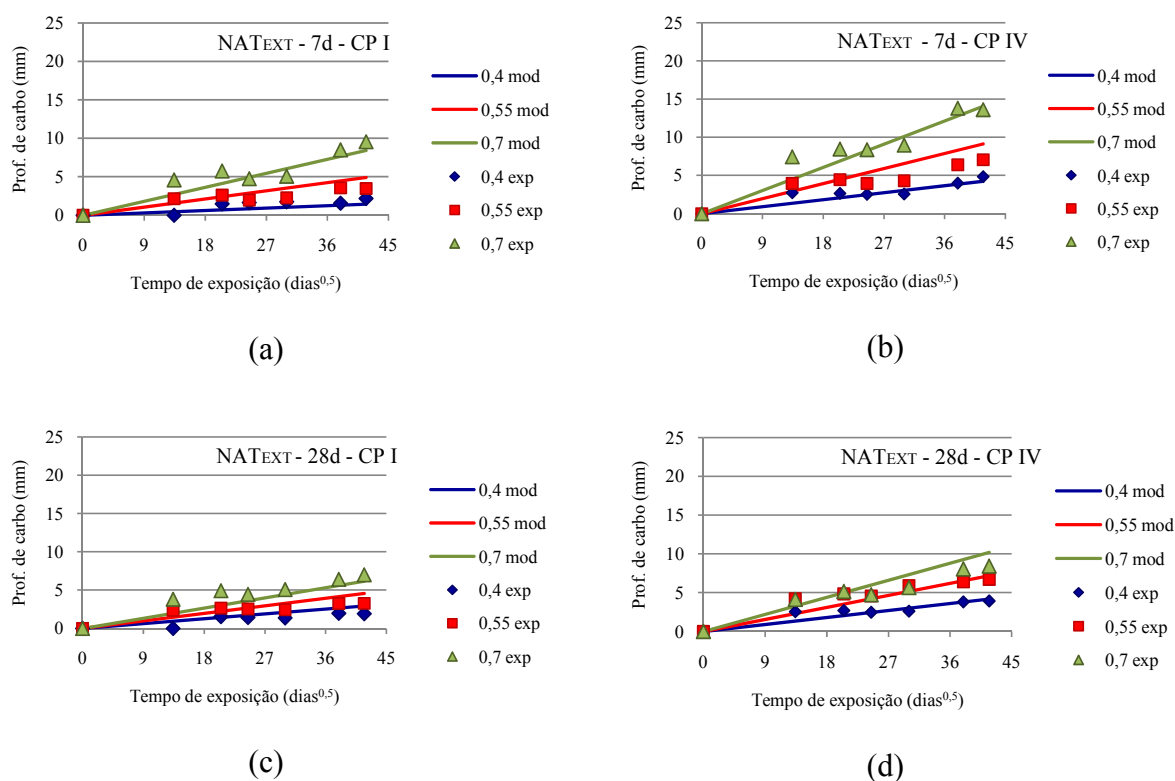


Figura E1 – Comparativo entre dados de profundidade de carbonatação experimentais e do modelo matemático para a condição natural externo

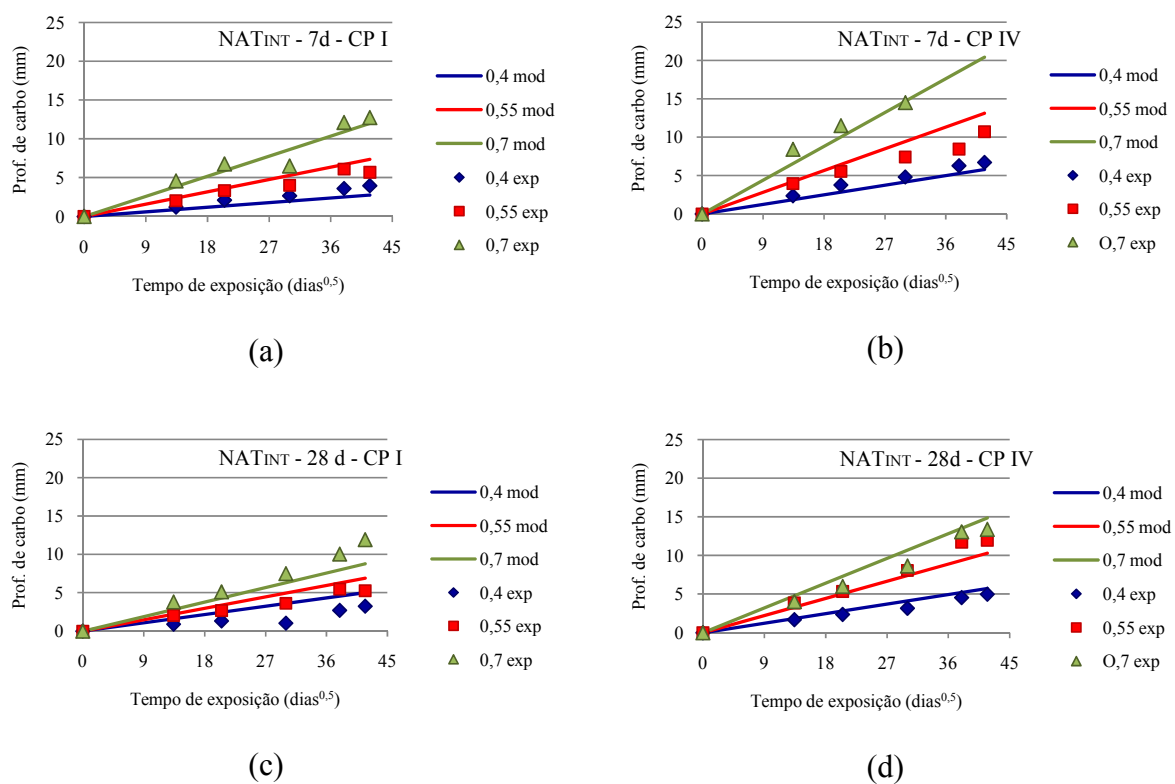


Figura E2 – Comparativo entre dados de profundidade de carbonatação experimentais e do modelo matemático para a condição natural interno

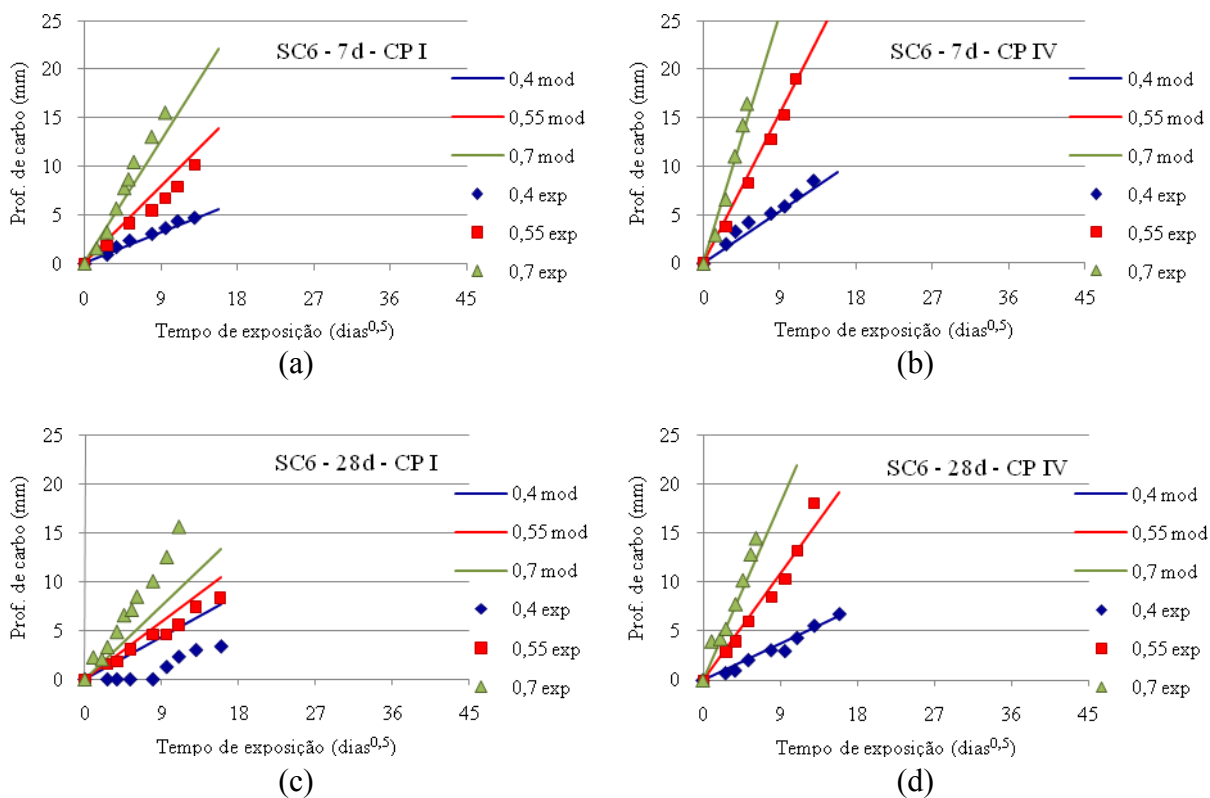


Figura E3 – Comparativo entre dados de profundidade de carbonatação experimentais e do modelo matemático para a condição sala climatizada 6%  $\text{CO}_2$

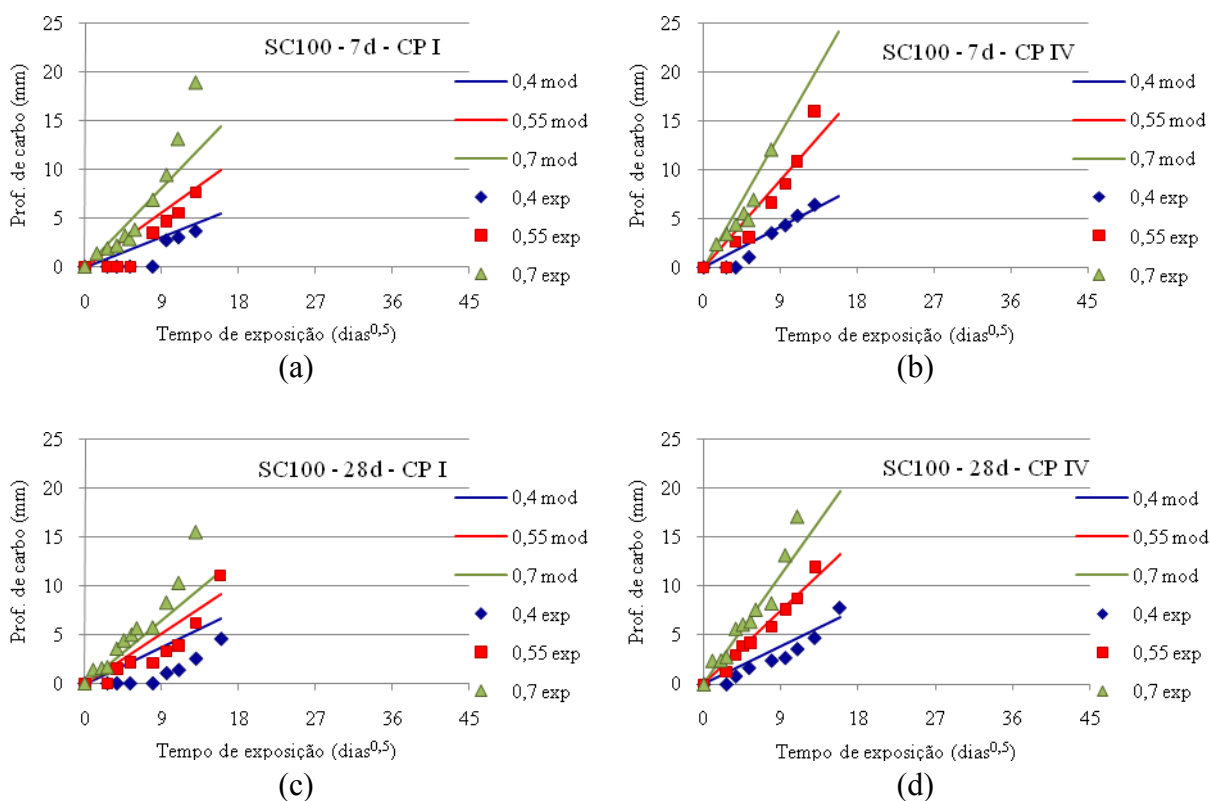


Figura E4 – Comparativo entre dados de profundidade de carbonatação experimentais e do modelo matemático para a condição sala climatizada 100%  $\text{CO}_2$

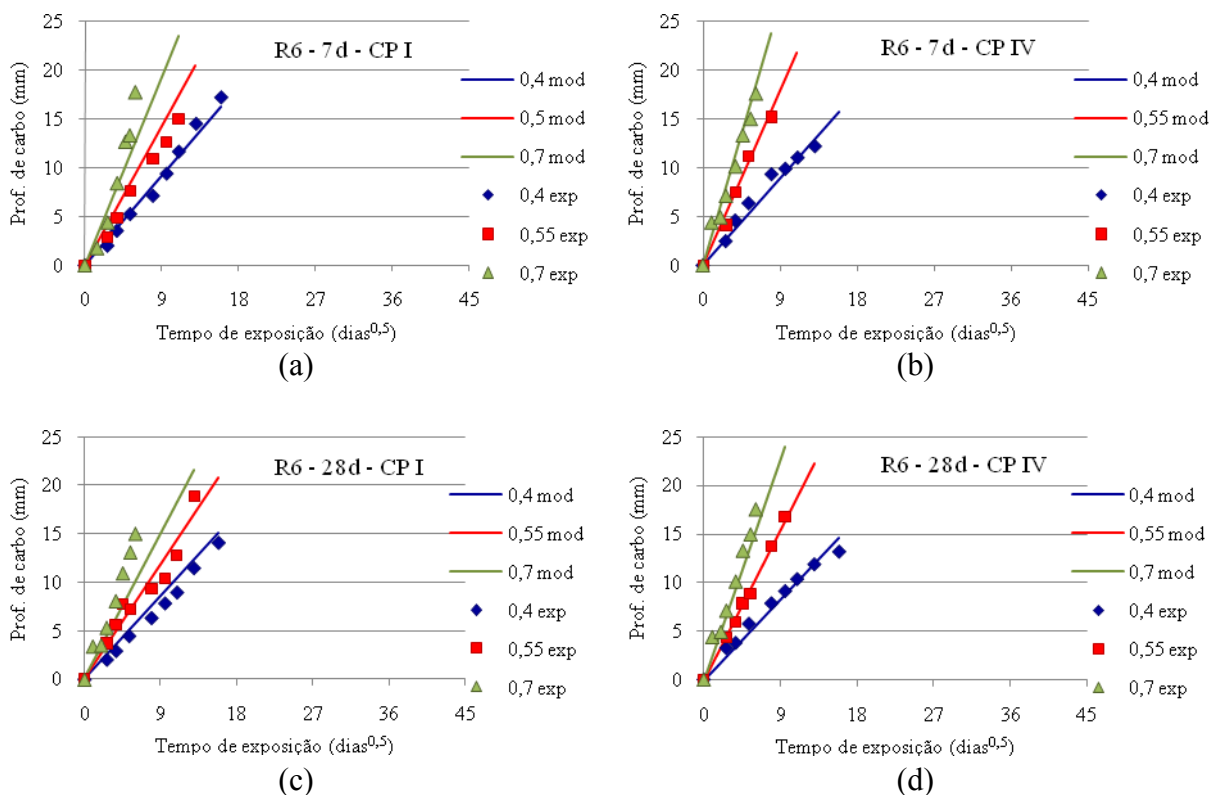


Figura E5 – Comparativo entre dados de profundidade de carbonatação experimentais e do modelo matemático para a condição RILEM 6%  $\text{CO}_2$

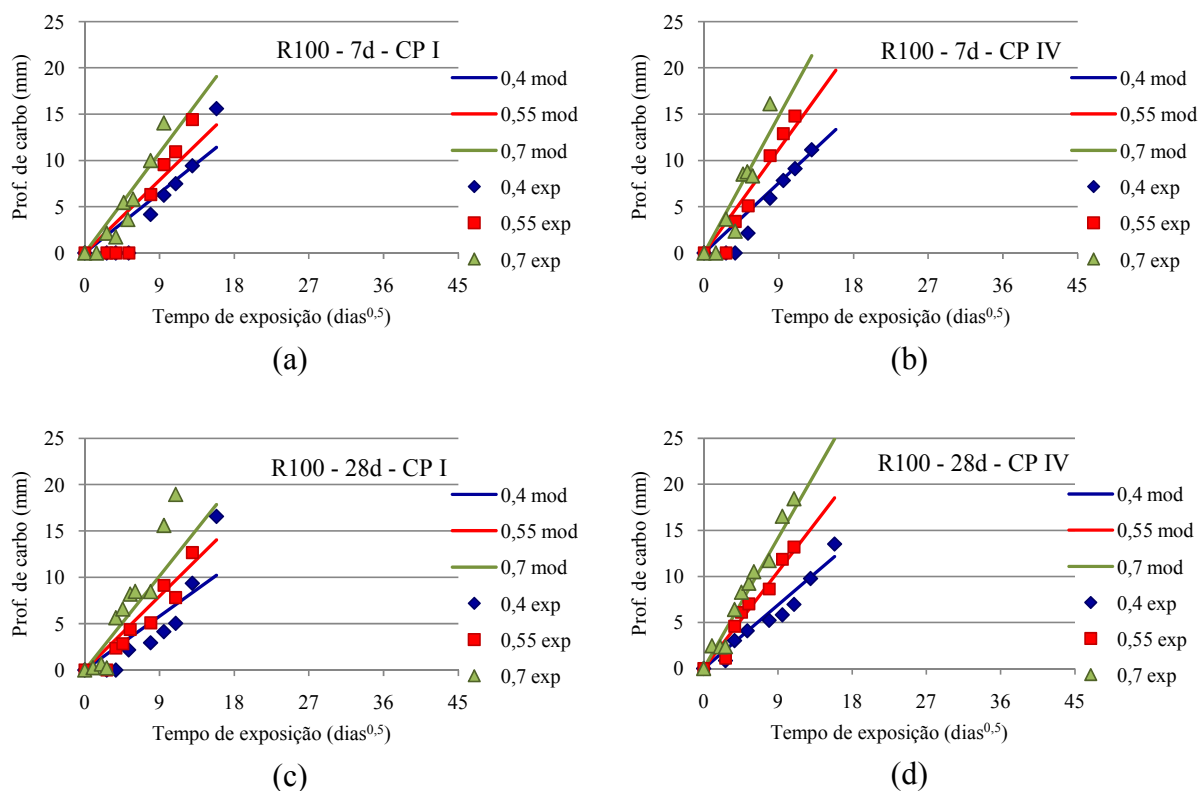


Figura E6 – Comparativo entre dados de profundidade de carbonatação experimentais e do modelo matemático para a condição RILEM 100%  $\text{CO}_2$

**APÊNDICE F – Resultados de profundidade de carbonatação natural para  
cura de 7, 14 e 28 dias**



Tabela F1: valores das profundidades de carbonatação natural (mm)  
das argamassas de CP I curadas por 7 dias

tempo (meses)	I40 Int	I40 Ext <sub>N</sub>	I40 Ext <sub>U</sub>	I55 Int	I55 Ext <sub>N</sub>	I55 Ext <sub>U</sub>	I70 Int	I70 Ext <sub>N</sub>	I70 Ext <sub>U</sub>
6	1,45	1,45	NM	NM	2,51	3,34	1,67	4,80	4,93
	1,48	1,48	NM	NM	2,38	2,85	2,15	4,06	5,20
	1,09	1,09	NM	NM	1,97	2,58	1,99	3,67	4,57
	0,58	0,58	NM	NM	1,43	2,71	2,19	4,15	5,20
	1,26	1,26	NM	NM	2,10	2,66	2,50	6,09	4,74
	1,38	1,38	NM	NM	1,80	2,25	2,41	4,75	4,31
14	1,68	1,68	NM	0,95	2,72	2,51	2,63	5,29	4,25
	2,43	2,43	NM	1,46	3,26	2,95	2,73	7,94	4,09
	2,52	2,52	NM	0,94	2,53	2,74	2,45	6,45	4,98
	1,88	1,88	NM	1,79	3,46	3,23	2,88	6,58	5,11
	2,15	2,15	NM	1,78	4,09	3,21	1,75	6,44	4,30
	2,00	2,00	NM	1,95	3,99	2,89	3,15	8,00	6,27
20	NM	NM	2,63	0,67	NM	2,01	1,10	NM	3,62
	NM	NM	3,19	1,85	NM	3,17	3,03	NM	5,01
	NM	NM	1,49	0,71	NM	2,18	1,38	NM	3,07
	NM	NM	1,75	2,89	NM	2,87	2,43	NM	6,12
	NM	NM	1,72	1,31	NM	2,94	1,52	NM	4,73
	NM	NM	1,97	2,43	NM	2,63	2,42	NM	5,92
30	2,41	2,41	2,52	1,02	4,52	2,35	1,53	7,21	4,18
	2,61	2,61	3,16	0,78	4,75	2,29	3,22	8,41	5,10
	2,63	2,63	2,25	1,43	4,18	1,79	2,12	4,11	4,00
	3,39	3,39	1,53	2,33	3,55	2,11	2,01	3,65	5,45
	1,17	1,17	NM	2,15	2,83	2,87	1,75	7,46	3,84
	3,82	3,82	NM	2,74	4,21	2,28	2,91	8,20	4,37
48	4,10	4,10	2,36	1,31	5,75	3,32	3,74	11,83	6,52
	3,36	3,36	4,17	1,80	5,86	3,55	3,74	12,92	6,29
	4,08	4,08	1,95	2,34	4,72	3,46	3,91	12,96	6,00
	3,70	3,70	2,04	1,02	5,93	3,58	4,18	13,07	5,58
	3,03	3,03	1,94	1,44	7,36	2,78	2,64	12,06	7,85
	3,34	3,34	2,14	1,45	6,96	5,77	3,06	9,85	7,10
58	3,68	3,68	1,98	1,69	5,35	2,47	2,90	14,06	9,42
	4,23	4,23	2,48	2,25	5,57	3,93	3,29	12,78	8,66
	4,77	4,77	1,87	1,53	4,93	3,11	3,89	12,84	9,67
	3,45	3,45	3,06	2,16	5,96	4,01	4,74	12,55	7,57
	3,67	3,67	1,01	1,94	6,52	2,73	2,71	13,45	7,50
	4,03	4,03	1,52	3,44	5,83	3,27	3,35	10,79	7,79

NM = não medida

Tabela F2: valores das profundidades de carbonatação natural (mm)  
das argamassas de tipo CP IV curadas por 7 dias

tempo (meses)	IV40 Int	IV40 Ext <sub>N</sub>	IV40 Ext <sub>U</sub>	IV55 Int	IV55 Ext <sub>N</sub>	IV55 Ext <sub>U</sub>	IV70 Int	IV70 Ext <sub>N</sub>	IV70 Ext <sub>U</sub>
6	2,85	3,33	3,15	4,17	3,75	4,20	8,80	7,38	7,54
	2,65	3,54	2,28	3,69	4,34	4,13	8,42	7,39	7,92
	2,20	2,89	2,53	4,05	4,50	4,14	8,24	7,76	7,95
	2,29	2,69	2,58	3,57	4,02	3,94	8,20	7,03	7,56
	2,45	3,02	2,51	4,56	3,85	3,57	8,53	9,16	7,22
	1,75	2,84	3,37	3,65	6,88	3,73	8,36	7,56	6,38
14	3,42	2,84	2,66	5,98	4,12	4,48	11,29	8,85	7,25
	4,31	3,02	2,62	5,67	4,21	4,66	12,44	8,61	8,56
	3,51	2,70	2,33	5,85	3,83	4,43	10,94	9,52	8,98
	4,26	2,27	3,47	5,06	4,49	4,74	11,80	8,62	8,43
	3,17	2,63	2,48	5,22	3,65	4,30	10,73	7,98	7,85
	3,93	3,29	2,37	5,52	4,65	4,14	11,89	9,30	9,62
20	NM	2,85	2,63	NM	4,48	3,10	NM	7,40	7,33
	NM	2,80	3,13	NM	4,04	4,12	NM	9,19	8,61
	NM	4,12	1,96	NM	3,78	3,56	NM	9,15	8,24
	NM	3,20	2,63	NM	3,76	5,17	NM	9,55	7,79
	NM	2,35	2,48	NM	4,10	3,30	NM	7,81	9,37
	NM	2,84	2,34	NM	4,43	4,51	NM	10,53	8,86
30	4,32	1,90	2,5	7,59	3,19	3,81	6,38	9,21	7,06
	4,39	2,50	2,28	7,58	3,81	4,94	6,80	7,26	9,08
	4,36	2,44	2,36	6,90	3,35	3,90	17,66	9,22	8,9
	4,60	4,17	1,73	7,63	3,48	3,69	16,30	9,43	9,52
	5,12	3,01	3,14	NM	3,29	4,75	20,00	9,20	8,81
	6,14	3,83	3,48	NM	3,69	4,69	20,00	8,88	10,38
48	5,79	3,09	3,47	9,22	7,18	5,82	TC	14,71	12,15
	6,06	3,75	3,68	8,54	6,26	5,94	TC	13,70	12,06
	6,39	3,97	3,24	10,07	6,21	5,84	TC	11,03	11,7
	6,91	3,80	4,68	10,13	7,30	6,96	TC	11,83	15,52
	6,16	3,69	4,03	6,23	5,32	6,50	TC	15,05	14,97
	6,34	4,62	4,88	6,53	4,93	7,40	TC	16,27	16,32
58	6,50	3,68	4,43	11,29	5,13	5,83	TC	15,67	12,82
	6,81	4,13	5,64	9,31	5,19	9,39	TC	14,22	14,31
	6,52	2,67	3,54	10,39	7,58	4,96	TC	15,36	11,06
	6,66	2,94	5,86	11,67	6,31	7,48	TC	12,01	15,75
	6,91	3,54	4,10	11,51	4,93	5,81	TC	15,24	11,15
	6,84	4,27	5,53	10,18	5,53	8,80	TC	13,68	16,52

NM = não medida

TC = todo carbonatado

Tabela F3: valores das profundidades de carbonatação natural (mm)  
das argamassas de CP I curadas por 14 dias

tempo (meses)	I40 Int	I40 Ext <sub>N</sub>	I40 Ext <sub>U</sub>	I55 Int	I55 Ext <sub>N</sub>	I55 Ext <sub>U</sub>	I70 Int	I70 Ext <sub>N</sub>	I70 Ext <sub>U</sub>
6	0,67	NM	NM	2,40	2,52	2,50	4,12	3,30	3,93
	0,91	NM	NM	2,09	2,51	2,53	3,57	3,92	3,49
	1,17	NM	NM	2,18	2,35	2,38	3,02	4,68	4,75
	0,00	NM	NM	1,74	2,71	2,79	3,06	4,61	3,53
	1,00	NM	NM	2,30	1,73	2,82	3,77	3,49	4,07
	0,33	NM	NM	2,21	2,37	2,67	3,61	4,18	4,55
14	1,70	NM	1,25	2,72	2,57	2,45	4,68	4,62	4,11
	1,74	NM	1,67	3,11	2,79	3,45	5,60	4,84	4,32
	1,92	NM	1,21	3,15	2,43	2,19	6,10	4,24	4,30
	2,39	NM	1,91	3,50	3,17	3,12	5,97	3,86	4,71
	1,94	NM	1,59	2,92	3,30	3,33	5,57	3,84	5,11
	2,42	NM	2,21	3,52	3,20	3,36	5,84	4,04	5,20
20	NM	1,38	1,19	NM	2,38	2,73	NM	4,00	4,18
	NM	1,96	1,53	NM	3,22	3,38	NM	6,12	4,52
	NM	2,80	1,06	NM	2,51	2,43	NM	3,51	3,6
	NM	3,12	1,95	NM	2,43	3,04	NM	4,69	4,38
	NM	2,47	0,54	NM	2,30	1,90	NM	5,35	4,15
	NM	2,75	1,21	NM	3,09	3,17	NM	3,39	4,57
30	2,01	2,27	1,31	8,57	2,28	2,88	7,53	3,35	4,11
	2,44	2,06	1,75	9,13	2,03	2,80	7,36	2,85	5,70
	2,08	1,03	1,38	3,80	1,90	2,34	5,55	3,56	5,03
	1,38	1,50	0,81	3,62	3,17	3,37	7,32	3,36	6,03
	1,95	2,62	1,08	3,99	2,27	2,27	6,92	3,84	2,80
	2,37	2,81	1,55	3,95	2,76	3,05	5,86	3,98	3,94
48	3,70	2,46	2,25	5,66	3,48	3,60	12,36	4,23	7,78
	2,57	4,12	1,58	5,24	4,10	4,35	8,54	6,58	8,51
	3,16	1,60	0,88	5,26	3,55	3,41	11,38	4,11	7,08
	3,24	1,76	1,93	4,48	3,03	3,05	11,77	6,01	6,17
	3,25	2,26	1,16	6,58	4,48	3,41	10,43	4,45	7,88
	3,05	3,22	2,17	5,11	4,34	3,58	12,74	4,11	10,44
58	3,20	1,68	1,52	4,68	3,20	2,99	11,94	5,78	6,98
	3,47	2,43	2,85	4,81	3,40	5,13	13,08	6,75	8,80
	3,53	1,37	1,35	5,01	4,08	3,52	13,67	3,81	6,38
	3,45	1,81	2,36	5,76	3,68	4,14	14,55	5,51	8,99
	3,35	2,53	1,35	5,97	4,39	3,54	12,52	4,26	7,37
	3,06	3,38	2,57	6,16	3,88	4,14	10,33	3,68	11,19

NM = não medida

Tabela F4: valores das profundidades de carbonatação natural (mm)  
das argamassas de tipo CP IV curadas por 14 dias

tempo (meses)	IV40 Int	IV40 Ext <sub>N</sub>	IV40 Ext <sub>U</sub>	IV55 Int	IV55 Ext <sub>N</sub>	IV55 Ext <sub>U</sub>	IV70 Int	IV70 Ext <sub>N</sub>	IV70 Ext <sub>U</sub>
6	1,84	2,68	2,58	4,19	NM	5,03	7,32	7,17	6,5
	2,09	2,59	2,36	4,68	NM	4,99	6,90	7,20	7,66
	2,03	2,76	2,78	4,57	4,45	4,29	8,33	7,70	6,65
	2,02	2,25	2,43	4,39	3,84	4,33	7,24	6,87	7,44
	2,00	3,09	2,87	4,69	4,88	3,57	8,55	8,58	6,75
	1,88	3,20	2,41	4,18	4,39	3,72	7,16	7,13	6,85
14	2,83	2,33	2,82	5,81	5,01	4,69	9,68	7,66	7,69
	3,20	3,28	3,34	6,50	5,21	5,43	10,64	8,08	8,28
	2,72	2,93	2,25	5,74	4,76	4,65	10,88	8,33	7,39
	2,96	2,45	4,11	7,05	5,14	5,33	12,24	8,95	8,68
	2,69	2,02	2,29	6,87	4,57	5,05	12,01	7,65	8,8
	3,08	2,48	3,57	6,31	5,14	5,01	11,70	8,53	8,48
20	NM	2,08	2,55	NM	4,81	4,51	NM	8,42	8,84
	NM	2,28	2,99	NM	4,94	4,96	NM	8,94	8,37
	NM	2,65	2,38	NM	4,27	5,59	NM	10,70	5,89
	NM	3,31	1,95	NM	4,87	5,44	NM	10,21	7,48
	NM	2,56	2,68	NM	4,94	4,38	NM	7,93	7,3
	NM	3,03	3,35	NM	4,57	5,66	NM	9,66	9,84
30	3,21	3,72	1,97	8,97	6,19	5,97	17,16	8,05	11,42
	3,43	2,99	2,01	9,01	5,37	7,01	17,34	8,02	11,13
	3,90	2,62	2,49	9,05	5,19	5,05	20,37	11,74	8,14
	5,51	2,53	2,90	8,34	4,65	5,77	18,37	10,25	8,93
	3,68	2,15	2,64	8,45	4,70	4,93	17,08	7,84	8,50
	3,80	2,35	2,47	9,29	5,89	5,78	16,84	11,00	8,80
48	4,96	4,05	3,70	12,14	7,63	6,83	TC	13,65	12,45
	5,19	4,78	4,17	11,52	7,79	7,45	TC	14,75	11,67
	4,93	3,49	3,42	11,75	7,10	5,7	TC	14,46	10,05
	5,74	3,46	3,51	11,91	9,14	7,75	TC	13,75	13,1
	4,82	3,85	3,29	12,38	8,26	6,89	TC	11,57	11,11
	6,06	4,29	5,10	14,08	7,17	10,68	TC	11,05	15,3
58	5,85	2,75	4,07	12,50	8,15	7,18	TC	16,65	10,1
	6,11	3,90	5,57	11,97	8,64	8,77	TC	14,06	14,72
	6,03	2,77	4,07	11,58	6,84	6,43	TC	12,74	10,09
	5,43	3,60	3,87	11,87	8,04	7,02	TC	15,41	14,52
	4,56	3,99	4,10	12,63	6,55	5,93	TC	13,07	11,73
	7,11	4,21	4,27	12,38	7,11	8,41	TC	11,32	15,68

NM = não medida

TC = todo carbonatado

Tabela F5: valores das profundidades de carbonatação natural (mm)  
das argamassas de CP I curadas por 28 dias

tempo (meses)	I40 Int	I40 Ext <sub>N</sub>	I40 Ext <sub>U</sub>	I55 Int	I55 Ext <sub>N</sub>	I55 Ext <sub>U</sub>	I70 Int	I70 Ext <sub>N</sub>	I70 Ext <sub>U</sub>
6	1,13	NM	NM	2,04	3,00	1,96	4,06	3,97	3,72
	0,69	NM	NM	1,95	2,75	2,49	3,75	3,54	4,16
	1,41	NM	NM	2,21	2,43	2,31	4,30	4,25	3,24
	0,60	NM	NM	2,07	2,49	2,52	3,86	4,59	4,2
	0,85	NM	NM	2,22	2,65	2,31	3,47	4,50	3,64
	0,75	NM	NM	1,72	2,92	2,52	3,44	4,32	3,89
14	1,64	NM	NM	2,51	2,74	2,07	5,20	4,27	4,64
	1,71	NM	1,58	3,05	3,43	3,08	5,07	4,33	5,53
	1,27	NM	1,19	2,44	3,68	2,78	4,96	4,10	4,56
	1,16	NM	2,03	2,76	2,93	2,58	4,95	4,52	5,98
	1,07	NM	1,76	2,45	2,69	2,40	5,07	3,84	3,98
	1,15	NM	1,55	2,92	2,82	2,96	5,47	4,40	4,80
20	NM	1,42	0,48	NM	2,83	1,98	NM	4,14	3,44
	NM	2,09	2,45	NM	3,43	2,60	NM	5,55	5,53
	NM	2,42	0,79	NM	2,84	2,06	NM	4,28	4,01
	NM	2,38	1,83	NM	3,16	3,37	NM	4,35	5,09
	NM	1,38	1,12	NM	2,53	1,99	NM	4,17	3,32
	NM	1,62	1,85	NM	2,86	3,18	NM	4,59	5,26
30	1,78	2,39	1,42	3,34	2,93	1,58	7,03	4,60	4,45
	0,00	2,41	1,84	3,64	3,26	2,70	7,11	3,48	7,87
	0,95	1,73	0,31	3,59	2,75	2,05	6,08	3,74	4,23
	0,00	2,13	2,46	3,43	3,16	2,65	7,46	4,66	4,77
	1,64	NM	0,61	3,58	1,95	2,20	8,51	5,42	4,95
	1,88	NM	1,53	4,12	2,64	3,40	8,82	4,58	4,21
48	2,06	2,07	1,92	4,52	3,27	2,53	9,71	4,05	6,39
	2,79	1,95	2,02	6,21	3,54	2,74	9,63	4,03	7,55
	3,25	1,15	2,59	5,15	2,53	2,8	11,26	8,40	4,9
	2,55	1,95	1,64	6,21	2,83	3,43	10,50	10,39	6,23
	2,61	2,08	1,52	5,15	2,97	2,84	10,15	4,59	7,27
	3,02	3,21	2,08	5,62	4,39	5,15	8,97	6,09	6,08
58	3,29	2,14	1,69	5,79	2,81	3,45	13,37	4,34	6,02
	3,25	2,25	2,49	5,52	4,41	3,13	13,45	7,43	5,81
	3,41	0,59	1,04	4,69	2,98	3,01	10,44	6,95	6,04
	3,14	1,41	2,60	4,94	3,24	4,28	11,14	8,28	8,34
	2,99	3,18	1,27	5,46	1,90	2,15	10,46	8,63	6,10
	3,39	1,93	2,39	5,24	3,27	3,52	12,72	4,23	9,69

NM = não medida

Tabela F6: valores das profundidades de carbonatação natural (mm)  
das argamassas de tipo CP IV curadas por 28 dias

tempo (meses)	IV40 Int	IV40 Ext <sub>N</sub>	IV40 Ext <sub>U</sub>	IV55 Int	IV55 Ext <sub>N</sub>	IV55 Ext <sub>U</sub>	IV70 Int	IV70 Ext <sub>N</sub>	IV70 Ext <sub>U</sub>
6	1,76	2,58	3,08	3,99	4,03	3,87	3,88	4,45	3,48
	1,83	3,30	2,52	3,72	4,18	4,48	3,93	4,60	4,23
	1,57	2,75	2,34	4,35	4,29	3,93	4,23	4,38	3,84
	1,31	2,68	2,36	3,91	4,20	4,32	4,06	5,03	4,44
	1,86	2,46	2,38	3,56	4,58	4,12	4,43	4,63	4,29
	1,78	2,51	2,61	3,50	3,96	4,56	3,85	4,93	4,49
14	2,39	2,48	2,45	6,09	4,38	4,27	6,32	4,92	4,46
	2,12	2,12	3,17	4,53	4,64	5,12	5,78	5,97	5,48
	2,21	2,28	2,21	4,92	4,37	4,50	5,62	5,03	4,54
	2,61	2,71	2,82	5,36	4,48	5,02	5,70	4,89	5,84
	1,54	2,62	2,13	4,91	4,53	4,61	5,83	5,68	5,25
	3,26	3,23	3,41	6,17	4,75	5,46	6,68	5,56	5,31
20	NM	2,42	1,18	NM	4,12	4,35	NM	4,77	4,19
	NM	3,33	3,57	NM	5,01	4,59	NM	5,20	4,46
	NM	2,68	2,17	NM	5,01	4,16	NM	5,33	4,31
	NM	3,18	2,46	NM	5,61	5,13	NM	6,01	5,75
	NM	1,91	2,69	NM	3,82	3,73	NM	5,65	4,38
	NM	2,64	2,81	NM	5,17	5,47	NM	5,09	5,2
30	2,72	2,00	2,18	7,48	4,71	5,11	7,04	4,73	5,81
	3,32	2,87	2,70	8,29	5,48	6,07	9,11	4,85	6,22
	3,73	2,29	2,53	8,17	5,27	5,56	9,77	4,87	4,38
	3,18	2,91	3,12	8,25	6,11	7,29	9,19	5,79	5,43
	3,13	2,52	2,41	7,96	4,38	4,84	7,90	5,10	6,17
	2,85	2,15	2,76	8,09	5,31	6,61	8,74	6,45	5,91
48	4,53	4,68	3,80	10,91	7,93	7,07	12,86	6,92	7,74
	5,51	4,09	4,39	11,09	7,65	6,49	12,19	6,87	8,4
	4,34	3,33	3,93	12,91	7,60	5,71	12,76	8,59	8,19
	4,36	3,23	4,34	12,02	8,09	5,58	12,59	6,67	7,94
	4,31	3,74	3,25	11,09	9,70	6,45	15,05	8,27	8,38
	4,20	5,08	3,17	12,26	9,26	6,95	12,82	8,08	7,63
58	4,51	3,52	2,56	13,84	9,81	6,87	13,06	7,97	7,94
	5,13	3,22	4,96	11,77	9,65	6,65	13,74	6,75	7,87
	4,83	3,43	2,58	10,22	7,42	7,13	13,06	6,68	8,21
	5,22	4,07	5,05	12,86	7,04	6,36	13,26	7,58	9,88
	5,16	3,03	3,61	10,64	7,40	5,00	13,93	6,75	7,27
	4,95	4,51	4,81	12,30	6,72	8,28	13,16	6,43	9,27

NM = não medida

## **APÊNDICE G – Resultados das profundidades de carbonatação acelerada**

Tabela G1: valores das profundidades de carbonatação (mm) das argamassas do grupo 1, a/c=0,40

Tempo (dias)	I40				IV40			
	SC6	SC100	R6	R100	SC6	SC100	R6	R100
7	0,00	0,00	1,99	0,00	0,00	0,00	2,52	3,05
	0,00	0,00	2,16	0,00	0,00	0,00	2,88	2,12
	0,00	0,00	2,20	0,00	1,14	0,00	3,26	0,00
	0,00	0,00	1,69	0,00	1,10	0,00	3,53	0,00
	0,00	0,00	2,29	0,00	1,08	0,00	3,62	0,00
	0,00	0,00	1,96	0,00	1,13	0,00	3,61	0,00
14	0,00	0,00	2,97	0,00	0,00	0,00	3,38	4,14
	0,00	0,00	3,36	0,00	0,00	0,00	3,71	3,58
	0,00	0,00	2,64	0,00	1,43	1,28	4,40	2,56
	0,00	0,00	2,90	0,00	1,26	1,31	3,90	2,54
	0,00	0,00	3,18	0,00	1,45	1,46	3,66	2,86
	0,00	0,00	2,67	0,00	1,85	0,88	3,63	2,52
30	0,00	0,00	5,29	1,91	1,92	1,38	5,23	3,92
	0,00	0,00	4,51	2,16	2,32	1,80	6,24	3,91
	0,00	0,00	3,81	2,08	1,99	1,54	6,55	4,30
	0,00	0,00	4,58	2,53	1,66	1,87	6,15	3,73
	0,00	0,00	5,07	2,53	2,37	1,51	4,58	4,33
	0,00	0,00	3,62	1,85	2,10	1,83	5,74	4,38
63	0,00	0,00	7,01	2,79	2,90	1,95	8,36	5,94
	0,00	0,00	7,32	3,21	3,38	2,41	8,79	4,41
	0,00	0,00	5,64	2,61	2,99	2,32	8,79	6,25
	0,00	0,00	5,53	2,88	2,85	2,21	7,21	4,54
	0,00	0,00	6,24	3,44	3,40	3,40	6,79	5,07
	0,00	0,00	6,27	2,73	2,92	2,16	7,15	5,19
91	0,00	1,17	9,02	3,70	3,89	2,64	9,81	8,03
	0,00	0,89	8,41	3,56	3,21	2,62	10,37	6,04
	1,62	1,41	7,23	5,12	2,17	3,09	10,28	4,90
	2,45	1,03	7,85	4,41	2,89	1,93	8,41	5,14
	1,47	1,46	7,19	4,15	3,22	2,98	8,83	5,38
	2,09	0,28	7,34	3,87	2,47	2,82	6,97	5,46
120	2,51	1,13	9,53	4,46	5,00	3,61	10,61	7,71
	2,95	0,99	10,67	4,66	4,33	3,77	11,53	8,04
	2,09	1,82	8,64	5,42	3,75	3,36	11,78	6,38
	2,61	1,26	8,39	5,43	4,82	3,22	11,28	6,25
	1,62	1,43	8,52	5,04	3,97	3,55	8,56	6,24
	2,14	1,55	8,03	5,23	4,03	3,98	8,31	7,14
168	3,01	2,96	12,82	7,99	6,22	5,06	10,90	10,53
	2,75	2,16	12,87	8,27	7,28	5,14	11,60	10,90
	3,36	2,63	10,55	11,46	3,96	3,70	13,73	8,41
	3,12	2,30	11,39	10,75	5,45	4,61	12,80	9,07
	3,18	2,71	11,29	8,62	5,54	4,52	10,39	9,53
	2,65	2,31	9,89	9,06	4,91	5,22	11,81	10,15
254	3,40	3,10	15,15	13,90	7,51	8,42	12,11	14,59
	3,90	4,80	15,97	14,55	7,56	8,22	12,86	13,83
	3,48	5,71	13,58	TC	7,20	6,64	14,52	13,65
	3,58	4,74	13,44	TC	6,23	7,64	15,18	13,53
	3,55	4,38	13,53	16,07	5,95	7,32	12,14	13,63
	2,36	4,39	12,72	14,98	6,05	8,33	12,20	11,83



Tabela G2: valores das profundidades de carbonatação (mm) das argamassas do grupo 1, a/c=0,55

Tempo (dias)	I55				IV55			
	SC6	SC100	R6	R100	SC6	SC100	R6	R100
7	1,41	0,00	2,92	0,00	2,85	1,25	4,79	1,84
	1,53	0,00	4,86	0,00	3,06	1,58	5,10	1,56
	1,67	0,00	3,12	0,00	2,95	0,91	4,58	0,64
	1,65	0,00	3,85	0,00	2,85	1,65	4,12	1,20
	1,71	0,00	3,99	0,00	2,38	1,50	3,57	0,68
	1,06	0,00	3,55	0,00	3,28	0,99	4,15	0,93
14	1,31	1,39	4,50	0,82	4,43	2,88	6,16	4,78
	2,31	1,30	5,95	1,77	3,96	2,60	6,73	4,13
	1,69	1,24	5,14	0,00	3,94	2,86	5,44	3,70
	1,89	1,87	5,37	3,06	3,91	3,36	6,01	3,62
	1,82	1,83	6,21	4,47	3,44	3,10	4,94	5,32
	1,66	1,35	6,81	4,01	4,09	2,94	6,58	6,05
30	3,99	1,94	7,59	5,47	6,88	3,70	10,74	8,20
	2,62	3,19	7,14	6,52	6,73	4,31	10,25	5,39
	3,11	2,25	7,03	5,14	5,99	3,89	8,63	6,87
	3,20	2,08	7,21	3,94	5,86	4,30	8,17	6,48
	2,51	1,71	5,35	3,09	4,72	3,87	7,06	7,55
	3,00	1,89	6,13	2,04	5,82	5,17	8,53	7,68
63	4,20	1,81	8,50	6,65	8,01	5,35	14,00	7,43
	4,43	2,39	9,14	4,57	9,33	5,34	15,47	7,51
	5,57	2,28	10,42	4,61	8,72	7,20	13,18	7,58
	5,19	2,01	10,63	4,25	10,19	6,82	12,69	7,35
	3,82	2,07	7,52	5,62	9,23	5,42	12,33	11,07
	4,29	1,92	9,58	4,87	5,45	4,99	14,77	10,95
91	4,05	2,76	14,67	8,16	11,20	8,35	TC	12,44
	4,01	3,33	13,54	8,21	10,31	8,52	TC	11,34
	5,01	3,80	7,21	6,22	10,59	6,81	16,97	13,76
	5,29	3,61	7,68	5,62	11,27	6,80	15,17	11,54
	4,87	3,15	10,90	12,23	10,03	7,86	15,51	13,02
	4,18	3,13	8,18	14,40	8,47	7,40	12,95	9,04
120	4,81	3,67	14,18	9,03	13,57	9,47		12,94
	5,78	4,33	11,64	9,58	13,92	10,29		13,52
	6,32	3,58	13,40	7,39	13,90	8,32		13,63
	5,09	4,38	12,50	8,01	12,33	10,01		14,26
	5,58	3,62	13,16	6,51	12,78	7,01		12,79
	5,83	3,76	11,61	6,36	12,53	7,18		12,07
168	7,01	7,33	TC	15,69	19,64	13,30		
	6,74	6,56	TC	14,51	17,03	13,74		
	7,65	4,65	17,00	10,52	20,00	12,14		
	7,26	6,35	16,42	11,58	20,00	11,92		
	8,18	6,32	TC	12,30	17,22	9,82		
	7,41	5,79	TC	11,48	14,21	10,67		
254	9,53	11,73		TC				
	7,58	10,96		TC				
	10,11	9,83		TC				
	7,87	12,03		TC				
	7,84	9,19		TC				
	6,84	12,36		TC				

Tabela G3: valores das profundidades de carbonatação (mm) das argamassas do grupo 1, a/c=0,70

Tempo (dias)	I70				IV70			
	SC6	SC100	R6	R100	SC6	SC100	R6	R100
1	2,56	1,49	3,20	0,00	3,48	2,33	4,68	5,11
	2,06	0,00	2,73	0,00	4,56	2,60	4,56	5,02
	2,22	1,92	3,90	0,53	3,48	2,28	3,92	0,46
	2,16	1,37	4,00	0,95	4,71	2,62	3,84	1,48
	2,25	1,62	3,49	0,00	3,95	2,77	4,79	0,79
	2,20	1,86	3,09	0,00	3,69	1,87	4,40	1,93
4	1,96	1,25	3,28	0,00	3,79	2,31	5,62	4,10
	1,83	2,01	3,17	1,75	4,33	2,26	4,96	2,67
	1,95	1,83	3,92	0,97	3,88	2,81	4,64	1,30
	1,79	1,31	3,74	1,11	5,27	2,56	4,63	2,26
	2,37	1,36	3,77	0,00	4,20	2,68	5,03	1,45
	2,39	1,56	3,23	0,00	4,01	2,15	4,63	2,30
7	3,78	2,02	4,66	0,00	4,84	2,94	6,77	1,33
	3,17	1,79	5,66	0,00	5,67	3,49	6,69	2,52
	3,00	1,56	5,45	0,85	4,40	2,63	7,62	1,99
	3,52	1,32	5,72	0,52	5,19	2,75	7,13	1,91
	3,08	1,93	5,75	0,00	5,32	3,02	6,25	3,01
	3,21	1,31	4,78	0,00	6,15	1,95	8,08	3,46
14	4,45	2,80	7,13	7,11	7,46	6,06	9,21	5,70
	4,43	3,50	7,80	6,65	7,79	5,38	10,49	6,72
	4,88	3,91	8,92	3,26	7,24	4,89	11,58	4,39
	5,89	3,05	7,60	3,39	8,42	6,42	9,71	6,88
	4,85	4,05	8,94	7,37	7,76	6,54	9,84	7,97
	4,57	4,00	8,04	6,04	8,02	4,77	9,75	6,82
21	6,67	4,06	10,21	6,23	10,87	6,30	12,07	8,65
	6,60	4,06	10,89	6,13	9,80	5,67	12,43	8,39
	7,86	4,16	10,10	6,68	11,01	6,95	12,68	7,22
	5,83	3,73	11,43	5,90	8,44	5,45	13,76	7,50
	6,35	4,67	12,51	7,64	10,72	6,42	14,38	9,40
	6,01	5,65	10,44	6,87	10,47	5,98	14,36	8,53
30	6,85	5,40	15,00	9,33	12,73	7,20	14,05	9,77
	6,83	4,80	14,86	6,78	13,08	6,17	12,16	10,02
	7,18	5,03	13,00	9,11	13,73	6,18	15,27	9,16
	5,44	4,57	11,76	7,98	13,84	6,87	13,81	8,68
	8,25	4,41	11,31	8,03	10,74	5,95	17,28	8,10
	7,90	5,66	12,55	7,89	13,04	6,13	17,14	9,84
37	8,22	6,17	18,37	9,56	14,77	7,98	15,99	10,81
	8,50	6,61	18,36	9,08	13,11	8,85	17,16	11,23
	8,71	5,19	13,82	8,46	13,58	7,22	16,39	10,38
	6,36	5,11	14,10	8,70	16,44	7,17	15,64	10,91
	10,24	5,18	13,14	8,09	15,42	7,78	TC	8,90
	8,55	5,47	12,15	6,97	13,69	6,84	TC	10,82
63	9,73	5,79		7,33		8,48		12,12
	11,60	6,34		9,56		8,41		11,45
	11,55	6,06		8,65		7,20		13,55
	7,40	6,15		7,37		7,75		12,66
	8,82	4,89		8,81		8,11		10,24
	10,91	4,99		9,05		9,77		10,23

Tempo (dias)	I70				IV70			
	SC6	SC100	R6	R100	SC6	SC100	R6	R100
91	10,15	9,31		TC		14,63		TC
	12,05	8,34		TC		15,77		TC
	12,92	9,14		13,59		15,49		16,48
	10,44	7,89		13,27		13,81		16,91
	15,31	6,91		12,61		10,63		13,49
	13,96	7,91		14,14		8,86		12,26
120	14,77	11,09		TC		15,41		TC
	14,62	12,37		TC		16,01		TC
	9,81	10,37		16,99		17,37		TC
	17,00	9,56		16,49		22,05		TC
	19,07	10,00		TC		17,10		15,92
	17,98	8,08		TC		14,96		14,64
168		15,85						
		17,19						
		16,75						
		17,85						
		10,53						
		14,48						

Nota:

TC = todo carbonatado

Tabela G4: valores das profundidades de carbonatação (mm) das argamassas do grupo 2, a/c=0,40

Tempo (dias)	I40				IV40			
	SC6	SC100	R6	R100	SC6	SC100	R6	R100
7	0,70	0,00	1,64	0,00	2,06	0,00	2,23	0,00
	0,68	0,00	2,27	0,00	2,71	0,00	2,53	0,00
	0,71	0,00	1,96	0,00	2,10	0,00	3,01	0,00
	0,42	0,00	1,83	0,00	1,36	0,00	2,19	0,00
	2,24	0,00	2,15	0,00	2,00	0,00	2,51	0,00
	0,76	0,00	2,18	0,00	1,71	0,00	2,42	0,00
14	1,60	0,00	3,21	0,00	3,54	0,00	4,48	0,00
	1,50	0,00	3,46	0,00	3,15	0,00	4,40	0,00
	1,38	0,00	3,33	0,00	3,32	0,00	5,46	0,00
	1,77	0,00	4,23	0,00	3,37	0,00	4,96	0,00
	2,23	0,00	3,35	0,00	3,43	0,00	4,38	0,00
	1,63	0,00	3,65	0,00	2,84	0,00	3,86	0,00
27	2,27	0,00	5,38	0,00	4,13	1,36	6,41	1,91
	2,67	0,00	5,47	0,00	4,37	0,74	6,65	2,36
	2,46	0,00	5,85	0,00	4,07	NM	6,21	NM
	2,51	0,00	4,69	0,00	4,26	NM	7,00	NM
	2,40	0,00	5,53	0,00	4,53	NM	5,92	NM
	1,96	0,00	4,60	0,00	3,90	NM	6,05	NM
63	3,36	0,00	9,19	3,29	4,36	4,50	8,72	6,37
	3,04	0,00	7,43	3,70	5,09	4,56	9,41	5,49
	3,04	0,00	5,46	4,04	6,05	3,71	8,15	7,17
	3,00	0,00	5,90	4,02	5,40	2,75	8,45	6,69
	2,85	0,00	7,21	5,36	5,09	2,87	10,68	4,63
	3,12	0,00	7,55	4,56	4,65	2,71	10,64	5,18
91	4,37	2,23	10,53	5,33	5,67	5,41	10,79	7,75
	3,50	3,47	10,77	6,34	6,25	4,16	10,69	7,49
	3,20	2,09	8,70	6,88	5,73	4,73	8,43	9,25
	4,02	3,11	8,65	6,32	5,10	3,67	10,26	8,20
	4,06	2,74	8,94	6,20	5,81	4,40	10,29	7,34
	2,86	2,64	8,73	6,44	6,50	3,61	8,88	6,96
120	4,23	2,82	13,41	7,71	6,56	5,05	11,12	9,23
	5,04	3,68	13,08	7,87	7,40	5,23	11,74	8,87
	4,30	2,99	12,29	6,98	7,56	5,90	10,70	9,70
	4,38	3,15	9,48	7,35	7,21	5,44	11,12	9,72
	4,29	2,96	12,24	7,13	6,54	4,64	11,33	8,81
	4,12	2,43	9,32	7,84	6,65	5,62	10,25	8,32
167	5,09	3,73	12,76	9,03	7,38	7,52	13,10	13,22
	4,51	3,51	15,11	9,53	9,00	6,01	12,71	11,11
	4,47	3,37	14,78	9,44	9,77	6,96	9,86	10,99
	4,84	3,21	14,22	9,30	8,33	6,01	11,51	10,30
	5,07	4,14	14,58	9,52	8,05	6,14	12,99	10,52
	4,45	3,93	15,50	9,72	8,19	6,00	13,03	10,75
250	6,87	7,18	17,27	14,93	9,91	12,68	15,36	17,22
	6,37	6,88	17,09	16,05	10,27	9,74	16,42	14,82
	5,64	5,58	17,41	16,61	10,28	10,69	14,79	16,64
	5,77	5,71	18,56	11,34	9,65	9,59	15,44	15,88
	5,04	8,24	15,73	16,48	9,28	9,15	14,95	13,77
	5,30	3,59	17,05	18,06	9,26	9,27	14,12	15,69

Tabela G5: valores das profundidades de carbonatação (mm) das argamassas do grupo 2, a/c=0,55

Tempo (dias)	I55				IV55			
	SC6	SC100	R6	R100	SC6	SC100	R6	R100
7	1,39		2,36	0,00	3,18	0,00	3,34	0,00
	1,88	0,00	2,76	0,00	4,16	0,00	4,30	0,00
	2,05	0,00	2,95	0,00	3,62	0,00	4,07	0,00
	2,00	0,00	2,82	0,00	3,56	0,00	4,54	0,00
	1,88	0,00	3,26	0,00	3,91	0,00	4,39	0,00
	1,91	0,00	3,27	0,00	3,92	0,00	3,96	0,00
14	NM	0,00	4,61	0,00	NM	2,44	7,03	4,28
	NM	0,00	4,77	0,00	NM	2,88	7,94	3,71
	NM	0,00	5,58	0,00	NM	2,69	7,87	2,38
	NM	0,00	4,39	0,00	NM	2,60	7,48	2,93
	NM	0,00	4,97	0,00	NM	2,53	7,65	3,99
	NM	0,00	4,75	0,00	NM	2,53	7,03	3,23
30	4,13	0,00	7,32	0,00	7,62	3,18	10,45	5,34
	3,90	0,00	7,26	0,00	8,11	3,23	11,16	6,02
	4,84	0,00	6,90	0,00	8,06	3,29	11,51	5,46
	3,65	0,00	8,55	0,00	8,54	3,11	11,60	4,97
	3,91	0,00	7,70	0,00	8,67	2,47	10,84	4,57
	4,26	0,00	7,64	0,00	8,80	3,02	11,08	4,21
63	5,79	3,96	11,08	7,72	13,99	6,06	16,11	8,35
	5,62	4,27	11,61	7,83	13,22	6,69	15,07	9,36
	5,85	3,63	9,91	5,19	12,47	6,71	13,06	11,86
	5,48	3,66	9,72	5,66	13,25	7,06	13,68	11,51
	5,10	2,90	12,01	5,15	11,19	6,28	17,12	10,68
	5,00	2,54	11,14	6,35	12,51	6,80	15,77	11,27
91	7,03	4,80	13,20	9,52	18,10	8,72		13,44
	7,09	5,20	13,43	10,73	15,64	9,97		12,79
	7,50	4,95	12,37	9,30	14,26	8,30		12,29
	6,35	4,82	11,25	9,78	13,26	8,10		12,13
	6,34	3,56	12,51	8,92	13,87	7,39		12,78
	6,18	4,72	12,97	8,99	16,47	8,54		13,97
120	8,40	6,07	15,08	10,77	20,00	11,22		14,49
	8,47	5,21	15,17	9,76	20,00	11,28		15,36
	7,74	6,02	13,79	10,80	20,00	10,56		13,74
	7,41	5,93	14,51	11,73	20,00	10,65		14,04
	6,86	4,88	15,99	11,35	16,53	10,36		14,84
	8,71	5,07	15,26	11,31	17,34	10,94		16,25
168	10,35	7,83		12,60		15,88		
	11,61	6,72		14,13		17,40		
	9,75	7,59		14,79		14,22		
	9,64	7,59		13,88		17,05		
	9,56	8,05		16,17		15,33		
	10,22	8,04		14,92		15,77		
254	12,77	14,16						
	14,60	17,43						
	12,77	16,42						
	13,84	15,89						
	10,34	13,19						
	11,04	17,66						

Tabela G6: valores das profundidades de carbonatação (mm) das argamassas do grupo 2, a/c=0,70

Tempo (dias)	I70				IV70			
	SC6	SC100	R6	R100	SC6	SC100	R6	R100
2	1,62	1,44	1,05	0,00	3,08	2,57	2,83	0,00
	1,26	1,53	1,27	0,00	2,29	1,98	3,37	0,00
	1,64	1,87	2,21	0,00	2,92	2,63	2,74	0,00
	1,58	0,98	1,95	0,00	3,32	2,15	2,45	0,00
	1,68	1,21	2,38	0,00	3,09	2,51	2,72	0,00
	1,56	1,11	1,77	0,00	2,94	2,50	3,10	0,00
7	2,49	1,39	3,70	2,56	5,47	2,43	5,61	4,67
	3,32	2,07	4,53	1,00	6,73	4,06	8,22	4,39
	3,26	1,98	4,44	0,00	7,27	3,80	3,95	3,44
	3,68	1,87	4,91	4,30	6,89	4,36	4,73	3,83
	3,41	1,82	4,55	2,67	6,30	3,40	7,26	2,24
	3,19	2,12	4,26	2,29	6,95	2,54	7,02	3,39
14	5,18	1,98	7,21	3,49	9,73	4,79	12,15	2,04
	6,36	2,18	8,10	1,95	10,25	4,01	13,52	1,45
	5,14	2,82	8,25	1,50	10,37	5,55	11,45	2,08
	7,30	2,39	9,97	1,27	10,20	4,20	12,98	4,28
	4,97	1,56	8,17	1,45	12,06	4,54	9,99	1,35
	5,08	2,10	8,85	0,73	13,50	3,30	9,27	2,94
22	6,86	3,41	10,55	6,14	14,78	5,60	TC	8,45
	8,29	3,45	11,64	6,42	14,36	5,58	TC	9,02
	8,85	3,73	13,36	6,14	13,93	6,45	TC	9,73
	7,63	3,30	14,44	6,36	12,36	5,43	TC	9,67
	7,35	2,83	13,85	3,58	16,31	5,57	TC	6,97
	7,67	2,36	12,16	4,12	13,46	4,68	TC	7,25
27	6,69	3,14	12,86	3,71	12,39	5,37		8,89
	7,76	2,77	13,14	5,07	14,07	5,48		9,48
	10,28	2,76	13,44	3,61	17,20	4,96		10,95
	8,67	2,85	14,00	2,22	14,65	4,34		9,27
	8,40	3,10	13,62	3,54	TC	4,96		6,77
	10,28	2,56	12,86	3,54	TC	4,17		7,27
34	10,75	4,65	17,24	6,15		6,98		8,19
	10,36	4,00	17,20	5,64		6,48		7,69
	10,53	3,16	20,59	5,70		6,65		6,88
	9,49	3,17	17,88	5,10		5,98		7,77
	9,41	3,68	16,96	5,87		7,92		9,41
	12,25	4,16	16,59	6,48		7,60		10,06
63	13,60	8,51		10,86		12,67		21,02
	15,48	8,01		11,78		14,93		16,67
	13,74	6,85		7,42		11,11		16,57
	10,97	5,56		8,75		12,91		14,29
	10,95	5,73		10,81		10,29		13,18
	13,65	6,55		10,34		10,57		14,97
91	19,45	10,00		15,88				
	17,12	9,53		15,47				
	15,60	9,55		13,40				
	14,14	9,02		14,01				
	12,03	8,48		12,92				
	15,04	9,92		12,64				

Tempo (dias)	I70				IV70			
	SC6	SC100	R6	R100	SC6	SC100	R6	R100
118		16,43						
		13,40						
		15,66						
		11,80						
		10,29						
		11,17						
167		17,95						
		15,59						
		TC						
		TC						
		TC						
		TC						

Nota:

NM = não medida

TC = todo carbonatado

**APÊNDICE H – Resultados da resistência à compressão axial aos 7, 28 e 63 dias de idade**



Tabela H1: resultados da resistência à compressão axial das argamassas dos quatro grupos de moldagem para os ensaios acelerados

Grupo	Idade ruptura (dias)	Valores de resistência à compressão axial ( $f_c$ ), em MPa					
		I40	I55	I70	IV40	IV55	IV70
Grupo 1	7	35,24	25,03	15,77	30,43	19,45	12,87
		29,57	25,41	16,21	31,82	19,87	12,83
		33,43	22,90	14,30	29,49	19,50	12,41
	28	32,14	29,35	17,90	44,00	30,63	21,69
		41,60	29,22	19,27	40,58	27,63	20,30
		39,23	29,32	19,65	29,35	30,06	20,68
	63	46,10	34,02	20,51	51,81	33,61	27,13
		45,80	31,52	19,89	52,02	31,02	27,79
		40,40	30,80	20,74	48,44	34,61	27,82
Grupo 2	7	32,47	22,97	15,80	29,35	18,37	11,35
		32,11	21,80	15,62	28,53	18,65	13,66
		32,18	23,76	16,19	29,32	18,91	12,11
	28	38,11	28,03	19,41	40,91	28,56	19,69
		38,54	29,57	18,46	41,68	26,14	19,11
		37,98	27,74	19,18	43,15	29,63	21,71
	63	42,62	31,42	19,89	48,30	36,14	27,20
		43,23	29,59	18,74	51,88	35,41	26,47
		42,89	29,86	20,30	51,31	38,44	26,90
Grupo 3	7	26,75	23,10	16,51	26,13	19,56	12,78
		36,64	23,70	15,57	25,61	19,45	12,17
		-	-	-	-	-	-
	28	41,91	27,28	21,26	38,53	30,78	21,40
		40,45	27,79	22,47	41,54	27,22	21,86
		-	-	-	-	-	-
	63	38,87	29,72	21,50	45,77	34,18	27,37
		42,91	28,75	21,93	43,37	33,66	28,94
		-	-	-	-	-	-
Grupo 4	7	34,40	22,23	15,05	29,41	18,17	12,21
		31,24	24,04	15,60	30,14	19,36	12,53
		25,75	23,29	15,81	28,93	18,63	11,91
	28	29,92	28,32	18,22	36,33	30,03	20,29
		33,22	29,50	18,17	47,97	28,12	20,93
		40,75	29,41	-	44,09	31,82	-
	63	44,95	31,53	17,97	50,38	39,42	26,37
		45,46	32,76	18,47	46,96	37,77	25,57
		44,32	31,00	-	51,81	36,56	-

Tabela H2: resultados da resistência à compressão axial das argamassas dos três grupos de moldagem para os ensaios naturais

Grupo	Idade ruptura (dias)	Valores de resistência à compressão axial ( $f_c$ ), em MPa					
		I40	I55	I70	IV40	IV55	IV70
Natural 1	7	32,38	21,31	18,84	31,59	18,52	18,27
		35,60	24,15	20,67	29,67	18,31	17,60
		34,52	24,50	15,71	31,25	19,16	17,83
	28	38,52	28,26	22,37	44,00	26,68	25,85
		36,54	29,60	19,56	46,12	28,81	27,83
		39,17	29,20	21,85	41,99	28,64	24,81
	63	45,07	27,72	23,19	56,76	38,59	34,43
		41,29	-	24,42	54,82	-	37,94
		41,80	-	24,22	55,01	-	34,23
Natural 2	7	33,72	23,13	19,34	29,69	17,78	12,11
		31,92	22,38	19,17	30,96	19,59	12,12
		33,62	23,54	18,66	29,62	19,12	11,92
	28	41,46	28,48	22,59	41,89	29,93	20,86
		41,01	28,03	22,94	44,46	30,12	19,59
		41,82	28,50	21,80	43,08	28,62	19,29
	63	45,35	26,14	24,23	52,24	38,20	26,27
		45,75	28,83	24,28	50,89	34,33	25,79
		43,99	28,55	23,14	54,78	38,15	26,16
Natural 3	7	32,54	24,10	18,91	30,53	22,02	13,85
		34,46	24,95	16,59	29,11	22,31	12,83
		32,44	24,17	17,54	30,24	22,19	12,24
	28	41,73	24,71	22,43	46,65	37,04	21,78
		40,78	30,14	21,77	47,50	31,32	19,96
		41,90	30,06	20,10	45,46	28,11	21,92
	63	44,08	27,78	19,75	52,48	39,91	27,60
		45,23	31,73	20,32	54,75	39,77	27,87
		45,09	31,23	15,76	41,35	41,90	26,16

**ANEXO A – Dados de precipitação, umidade relativa e temperaturas médias mensais, estação INMET Porto Alegre, para o período de 2003 a 2008**

### Precipitação média do período de 2003 - 2008

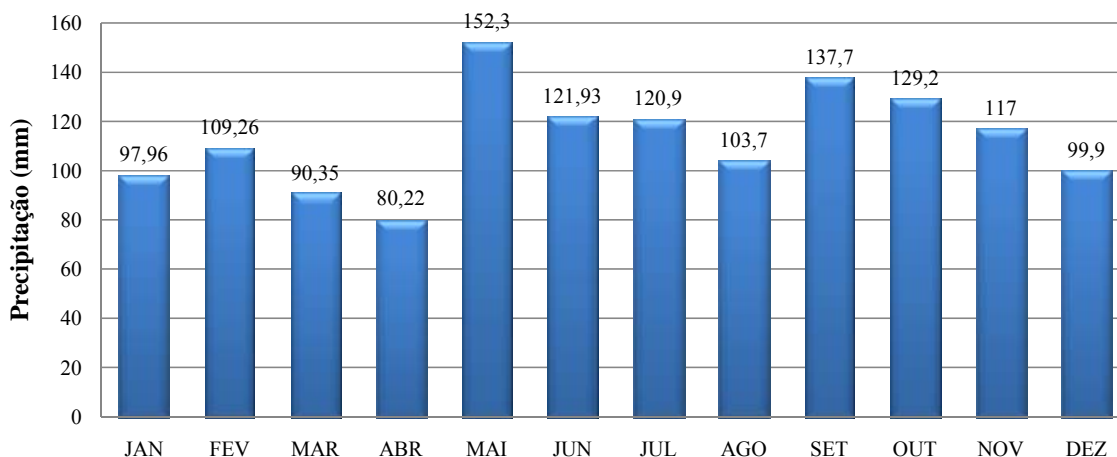


Figura AA1 – Precipitação média mensal registrada na estação do INMET, em Porto Alegre, para o período 2003 a 2008

### Umidade relativa e temperatura média do período 2003 - 2008

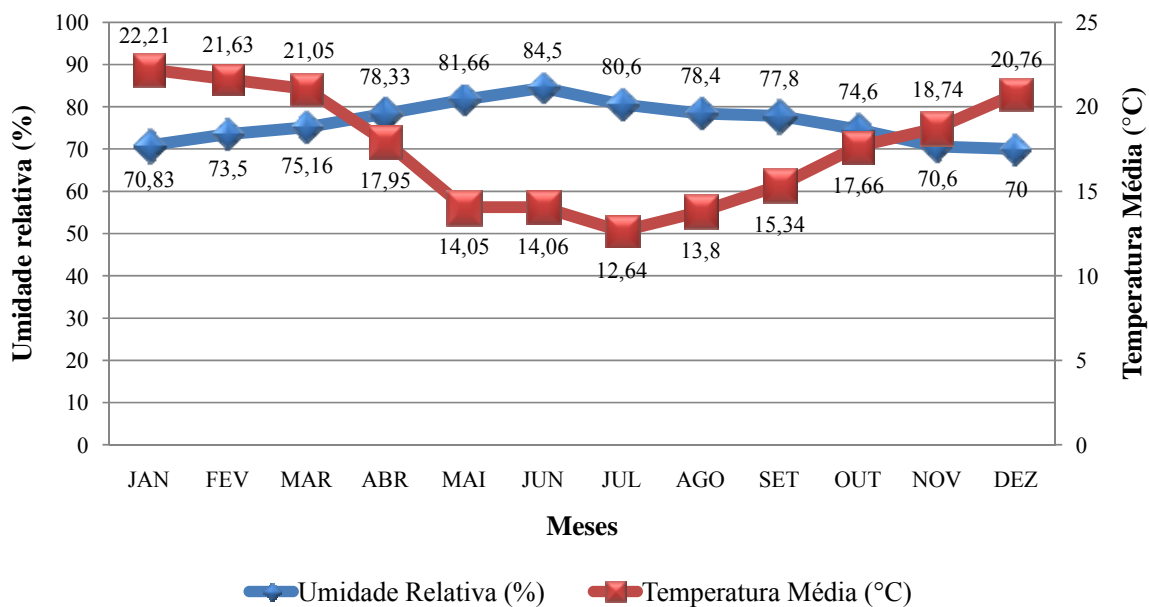


Figura AA2 – Temperatura e umidade relativa médias mensais registradas na estação do INMET, em Porto Alegre, para o período 2003 a 2008

P326e Pauletti, Cristiane

Estimativa de carbonatação natural de materiais cimentícios a partir de ensaios acelerados e de modelos de predição / Cristiane Pauletti. – 2009.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, BR-RS, 2009.

Orientadores: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Denise Carpena Coitinho Dal Molin  
Prof. Dr. Jean-Pierre Ollivier

Coorientadores: Prof. Dr. Claudio de Souza Kazmierczak  
Prof. Dr. Jérôme Verdier

1. Carbonatação – Ensaio acelerados. 2. Argamassa – Ensaio. 3. Estruturas – Concreto armado. I. Dal Molin, Denise Carpena Coitinho, orient. II. Ollivier, Jean-Pierre, orient. III. Kazmierczak, Claudio de Souza, coorient. IV. Verdier, Jérôme, coorient. V. Título.

CDU-624.012.45(043)