

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA,
ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

**ESTUDO DA CARBONATAÇÃO NATURAL DE
CONCRETOS COM DIFERENTES ADIÇÕES
MINERAIS APÓS 10 ANOS DE EXPOSIÇÃO**

MURILLO BATISTA FERREIRA

D0068C13
GOIÂNIA
2013

MURILLO BATISTA FERREIRA

**ESTUDO DA CARBONATAÇÃO NATURAL DE
CONCRETOS COM DIFERENTES ADIÇÕES
MINERAIS APÓS 10 ANOS DE EXPOSIÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de Goiás para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Construção Civil

Orientador: Prof. Dr. Oswaldo Cascudo

Co-orientadora: Prof. Dra. Helena Carasek

D0068C13
GOIÂNIA
2013

MURILLO BATISTA FERREIRA

**ESTUDO DA CARBONATAÇÃO NATURAL DE CONCRETOS COM DIFERENTES
ADIÇÕES MINERAIS APÓS 10 ANOS DE EXPOSIÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de Goiás para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Aprovada em ____/____/____.

Prof. Dr. Oswaldo Cascudo (Orientador)
Universidade Federal de Goiás

Prof. Dra. Helena Carasek (Co-orientadora)
Universidade Federal de Goiás

Prof. Dr. Nicole Pagan Hasparyk (PPG-GECON / Eletrobras Furnas)
Eletrobras Furnas

Prof. Dr. Geraldo Cechella Isaia (UFMS)
Universidade Federal de Santa Maria

Dedico este trabalho a minha abençoada família, de forma especial a minha maravilhosa esposa Flávia e aos meus magníficos pais João Batista e Nice.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, que por sua imensidão nunca me deixou caminhar sozinho. Percebo seus cuidados em todos os momentos de minha vida.

A Nossa Senhora, que sempre me cobre com teu manto sagrado.

Aos meus orientadores Oswaldo Cascudo e Helena Carasek, pela dedicação, apoio, incentivo, disponibilidade, acessibilidade e principalmente pelo conhecimento transmitido. Obrigado pela confiança depositada em mim.

Ao engenheiro Alexandre de Castro, por ter confiado a mim a continuação de seu valioso estudo, pelo seu grande conhecimento técnico e científico e pelas valiosas orientações ao longo deste trabalho.

À Universidade Federal de Goiás, por ter me concedido a oportunidade de estudar em uma instituição pública de qualidade e gratuita.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação e Geotecnia, Estruturas e Construção Civil (PPG-GECON).

Aos Professores Doutor Geraldo Isaia e Doutora Nicole Hasparyk, por terem aceitado o convite para participarem da banca examinadora e darem suas contribuições para este trabalho.

À Eletrobras Furnas, que acolhe e proporciona todo apoio para o desenvolvimento desta pesquisa ao longo do tempo.

À ANEEL, por meio de Eletrobras Furnas, pelo indispensável apoio financeiro.

À CAPES (Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoa de Ensino Superior), pelo suporte financeiro em forma de bolsa de pesquisa.

A todos colaboradores de Eletrobras Furnas, que auxiliaram na realização dos ensaios, em especial ao Edson, que operou o equipamento para o corte dos corpos de prova.

Aos meus magníficos pais, João Batista e Nice. Obrigado por todos os ensinamentos, sejam eles por palavras ou atitudes. Tudo que sou eu devo a vocês, meus eternos mestres.

À minha maravilhosa esposa, Flávia, por toda paciência, dedicação, incentivo e amor. É você que ilumina e encanta os meus dias. Obrigado por toda sua colaboração.

Aos meus queridos, Katiúscia, Ghunter, Davi e Isabela. Obrigado por essa família ser uma inspiração para a construção da minha.

Aos meus queridos, Lorena e Paulo. Obrigado por todo companheirismo e momentos juntos, que por sinal são muito descontraídos.

Ao Hélio, Dinair e Sarah, que me acolhem sempre.

Aos amigos e companheiros de longas datas nos estudos: José Henrique, Mário Henrique e Pedro Henrique. Obrigado pela amizade e aprendizado mútuo, que nossa amizade possa permanecer sempre.

Aos amigos e irmãos da Comunidade São José, por todos os momentos de encontro que foram abençoados e divertidos.

Aos colegas de mestrado, pelo convívio durante as disciplinas e eventuais encontros.

A todos que de alguma maneira contribuíram para a elaboração deste trabalho.

Murillo Batista

*Cabe ao homem formular projetos em seu coração, mas
do Senhor vem a resposta certa. (Provérbios, 16-1).*

RESUMO

Estudo da Carbonatação Natural de Concretos com Diferentes Adições Minerais após 10 anos de Exposição

Dentre as diversas patologias que atacam as estruturas de concreto destaca-se a corrosão das armaduras, que pode ser desencadeada pelo fenômeno da carbonatação do concreto, que consiste em um processo físico-químico entre o gás carbônico (CO_2) presente na atmosfera e os compostos da pasta de cimento, tendo como resultado principal a precipitação do carbonato de cálcio (CaCO_3) em uma região do cobrimento, com a constituição de uma camada que passa a ter uma alcalinidade significativamente menor do que aquela não afetada por esse fenômeno. A carbonatação avança de fora para dentro do concreto, por meio de uma frente carbonatada, que quando atinge a profundidade das armaduras provoca desestabilização da camada passiva protetora, propiciando assim o início da corrosão. Como muitas pesquisas são conduzidas por ensaios de carbonatação acelerada, é de suma importância a avaliação desse processo confrontando-o com dados obtidos de amostras que sofreram carbonatação natural. Diante dessa realidade, esta pesquisa se conduz baseada em amostras que estão expostas no ambiente natural (abrigado externo) por um período de dez anos, com o objetivo geral de avaliar os resultados obtidos (profundidades e coeficientes de carbonatação) do processo de carbonatação natural de concretos com diferentes adições minerais, relações água/aglomerante e processos de cura (úmida e seca) ao longo desse período. Para sua realização, foram utilizados corpos de prova de concreto armado produzidos no ano de 2002, fruto da dissertação de Castro (2003). As variáveis contempladas no programa experimental são: concretos com cinco tipos de adições minerais (sílica ativa (10%), cinza de casca de arroz (10%), metacaulim (10%), cinza volante (25%) e escória alto forno (65%), sendo estes teores em substituição parcial da massa de cimento) e mais o concreto de referência, sem adição mineral; três relações água/aglomerante (0,40; 0,55 e 0,70) e dois procedimentos de cura (úmida e seca). Foram realizadas medidas de carbonatação natural por meio de indicador de pH à base de fenolftaleína, elaborando-se um banco de dados ao longo do tempo, por meio de medidas realizadas com os tempos de exposição de 0,25 anos (91 dias), 0,50 anos (182 dias), 0,82 anos (301 dias), 3 anos, 7 anos, 9 anos e 10 anos, permitindo assim uma avaliação comparativa de desempenho dos diversos concretos contendo adições minerais, tendo-se como base os valores de profundidade carbonatada e os coeficientes de carbonatação natural. Os resultados mostraram que existem diferenças significativas de comportamento entre os diversos concretos estudados e que na análise global dos coeficientes de carbonatação natural, o concreto de referência apresentou isoladamente o melhor desempenho, demonstrando que a reserva alcalina ainda é o efeito preponderante em termos de combate à carbonatação, mas que o refinamento da microestrutura proporcionado pelas adições (efeito físico) se aproxima desse aspecto químico, como se tem, por exemplo, nos concretos com metacaulim. Na correlação entre os coeficientes de carbonatação acelerado e natural, verificou-se uma relação de direta proporcionalidade entre os coeficientes encontrados para os dois procedimentos, com o coeficiente acelerado significando aproximadamente 7,4 vezes o coeficiente natural. Os prognósticos de vida útil mostraram períodos de tempo estimado até a frente de carbonatação atingir a espessura de cobrimento variando desde 4 anos até 241 anos, para os diversos concretos e situações analisadas.

Palavras-chave: Concreto. Adições minerais. Carbonatação natural. Durabilidade. Vida útil.

ABSTRACT

Study of natural carbonation of concrete with different additions minerals after 10 years of exposure

Among lots of pathologies that attack the concrete structures stands out the corrosion of the reinforcements, that may be triggered by the phenomenon of carbonation of the concrete, which consists in a physico-chemical process between the carbon dioxide (CO_2) from the atmosphere and the cement paste compounds, which has as main result the calcium carbonate precipitation (CaCO_3) in a region of the concrete cover, with the formation of a layer that has less alkalinity than that not affected by this phenomenon. The carbonation moves from outside to inside the concrete through a carbonated front, that when it reaches the depth of the reinforcement causes destabilization of the protective passive layer, providing the onset of the corrosion. How many researches are conducted by accelerated carbonation tests, it is of paramount importance that the evaluation process by comparing it with data obtained from samples that have suffered natural carbonation. Facing this reality, this research is conducted based on samples that are exposed in the natural environment (external housed) for a period of ten years, with the general objective of evaluating the results (coefficients and carbonation depths) of natural carbonation process of concrete with different mineral additions, water/binder ratios and curing conditions (moist and dry) over this period. For this realization, samples of concrete produced in 2002, produced in Castro's dissertation (2003). The variables included in the experimental program are: concretes with five types of mineral additions (silica fume (10%), rice husk ash (10%), metakaolin (10%), fly ash (25%), blast furnace slag (65%), these amounts being in partial replacement of cement mass) and the reference concrete, without mineral addition; three water/binder relationships (0.40, 0.55 and 0.70) and two curing conditions (moist and dry). Measurements were made of natural carbonation through of pH indicator based on phenolphthalein, elaborating a database along time, through measurements with periods of exposure of 0.25 years (91 days), 0.50 years (182 days), 0.82 years (301 days), 3 years, 7 years, 9 years and 10 years, allowing comparative performance evaluation of various concrete containing mineral additions, taking as a base carbonated depths and natural carbonation coefficients data. The results showed that there are significant differences of behavior between different concretes studied and that in the overall analysis of the carbonation natural coefficients, the reference concrete showed the best alone performance, showing that the alkaline reserve is still the predominant effect in terms of against carbonation, but the microstructure refinement provided by additions (physical effect) approaches such chemical aspect, as detected, for example, in concrete with metakaolin. In the correlation between the accelerated carbonation coefficients and the natural carbonation ones, was verified a relation of direct proportionality between the coefficients found for the two procedures, with the coefficient signifying accelerated approximately 7.4 times the natural ratio. The useful life predictions showed periods of time until the carbonation front reaches the cover thickness ranging from 4 years up to 241 years, for the different concretes and situations analyzed.

Keywords: Concrete. Mineral additions. Natural carbonation. Durability. Useful life.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1- Carbonatação do $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (THIÉRY, 2005).....	30
Figura 2.2 - Influência do teor de adição de Sílica Ativa na carbonatação dos concretos de relação água/aglomerante 0,80, ao longo do tempo (POSSAN, 2004)	34
Figura 2.3 - Profundidade de carbonatação de concretos com diferentes relações água/aglomerante e dois teores de cinza de casca de arroz (HOPPE, 2008).....	35
Figura 2.4 - Porosidade representada pelo ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio para os concretos de referência e com adição de metacaulim (DUAN <i>et al.</i> , 2012).....	36
Figura 2.5 – Profundidade carbonatada dos concretos referência e com adição de metacaulim (DUAN <i>et al.</i> , 2012).....	37
Figura 2.6 – Profundidade carbonatada dos concretos referência e com adição de cinza volante, considerando os três períodos de cura, três níveis de substituição e três níveis de finura da cinza volante (DAS; PANDEY, 2012).....	38
Figura 2.7 - Disposição dos resultados médios globais, para cada um dos tipos de cura, dos coeficientes de carbonatação acelerada (CASTRO, 2003).....	40
Figura 2.8 - Profundidade de carbonatação natural aos 365 dias em função da relação água/aglomerante (BOURGUIGNON, 2004)	41
Figura 2.9 – Influência da cura e da relação água/cimento na carbonatação do concreto obtida em processo acelerado, em concretos produzidos com CP II F – 32 (CASCUDO; CARASEK, 2011).....	43
Figura 2.10 - Coeficiente de difusão do O_2 em função da relação água/cimento (TUUTTI, 1982).....	51
Figura 3.1 - (a) Fôrma de madeira compensada de 12 mm, (b) armadura longitudinal, estribos e espaçadores, (c) vista da fôrma com armadura, prontos para moldagem e (d) corpo de prova após desenforma	67
Figura 3.2 - (a) Material sendo carregado na betoneira, (b) descarga do concreto no piso do laboratório após mistura, (c) realização do ensaio de abatimento de tronco de cone,	

(d) aplicação do concreto nas fôrmas de madeira, (e) detalhe do processo de vibração do concreto e (f) corpos de prova após moldagem.....	69
Figura 3.3 - (a) Tenda aberta para realização das medidas de profundidade de carbonatação, (b) tenda fechada após o ensaio, (c) corpos de prova empilhados sob a tenda e sobre os páletes e (d) detalhe da posição das armaduras no protótipo de viga garantindo o cobrimento.....	71
Figura 3.4 - Valores de temperatura ao longo do ano de 2011 e em parte de 2010 (Fonte: Eletrobras Furnas)	72
Figura 3.5 - Valores de umidade relativa ao longo do ano de 2011 e em parte de 2010 (Fonte: Eletrobras Furnas)	72
Figura 3.6 - Correlação entre as profundidades medidas com o uso dos dois indicadores de pH (CASTRO, 2003).....	74
Figura 3.7 - Correlação entre as profundidades medidas com o uso de ruptura manual e corte refrigerado	75
Figura 3.8 - Correlação entre as profundidades de carbonatação medidas com o indicador aplicado com <i>spray</i> e com pincel	76
Figura 3.9 - Correlação entre as leituras após o tempo de aspersão do indicador de pH (CASTRO, 2003).....	77
Figura 3.10 - Esquema adotado para a realização das medidas de profundidades da frente de carbonatação.	78
Figura 3.11 - (a) Retirada da “fatia” do corpo de prova, (b) corpos de prova com suas respectivas “fatias” ao lado, (c) aspersão do indicador de pH à base de fenolftaleína e (d) detalhe da medida da profundidade carbonatada com auxílio do paquímetro	79
Figura 4.1 - Distribuição normal dos dados individuais de profundidade carbonatada	83
Figura 4.2 - Avanço da frente de carbonatação dos concretos sem adição, para as três relações a/ag distintas (0,40; 0,55 e 0,70) e submetidos às curas seca e úmida	87
Figura 4.3 - Avanço da frente de carbonatação dos concretos com adição de cinza volante, para as três relações a/ag distintas (0,40; 0,55 e 0,70) e submetidos às curas seca e úmida	89

Figura 4.4 - Avanço da frente de carbonatação dos concretos com adição de escória de alto forno, para as três relações a/ag distintas (0,40; 0,55 e 0,70) e submetidos às curas seca e úmida	91
Figura 4.5 - Avanço da frente de carbonatação dos concretos com adição de cinza de casca de arroz, para as três relações a/ag distintas (0,40; 0,55 e 0,70) e submetidos às curas seca e úmida	93
Figura 4.6 - Avanço da frente de carbonatação dos concretos com adição de sílica ativa, para as três relações a/ag distintas (0,40; 0,55 e 0,70) e submetidos às curas seca e úmida.....	95
Figura 4.7 - Avanço da frente de carbonatação dos concretos com adição de metacaulim, para as três relações a/ag distintas (0,40; 0,55 e 0,70) e submetidos às curas seca e úmida.....	98
Figura 4.8 – Valores dos expoentes das equações de potência encontradas para as linhas de tendência das profundidades individuais em função do tempo, (a) para os concretos curados de forma úmida e (b) para os concretos curados de forma seca.....	103
Figura 4.9 - Avanço da profundidade média de carbonatação ao longo do tempo para os concretos de relação água/aglomerante igual a 0,40 submetidos à cura úmida.	104
Figura 4.10 - Avanço da profundidade média de carbonatação ao longo do tempo para os concretos de relação água/aglomerante igual a 0,40 submetidos à cura em local seco.....	105
Figura 4.11 - Avanço da profundidade média de carbonatação ao longo do tempo para os concretos de relação água/aglomerante igual a 0,55 submetidos à cura úmida	106
Figura 4.12 - Avanço da profundidade média de carbonatação ao longo do tempo para os concretos de relação água/aglomerante igual a 0,55 submetidos à cura em local seco.....	106
Figura 4.13 - Avanço da profundidade média de carbonatação ao longo do tempo para os concretos de relação água/aglomerante igual a 0,70 submetidos à cura úmida	108
Figura 4.14 - Avanço da profundidade média de carbonatação ao longo do tempo para os concretos de relação água/aglomerante igual a 0,70 submetidos à cura em local seco.....	108
Figura 4.15 - Coeficientes de carbonatação de todas as situações de concretos, contemplando todas as idades de análise, considerando separadamente as três relações a/ag (0,40; 0,55 e 0,70) e os dois tipos de cura (seca e úmida). Os valores médios de kn estão expressos em (mm/√ano).....	110

Figura 4.16 - Estimativa de média dos coeficientes de carbonatação natural, para cada tipo adição mineral empregada na produção dos concretos	115
Figura 4.17 - Estimativa de média dos coeficientes de carbonatação natural, para cada tipo adição mineral empregada na produção dos concretos	118
Figura 4.18 - Disposição dos grupos definidos pela comparação múltipla de médias, com os fatores ordenados de forma crescente quanto às médias globais dos coeficientes de carbonatação natural dos concretos para as situações (a) dos valores médios por regressão linear, (b) dos valores individuais considerando todas as idades e (c) dos valores individuais para a idade de dez anos	120
Figura 4.19 - Disposição dos grupos definidos pela comparação múltipla de médias, com os fatores ordenados de forma crescente quanto às médias globais dos coeficientes de carbonatação natural dos concretos	121
Figura 4.20 - Correlação direta entre os coeficientes de carbonatação acelerada e natural ...	127
Figura 4.21 - Disposição dos resultados médios globais, para cada um dos tipos de cura, dos coeficientes de carbonatação acelerada (CASTRO, 2003).....	128
Figura 4.22 - Disposição dos resultados médios globais, para cada um dos tipos de cura, dos coeficientes obtidos para a carbonatação natural	128
Figura A.1 - Curva de distribuição granulométrica do agregado miúdo (CASTRO, 2003)...	145
Figura A.2 - Curva de distribuição granulométrica do agregado graúdo (CASTRO, 2003)..	146
Figura A.3 - Difratoograma de raios X do cimento Portland CII-F (CASTRO, 2003)	148
Figura A.4 - Difratoograma de raios X da cinza volante (CASTRO, 2003)	150
Figura A.5 - Difratoograma de raios X da escória de alto forno (CASTRO, 2003).....	150
Figura A.6 - Difratoograma de raios X da cinza de casca de arroz (CASTRO, 2003)	151
Figura A.7 - Difratoograma de raios X da cinza de sílica ativa (CASTRO, 2003).....	151
Figura A.8 - Difratoograma de raios X da cinza de metacaulim (CASTRO, 2003)	152
Figura B.1 - Imagem digital da amostra com escala para calibração	157
Figura B.2 - Delimitação entre as armaduras do corpo de prova	158
Figura B.3 - Medição da área carbonatada entre as armaduras	158

Figura B.4 - Determinação da profundidade de carbonatação média de cada lateral	159
Figura B.5 – Correlação entre profundidades médias obtidas por paquímetro e <i>AutoCad</i> para o ano de 2011.....	160
Figura B.6 – Correlação entre profundidades médias obtidas por paquímetro e <i>AutoCad</i> para o ano de 2012.....	160

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Modelos matemáticos para estimativa da profundidade de carbonatação do concreto (POSSAN, 2010)	45
Tabela 2.1 - Modelos matemáticos para estimativa da profundidade de carbonatação do concreto (POSSAN, 2010) (continuação)	46
Tabela 2.1 - Modelos matemáticos para estimativa da profundidade de carbonatação do concreto (POSSAN, 2010) (continuação)	47
Tabela 2.1 - Modelos matemáticos para estimativa da profundidade de carbonatação do concreto (POSSAN, 2010) (continuação)	48
Tabela 2.1 – Modelos matemáticos para estimativa da profundidade de carbonatação do concreto (POSSAN, 2010) (continuação)	49
Tabela 2.2 - Parâmetros de projeto para estruturas sujeitas à carbonatação (POSSAN, 2010)	53
Tabela 3.1 - Caracterização do concreto endurecido com relação água/aglomerante igual a 0,40 - valores médios.....	64
Tabela 3.2 - Caracterização do concreto endurecido com relação água/aglomerante igual a 0,55 - valores médios.....	65
Tabela 3.3 - Caracterização do concreto endurecido com relação água/aglomerante igual a 0,70 - valores médios.....	66
Tabela 4.1 – Equações das linhas de tendência que melhor representam os dados das profundidades individuais ao longo do tempo, para cada uma das situações.	101
Tabela 4.2 - Valores médios dos coeficientes de carbonatação natural com seus respectivos desvios padrões.....	111
Tabela 4.3 - Resultados da análise de variância realizada com os dados individuais de coeficientes de carbonatação natural para todos os concretos, considerando todas as idades	114
Tabela 4.4 - Resultados da análise de variância realizada com os dados individuais de coeficientes de carbonatação natural para todos os concretos, considerando apenas a idade de dez anos	116
Tabela 4.5 - Valores médios para os coeficientes de carbonatação acelerada e natural.....	126

Tabela 4.6 - Tempo necessário para a frente de carbonatação atingir 25 mm de espessura, atingindo assim o nível das armaduras	130
Tabela A.1 - Caracterização do agregado miúdo (CASTRO, 2003).....	145
Tabela A.2 - Caracterização do agregado graúdo (CASTRO, 2003)	146
Tabela A.3 - Caracterização do cimento Portland (CASTRO, 2003)	147
Tabela A.4 - Principais características das adições minerais (CASTRO, 2003).....	149
Tabela A.5 - Caracterização dos concretos de relação água/aglomerante 0,40, no estado fresco (CASTRO, 2003).....	153
Tabela A.6 - Caracterização dos concretos de relação água/aglomerante 0,55, no estado fresco (CASTRO, 2003).....	154
Tabela A.7 - Caracterização dos concretos de relação água/aglomerante 0,70, no estado fresco (CASTRO, 2003).....	155
Tabela C.1 – Valores de profundidades carbonatadas e coeficientes de carbonatação natural para concretos de referência com relação a/ag igual a 0,40 e cura úmida.....	162
Tabela C.2 – Valores de profundidades carbonatadas e coeficientes de carbonatação natural para concretos de referência com relação a/ag igual a 0,40 e cura seca.....	163
Tabela C.3 – Valores de profundidades carbonatadas e coeficientes de carbonatação natural para concretos de referência com relação a/ag igual a 0,55 e cura úmida.....	164
Tabela C.4 – Valores de profundidades carbonatadas e coeficientes de carbonatação natural para concretos de referência com relação a/ag igual a 0,55 e cura seca.....	165
Tabela C.5 – Valores de profundidades carbonatadas e coeficientes de carbonatação natural para concretos de referência com relação a/ag igual a 0,70 e cura úmida.....	166
Tabela C.6 – Valores de profundidades carbonatadas e coeficientes de carbonatação natural para concretos de referência com relação a/ag igual a 0,70 e cura seca.....	167
Tabela C.7 – Valores de profundidades carbonatadas e coeficientes de carbonatação natural para concretos com escória de alto forno com relação a/ag igual a 0,40 e cura úmida.....	168
Tabela C.8 – Valores de profundidades carbonatadas e coeficientes de carbonatação natural para concretos com escória de alto forno com relação a/ag igual a 0,40 e cura seca.....	169

Tabela C.9 – Valores de profundidades carbonatadas e coeficientes de carbonatação natural para concretos com escória de alto forno com relação a/ag igual a 0,55 e cura úmida.....	170
Tabela C.10 – Valores de profundidades carbonatadas e coeficientes de carbonatação natural para concretos com escória de alto forno com relação a/ag igual a 0,55 e cura seca	171
Tabela C.11 – Valores de profundidades carbonatadas e coeficientes de carbonatação natural para concretos com escória de alto forno com relação a/ag igual a 0,70 e cura úmida.....	172
Tabela C.12 – Valores de profundidades carbonatadas e coeficientes de carbonatação natural para concretos com escória de alto forno com relação a/ag igual a 0,70 e cura seca	173
Tabela C.13 – Valores de profundidades carbonatadas e coeficientes de carbonatação natural para concretos com metacaulim com relação a/ag igual a 0,40 e cura úmida.....	174
Tabela C.14 – Valores de profundidades carbonatadas e coeficientes de carbonatação natural para concretos com metacaulim com relação a/ag igual a 0,40 e cura seca	175
Tabela C.15 – Valores de profundidades carbonatadas e coeficientes de carbonatação natural para concretos com metacaulim com relação a/ag igual a 0,55 e cura úmida.....	176
Tabela C.16 – Valores de profundidades carbonatadas e coeficientes de carbonatação natural para concretos com metacaulim com relação a/ag igual a 0,55 e cura seca	177
Tabela C.17 – Valores de profundidades carbonatadas e coeficientes de carbonatação natural para concretos com metacaulim com relação a/ag igual a 0,70 e cura úmida.....	178
Tabela C.18 – Valores de profundidades carbonatadas e coeficientes de carbonatação natural para concretos com metacaulim com relação a/ag igual a 0,70 e cura seca	179
Tabela C.19 – Valores de profundidades carbonatadas e coeficientes de carbonatação natural para concretos com sílica ativa com relação a/ag igual a 0,40 e cura úmida	180
Tabela C.20 – Valores de profundidades carbonatadas e coeficientes de carbonatação natural para concretos com sílica ativa com relação a/ag igual a 0,40 e cura seca	181
Tabela C.21 – Valores de profundidades carbonatadas e coeficientes de carbonatação natural para concretos com sílica ativa com relação a/ag igual a 0,55 e cura úmida	182
Tabela C.22 – Valores de profundidades carbonatadas e coeficientes de carbonatação natural para concretos com sílica ativa com relação a/ag igual a 0,55 e cura seca	183

Tabela C.23 – Valores de profundidades carbonatadas e coeficientes de carbonatação natural para concretos com sílica ativa com relação a/ag igual a 0,70 e cura úmida	184
Tabela C.24 – Valores de profundidades carbonatadas e coeficientes de carbonatação natural para concretos com sílica ativa com relação a/ag igual a 0,70 e cura seca	185
Tabela C.25 – Valores de profundidades carbonatadas e coeficientes de carbonatação natural para concretos com cinza volante com relação a/ag igual a 0,40 e cura úmida	186
Tabela C.26 – Valores de profundidades carbonatadas e coeficientes de carbonatação natural para concretos com cinza volante com relação a/ag igual a 0,40 e cura seca	187
Tabela C.27 – Valores de profundidades carbonatadas e coeficientes de carbonatação natural para concretos com cinza volante com relação a/ag igual a 0,55 e cura úmida	188
Tabela C.28 – Valores de profundidades carbonatadas e coeficientes de carbonatação natural para concretos com cinza volante com relação a/ag igual a 0,55 e cura seca	189
Tabela C.29 – Valores de profundidades carbonatadas e coeficientes de carbonatação natural para concretos com cinza volante com relação a/ag igual a 0,70 e cura úmida	190
Tabela C.30 – Valores de profundidades carbonatadas e coeficientes de carbonatação natural para concretos com cinza volante com relação a/ag igual a 0,70 e cura seca	191
Tabela C.31 – Valores de profundidades carbonatadas e coeficientes de carbonatação natural para concretos com cinza de casca de arroz com relação a/ag igual a 0,40 e cura úmida.....	192
Tabela C.32 – Valores de profundidades carbonatadas e coeficientes de carbonatação natural para concretos com cinza de casca de arroz com relação a/ag igual a 0,40 e cura seca.....	193
Tabela C.33 – Valores de profundidades carbonatadas e coeficientes de carbonatação natural para concretos com cinza de casca de arroz com relação a/ag igual a 0,55 e cura úmida.....	194
Tabela C.34 – Valores de profundidades carbonatadas e coeficientes de carbonatação natural para concretos com cinza de casca de arroz com relação a/ag igual a 0,55 e cura seca.....	195
Tabela C.35 – Valores de profundidades carbonatadas e coeficientes de carbonatação natural para concretos com cinza de casca de arroz com relação a/ag igual a 0,70 e cura úmida.....	196
Tabela C.36 – Valores de profundidades carbonatadas e coeficientes de carbonatação natural para concretos com cinza de casca de arroz com relação a/ag igual a 0,70 e cura seca.....	197

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO.....	22
1.1 OBJETIVOS.....	25
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO	26
CAPÍTULO 2 CARBONATAÇÃO NO CONCRETO	28
2.1 MECANISMO DA CARBONATAÇÃO	29
2.2 VARIÁVEIS QUE INFLUENCIAM NA CARBONATAÇÃO.....	31
2.2.1 Adições minerais	32
2.2.2 Relação água/aglomerante	40
2.2.3 Cura	42
2.3 MODELOS DE CARBONATAÇÃO.....	43
2.3.1 Modelo de Tuutti (1982).....	50
2.3.2 Modelo de Papadakis, Vayenas e Fardis (1989, 1991).....	51
2.3.3 Modelo do CEB - Comité Euro-International du Béton (1997).....	52
2.3.4 Modelo de Duprat, Sellier e Nguyen (2006).....	54
2.3.5 Modelo de Hyvert (2009)	55
2.3.6 Modelo de Possan (2010)	56
CAPÍTULO 3 MATERIAIS E MÉTODOS	59
3.1 VARIÁVEIS.....	59
3.2 MATERIAIS UTILIZADOS.....	61
3.3 CONCRETOS ESTUDADOS	62
3.3.1 Caracterização do Concreto Endurecido.....	63
3.4 CORPOS DE PROVA PARA A CARBONATAÇÃO NATURAL.....	67
3.5 AVALIAÇÃO DA FRENTE DE CARBONATAÇÃO.....	73
3.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA	79
CAPÍTULO 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	82
4.1 TRATAMENTO DE VALORES ESPÚRIOS.....	82
4.2 PROFUNDIDADES DE CARBONATAÇÃO NATURAL DOS CONCRETOS EM FUNÇÃO DO TEMPO DE EXPOSIÇÃO – ANÁLISE DE COMPORTAMENTO	84
4.2.1 Concretos sem Adição (Situação de Referência).....	86

4.2.2	Concretos com Cinza Volante	88
4.2.3	Concretos com Escória de Alto Forno	90
4.2.4	Concretos com Cinza de Casca de Arroz.....	92
4.2.5	Concretos com Sílica Ativa	94
4.2.6	Concretos com Metacaulim	97
4.2.7	Considerações Gerais sobre os Resultados Individuais	99
4.3	PROFUNDIDADES DE CARBONATAÇÃO NATURAL DOS CONCRETOS EM FUNÇÃO DO TEMPO DE EXPOSIÇÃO - ANÁLISE COMPARATIVA DOS TIPOS DE ADIÇÕES.....	104
4.3.1	Concretos com Relação a/ag Igual a 0,40.....	104
4.3.2	Concretos com Relação a/ag Igual a 0,55.....	105
4.3.3	Concretos com Relação a/ag Igual a 0,70.....	107
4.4	ANÁLISE DOS COEFICIENTES DE CARBONATAÇÃO NATURAL	109
4.4.1	Coefficientes de Carbonatação Natural.....	109
4.4.2	Análises de variância dos dados de coeficientes de carbonatação	112
4.4.2.1	Coefficientes considerando todas as idades	112
4.4.2.2	Coefficientes considerando apenas a idade de 10 anos.....	116
4.4.3	Comparação múltipla de médias.....	119
4.4.4	Análise dos Coeficientes Tratando as Variáveis Separadamente	121
4.5	CORRELAÇÃO ENTRE OS COEFICIENTES DE CARBONATAÇÃO ACELERADO E NATURAL.....	124
4.6	ESTIMATIVA DE VIDA ÚTIL POTENCIAL DO CONCRETO	129
	CAPÍTULO 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	132
5.1	CONSIDERAÇÕES SOBRE ALGUNS ASPECTOS DA METODOLOGIA ADOTADA	132
5.2	CONCLUSÕES	133
5.3	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	136
	REFERÊNCIAS	138
	APÊNDICE A – CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS..	144
A.1	AGREGADO MIÚDO	145
A.2	AGREGADO GRAÚDO.....	146
A.3	CIMENTO PORTLAND.....	147
A.4	ADIÇÕES MINERAIS.....	149
A.5	CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO FRESCO.....	153

APÊNDICE B – PROCEDIMENTO PARA MEDIDA DA PROFUNDIDADE MÉDIA DA FRENTE DE CARBONATAÇÃO COM AUXÍLIO DO PROGRAMA COMPUTACIONAL AUTOCAD.....	156
APÊNDICE C – PROFUNDIDADES CARBONATADAS E COEFICIENTES DE CARBONATAÇÃO NATURAL.....	161
C.1 CONCRETOS DE REFERÊNCIA.....	162
C.2 CONCRETOS COM ESCÓRIA DE ALTO FORNO.....	168
C.3 CONCRETOS COM METACAULIM.....	174
C.4 CONCRETOS COM SÍLICA ATIVA.....	180
C.5 CONCRETOS COM CINZA VOLANTE.....	186
C.6 CONCRETOS COM CINZA DE CASCA DE ARROZ.....	192

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Sabe-se que são muitas as causas de deterioração das estruturas de concreto armado: corrosão de armaduras, lixiviação, ataque por sulfatos, reação álcali-agregado, etc. Assim, as manifestações patológicas podem comprometer a durabilidade destas estruturas reduzindo, de forma significativa, sua vida útil de projeto. Dentre as diversas patologias que atacam as estruturas de concreto armado destaca-se a corrosão de armaduras, seja por ataque de cloretos ou carbonatação, tanto por causa das dificuldades técnicas de recuperação como pelos aspectos econômicos envolvidos.

O fenômeno da carbonatação, enfoque deste trabalho, consiste em um processo físico-químico entre o gás carbônico (CO_2) presente na atmosfera e os compostos da pasta de cimento, que tem como resultado principal a precipitação do carbonato de cálcio (CaCO_3). Na estrutura interna do concreto em que essa precipitação ocorre, o concreto se altera fisicamente e, também, do ponto de vista químico, há uma redução da alcalinidade. Como o CO_2 se difunde no concreto de fora para dentro, pois ele se encontra em maior concentração no meio externo, a carbonatação se dá de fora para dentro e, portanto, está intimamente ligado ao concreto de cobertura. Este, por sua vez, apresenta fundamental importância no campo da conservação das estruturas, pois ele governa os mecanismos de transporte no tocante à entrada de agentes agressivos para o interior dos poros da pasta de cimento.

Essa espessura de cobertura possui características particulares que a diferem da massa de concreto confinado nas partes mais internas dos elementos estruturais, pois está em contato direto com as fôrmas na fase de moldagem, podendo perder água por absorção promovida por elas, sofrer alterações devidas ao efeito parede e ainda ser o caminho final percorrido pela água na sua evaporação para o ambiente.

A carbonatação se caracteriza pela formação de uma frente homogênea de avanço, que promove a formação de zonas de pH distintos, de modo que quando a frente de pH mais baixo formada atinge a região da superfície do aço ocorre um ataque à película passivadora da armadura, deixando este material suscetível à corrosão. Embora existam outras repercussões trazidas pela carbonatação ao concreto, algumas negativas outras positivas, essa implicação

direta na estabilidade das armaduras quanto à corrosão é o principal efeito, que tem motivado diversos estudos no Brasil e no mundo.

Por se tratar de uma reação processada de forma lenta em ambiente natural, diversos estudos sobre a carbonatação utilizam-se do processo acelerado. Alguns exemplos de pesquisas nacionais nesta linha são os trabalhos de: Kazmierczak (1995); Kulakowski (2002), Castro (2003), Bourguignon (2004), Possan (2004), Dalla Lana (2005), Pauletti (2009), Wolf (2010), Isaia *et al.* (2010), e Rebmann (2011), entre outros. No contexto internacional são inúmeros os trabalhos, podendo-se destacar os estudos de: Papadakis (2000), Thiery (2005), Peter *et al.* (2008), Hyvert (2009), Yongsheng *et al.* (2010) e Bellezze *et al.* (2011). O processo acelerado consiste em submeter amostras a elevadas concentrações de CO₂ em uma câmara apropriada. A grande dificuldade desses ensaios é conseguir uma adequada representatividade em relação ao processo natural, tanto pela escolha e realização do condicionamento das amostras, quanto pelas condições de execução dos ensaios e definição dos fatores influentes.

A precisa determinação dos fatores que influenciam a carbonatação das estruturas de concreto é uma questão complexa. Desse modo, as aplicações de teorias e métodos de previsão se tornam oportunos, pois são ferramentas úteis para modelagem do fenômeno. Muitos dos modelos de carbonatação são baseados em equações simplificadas, as quais consideram as diversas influências das variáveis em determinados coeficientes. Por outro lado, existem modelos que necessitam de dados de entrada de difícil obtenção, restringindo assim suas aplicações. Por isso, destaca-se a importância de modelos matemáticos que possuam dados de entrada de fácil obtenção e de baixo custo de aquisição e que contemplem uma abordagem probabilística para representar bem o fenômeno de carbonatação do concreto.

Como muitas pesquisas são conduzidas por ensaios de carbonatação acelerada, é de suma importância a avaliação desse processo confrontando-o com dados obtidos de amostras que sofreram carbonatação natural. Diante dessa realidade, esta pesquisa se conduz baseada em dados obtidos de amostras que estão expostas no ambiente natural por um período aproximado de 10 anos, ambiente este representativo do entorno da cidade de Goiânia-GO.

As concentrações de CO₂ nos diversos ambientes em que as estruturas de concreto são concebidas apresentam cada vez mais valores maiores, principalmente por causa do crescente avanço dos setores de transporte e industrial, associado ao crescimento das cidades. O

aumento na emissão deste gás e também de suas concentrações na atmosfera justifica a necessidade de desenvolver estudos que enfatizem a abordagem da influência do CO₂ na durabilidade e desempenho das estruturas de concreto frente ao avanço da carbonatação natural.

A utilização de adições minerais, além de proporcionarem melhorias nas características do concreto, tanto no estado fresco como no endurecido, também proporcionam modificações no comportamento do concreto diante do processo de carbonatação. Segundo Helene (1993), devido às reações pozolânicas, concretos com adições minerais apresentam menores reservas alcalinas, podendo ser este um fator de desvantagem na utilização de adições em relação ao avanço da frente de carbonatação. Este problema, porém, pode ser minimizado com uma cura úmida adequada, de forma a reduzir a porosidade e permeabilidade superficial do concreto e impedir ou retardar o acesso do CO₂. Diante disso, as cinco adições contempladas neste trabalho se propõe a contribuir para o entendimento do comportamento dos concretos com diferentes adições (e seus teores) diante do processo de carbonatação natural, considerando inclusive a execução de cura úmida ou seca.

Para a realização desta pesquisa, foram utilizados corpos de prova de concreto armado produzidos no ano de 2002, fruto da dissertação de Castro (2003), trabalho este constituinte de um projeto de pesquisa mais amplo, que versou sobre as “características do concreto de cobertura e o seu papel na durabilidade das estruturas de concreto armado”. Este projeto foi desenvolvido pela Universidade Federal de Goiás em conjunto com Furnas Centrais Elétricas, atualmente Eletrobras Furnas, no contexto de uma pesquisa Furnas/ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). A temática geral foi, portanto, a durabilidade do concreto de cobertura, tendo como variáveis as adições minerais (em substituição parcial ao cimento), os procedimentos de cura e a relação água/aglomerante (a/ag).

Do projeto de pesquisa citado, em sua totalidade, originaram-se quatro dissertações de mestrado, que trataram da influência das condições de moldagem na camada de cobertura (BRAUN, 2003), da influência das adições minerais na durabilidade do concreto sujeito à carbonatação (CASTRO, 2003), da influência das adições minerais e seu efeito na corrosão de armaduras induzidas por cloreto (FERREIRA, 2003) e da influência das condições de cura nas características da camada de cobertura (PAULA COUTO, 2003).

Os corpos de prova foram produzidos além dos previstos para os ensaios da época, com o intuito de estudar o envelhecimento natural de concretos com diferentes adições minerais, em especial no que se refere ao processo de carbonatação natural, complementando assim os estudos de Castro (2003) referentes ao desempenho dos concretos e à sua correlação com o processo acelerado.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar os resultados obtidos (profundidades e coeficientes de carbonatação) do processo de carbonatação natural de concretos com diferentes adições minerais, relações água/aglomerante e processos de cura (úmida e seca), após 10 anos de exposição em um ambiente natural, abrigado externo, do entorno da cidade de Goiânia-GO.

São objetivos específicos:

- Verificar a tendência do avanço da frente de carbonatação natural ao longo de 10 anos de exposição em diferentes concretos, em termos de análises de comportamento da profundidade de carbonatação *versus* o tempo de exposição, tendo em vista seis situações em relação ao uso de adições minerais, três relações água/aglomerante e dois processos de cura;
- Nas análises de comportamento referidas no tópico anterior, verificar e ajustar as melhores funções matemáticas para representar o comportamento natural das profundidades carbonatadas em função do tempo, para os diversos concretos com suas variáveis;
- Verificar estatisticamente a influência de diferentes adições minerais (sílica ativa, metacaulim, cinza de casca de arroz, cinza volante, escória de alto-forno e referência-sem adições) incorporadas ao concreto, de três relações água/aglomerante (0,40; 0,55 e 0,70) e dos dois procedimentos de cura (úmida e seca) no processo de carbonatação natural do concreto, tendo como base de análise o coeficiente de carbonatação natural médio obtido dos dados experimentais, segundo o modelo de Tuutti (1982) - oriundo dos estudos de Fick;

- Correlacionar os coeficientes de carbonatação do processo acelerado obtidos por Castro (2003), com concentração de aproximadamente 5,5% de CO₂, umidade relativa de 65% e uma temperatura de (28 ± 1)°C, com os coeficientes de carbonatação do processo natural durante um período de 10 anos de exposição na região metropolitana de Goiânia;
- Realizar um prognóstico de vida útil utilizando os dados obtidos neste trabalho, para os diversos concretos concebidos na pesquisa, visando estimar o tempo necessário para a despassivação das armaduras, a partir do modelo de Tuutti (1982), considerando uma espessura total de cobrimento (carbonatável) de 25 mm.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

A estrutura da dissertação é apresentada a seguir, de acordo com a ordem dos capítulos que fazem parte do corpo do texto.

No Capítulo 2, é apresentada a revisão bibliográfica do trabalho, que abrange alguns aspectos relacionados à carbonatação no concreto, aos mecanismos que envolvem os processos físico-químicos presentes no desenvolvimento do processo de carbonatação e as diferentes variáveis que influenciam o processo (principalmente as adições minerais, a relação água/aglomerante e os procedimentos de cura úmida, que são as variáveis deste trabalho). Por fim, tem-se uma abordagem dos vários modelos de carbonatação presentes na literatura, discutindo alguns deles para os fins de maior detalhamento e compreensão.

No Capítulo 3, são apresentados os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento do programa experimental, com detalhes das variáveis estabelecidas no estudo, dos materiais utilizados para a produção dos corpos de prova, dos concretos estudados com sua caracterização no estado endurecido, dos corpos de prova utilizados para a carbonatação natural, da avaliação da frente de carbonatação e da análise estatística utilizada.

No Capítulo 4, são apresentados os resultados e as discussões relativas aos ensaios realizados no programa experimental. Dentre os resultados abordados, estão: o tratamento de valores espúrios que eliminaram os dados que estavam fora da distribuição normal do banco de dados; as profundidades de carbonatação natural dos diferentes concretos, considerando os valores individuais e os médios em função do tempo de exposição; as análises estatísticas dos

coeficientes de carbonatação natural; a correlação entre os coeficientes de carbonatação acelerada e natural; e por fim a estimativa de vida útil dos diferentes concretos estudados, considerando todas as variáveis utilizadas neste trabalho e para a espessura de cobrimento adotada, de 25 mm.

No Capítulo 5, são apresentadas as considerações finais do trabalho, contendo as considerações sobre alguns aspectos da metodologia adotada, as conclusões e, finalmente algumas sugestões para futuras pesquisas.

CAPÍTULO 2

CARBONATAÇÃO NO CONCRETO

A carbonatação é um processo físico-químico que ocorre lentamente entre os produtos alcalinos do concreto com gases ácidos. Esses produtos alcalinos são formados pelos íons de sódio (Na^+), potássio (K^+) e principalmente cálcio (Ca^{2+}) que são provenientes da reação de hidratação do cimento. Já os gases ácidos que podem ser encontrados no ar atmosférico, principalmente em ambientes urbanos, são o gás sulfídrico (H_2S), o dióxido de enxofre (SO_2) e o gás carbônico (CO_2), este último com maior preponderância (CADORE, 2008).

Os hidróxidos de sódio (NaOH), potássio (KOH) e cálcio (Ca(OH)_2), tanto dissolvidos na fase aquosa quanto precipitados, propiciam um ambiente de elevada alcalinidade ao concreto, fruto do alto pH da solução do poro contida na pasta de cimento (CASCUDO; CARASEK, 2011). Quando esses compostos são consumidos ocorre uma significativa redução no pH desta solução. O pH do concreto, originalmente apresenta valores superiores a 12,5 e após o processo de carbonatação pode chegar a valores inferiores a 8,5 (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Diante desta baixa alcalinidade ocorre a desp passivação da armadura, gerando assim uma maior susceptibilidade de ocorrer sua corrosão, principalmente devido à presença de oxigênio associado com umidade. Diante desse processo de degradação das estruturas de concreto armado, certamente sua vida útil será bastante comprometida (POSSAN, 2010). E por se tratar de um fenômeno que ocorre de forma generalizada, as estruturas podem sofrer grandes problemas na estabilidade global e também em termos da extensão geral dos danos, consoante o desenvolvimento continuado dos processos corrosivos das armaduras. Dessa forma, torna-se muito importante garantir a qualidade e desempenho do concreto de cobrimento, pois é nesta região que ocorre todo processo da carbonatação.

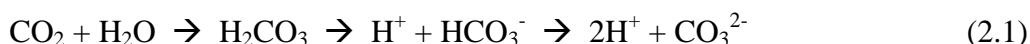
Além da diminuição do pH do concreto, o processo de carbonatação também pode gerar microfissuras, provocadas pela formação dos novos produtos que ocasionam aumento de volume, modificando assim a estrutura dos poros e alterando as condições de penetração dos gases envolvidos no processo. Dessa forma, torna-se necessário associar os estudos de carbonatação e porosidade, uma vez que a penetração de agentes agressivos, como o CO_2 , é

basicamente controlada pela estrutura de poros do material e pela umidade relativa dos poros (SAETTA *et al.*, 1993).

2.1 MECANISMO DA CARBONATAÇÃO

A carbonatação do concreto envolve os seguintes processos físico-químicos descritos a seguir.

(a) Difusão e dissolução do CO₂ gasoso na solução presente nos poros do concreto, conforme é mostrado na Equação 2.1. Na primeira etapa da reação há a formação do ácido carbônico que posteriormente se ioniza em bicarbonato e depois em carbonato, considerando que apenas este último participa do processo de carbonatação (PAPADAKIS, 2000).



b) Dissolução do Ca(OH)₂ na solução dos poros do concreto. A dissolução do CO₂ provoca a diminuição do pH da solução intersticial dos poros, com isso a dissolução do Ca(OH)₂ ocorre para restabelecer a alcalinidade do meio, seguido de sua difusão das regiões de maior alcalinidade para as de menor alcalinidade (THIÉRY, 2005). Na Equação 2.2 é mostrada essa dissolução (TAYLOR, 1997).



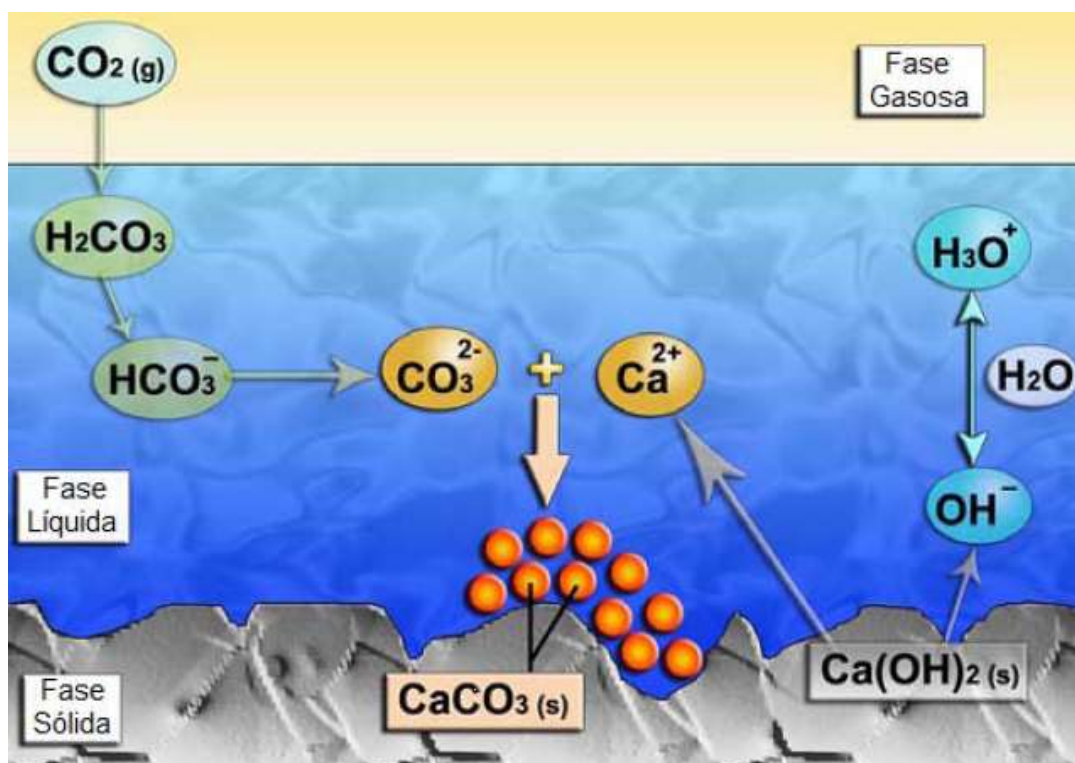
c) Reação entre os íons CO₃²⁻ e Ca²⁺ com a precipitação do composto CaCO₃, como é mostrado na Equação 2.3 (TAYLOR, 1997).



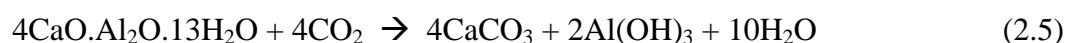
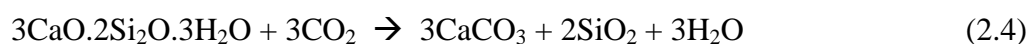
A reação entre o Ca(OH)₂ e o CO₂ é considerada a reação principal da carbonatação do concreto. Peter *et al.* (2008) investigaram a influência dos compostos da pasta de cimento no consumo de CO₂, no contexto do processo de carbonatação do concreto. Em seus estudos foram analisados os compostos CH, C-S-H, C₂S e C₃S, que de acordo com os resultados apresentados a quantidade de CO₂ consumida pelo CH foi cerca de três vezes maior que a consumida pelo C-S-H, vinte vezes maior que a do C₂S e cinquenta vezes maior que a do C₃S.

Esse fato deve-se à grande quantidade de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ presente na pasta de cimento hidratada (quando se compara ao C_2S e ao C_3S , por exemplo) e também à sua maior solubilidade se comparado com os outros produtos presentes na pasta de cimento, como o C-S-H por exemplo. Na Figura 2.1 são mostradas as fases dos processos descritos anteriormente.

Figura 2.1- Carbonatação do $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (THIÉRY, 2005)



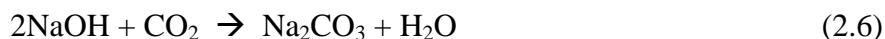
A ação do CO_2 também pode ocorrer sobre o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e sobre as fases aluminato (como no C_4AH_x), segundo se pode ver nas Equações 2.4 e 2.5, respectivamente (TAYLOR, 1997).



Na carbonatação dos aluminatos estes são convertidos rapidamente em (C_4ACH_x) e logo após se transforma em CaCO_3 e alumina gel. Considerando o monossulfato (AF_m) e a etringita (AF_t), eles geram na carbonatação o CaCO_3 , gel de alumina e sulfato de cálcio. Já na carbonatação do C-S-H, ocorre primeiramente a sua descalcificação, diminuindo a relação

Ca/Si, e posteriormente há a formação do gel de sílica, que por sua vez possui uma estrutura altamente porosa (CASCUDO; CARASEK, 2011).

Ainda na solução dos poros do concreto existem os álcalis do cimento (sódio e potássio) que também são passíveis da carbonatação, formando sais conforme é mostrado de forma simplificada nas Equações 2.6 e 2.7 (CASCUDO, 1997).



Segundo Houst e Wittmann (2002) os sais formados por essas reações são instáveis e tendem a reagir rapidamente com o $\text{Ca}(\text{OH})_2$, formando o carbonato de cálcio e disponibilizando novamente os álcalis (Equações 2.8 e 2.9) que vão continuar o processo através das reações apresentadas anteriormente.



2.2 VARIÁVEIS QUE INFLUENCIAM NA CARBONATAÇÃO

A profundidade e a velocidade de carbonatação podem ser influenciadas por diversos fatores que estão ligados ao sistema de poros e ao pH do concreto, os quais são alterados principalmente pela composição e pela execução da estrutura de concreto. Entre os principais fatores, estão a presença de adições minerais, a relação água/aglomerante, o processo e o tempo de cura, a dosagem, a porosidade, a resistência à compressão, os fatores internos do concreto (idade, grau de hidratação, agregado e aglomerante) e as condições ambientais (temperatura, umidade relativa, concentração de CO_2 e tempo de exposição). Pauletti (2009) afirma que para a carbonatação natural a influência do ambiente de exposição e a proteção do concreto contra intempéries são fatores bastante relevantes, já para o caso de ensaios acelerados o condicionamento passa a ser uma condição fundamental no controle da carbonatação.

Esta revisão da literatura faz uma abordagem, na sequência deste item, dos seguintes fatores influentes na carbonatação: adições minerais, relação água/aglomerante e processo de cura. A escolha desses três fatores se justifica por eles fazerem parte das variáveis consideradas na metodologia do programa experimental.

2.2.1 Adições minerais

As adições minerais de natureza pozolânica empregadas no concreto possuem dois mecanismos básicos com efeito na pasta de cimento e na estrutura interna do concreto: o efeito fíler (ação física) e o efeito pozolânico (ação química).

Considerando o efeito fíler, Mehta e Monteiro (2008) relatam que a incorporação de adições minerais em substituição parcial de cimento melhora a microestrutura do concreto, pois as pequenas partículas proporcionam o refinamento de poros, que consiste no processo de transformação de um sistema contendo vazios capilares grandes em um produto microporoso contendo muitos vazios pequenos. Por este efeito físico, os grãos menores proporcionam o empacotamento dos poros, com interrupções da rede porosa interconectada (diminuindo com isto a permeabilidade do concreto), assim como diminuem o efeito parede na zona de transição, promovendo o aumento da compacidade nessas regiões de interface pasta-agregado. O efeito global em termos de propriedades do concreto é um aumento da resistência mecânica e uma redução dos mecanismos de transporte responsáveis pela entrada de agentes agressivos, que se dá em decorrência de um sistema de poros significativamente conectado ao ambiente externo, a chamada porosidade aberta (OLLIVIER; VICHOT, 2008).

O efeito pozolânico é regido pela reação química que ocorre em temperaturas ambientes entre os compostos silicosos ou sílico-aluminosos das adições minerais com o Ca(OH)_2 precipitado na pasta de cimento para formar produtos com propriedades cimentantes. Com a ativação das reações pozolânicas, ocorre uma redução da quantidade de Ca(OH)_2 precipitado na pasta de cimento, ocasionando a diminuição da reserva alcalina que conseqüentemente contribui para a redução da capacidade de proteção da pasta de cimento fazendo com que sejam necessárias menores quantidades de CO_2 para carbonatar o concreto. Porém os produtos formados nestas reações são mais resistentes e compactos do que o Ca(OH)_2 e são precipitados nos canais de percolação da água e na zona de transição, promovendo assim uma maior compacidade com a produção de um sistema de poros refinado menos conectado e com maior grau de

tortuosidade, podendo apresentar um menor volume total de poros. Isto, conduz a uma redução da difusividade do CO_2 na matriz cimentícia, retardando assim o avanço da frente de carbonatação, o que se dá por um mecanismo essencialmente físico de bloqueio dos capilares conectados (e não por ação química de fixação do CO_2 na própria reação de carbonatação, que se tem em ambientes com forte reserva alcalina) (CASCUDO; CARASEK, 2011).

De modo geral as adições minerais possuem esses dois mecanismos básicos de ação, porém para o efeito da carbonatação é necessário conhecer qual deles predomina de acordo com o tipo de adição. Isto depende também do teor de adição, da relação água/aglomerante e da eficiência da cura realizada (ISAIA, 1999). A seguir, apresentam-se algumas particularidades das adições minerais empregadas na pesquisa experimental do presente trabalho, com base no levantamento bibliográfico realizado.

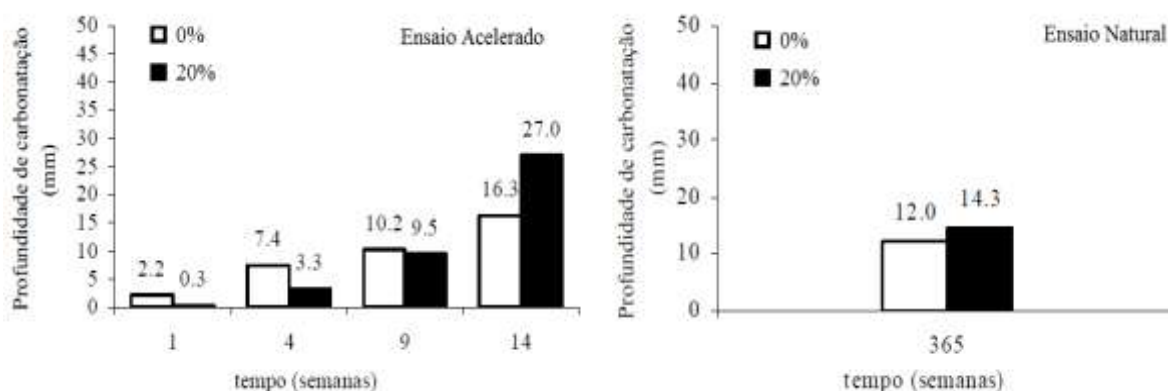
a) Sílica ativa

A sílica ativa é um subproduto da fabricação de silício ou ligas de ferro-silício, a partir de quartzo de elevada pureza em fornos a arco e de indução das indústrias de silício metálico.

Segundo Papadakis (2000) o emprego de sílica ativa no concreto diminui o teor de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e conseqüentemente aumentam a profundidade da frente de carbonatação. Entretanto, o autor salienta que este fato ocorre quando o emprego de tal adição é dado como substituição ao cimento. Neste estudo, dados confirmam que argamassas moldadas com relação água/aglomerante acima de 0,50 e substituição de 10% de sílica ativa apresentaram aumento na profundidade de carbonatação em relação à argamassa sem sílica ativa. Para valores de água/aglomerante acima de 0,50, as características químicas da pasta de cimento passam a exercer um efeito significativo na profundidade de carbonatação e o consumo de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, ocorrido nas reações pozolânicas promovidas pela sílica ativa, torna-se favorável à carbonatação (KULAKOWSKI, 2002).

Em pesquisa sobre o assunto, Possan (2004) apresenta o gráfico da Figura 2.2 em que é mostrada a influência do teor de sílica ativa em substituição ao cimento para concretos de relação água/aglomerante igual a 0,80. De acordo com o gráfico, percebe-se que para idades mais avançadas, tanto para o ensaio acelerado (14 semanas - 98 dias) quanto para o ensaio natural (365 semanas - 7 anos), a presença de sílica ativa favorece o processo de carbonatação.

Figura 2.2 - Influência do teor de adição de Sílica Ativa na carbonatação dos concretos de relação água/aglomerante 0,80, ao longo do tempo (POSSAN, 2004)



Em contra partida, na pesquisa desenvolvida por Castro (2003), cujo processo de carbonatação foi o acelerado, em seus resultados é mostrado que, de forma global, a sílica ativa foi a que apresentou o melhor desempenho para os concretos submetidos às curas úmida e seca em relação aos concretos de referência, considerando três níveis de relação a/ag (0,40, 0,55 e 0,70). Dessa forma, o desempenho desta adição mineral depende também de suas características, tais como reatividade pozolânica e finura.

Para relações água/aglomerante abaixo de 0,50, diversos estudos (KULAKOWSKI, 2002; SILVA; LIBORIO, 2002; VIEIRA, 2003) relatam que concretos com ou sem adição de sílica ativa apresentam processo de carbonatação desprezível; isso se deve ao fato de que o avanço da frente de carbonatação nesses casos é regido, principalmente, pela porosidade da matriz cimentícia, que é função direta da relação água/aglomerante adotada.

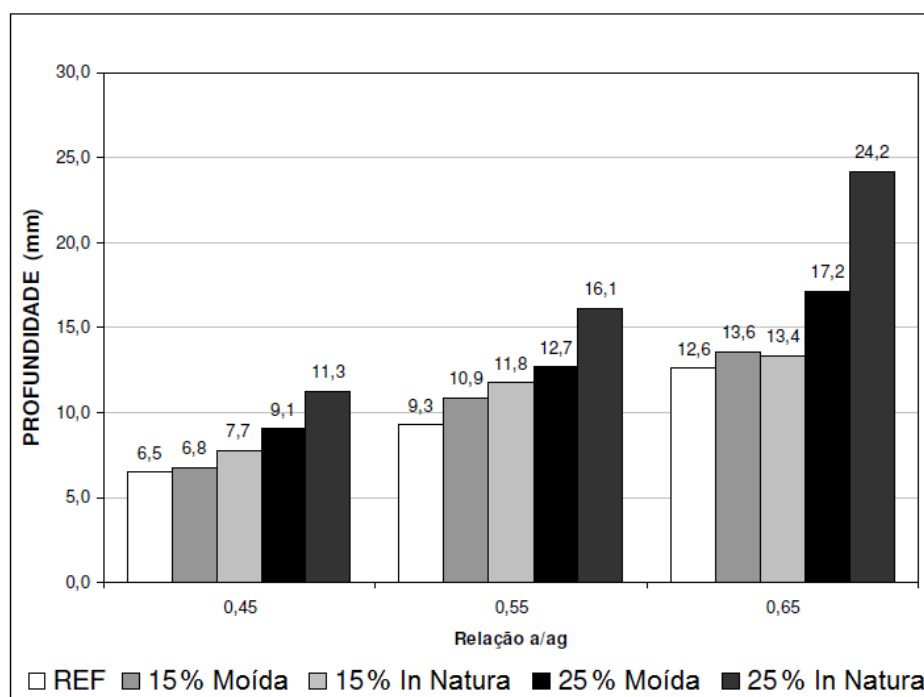
b) Cinza de casca de arroz

Muitas propriedades apresentadas pelos concretos decorrentes da incorporação da cinza de casca de arroz (CCA) têm sido reportadas por alguns pesquisadores na área tecnológica. Pouey (2006) verificou que ao ser incorporada ao concreto em substituição ao cimento, a cinza de casca de arroz modifica a microestrutura da pasta, pois ao se combinar com o hidróxido de cálcio (CH), gera uma pasta menos heterogênea, mais resistente e apresentando um menor calor de hidratação. Além da reação química, a cinza de casca de arroz promove o efeito microfiller, devido ao tamanho das partículas, uma vez que se introduzem entre os grãos de cimento e se alojam nos interstícios da pasta. Tal ocupação reduz os espaços

disponíveis para a água e atua como pontos de nucleação, dificultando, assim, a formação de cristais de CH orientados de forma preferencial.

De acordo com Hoppe (2008) os concretos com a incorporação de cinza de casca de arroz possuem uma predisposição a apresentar coeficientes de carbonatação superiores aos concretos sem adições para as mesmas idades e relações água/aglomerante. Este comportamento está associado basicamente à maior reserva de CH que o cimento Portland proporciona ao concreto, pois existe maior quantidade de CH disponível para ser consumido pelo CO₂ nas reações de carbonatação, necessitando primeiro baixar o pH da solução para depois continuar avançando, fazendo com que a profundidade carbonatada progrida lentamente, diminuindo, assim, os coeficientes de carbonatação. No gráfico da Figura 2.3 são mostrados concretos submetidos ao processo de carbonatação acelerado com dois diferentes teores de cinza de casca de arroz (15% e 25%), moída e *in natura*, e suas respectivas profundidades de carbonatação a uma idade de 12 semanas (84 dias). Nele observa-se que para todas as relações água/aglomerante a presença de cinza de casca de arroz contribuiu para o aumento da profundidade carbonatada, contudo para 15% de CCA as diferenças não foram tão acentuadas quanto para 25%, notadamente em se tratando da cinza moída (que deve ter proporcionado um efeito filler mais pronunciado).

Figura 2.3 - Profundidade de carbonatação de concretos com diferentes relações água/aglomerante e dois teores de cinza de casca de arroz (HOPPE, 2008)

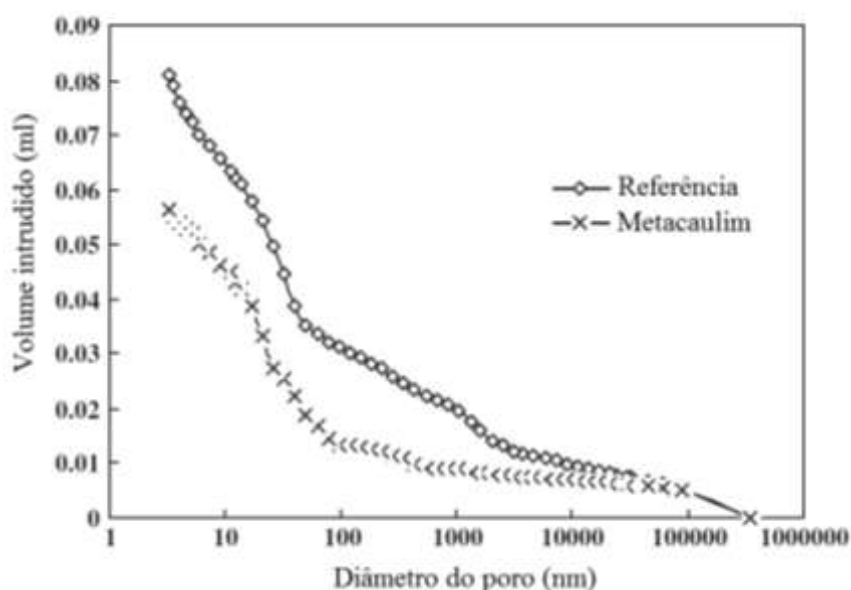


c) Metacaulim

As reações pozolânicas entre a argila calcinada e o CH são reações de dissolução e formação de novos compostos. A argila termicamente ativada, pelo fato de estar em forte desequilíbrio físico-químico por causa do tratamento térmico que transforma a estrutura cristalina dos minerais aluminossilicosos (argilominerais) em uma estrutura amorfa, quando entra em contato com o meio fortemente alcalino das pastas hidratadas de cimento Portland, promove na superfície de suas partículas a dissolução do silício e do alumínio que, posteriormente, com a disponibilidade de cálcio irão cristalizar-se em aluminatos, silicatos e aluminossilicatos de cálcio hidratado (FERREIRA, 2003).

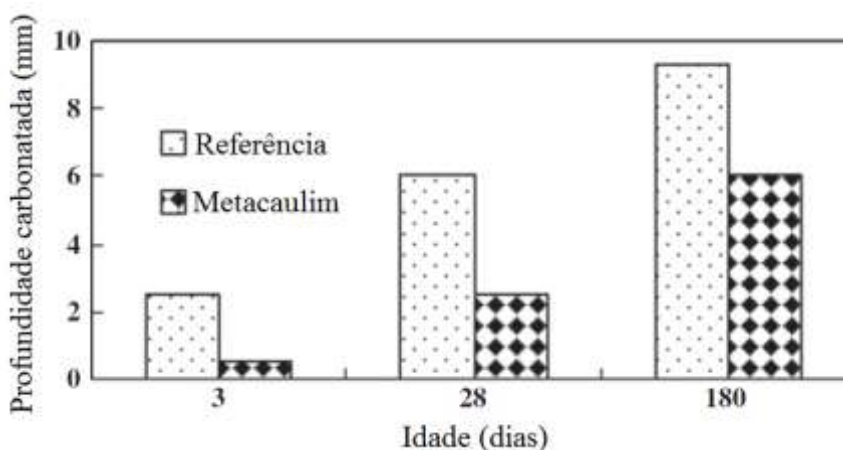
De acordo com uma pesquisa de Duan *et al.* (2012) a substituição de parte da massa de cimento por metacaulim pode causar uma significativa diminuição da porosidade do sistema. Em seus estudos foram utilizadas amostras prismáticas de seção de 100 mm por 100 mm e comprimento de 400 mm, as quais tiveram substituição de 10% da massa de cimento por metacaulim e relação a/ag igual a 0,50. Na Figura 2.4 é mostrada a diferença de porosidade por meio do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio, entre as amostras referência, sem adição de metacaulim, e com a presença de metacaulim. É possível verificar que a incorporação de metacaulim no sistema cimentício provocou uma redução considerável da porosidade global.

Figura 2.4 - Porosidade representada pelo ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio para os concretos de referência e com adição de metacaulim (DUAN *et al.*, 2012)



Outro resultado apresentado pelos autores é a diferença das profundidades de carbonatação entre os diferentes concretos, que podem ser vistas na Figura 2.5, a seguir.

Figura 2.5 – Profundidade carbonatada dos concretos referência e com adição de metacaulim (DUAN *et al.*, 2012)



Essa diferença é explicada pela diminuição da porosidade e do diâmetro dos poros do sistema proporcionada, principalmente, pelas reações pozolânicas ocorridas dentro da matriz cimentícia. Por outro lado, as finas partículas de metacaulim proporcionam pontes entre as partículas de cimento, fazendo com que o concreto fique mais denso, dificultando dessa forma a entrada de gases externos causadores das reações de carbonatação.

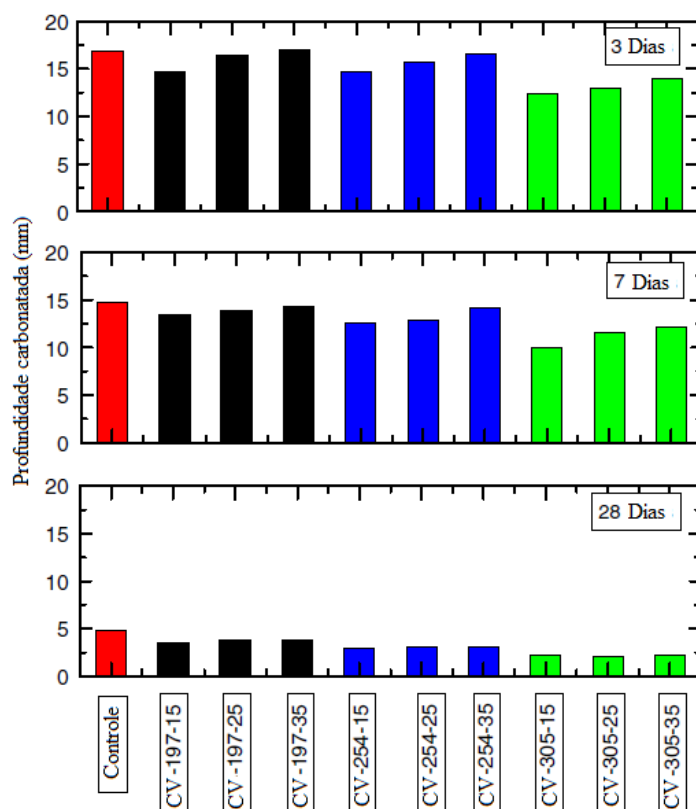
d) Cinza Volante

Jiang *et al.* (2000) comentam que a presença da cinza volante implica em uma carbonatação mais rápida. Quando existe adição de cinza volante, principalmente em percentuais elevados, o teor de CaO é significativamente menor e, portanto, menos hidróxido de cálcio será formado, que por sua vez será consumido nas reações pozolânicas. Embora o efeito da adição de cinza volante possa ser diminuído quando se aumenta o tempo de cura, a capacidade de fixação do CO₂ pelo cimento é reduzida, o que explica a rápida evolução da profundidade de carbonatação em concretos com cinza volante. Entretanto, a redução da quantidade de CH somente é verificada quando se substitui parte do cimento por cinza volante, pois neste caso, não apenas o hidróxido de cálcio é carbonatado, mas também o silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Estes autores ainda comentam que para uma determinada relação água/aglomerante, a profundidade carbonatada é maior para concretos contendo cinza volante quando comparados aos concretos sem cinza volante.

Segundo Khan e Lynsdale (2002), a profundidade carbonatada aumenta linearmente com o teor de cinza volante. Para cada incremento de 10% de cinza volante, os autores observaram um aumento de aproximadamente 0,3 mm na profundidade carbonatada, tendo sido observada uma profundidade máxima carbonatada aproximada de 2 mm em concretos com relação água/aglomerante 0,27, contendo 0%, 20%, 30% e 40% de cinza volante, mantidos durante 2 anos em carbonatação natural em temperatura de $(20 \pm 3)^\circ\text{C}$ e umidade relativa de $(65 \pm 5)\%$.

Outra pesquisa desenvolvida com concretos com adição de cinza volante foi a de Das e Pandey (2011). Nesta pesquisa eles utilizaram três níveis de substituição de massa de cimento por cinza volante (15%, 25% e 35%), três níveis de finura da cinza volante ($200 \text{ m}^2/\text{kg}$, $255 \text{ m}^2/\text{kg}$ e $305 \text{ m}^2/\text{kg}$) e três períodos de cura (3, 7 e 28 dias). A seguir na Figura 2.6 são apresentados os resultados das profundidades de carbonatação para cada concreto em função ao tempo de cura, considerando os três níveis de finura da cinza volante e os três períodos de cura. O processo de carbonatação utilizado pelos autores é o acelerado em câmara de carbonatação com concentração constante de 10% de CO_2 , temperatura controlada de 27°C e umidade relativa de 65%.

Figura 2.6 – Profundidade carbonatada dos concretos referência e com adição de cinza volante, considerando os três períodos de cura, três níveis de substituição e três níveis de finura da cinza volante (DAS; PANDEY, 2012)



Com esses resultados observa-se que quanto maior o valor de substituição de massa de cimento por cinza volante, maior é a profundidade de carbonatação, independente do período de cura e finura da adição. Além disso, observa-se também que quanto mais fina a cinza volante e quanto maior o período de cura do concreto, maior é a resistência da amostra à carbonatação, pois surge uma diminuição da porosidade do material.

Para o referido estudo os autores fixaram na metodologia a resistência à compressão, de forma que os valores encontrados para a relação água/aglomerante foram diferentes para os diversos concretos estudados. Diante deste fato, o concreto de referência (controle) ficou com um maior valor de relação água/aglomerante (maior relação a/c) quando comparado com os demais concretos contemplados na pesquisa. Assim o concreto, denominado pelo autor de controle, apresentou maiores profundidades de carbonatação, haja vista ter maior porosidade em relação aos concretos aos quais estão sendo comparados, uma vez que a relação água/cimento é uma das principais variáveis que influencia na porosidade final do sistema.

e) Escória de alto-forno

A rigor, a escória de alto-forno não é uma adição mineral de natureza pozolânica e sim um material cimentante, que apresenta hidraulicidade em meio aquoso. Segundo Bourguignon (2004), a carbonatação do concreto com escória de alto-forno, inicialmente, é muito semelhante àquela do cimento Portland comum, apresentando diferenças na quantidade de carbonatos que se precipitam da reação com o Ca(OH)_2 , porém a diferença de composição de C-S-H e do teor de Ca(OH)_2 afetam o mecanismo de carbonatação. Com isso, as misturas com adição de escória de alto-forno são mais dependentes da carbonatação do C-S-H, em decorrência da menor quantidade de hidróxido de cálcio, além da menor relação Ca/Si do C-S-H dessas misturas. As misturas que contêm escória de alto-forno como aglomerante necessitam, para ter um bom desempenho com relação à carbonatação, de um tempo maior de cura úmida, no mínimo 28 dias. Esse menor desempenho dos cimentos com adições de escória pode ser compensando com uma diminuição da relação água/aglomerante, que proporciona uma menor profundidade de carbonatação.

Nos estudos de Costa *et al.* (2005), sobre concretos com altos teores de escória de alto forno, considerando diferentes teores, eles concluíram que a profundidade de carbonatação cresce com o aumento do teor de escória e diminui quando se aumenta a classe de resistência dos concretos. Este fato pode ser explicado pelo menor teor de Ca(OH)_2 no sistema, o que

significa uma menor quantidade potencial de íons de cálcio disponíveis para a fixação e avanço do CO₂, reduzindo o pH da solução dos poros e permitindo o avanço da frente de carbonatação. Considerando a redução da carbonatação, em função do aumento da resistência à compressão, tem-se como argumento a redução na porosidade, pois concretos com menores volumes de poros apresentam maior compacidade e possui maior resistência à compressão, o que garante uma menor difusividade, dificultando a penetração de gases e agentes agressivos para o interior do concreto.

Diante do exposto, as adições minerais podem contribuir de forma a facilitar ou dificultar o avanço da frente de carbonatação ao longo do tempo, isso vai depender das características da adição, principalmente finura e reatividade pozolânica, melhorando com o efeito fíler. Por exemplo, nos estudos de Castro (2003) ele percebeu em seus resultados que alguns concretos com adições minerais, tiveram melhor ou pior desempenho em relação ao concreto de referência, conforme é mostrado na Figura 2.7, para concretos submetidos às curas úmida e seca.

Figura 2.7 - Disposição dos resultados médios globais, para cada um dos tipos de cura, dos coeficientes de carbonatação acelerada (CASTRO, 2003)

Coeficientes acelerados - cura úmida					
M	SA	CA	R	E	CV
7,21	15,86	27,40	27,40	28,12	31,72
Coeficientes acelerados - cura seca					
SA	M	R	E	CA	CV
20,19	23,79	44,70	49,03	52,63	54,80

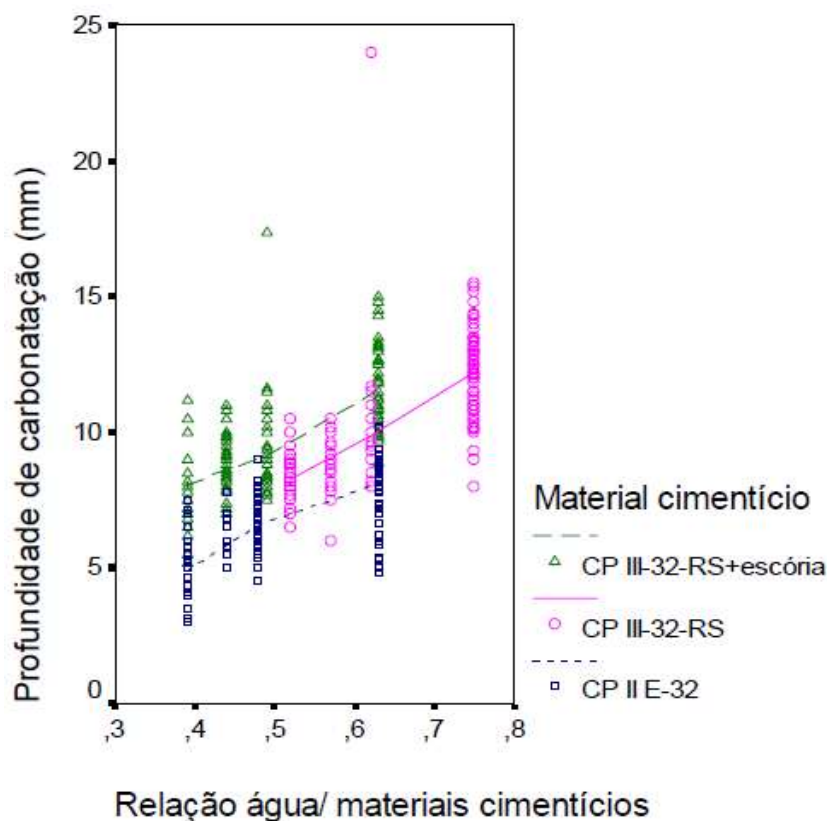
2.2.2 Relação água/aglomerante

A relação água/aglomerante ou relação água/cimento apresenta grande interação com a profundidade de carbonatação dos concretos, sendo esta maior quanto maior a relação água/aglomerante, fato este de consenso na literatura (HO; LEWIS, 1987; COLLEPARDI *et al.*, 1989; HELENE, 1993; CASCUDO, 2000; SILVA; LIBORIO, 2002; KHAN, LYNSDALE, 2002; CHI, HUANG, YANG *et al.*, 2002; KULAKOWSKI, 2002; VIEIRA, 2003; CASTRO, 2003; FERREIRA, 2003; ISAIA *et al.*, 2010; TASCA, 2012 entre outros).

A relação água/aglomerante afeta diretamente as propriedades microestruturais do concreto sendo ligada com a porosidade e com as propriedades mecânicas do concreto endurecido, principalmente na espessura de cobrimento que se encontra em contato com as fôrmas no momento de moldagem. O aumento da relação água/aglomerante aumenta a porosidade, que por sua vez aumenta a difusão de gases para o interior dos poros da pasta de cimento hidratada, resultando numa maior velocidade de carbonatação dos concretos (PAPADAKIS, 1991).

Em pesquisa de Bourguignon (2004), foram utilizados concretos com diversas relações água/aglomerante. Na Figura 2.8 pode-se observar a influência negativa do aumento da relação água/aglomerante na profundidade de carbonatação de concretos com diferentes cimentos. Pode-se afirmar que relações água/aglomerante menores proporcionam uma maior dificuldade de difusão do CO₂ para dentro dos poros da pasta de cimento hidratada.

Figura 2.8 - Profundidade de carbonatação natural aos 365 dias em função da relação água/aglomerante (BOURGUIGNON, 2004)



A porosidade e a distribuição dos tamanhos dos poros que são diretamente afetadas pela relação água/aglomerante determinam a compacidade, sendo que somente poros maiores que

um valor específico contribuem significativamente para o transporte de massa através do concreto. Quando o concreto está em contacto com a água, o mecanismo de penetração por capilaridade deve prevalecer apenas nas camadas superficiais, que apresentam poros abertos e conectados (MENDES, 2009). Mesmo estando estes poros conectados até as camadas mais internas, o transporte não ocorre indefinidamente por capilaridade porque os poros opõem uma resistência ao escoamento de fluídos, determinada fundamentalmente pelas suas dimensões, sendo que poros menores apresentam maior resistência hidráulica que os maiores. Além disso, os poros podem assumir diferentes formas e, assim, à medida que a interface água/ar se movimenta através do poro, pode ter o seu movimento interrompido ao atingir uma situação de menisco estável, resultante de um aumento no diâmetro e consequente redução da força capilar (CADORE, 2008).

2.2.3 Cura

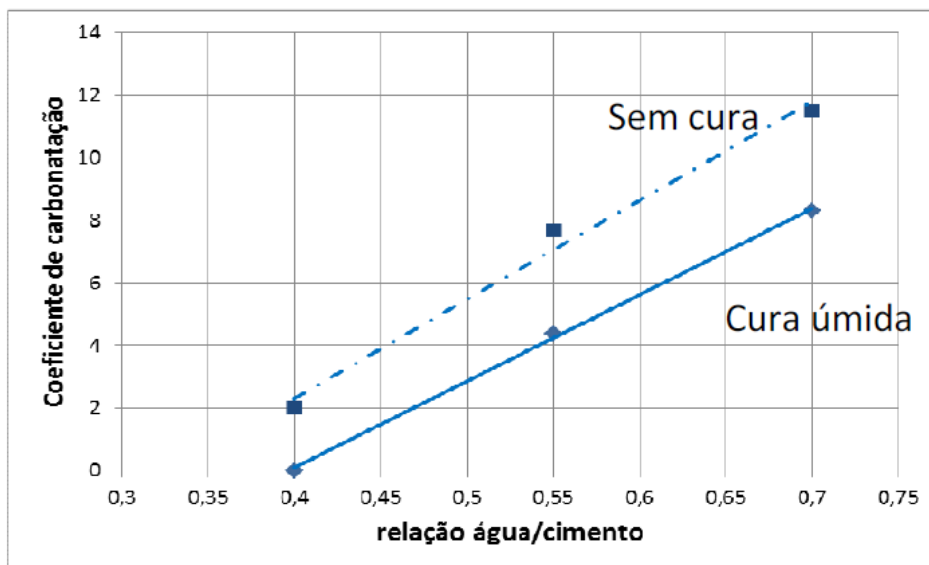
A cura úmida para o concreto influencia de forma decisiva no seu desempenho ao longo de sua vida útil, especialmente na carbonatação. Esta é bastante reduzida quando o concreto for submetido a períodos de cura inicial prolongada, possibilitando melhor hidratação do cimento, diminuição da porosidade e aumento da compacidade e, logo, maior proteção frente à penetração do CO₂.

Quando se utiliza adições minerais ao concreto, sob o ponto de vista da carbonatação, uma cura bem executada e por período maior proporciona melhor desenvolvimento das reações pozolânicas e refinamento dos poros da estrutura, podendo reduzir a permeabilidade e, de certa forma, compensando o efeito negativo do consumo de CH (NEVILLE, 1982).

Partindo da premissa que um processo de cura eficiente do concreto diminui os números de vazios e ligações entre poros e também evita fissuras de retração, conclui-se que um bom processo de cura é fundamental para reduzir o efeito da carbonatação. Diversas microfissuras surgem na superfície do concreto mal curado. A pré-existência de fissuras nas estruturas facilita a entrada do CO₂ e pode acelerar o processo de carbonatação (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Na Figura 2.9 é mostrado que a cura efetiva influencia de forma a abaixar os coeficientes de carbonatação.

Figura 2.9 – Influência da cura e da relação água/cimento na carbonatação do concreto obtida em processo acelerado, em concretos produzidos com CP II F – 32 (CASCUDO; CARASEK, 2011)



Segundo Pauletti (2009), a profundidade da camada carbonatada no concreto depende do processo de cura empregado nele, pois esse processo afeta as propriedades de hidratação do cimento Portland. Devido ao fato de influenciar a microestrutura do concreto, que por sua vez afeta a difusão do CO_2 através da rede de poros interconectada, o processo de cura do concreto tem um papel decisivo no desenvolvimento da reação de carbonatação, principalmente em concretos elaborados com adições em substituição ao cimento Portland.

2.3 MODELOS DE CARBONATAÇÃO

Este subitem promove uma breve revisão sobre os modelos de carbonatação empregados em nível mundial. Não se constituiu um objetivo do presente trabalho o uso e o aprofundamento ou aprimoramento desses modelos, mas apenas realizar uma pequena discussão sobre cada um deles, como forma de legado aos leitores e por se tratar de assunto pertinente ao contexto temático global do trabalho.

Existem, portanto, vários modelos com o objetivo de relacionar as profundidades de carbonatação medidas nos ensaios acelerados com aquelas da carbonatação natural. Com isso há diversos fatores que influenciam na determinação dos coeficientes de proporcionalidade, dentre eles podem ser citados a difusão do dióxido de carbono no material, a umidade e

temperatura do ambiente em que se está inserido, mineralogia dos constituintes e grau de saturação dos poros da pasta cimentícia.

Muitos pesquisadores relacionam diversos fatores na determinação do coeficiente de proporcionalidade considerando simultaneamente características tanto do concreto como também do ambiente em que ele está inserido. Com essas considerações, modelos de carbonatação empíricos e complexos são desenvolvidos. Esses modelos (PAPADAKIS, 2000; CEB, 1997; IZQUIERDO, 2003; THIÉRY, 2005; DUPRAT; SILLIER; NGUYEN, 2006; HYVERT, 2009; PAULETTI, 2009; POSSAN, 2010, entre outros) buscam representar o fenômeno da carbonatação e são utilizados para prever a profundidade de carbonatação natural a partir de ensaios acelerados.

Em seus estudos sobre modelos de carbonatação, Possan (2010) lista alguns modelos matemáticos descritos nas últimas décadas (Tabela 2.1), para estimar a profundidade de carbonatação com o tempo. A origem (anos e autores), a descrição matemática (com o detalhamento dos termos das equações) e outras informações sobre os modelos são apresentados a seguir.

Tabela 2.1 - Modelos matemáticos para estimativa da profundidade de carbonatação do concreto (POSSAN, 2010)

Autor (ano)	Modelo	Fatores	Observações
SMOLCZYK (1969)	$e_c = k \sqrt[n]{t - t_0}$	e_c = espessura carbonatada (mm); t_0 = idade inicial da estrutura (anos); t = tempo de exposição (anos); k = coeficiente de carbonatação; n = parâmetro que depende do tipo de cimento.	Considera somente dois tipos de cimento; não informa como determinar o k .
HAMADA (1969)	$e_c = \frac{R}{\sqrt{k}} t, \text{ para } k = \frac{0,30(1,15+3a/c)}{(a/c-0,25)^2}$	e_c = espessura carbonatada; k = coeficiente em função de a/c ; a/c = relação água/cimento; R = coeficiente em função do tipo de cimento, tipo de agregado e aditivo.	Parâmetros do modelo são tabelados; k é função da relação água/cimento.
SCHIESSL (1976)	$e_c = \left(\frac{2D(c_1 - c_2)}{a} \right)^{\frac{1}{2}} \sqrt{t}$	e_c = espessura carbonatada (cm); D = coeficiente de difusão efetiva do CO_2 (m^2/s); a = volume de material alcalino no concreto; $(c_1 - c_2)$ = diferença da concentração de CO_2 entre a superfície e a frente de carbonatação (kg/m^3); t = tempo de exposição.	Parâmetros de entrada de determinação não trivial, como D , a , c_1 e c_2 .
TUUTTI (1982)	$e_c = k \sqrt{t},$	e_c = espessura carbonatada (cm); t = tempo em anos ou meses; k = coeficiente dependente da difusividade efetiva do CO_2 através do concreto.	Não informa como determinar o k para projetos novos.

Tabela 2.1 - Modelos matemáticos para estimativa da profundidade de carbonatação do concreto (POSSAN, 2010) (continuação)

Autor (ano)	Modelo	Fatores	Observações
SENTLER (1984)	<p>Determinista</p> $e_c = \sqrt{\left(\frac{2D_{CO_2}}{a}\right) dp \cdot t}$ <p>Estocástico</p> $f(e_c, e_0; t) = \left[\frac{1}{\sigma(2\pi t^{0,5})^{0,5}} \right] \frac{(e_c - e_0 - \mu t^{0,2})^2}{2\sigma^2 t^{0,5}}$	<p>e_c = espessura carbonatada (cm); D_{CO_2} = coeficiente de difusão de CO_2 (m^2/s); a = concentração dos constituintes do concreto que podem carbonatar (kg/m^3); dp = diferença parcial de pressão do CO_2 (kg/m^3); $f(e_c, e_0; t)$ = função de densidade normal com média e variância; e_0 = carbonatação mais rápida que ocorre na superfície do concreto.</p>	Parâmetros de entrada de determinação não trivial, como D_{CO_2} , a , dp e c_2 .
HO e LEWIS (1987)	$e_c = e_0 + k\sqrt{t}$	<p>e_0 = profundidade de carbonatação inicial; k = coeficiente de carbonatação ($mm/ano^{0,5}$); t = tempo</p>	Não informa como determinar o k para projetos novos.
VESIKARI (1988)	$k = 26 (a/c - 0,3)^2 + 1,6$	<p>k = coeficiente de carbonatação ($mm/ano^{0,5}$); a/c = água cimento; limites: $0,45 < ac < 0,75$; Para ambiente externo desprotegido, multiplicar por 4.</p>	A carbonatação é função somente da relação a/c e é dada por um coeficiente k .
PAPADAKIS, VAYENAS e FARDIS (1989 e 1991)	$e_c = \sqrt{\frac{2D_{CO_2} [CO_2]^0}{[Ca(OH)]^0 + 3[CSH]^0 + 3[C_3S]^0 + 2[C_2S]^0} t}$	<p>e_c = profundidade de carbonatação (m); CO_2 = concentração molar do CO_2 (mol/m^3); D_{CO_2} = coeficiente de difusão efetivo do CO_2 no material carbonatado (m^2/s); t = tempo (s); $Ca(OH)_2$ e CSH = concentração molar dos hidratos (mol/m^3); C_3S e C_2S = concentração molar dos anidros (mol/m^3); O índice 0 é relativo às concentrações iniciais ($t=0$).</p>	Parâmetros de entrada de determinação não trivial, como CO_2 , D_{CO_2} ; necessidade da determinação da concentração molar dos hidratos e anidros.

Tabela 2.1 - Modelos matemáticos para estimativa da profundidade de carbonatação do concreto (POSSAN, 2010) (continuação)

Autor (ano)	Modelo	Fatores	Observações
PARROT (1994)	$e_c = 64 \left(\frac{K^{0,4} t^n}{c^{0,5}} \right)$	<p>e_c = profundidade de carbonatação (m); K = permeabilidade do oxigênio no concreto para uma umidade relativa de 60% (m^2/s); c = concentração de CaO no concreto (mol/kg); n = coeficiente em função da umidade relativa; t = tempo (anos)</p>	<p>Considera a permeabilidade do oxigênio através do concreto e a concentração de CaO, parâmetros de determinação não trivial.</p>
CEB* 238 (1997)	$e_c = \sqrt{(2 \psi_1 \psi_2 \psi_3 \Delta c)} \sqrt{\frac{D_{nom}}{a}} t \left(\frac{t_0}{t} \right)^n$	<p>e_c = profundidade de carbonatação (m); D_{nom} = difusão do CO_2 para completa carbonatação; Δc = diferença de concentração de CO_2 entre o ambiente e a frente de carbonatação; $\psi_1 \psi_2 \psi_3$ = parâmetros referentes às condições de microclima, de cura e referente à relação a/c; (Tabela). n = parâmetro que reflete as condições micro climáticas (ciclos de molhagem e secagem); (Tabela). t_0 = período de referência (1 ano); t = tempo; $n = 0$ (interiores); $n \leq 0,3$ (exteriores).</p>	<p>Parâmetros do modelo são tabelados; considera os vários fatores que influenciam a carbonatação; parâmetros de entrada de determinação não trivial, como D_{nom}, a e c.</p>

Tabela 2.1 - Modelos matemáticos para estimativa da profundidade de carbonatação do concreto (POSSAN, 2010) (continuação)

Autor (ano)	Modelo	Fatores	Observações
DURACRETE* (1999)	$e_c = \sqrt{\frac{2 k_e k_c D_{eff} \Delta c}{a}} \sqrt{t} \left(\frac{t_0}{t}\right)^w$	<p>e_c = profundidade de carbonatação (m); D_{eff} = coeficiente de difusão efetivo do CO₂ no período de referência t_0 (m²/s); a = quantidade de CO₂ para a completa carbonatação (kg/m³); Δc = diferença de concentração de CO₂ entre o ambiente e a frente de carbonatação (mol/m³); k_e = parâmetros referentes às condições climáticas, especialmente a umidade média do concreto; (Tabela) k_c = parâmetros referentes às condições de cura do concreto; (Tabela). w = quantidade de água contida no concreto (kg/m³); t_0 = período de referência (1 ano); t = tempo</p>	<p>Parâmetros do modelo são tabelados; considera os vários fatores que influenciam a carbonatação; parâmetros de entrada de determinação não trivial, como D_{aff}, a e c.</p>
JIANG <i>et al.</i> (2000)	$e_c = 839 (1 - UR)^{1,1} \sqrt{\frac{w}{r_c C} - 0,34} \frac{C_0}{r_{hd} r_c C} \sqrt{t}$	<p>e_c = profundidade de carbonatação (m); UR = umidade relativa; W = quantidade de água (kg/m³); C = consumo de cimento (kg/m³); C_o = concentração de CO₂(%); r_c = coeficiente que depende do tipo de cimento; (Tabela). r_{hd} = coeficiente do grau de hidratação; (Tabela)</p>	<p>Parâmetros do modelo são tabelados; considera os parâmetros de dosagem do concreto.</p>

Tabela 2.1 – Modelos matemáticos para estimativa da profundidade de carbonatação do concreto (POSSAN, 2010) (continuação)

Autor (ano)	Modelo	Fatores	Observações
HYVERT (2009)	$e_c = \sqrt{\frac{2 D_{CO_2}^0 P_o t}{R t \left(1 + \alpha C_2 \left(\frac{P_o}{P_{atm}}\right)^n\right) \left(\frac{C_2}{n+1} \left(\frac{P_o}{P_{atm}}\right)^n + Q_1\right)}}$	<p>e_c = profundidade carbonatada (m); P_o = pressão parcial de CO_2 na superfície do material (Pa); P_{atm} = a pressão atmosférica (Pa); t = tempo (s); R = constante dos gases perfeitos (J/mol/K); T = temperatura (K); $D_{CO_2}^0$ = coeficiente de difusão do CO_2 na zona carbonatada para uma exposição em pressão natural de CO_2 (m^2/s); Q_1 = número de moles de cálcio contidos nos três tipos de hidratos (a portlandita, a etringita e os aluminatos) (mol/l de pasta); α e n = parâmetros em função do tipo de cimento; α = reflete a influência sobre a difusão do CO_2, na diminuição da porosidade devida à carbonatação do C-S-H; n = afinidade química dos C-S-H com vistas à pressão de CO_2.</p>	Modelo complexo; modelagem físico-química; a maioria dos parâmetros de entrada do modelo precisa de ensaios de laboratório para sua determinação.
<p>* CEB - Comité Euro-International du Béton DURACRETE - <i>General Guidelines for Durability Design and Redesign</i>. The European Union-Brite-EuRam III, Project No. BE 95-1347, "Probabilistic Performance based Durability of Concrete Structures", Report No. T 7-01-1, 1999.</p>			

A seguir, faz-se uma discussão sobre alguns desses modelos apresentados anteriormente, para os fins de maior detalhamento e compreensão. Foram selecionados, por critérios de aceitabilidade científica e de contemporaneidade, os modelos de Tuutti (1982), de Papadakis, Veyenas e Fardis (1989, 1991), do CEB (1997), de Duprat, Sellier e Nguyen (2006), de Hyvert (20009) e de Possan (2010).

2.3.1 Modelo de Tuutti (1982)

Segundo Tuutti (1982) a estimativa da profundidade de carbonatação dos concretos pode ser efetuada pela equação convencional da raiz quadrada do tempo, que é baseada na primeira lei de Fick, conforme mostrada na Equação 2.10.

$$e = k \sqrt{t} \quad (2.10)$$

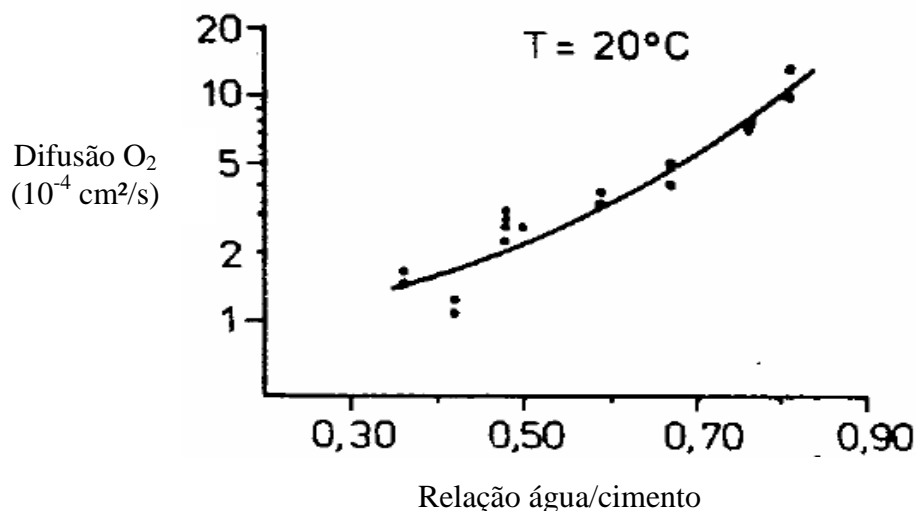
Em que:

e = profundidade de carbonatação;

k = coeficiente de carbonatação;

t = tempo de exposição.

O autor considera que o coeficiente de carbonatação depende do coeficiente de difusão do CO_2 , e que este pode ser representado pelo coeficiente de difusão efetivo do O_2 , o qual se considera mais fácil sua determinação em laboratório, embora deixe claro que não existe meios para equivalência entre os dois gases, mesmo considerando que a difusão ocorra através da camada já carbonatada. Na Figura 2.10, a seguir, é apresentado o coeficiente de difusão do O_2 em função da relação água/cimento.

Figura 2.10 - Coeficiente de difusão do O₂ em função da relação água/cimento (TUUTTI, 1982)

2.3.2 Modelo de Papadakis, Vayenas e Fardis (1989, 1991)

Este modelo considera a química do processo de carbonatação e é baseado nas equações de equilíbrio de massa do CO₂, Ca(OH)₂, C-S-H e dos silicatos de cálcio anidros, C₃S e C₂S. O modelo considera a seguinte Equação 2.11 para estimar a profundidade carbonatada.

$$e_c = \sqrt{\frac{2D_{CO_2} [CO_2]^0}{[Ca(OH)]^0 + 3[CSH]^0 + 3[C_3S]^0 + 2[C_2S]^0}} t \quad (2.11)$$

Em que,

e_c = profundidade de carbonatação (m);

D_{CO_2} = coeficiente de difusão efetivo do CO₂ no material carbonatado (m²/s);

t = tempo (s);

$[CO_2]$ = concentração molar do CO₂ (mol/m³);

$[Ca(OH)_2]$ e $[CSH]$ = concentração molar dos hidratos (mol/m³);

$[C_3S]$ e $[C_2S]$ = concentração molar dos anidros (mol/m³);

O índice 0 é relativo às concentrações iniciais ($t = 0$).

Os autores consideram este modelo para ensaios acelerados e destacam sua facilidade de aplicação, desconsiderando as condições de umidade relativa e as mudanças na porosidade causadas pelo processo de carbonatação. Consideram também uma modelagem para as reações pozolânicas, baseando-se na observação de que os óxidos das pozolanas e do clínquer são os mesmos, porém com mineralogia e proporções diferentes. Eles estimam que a hidratação do cimento Portland comum e as reações pozolânicas geram os mesmos produtos com a diferença que a porção vítrea da pozolana reage com a portlandita formada na hidratação do cimento. Assim, no modelo proposto os produtos das reações pozolânicas são somados aos produtos da hidratação do cimento para serem considerados na Equação 2.11 proposta.

2.3.3 Modelo do CEB - Comité Euro-International du Béton (1997)

A estimativa da profundidade de carbonatação do concreto neste modelo do CEB é feita pela Equação 2.12, sendo considerados diversos fatores que influenciam o processo. Ele permite prever a profundidade carbonatada em funções das condições do ambiente em que o material está exposto.

$$e_c = \sqrt{(2 \psi_1 \psi_2 \psi_3 \Delta c)} \sqrt{\frac{D_{nom}}{a}} t \left(\frac{t_0}{t}\right)^n \quad (2.12)$$

Em que,

e_c = profundidade de carbonatação (m);

D_{nom} = difusão do CO_2 para completa carbonatação;

Δc = diferença de concentração de CO_2 entre o ambiente e a frente de carbonatação;

$\psi_1 \psi_2 \psi_3$ = parâmetros referentes às condições de micro clima, de cura e referente à relação água/cimento (tabelados);

n = parâmetro que reflete as condições micro climáticas (ciclos de molhagem e secagem - tabelados);

t_0 = período de referência (1 ano);

t = tempo;

O termo “a” corresponde à quantidade de CO₂ necessária para que todo material seja completamente carbonatado e é dada pela Equação 2.13.

$$a = 0,75 C CaO \alpha_H \frac{M_{CO_2}}{M_{CaO}} \quad (2.13)$$

Em que,

C = quantidade de cimento no material (kg/m³);

CaO = quantidade de CaO no cimento (%);

α_H = grau de hidratação (%);

M = massas molares (mol/m³).

Os coeficientes ψ_1 ψ_2 ψ_3 e n são determinados de acordo com o ambiente de exposição, condições de cura, orientação solar de exposição das superfícies e meio de exposição às intempéries, se está protegido ou não. Na Tabela 2.2 são apresentados os parâmetros para os valores a serem adotados para os coeficientes.

Tabela 2.2 - Parâmetros de projeto para estruturas sujeitas à carbonatação (POSSAN, 2010)

Cura	Ruim	Boa				
		-			+	
Proteção	I	II	III	IV	V	Ref
ψ_1	0,30	0,30	0,40	0,50	0,60	1,00
ψ_1	2,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
ψ_1	1,50	1,20	1,20	1,00	1,00	1,00
n	0,30	0,30	0,20	0,10	0,05	0,00

I, II – molhado em qualquer ocasião

III – molhado durante chuva dirigida

IV, V – partes protegidas

2.3.4 Modelo de Duprat, Sellier e Nguyen (2006)

O modelo proposto pelos autores tem como objetivo descrever os diferentes fenômenos que influenciam na profundidade de carbonatação dos materiais cimentícios, bem como 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.

As variáveis consideradas para entrada no modelo são:

- Isoterma de absorção-dessorção: relação de equilíbrio entre o grau de saturação do material e a umidade relativa do ambiente;
- Coeficiente de difusão efetivo do CO₂: é o produto do efeito global da porosidade e do grau de saturação do material sobre o coeficiente de difusão do CO₂ pelo próprio coeficiente de difusão do CO₂ no ar;
- Permeabilidade relativa do material: considera-se que o material está em condições onde não há alterações significativas em sua estrutura global;
- Porosidade acessível à água: medida esta realizada segundo ensaio padronizado;
- Quantidade inicial de Ca(OH)₂: é obtida a partir da composição do material, do cimento e do grau de hidratação do cimento;
- Raio das “esferas” (partículas) de portlandita: os autores recomendam valores compreendidos entre 30 µm e 60 µm, considerando relações água/cimento entre 0,45 e 0,60; porém este dado pode ser medido com auxílio de equipamentos de alta resolução;
- Grau de saturação inicial: saturação das amostras antes de iniciar os ensaios;
- Pressão inicial de CO₂: o valor adotado é indicado na literatura, sendo este igual a 10⁻¹⁰ Pa;
- Quantidade inicial de C-S-H: determinada a partir da composição do material e do cimento;

- Grau de saturação do material: corresponde à saturação do ar na superfície do corpo de prova e constitui uma condição no limite da amostra;
- Pressão inicial de CO₂ no ar: é a pressão do CO₂ no experimento;
- Tempo de carbonatação: duração do experimento ou da exposição ao ambiente de degradação.

Segundo Pauletti (2009), este modelo permite simular o processo de carbonatação em toda sua complexidade, pois abrange diversas situações de ensaio, no entanto apresenta uma vasta quantidade de variáveis de entrada que são difíceis de mensurar.

2.3.5 Modelo de Hyvert (2009)

O modelo proposto por Hyvert (2009) parte do princípio que a carbonatação avança como uma frente e que na zona carbonatada, a portlandita, a etringita e os aluminatos são completamente consumidos em pressões baixas (0,03%) e altas (50%) de CO₂. Em ensaios de Análise Termogravimétrica e de Difração de raio X para formulação do modelo, o autor constatou que para as altas pressões de dióxido de carbono, o suplemento de calcita é formado pela carbonatação do C-S-H. Este produto pode explicar a diminuição da porosidade determinada pela porosimetria por intrusão de mercúrio, e é importante ressaltar que o coeficiente de difusão de CO₂ na zona carbonatada depende da pressão parcial de CO₂.

A Equação 2.14 representa o modelo proposto pelo autor.

$$e_c = \sqrt{\frac{2 D_{CO_2}^0 P_o t}{R t \left(1 + \alpha C_2 \left(\frac{P_o}{P_{atm}}\right)^n\right) \left(\frac{C_2}{n+1} \left(\frac{P_o}{P_{atm}}\right)^n + Q_1\right)}} \quad (2.14)$$

Em que,

e_c = profundidade carbonatada (m);

P_o = pressão parcial de CO₂ na superfície do material (Pa);

P_{atm} = a pressão atmosférica (Pa);

t = tempo (s);

R = constante dos gases perfeitos (J/mol/K);

T = temperatura (K);

$D_{CO_2}^0$ = coeficiente de difusão do CO_2 na zona carbonatada para uma exposição em pressão natural de CO_2 (m^2/s);

$Q1$ = número de moles de cálcio contidos nos três tipos de hidratos (a portlandita, a etringita e os aluminatos) (mol/l de pasta);

α e n = parâmetros em função do tipo de cimento;

α = reflete a influência sobre a difusão do CO_2 , na diminuição da porosidade devida à carbonatação do C-S-H;

n = afinidade química dos compostos de C-S-H com vistas à pressão de CO_2 .

Este modelo, apesar de não considerar as transferências termo-hídricas, é considerado de fácil utilização e costuma apresentar resultados positivos em suas simulações (POSSAN, 2010).

2.3.6 Modelo de Possan (2010)

Em seus estudos, com o objetivo de propor um modelo matemático para previsão da vida útil de projeto de estruturas de concreto frente à ação da carbonatação, Possan (2010) elaborou um modelo de predição da profundidade de carbonatação do concreto empregando dados de entrada de fácil obtenção.

Sua aplicabilidade depende de diversos fatores envolvidos no processo de degradação, de modo que, para que sejam estabelecidos os limites adequados, bem como o universo de sua aplicação, admitem-se as seguintes condições de contorno:

- A análise é unidimensional;
- A profundidade de carbonatação é bem definida, ou seja, uniforme;
- O concreto é homogêneo e isotrópico;

- O concreto não apresenta fissuração;
- A estrutura de concreto foi executada com boas práticas construtivas.

O modelo que descreve a ação do CO₂ através do concreto é representado na Equação 2.15.

$$e_c = k_c \left(\frac{20}{f_c}\right)^{k_{fc}} \left(\frac{t}{20}\right)^{\frac{1}{2}} \exp \left[\left(\frac{k_{ad} ad^{\frac{3}{2}}}{40 + f_c} \right) + \left(\frac{k_{CO_2} CO_2^{\frac{1}{2}}}{60 + f_c} \right) - \left(\frac{k_{UR}(UR-0,58)^2}{100 + f_c} \right) \right] k_{ce} \quad (2.15)$$

Em que,

e_c = profundidade de carbonatação média do concreto (mm);

k_c = fator variável referente ao tipo de cimento empregado;

f_c = resistência característica à compressão axial do concreto (MPa);

k_{fc} = fator variável referente à resistência à compressão axial do concreto em função do tipo de cimento utilizado;

t = idade do concreto (anos);

k_{ad} = fator variável referente às adições pozolânicas do concreto – sílica ativa, metacaulim e cinza de casca de arroz em função do tipo de cimento utilizado;

ad = teor de adição pozolânica no concreto em % em relação à massa de cimento;

k_{CO_2} = fator variável referente ao teor de CO₂ do ambiente em função do tipo de cimento utilizado;

CO₂ = teor de CO₂ da atmosfera (%);

k_{UR} = fator variável referente à umidade relativa em função do tipo de cimento utilizado;

UR = umidade relativa média (10⁻² %);

k_{ce} = fator variável referente à exposição à chuva, em função das condições de exposição da estrutura.

Dessa forma, observa-se que o modelo considera algumas variáveis que influenciam no processo, tais como resistência à compressão axial do concreto, tipo de cimento, presença de adições, umidade relativa, quantidade de CO₂, processo de molhagem e secagem, redistribuição de umidade e tempo.

Pode-se concluir a partir da literatura que o processo de carbonatação é influenciado por diversos fatores, podendo ser eles internos, ligados às propriedades e características do concreto, ou externos, como por exemplo, a umidade, temperatura e concentração de CO₂ do ambiente de exposição. Como o processo natural ocorre de forma muito lenta, grande parte das pesquisas de carbonatação são realizadas utilizando-se do processo de aceleração, por meio de aplicação de elevadas concentrações de CO₂, em câmaras apropriadas. Dessa forma, por se tratar de uma situação alterada em relação ao processo ocorrido de forma natural, torna-se necessária a utilização de modelos matemáticos que auxiliem na previsão da profundidade de carbonatação em função do tempo de exposição no ambiente de utilização dos concretos armados, de forma a tentar prever a vida útil destas estruturas em relação ao fenômeno de carbonatação.

O modelo mais utilizado na grande maioria dos trabalhos na área de evolução da carbonatação com o tempo é o derivado da primeira lei de Fick (TUUTI, 1982) por ser o mais simples e rápido de ser aplicado, além de fornecer boa aderência com os resultados reais, desde que aplicado devidamente, a partir de dados tratados estatisticamente.

As pesquisas envolvendo o processo natural, como é o caso desta, se mostram bastante importante, pois permitem avaliar o comportamento dos concretos que sofreram ataque do CO₂ em concentrações ambientes e por períodos prolongados de tempo, verificando a influência das variáveis nos resultados das profundidades apresentadas.

No próximo capítulo serão apresentados os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento do trabalho experimental com o detalhamento das variáveis contempladas no programa experimental; dos materiais utilizados para a produção dos corpos de prova; dos concretos estudados com sua caracterização no estado endurecido; dos corpos de prova utilizados para a carbonatação natural; da avaliação da frente de carbonatação; e da análise estatística utilizada.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

Esta pesquisa foi desenvolvida utilizando corpos de prova de concreto armado produzidos no ano de 2002, fruto da dissertação de Castro (2003), trabalho este constituinte de um projeto de pesquisa mais amplo, que versou sobre as “características do concreto de cobrimento e o seu papel na durabilidade das estruturas de concreto armado”. Este projeto foi desenvolvido pela Universidade Federal de Goiás em conjunto com Furnas Centrais Elétricas, atualmente Eletrobras Furnas, tendo como tema geral a durabilidade do concreto de cobrimento e como variáveis as adições minerais (em substituição parcial ao cimento), os procedimentos de cura e a relação água/aglomerante.

Do projeto de pesquisa citado, em sua totalidade, originaram-se quatro dissertações de mestrado, que trataram da influência das condições de moldagem na camada de cobrimento (BRAUN, 2003), da influência das adições minerais na durabilidade do concreto sujeito à carbonatação (CASTRO, 2003), da influência das adições minerais e seu efeito na corrosão de armaduras induzidas por cloreto (FERREIRA, 2003) e da influência das condições de cura nas características da camada de cobrimento de diferentes concretos (PAULA COUTO, 2003).

Os corpos de prova foram produzidos além dos previstos para os ensaios da época, com o intuito de estudar o envelhecimento natural de concretos com diferentes adições minerais, em especial no que se refere ao processo de carbonatação natural, complementando assim os estudos de Castro (2003) referentes ao desempenho dos concretos e à sua correlação com o processo acelerado. Dessa forma, as variáveis, os materiais e sua caracterização, bem como boa parte dos métodos empregados, são os mesmos do programa experimental de Castro (2003).

3.1 VARIÁVEIS

As variáveis contempladas no programa experimental estão descritas a seguir.

a) **Tipo de adição mineral** - foram utilizadas no concreto em substituição parcial ao cimento Portland, com os seguintes teores percentuais em massa:

- Sílica ativa (10%);
- Cinza de casca de arroz (10%);
- Metacaulim (10%);
- Cinza volante (25%);
- Escória de alto-forno (65%);
- Sem adição (situação de referência).

b) **Condições de cura** - foram utilizados dois processos de cura:

- Cura em câmara úmida, com umidade relativa igual ou superior a 90%, por 28 dias, complementada por um período mínimo de 63 dias em local seco e protegido, totalizando um período de 91 dias;
- Cura em local seco e protegido de intempéries, semelhantes às condições de laboratório, com variações de temperatura e umidade mais amenas que as variações do ambiente, por um período mínimo de 91 dias.

Cabe salientar-se que, após os procedimentos padronizados de cura descritos anteriormente, os corpos de prova ficaram então aptos para o início do experimento. No estudo de Castro (2003), logo após os 91 dias de cura, iniciaram-se os estudos acelerados de carbonatação. Para os fins da presente pesquisa, após a cura, os corpos de prova ficaram armazenados ao longo de aproximadamente 10 anos em um ambiente protegido de intempéries (um ambiente de envelhecimento natural), como se comenta no item 3.4. Durante esse período, foram realizadas medidas da frente de carbonatação.

c) **Relação água/aglomerante** - foram utilizadas três relações água/aglomerante (0,40; 0,55 e 0,70), a fim de se obter concretos com diferentes estruturas internas e outras propriedades relacionadas à durabilidade, tais como: compacidade, absorção e difusividade iônica, entre outras.

3.2 MATERIAIS UTILIZADOS

Os ensaios de caracterização de todos os materiais utilizados na pesquisa foram realizados no Departamento de Tecnologia de Empreendimentos – Eletrobras Furnas.

Na sequência tem-se a descrição desses materiais, bem como suas principais características.

- **Agregado miúdo:** areia natural de leito de rio, de natureza quartzosa – o agregado miúdo definido para a pesquisa foi de único tipo e procedência, adquirido na região e atendeu à especificação correspondente NBR 7211 (ABNT, 1983¹); sua caracterização básica e a distribuição granulométrica estão apresentadas no Apêndice A.
- **Agregado graúdo:** pedra de micaxisto britada – o agregado graúdo definido para a pesquisa foi de único tipo e procedência, adquirido na região e atendeu à especificação correspondente NBR 7211 (ABNT, 1983); sua caracterização básica e a distribuição granulométrica estão apresentadas no Apêndice A.
- **Cimento Portland:** o cimento escolhido para a pesquisa foi de único tipo, corrente no mercado regional – cimento Portland CP II F-32, cuja caracterização e composição mineralógica estão apresentadas no Apêndice A.
- **Adições minerais:** sílica ativa, escória de alto-forno, cinza de casca de arroz, cinza volante e metacaulim. As principais características físicas e químicas e composições mineralógicas das adições estão apresentadas no Apêndice A.
- **Aditivos químicos para concreto:** foram empregados dois tipos nos concretos da pesquisa – plastificante (com ação retardadora de pega) e superplastificante, todos de uso corrente na produção de concretos usinados.
- **Aço:** aço carbono CA-50, com diâmetro nominal de 10 mm, de uso corrente em obras.

¹ Alguns métodos de ensaios, bem como alguns conteúdos de Normas mencionados neste trabalho estão de acordo com a vigência da época de utilização feita por Castro (2003).

3.3 CONCRETOS ESTUDADOS

No estudo de dosagem dos concretos foi utilizado o método empregado pelo Departamento de Apoio e Controle Técnico do Centro Tecnológico de Engenharia Civil de Eletrobras Furnas, chamado de método do “Módulo de Finura” (FURNAS, 1997), que se fundamenta no desenvolvimento experimental de diversas combinações entre os agregados (alterando o módulo de finura da mistura), de forma a minimizar o consumo de cimento sem prejuízo da resistência mecânica e da trabalhabilidade do concreto.

Durante o desenvolvimento da dosagem, as misturas preliminares resultam em gráficos que relacionam módulo de finura com consumo de água ou resistência à compressão, e relação água/cimento com resistência à compressão ou consumo de cimento. Por fim, são feitos alguns ajustes de teor de agregado miúdo. Por meio desses gráficos obtém-se o traço desejado. Este método é empregado usualmente por Furnas no desenvolvimento dos mais variados concretos.

O método em questão resultou nos três traços dos concretos de referência (sem adição) e, com base nestes, desenvolveram-se os traços dos demais concretos. Para os concretos com adições minerais, fez-se a substituição parcial do cimento pelas respectivas adições (conforme seus teores, em massa).

Para que a mistura permanecesse sem alteração de volume, em razão da diferença entre as massas específicas dos aglomerantes, a variação do volume foi corrigida pela alteração da quantidade dos agregados (componentes inertes do concreto), mantendo a proporcionalidade entre a areia e a brita. Deste modo, manteve-se a constância do volume da mistura e da massa de aglomerante em todos os concretos de um a mesma relação água/aglomerante. Com isto, pôde-se considerar que a quantidade dos compostos passíveis de carbonatação era teoricamente a mesma, facilitando o entendimento e a comparação dos comportamentos dos diferentes concretos. Este procedimento resultou em alterações mínimas nos traços, presentes no Apêndice A, não ocasionando diferenças nas características reológicas dos concretos.

Ao todo foram estabelecidos dezoito traços para moldagem dos corpos de prova, mantendo a consistência fixa em (80 ± 10) mm para todos os casos, sendo empregado aditivo plastificante (e superplastificante quando necessário) de modo a garantir a trabalhabilidade.

Os concretos no estado fresco foram caracterizados mediante as determinações da consistência pelo abatimento do tronco de cone NBR NM 67 (ABNT,1998), da massa específica NBR 9833 (ABNT, 1987) e o teor de ar NBR NM 47 (ABNT, 2002), estando estas características apresentadas no Apêndice A, inclusive os traços utilizados. Para a caracterização dos concretos no estado endurecido foram moldados cilindros de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura, cuja descrição apresenta-se a seguir.

3.3.1 Caracterização do Concreto Endurecido

A caracterização do concreto endurecido foi realizada utilizando-se corpos de prova cilíndricos (10 cm x 20 cm), os quais foram submetidos apenas ao procedimento de cura úmida. Foram empregados os seguintes métodos para caracterização do concreto, estando os resultados apresentados nas Tabelas 3.1, 3.2 e 3.3:

- Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos, seguindo as prescrições da NBR 5739 (ABNT, 1994), para as idades de 7, 28, 91 e 182 dias;
- Determinação do módulo de deformação estático, seguindo as prescrições da NBR 8522 (ABNT, 1984), para as idades de 7, 28, 91 e 182 dias;
- Determinação da absorção de água por imersão, seguindo as prescrições da NBR 9778 (ABNT, 1987), para as idades de 28, 91 e 182 dias;
- Determinação da absorção de água por capilaridade, seguindo as prescrições da NBR 9779 (ABNT, 1995), para as idades de 28, 91 e 182 dias.

Quanto ao tamanho da amostra, foram utilizados para o ensaio de módulo de deformação dois corpos de prova por idade, enquanto que para os ensaios de resistência à compressão, absorção de água por imersão e absorção de água por capilaridade foram utilizados três corpos de prova por idade.

Tabela 3.1 - Caracterização do concreto endurecido com relação água/aglomerante igual a 0,40 - valores médios

Propriedade	Idade	Adições					
		Referência	Escória de Alto-Forno	Cinza Volante	Cinza de Casca de Arroz	Metacaulim	Sílica Ativa
Resistência à compressão (MPa)	7 dias	28,1	20,6	22,5	28,6	35,0	32,5
	28 dias	32,9	31,1	34,9	37,0	40,5	42,8
	91 dias	47,3	40,6	41,0	48,0	46,0	48,4
	182 dias	47,1	43,1	41,2	52,4	48,8	55,3
Módulo de elasticidade (GPa)	7 dias	20,1	18,2	21,2	19,6	22,7	22,2
	28 dias	20,3	20,3	24,1	23,1	22,7	24,5
	91 dias	25,2	22,7	22,5	24,8	23,3	25,1
	182 dias	25,2	21,5	25,9	23,0	25,0	25,6
Absorção por imersão (%)	28 dias	4,43	4,57	3,98	3,85	5,03	4,64
	91 dias	4,25	3,58	6,35	3,78	5,30	3,19
	182 dias	6,14	4,18	5,93	4,06	4,06	5,20
Absorção por capilaridade (g/cm ²)	28 dias	0,42	0,45	0,29	0,54	0,62	0,36
	91 dias	0,62	0,59	0,46	0,39	0,91	0,38
	182 dias	1,06	0,68	0,52	1,04	0,54	0,83

Tabela 3.2 - Caracterização do concreto endurecido com relação água/aglomerante igual a 0,55 - valores médios

Propriedade	Idade	Adições					
		Referência	Escória de Alto-Forno	Cinza Volante	Cinza de Casca de Arroz	Metacaulim	Sílica Ativa
Resistência à compressão (MPa)	7 dias	21,9	15,0	14,7	23,9	29,9	21,3
	28 dias	24,8	25,0	23,5	30,8	35,5	31,4
	91 dias	39,2	32,3	31,3	40,2	41,4	38,3
	182 dias	38,9	32,1	28,4	42,5	42,0	39,1
Módulo de elasticidade (GPa)	7 dias	17,4	16,4	15,8	18,3	21,6	17,4
	28 dias	20,5	20,9	20,4	20,1	23,2	22,6
	91 dias	25,4	25,8	27,0	26,8	20,7	21,6
	182 dias	25,8	25,1	23,6	27,6	25,2	25,4
Absorção por imersão (%)	28 dias	6,04	3,82	4,62	3,67	4,95	3,16
	91 dias	4,28	5,56	4,76	4,26	5,18	4,41
	182 dias	6,25	5,16	7,18	6,30	3,99	6,61
Absorção por capilaridade (g/cm ²)	28 dias	0,37	0,67	0,31	0,41	0,55	0,38
	91 dias	0,94	0,60	0,81	0,49	0,68	0,59
	182 dias	0,85	0,60	0,78	0,97	0,57	0,99

Tabela 3.3 - Caracterização do concreto endurecido com relação água/aglomerante igual a 0,70 - valores médios

Propriedade	Idade	Adições					
		Referência	Escória de Alto-Forno	Cinza Volante	Cinza de Casca de Arroz	Metacaulim	Sílica Ativa
Resistência à compressão (MPa)	7 dias	15,8	9,5	12,6	14,8	17,3	17,3
	28 dias	18,9	22,9	25,7	24,1	22,1	26,1
	91 dias	29,8	24,8	33,2	29,0	31,9	29,7
	182 dias	29,4	24,5	27,8	30,7	26,6	36,1
Módulo de elasticidade (GPa)	7 dias	17,9	14,7	15,9	15,7	22,28	19,3
	28 dias	20,5	22,6	22,0	21,90	19,1	20,0
	91 dias	21,0	19,2	22,4	18,2	22,1	22,1
	182 dias	24,8	26,6	23,6	18,6	23,5	26,3
Absorção por imersão (%)	28 dias	5,65	5,32	5,38	4,74	5,66	5,13
	91 dias	5,31	4,96	4,81	4,75	5,86	5,05
	182 dias	5,62	5,88	5,74	6,28	4,72	5,04
Absorção por capilaridade (g/cm ²)	28 dias	1,04	0,31	0,49	0,58	0,82	0,55
	91 dias	0,70	0,49	0,53	0,58	0,88	0,91
	182 dias	0,63	0,60	0,85	1,08	0,74	0,98

3.4 CORPOS DE PROVA PARA A CARBONATAÇÃO NATURAL

Os corpos de prova que foram utilizados para a avaliação da carbonatação natural são prismáticos com dimensões de 200 mm x 200 mm x 500 mm, armados com quatro barras longitudinais em aço CA-50 de diâmetro nominal de 10 mm e quatro estribos em aço CA-60 de 5 mm. As barras longitudinais foram posicionadas de forma a garantir o cobrimento de 25 mm, medidos a partir da superfície externa do estribo. Os corpos de prova prismáticos foram elaborados de modo a reproduzir características similares as de uma peça de concreto armado real, tanto com armadura quanto com utilização de fôrmas de madeira compensada de 12 mm resinada. Dessa forma, as características do concreto de cobrimento, objetivo principal de análise, podem ser consideradas representativas dos elementos de uma estrutura de concreto real utilizada nas obras correntes. Na Figura 3.1 estão apresentadas as imagens da elaboração dos corpos de prova, que na pesquisa foram considerados protótipos de vigas de concreto armado.

Figura 3.1 - (a) Fôrma de madeira compensada de 12 mm, (b) armadura longitudinal, estribos e espaçadores, (c) vista da fôrma com armadura, prontos para moldagem e (d) corpo de prova após desenforma



(a)



(b)



(c)



(d)

A mistura do concreto foi realizada em betoneira pré-umedecida, com capacidade para 1,2 m³, em ambiente de laboratório com variação de temperatura entre 24°C e 27°C. A sequência de introdução dos materiais na betoneira e o tempo de amassamento do concreto seguiram os procedimentos recomendados pelo Laboratório de Concreto de Eletrobras Furnas, obedecendo à seguinte ordem:

- Com a betoneira parada e previamente umedecida foram adicionados os agregados graúdo e miúdo e parte da água;
- Após uma pequena movimentação, seguida de parada da betoneira, foram introduzidos o cimento e a adição mineral;
- Com a betoneira em movimento foram introduzidos o restante da água e o aditivo plastificante diluído (mais superplastificante, quando necessário);
- Após a introdução de todos os materiais na betoneira procedeu-se sua rotação por oito minutos ininterruptos.

A descarga do concreto fresco foi feita diretamente ao chão (com superfície limpa, não absorvente e estanque), nas proximidades das fôrmas, e o transporte foi realizado com carrinho de mão. O concreto foi colocado dentro dos moldes com auxílio de conchas e adensado com a utilização de vibrador elétrico de imersão (vibrador agulha). A moldagem e o adensamento de todos os corpos de prova, prismáticos e cilíndricos, seguiram as recomendações da NBR 5738 (ABNT, 1994).

Os concretos no estado fresco foram caracterizados mediante as determinações da consistência pelo abatimento do tronco de cone, da massa específica e do teor de ar, conforme comentado anteriormente. Na Figura 3.2 são ilustrados desde os procedimentos de mistura, até a finalização da moldagem dos corpos de prova. Todo o material foi colocado dentro da betoneira com auxílio de uma carregadeira (ilustração (a)); logo após a mistura o concreto era despejado no piso do laboratório, que antes desta ação era totalmente limpo e seco para que não houvesse alteração nas características e propriedades do material em seu estado fresco (ilustração (b)); antes de moldar os corpos de prova, realizavam-se as determinações da consistência pelo abatimento do tronco de cone (ABNT NBR NM 67, 1998) (ilustração (c)), da massa específica (ABNT NBR 9833, 1987) e do teor de ar (ABNT NBR NM 47, 2002);

após a retirada de amostras para a realização dos ensaios referentes ao estado fresco, o concreto era transportado até o local de moldagem por meio de um carrinho de mão e despejado dentro dos moldes com a ajuda de uma pá ou concha (ilustração (d)); para a realização do adensamento do material dentro das fôrmas, era utilizado um vibrador elétrico de imersão (ilustração (e)); e, por último deixavam-se os corpos de prova endurecer dentro dos moldes (ilustração (f)), para posteriormente realizar a retirada das fôrmas e dar sequência ao procedimento de cura predefinido.

Figura 3.2 - (a) Material sendo carregado na betoneira, (b) descarga do concreto no piso do laboratório após mistura, (c) realização do ensaio de abatimento de tronco de cone, (d) aplicação do concreto nas fôrmas de madeira, (e) detalhe do processo de vibração do concreto e (f) corpos de prova após moldagem



(a)



(b)



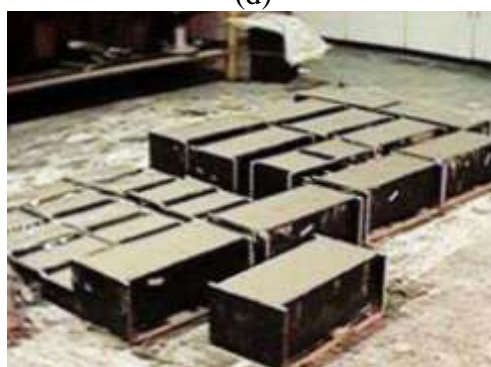
(c)



(d)



(e)



(f)

Após a finalização da moldagem, os corpos de prova produzidos foram mantidos por cerca de 36 horas no ambiente de laboratório (aqueles que seguiriam com cura úmida, foram cobertos com sacos de aniagem umedecidos; os que iriam para cura ao ar, foram deixados dentro das fôrmas, sem cobertura ou proteção), sendo em seguida desenformados e levados para a condição de cura predefinida: a) em câmara úmida, com temperatura de $(23 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ e umidade superior a 90%, permanecendo até a idade de 28 dias; b) ou diretamente para o ambiente de cura ao ar.

Os corpos de prova de cura ao ar, assim que desenformados, foram então para um ambiente externo, dentro das instalações do Departamento de Apoio e Controle Técnico da empresa Eletrobras Furnas, na cidade de Aparecida de Goiânia – GO (grande Goiânia), ficando nele até as datas das avaliações, ocorridas durante um período aproximado de 10 anos após sua confecção. Basicamente o mesmo ocorreu com os corpos de prova de cura úmida, sendo a única diferença o fato destes terem passado os seus primeiros 28 dias de idade em condição de cura úmida. O referido ambiente de cura e envelhecimento natural dos corpos de prova foi uma tenda instalada nos arredores dos laboratórios de Furnas (Figura 3.3 a e b), que propiciava aos corpos de prova uma condição intermediária entre um ambiente fechado (interno) e um ambiente totalmente aberto. Em outras palavras, tratava-se de um ambiente ameno, protegido de intempéries, mas que permitia a circulação de ar em seu interior. Considerou-se, então, neste trabalho, esse local de armazenamento como um ambiente externo abrigado.

Em relação ao posicionamento dos corpos de prova no interior da tenda, estes ficaram armazenados empilhados sobre páletes de madeira, evitando o contato direto com a umidade do piso. Também, procedeu-se ao espaçamento entre esses protótipos de viga de forma a preservar as faces de estudo, deixando livre a passagem do ar entre eles. Na Figura 3.3 são mostrados detalhes do local de armazenamento e envelhecimento dos corpos de prova sujeitos ao processo de carbonatação natural, que se manteve rigorosamente o mesmo em todos esses 10 anos da pesquisa.

Figura 3.3 - (a) Tenda aberta para realização das medidas de profundidade de carbonatação, (b) tenda fechada após o ensaio, (c) corpos de prova empilhados sob a tenda e sobre os páletes e (d) detalhe da posição das armaduras no protótipo de viga garantindo o cobrimento



(a)



(b)



(c)



(d)

Nos gráficos das figuras 3.4 e 3.5 são mostrados os valores monitorados de temperatura e de umidade relativa da tenda onde se mantiveram os corpos de prova em envelhecimento natural. Os dados são de julho de 2010 até janeiro de 2012 e dão uma ideia das variações climáticas da região. Eles mostram um clima com períodos sazonais bem definidos (chuvoso e seco) e temperaturas sem excessivas variações ao longo do ano, certamente representando bem todo o período de 10 anos.

Figura 3.4 - Valores de temperatura ao longo do ano de 2011 e em parte de 2010 (Fonte: Eletrobras Furnas)

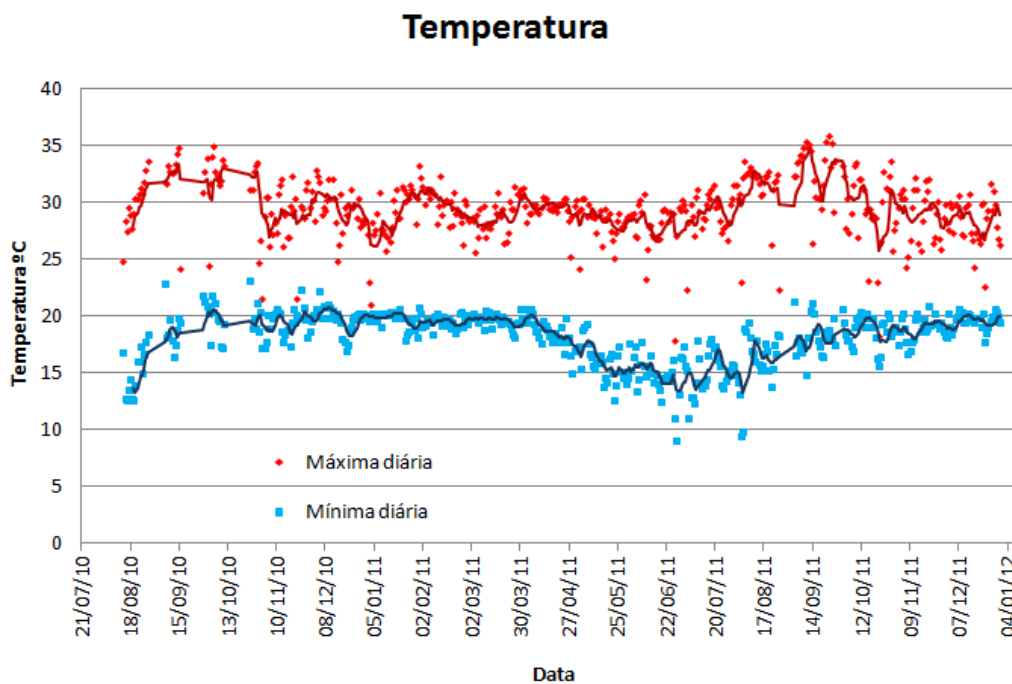
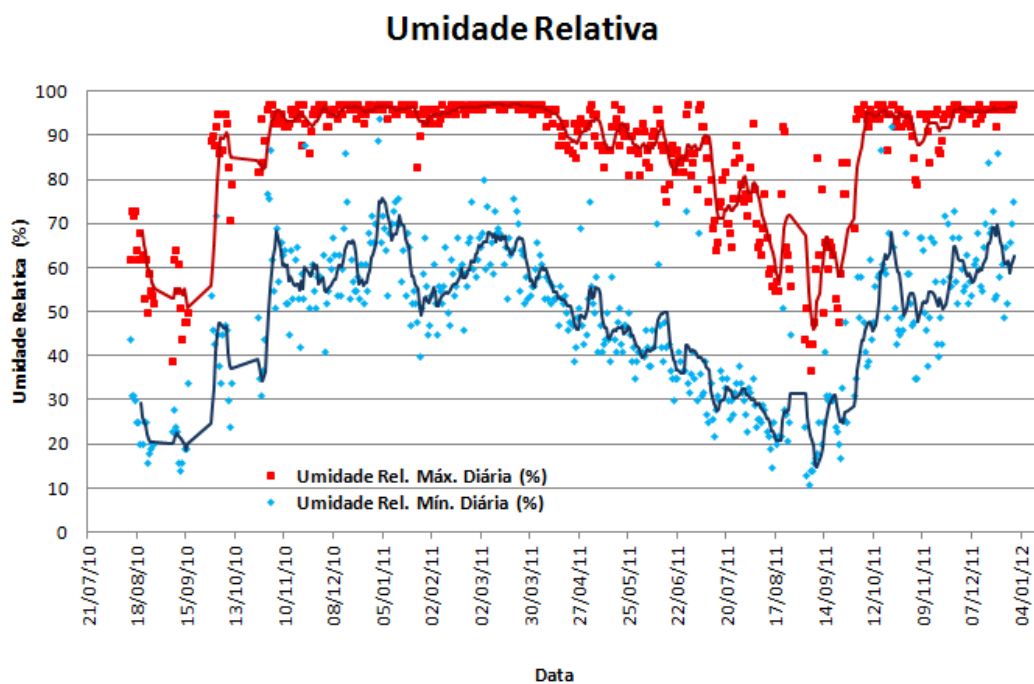


Figura 3.5 - Valores de umidade relativa ao longo do ano de 2011 e em parte de 2010 (Fonte: Eletrobras Furnas)



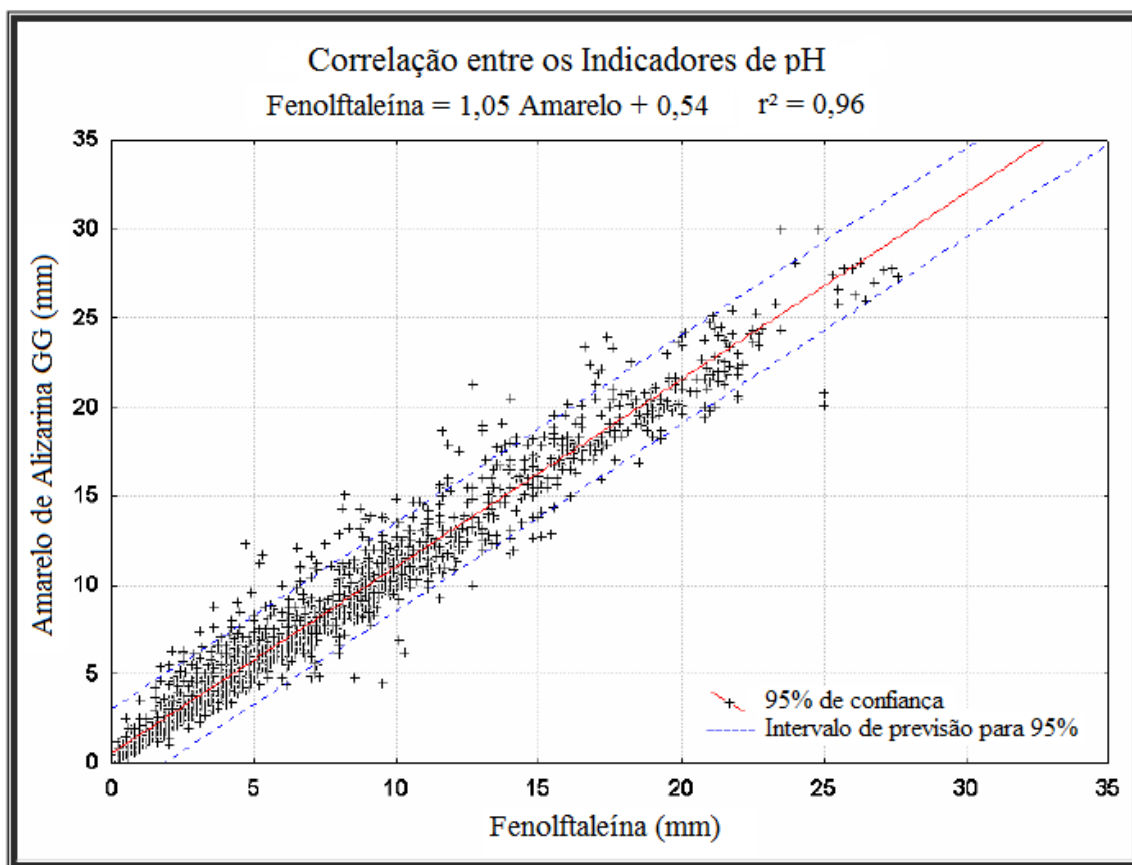
3.5 AVALIAÇÃO DA FRENTE DE CARBONATAÇÃO

Foi mensurado o avanço da frente de carbonatação natural no concreto utilizando-se indicador químico de pH, por ser o processo mais comum para a determinação da profundidade de carbonatação, em consequência de sua praticidade e de seu baixo custo. A técnica consistiu na aspersão do indicador em região recém fraturada do concreto, realizada antes que a face exposta pela fratura viesse a se carbonatar ao reagir com o CO₂ do ar. O contato da solução com o concreto evidenciou a região não carbonatada, onde o pH é muito alcalino (ocorreu a coloração típica do indicador ao valor de pH do concreto próximo a 13), diferenciando-a da região carbonatada (que resultou em aspecto incolor, estando o pH do concreto próximo a 8).

O processo de verificação da frente de carbonatação de todos os corpos de prova, consistiu na retirada de uma fatia com cerca de 5 cm do corpo de prova por meio de um corte refrigerado com água com disco diamantado, deixando a parte interna do corpo de prova exposta para que em seguida fosse feita a aspersão do indicador de pH à base de fenolftaleína com auxílio de um pincel, sendo então mensurada a profundidade de carbonatação mediante o uso de um paquímetro de precisão 0,01 mm.

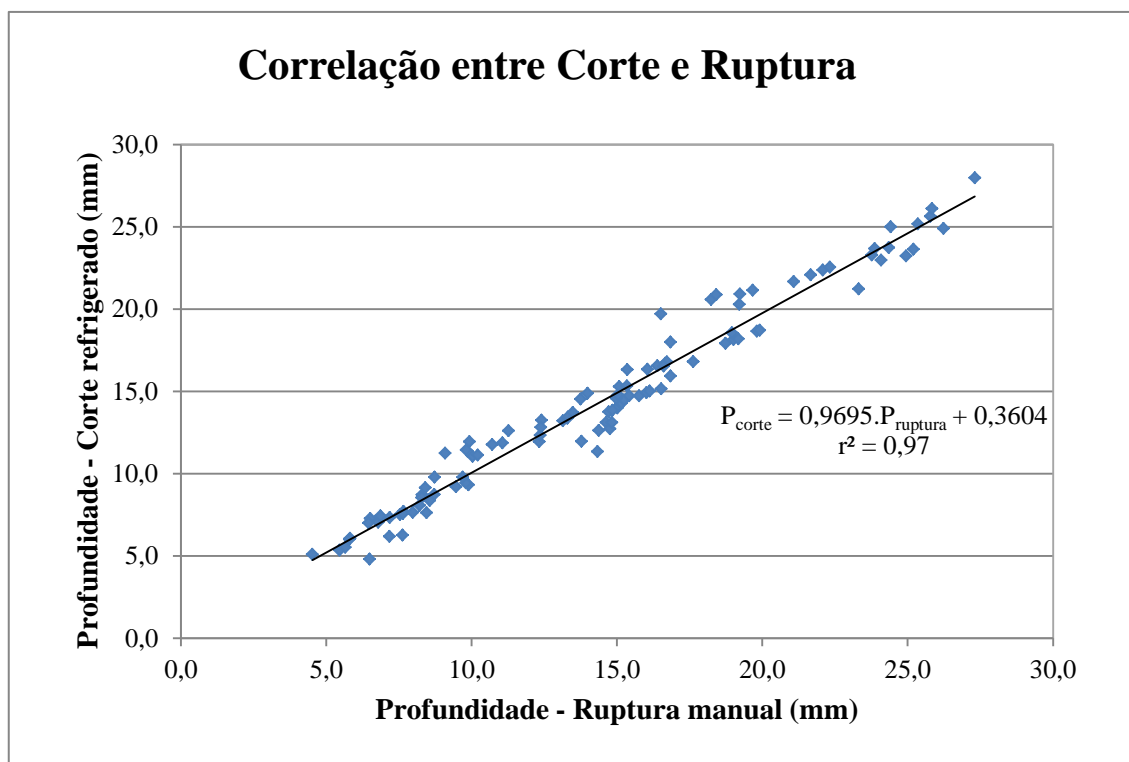
Diante da comparação feita por Castro (2003), entre os resultados de profundidades de carbonatação obtidos pelos indicadores de pH fenolftaleína e amarelo de alizarina, decidiu-se utilizar apenas o indicador à base de fenolftaleína, pois além dele apresentar maior facilidade na identificação da frente carbonatada (maior contraste), os dois mostraram resultados bastante parecidos a partir da correlação obtida, cujo coeficiente de determinação (R²) igual a 0,96, conforme o gráfico da Figura 3.6, ressalta um ajuste da curva muito preciso.

Figura 3.6 - Correlação entre as profundidades medidas com o uso dos dois indicadores de pH (CASTRO, 2003)



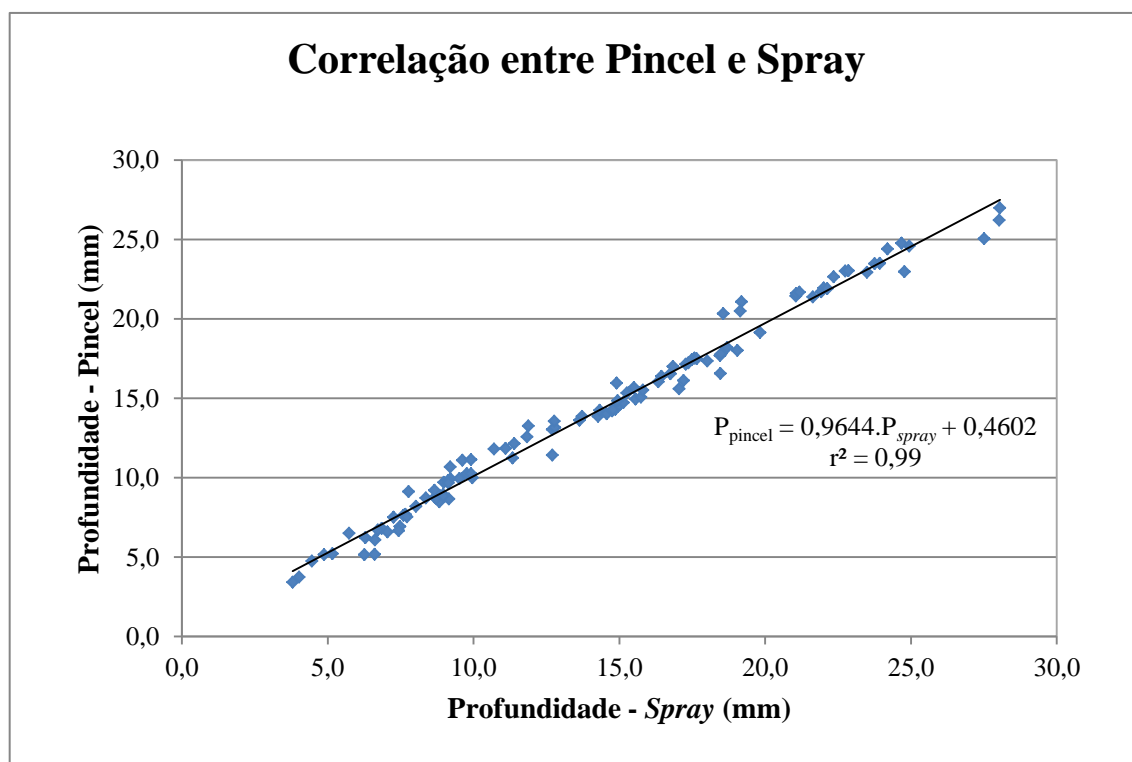
Para conseguir uma região recém fraturada, foi feita a retirada da camada carbonatada do corpo de prova para a identificação da profundidade carbonatada por meio da aspersão da fenolftaleína, utilizando corte refrigerado com água com disco diamantado. Antes de utilizar este método para todos os corpos de prova, foi feita uma comparação entre a ruptura do corpo de prova por meio da quebra manual, feita com talhadeira e marreta, e o corte refrigerado. Nesta comparação foram tomados nove corpos de prova, dos quais foram medidas as profundidades em seis pontos distintos entre as armaduras de cada uma das faces laterais. Na Figura 3.7, pode-se observar, a partir da equação obtida da curva ajustada na correlação (com um coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,97), que as medidas ficaram bastante próximas, sejam elas executadas por fratura ou por corte a disco do concreto. Como, então, não houve diferenças significativas entre as medidas para esses dois tipos de corte, decidiu-se pelo método mecanizado, que além de apresentar maior praticidade na execução, proporciona uma superfície mais plana para a execução das medidas com o paquímetro.

Figura 3.7 - Correlação entre as profundidades medidas com o uso de ruptura manual e corte refrigerado



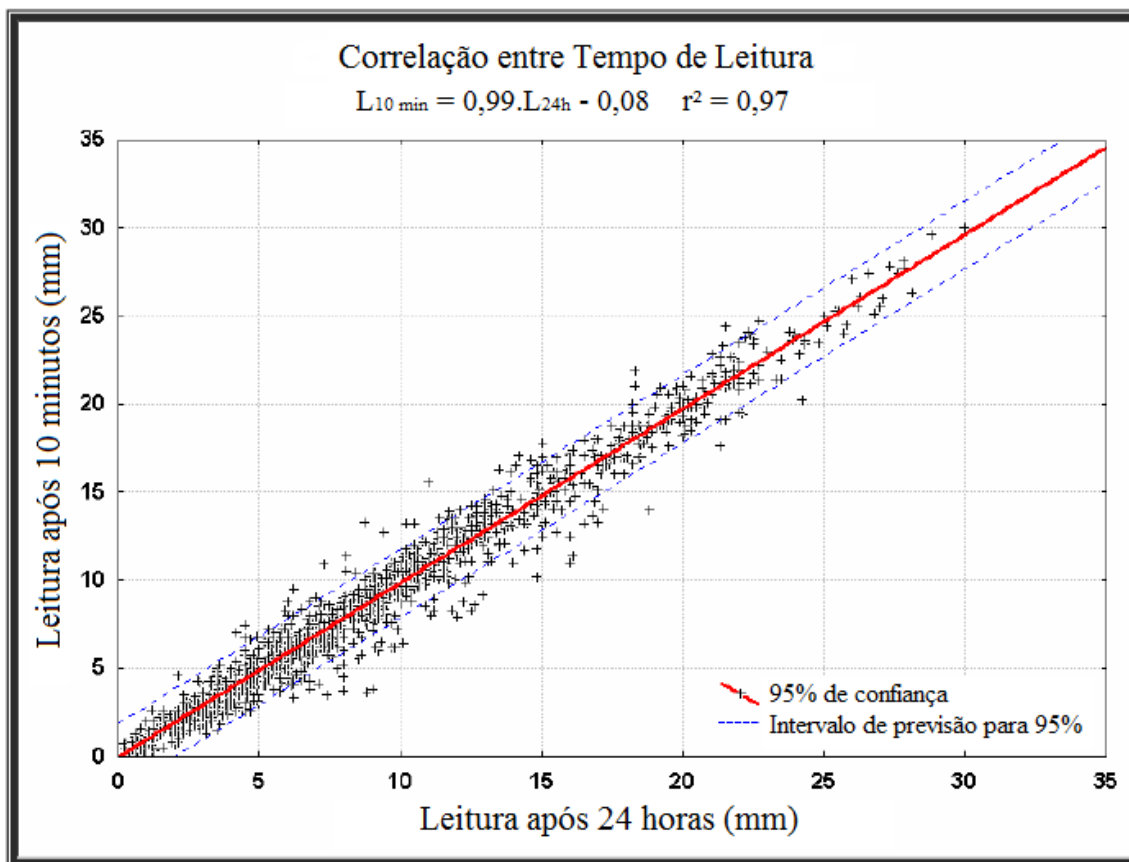
O modo de aspersão também foi submetido à comparação utilizando nove corpos de prova, pois neste trabalho foi proposta a utilização de pincel para o espalhamento do indicador sobre a face exposta. Os dois métodos correlacionados de aplicação do indicador foram: a aspersão por meio de *spray* e o espalhamento realizado com pincel. Os dois métodos resultaram em medidas de profundidade, também, bastante próximas, tendo como base a equação de ajuste obtida da correlação, que por sua vez apresentou um coeficiente de determinação (R^2) muito alto, igual a 0,99, denotando a excelente correlação obtida. Como as profundidades medidas não apresentaram diferenças significativas ao se compararem os dois métodos de aplicação, decidiu-se então utilizar o pincel espalhando a solução sobre a superfície do concreto como método de aplicação do indicador. Na Figura 3.8, a seguir, pode-se observar a comparação entre os dois métodos de aplicação do indicador.

Figura 3.8 - Correlação entre as profundidades de carbonatação medidas com o indicador aplicado com *spray* e com pincel



Castro (2003) correlacionou os tempos de leitura das medidas de profundidade carbonatada após 10 minutos e repetidas após 24 horas, a fim de verificar uma possível influência do intervalo de tempo entre a aspersão do indicador de pH e o momento da mensuração da frente de carbonatação. Essa correlação teve como intuito comparar um procedimento usual de leitura, que normalmente ocorre de imediato ou em curto prazo da aspersão do indicador, com o procedimento da CPC-18 (RILEM, 1988), que recomenda a leitura após 24 horas. Como pode ser observado na Figura 3.9, de acordo com a equação obtida, existe uma excelente correlação entre os momentos das medidas da frente de carbonatação, apresentando um coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,97. Diante desta correlação pode-se dizer que não houve diferença significativa entre as medidas realizadas nesses dois momentos de leitura, pois a leitura a 10 minutos e a leitura a 24 horas são praticamente iguais. Com isso, foi utilizado o procedimento usual, cuja leitura é realizada após poucos minutos da aspersão do indicador, que sem dúvidas apresenta maior praticidade.

Figura 3.9 - Correlação entre as leituras após o tempo de aspersão do indicador de pH (CASTRO, 2003)

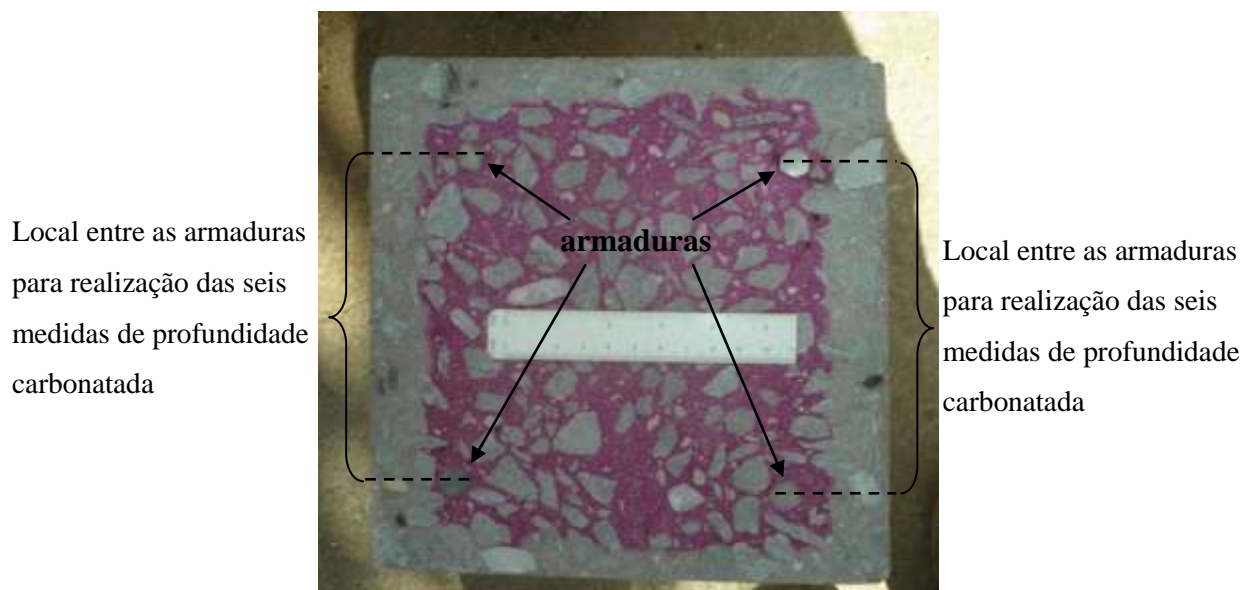


Para se determinar as profundidades da frente de carbonatação foram realizadas seis medidas entre as armaduras, desconsiderando os cantos nos quais tem-se o ataque do gás carbônico na direção das duas faces, mediante o uso de um paquímetro, em cada face lateral dos corpos de prova, conforme detalhado na Figura 3.10.

Além das medidas realizadas com o uso do paquímetro, também foi feita a medida da profundidade média a partir da delimitação da área carbonatada com a ajuda de um programa computacional, o *AutoCAD*, que está detalhada no Apêndice B. O procedimento² adotado foi semelhante ao empregado por Pauletti (2009).

² Apesar da realização deste procedimento, seus resultados não foram utilizados neste trabalho, pois para a realização da análise estatística foi necessário a utilização dos dados individuais e conseqüentemente os dados médios considerados foram obtidos a partir desses dados individuais.

Figura 3.10 - Esquema adotado para a realização das medidas de profundidades da frente de carbonatação.



Na Figura 3.11 está apresentada a sequência de ações descritas acima para a determinação da profundidade carbonatada.

Após a defesa da dissertação de Castro (2003), foram realizadas, durante esse período aproximado de 10 anos, outras duas medidas da profundidade de carbonatação natural, nos anos de 2005 e 2009 (utilizando o indicador fenolftaleína). Tendo em mãos esses resultados, além das medidas realizadas em 2011 e 2012, pelo presente autor, foi elaborado um banco de dados representando a carbonatação natural desses corpos de prova, permitindo com isso uma boa visualização do desenvolvimento deste processo ao longo de todo esse período.

Figura 3.11 - (a) Retirada da “fatia” do corpo de prova, (b) corpos de prova com suas respectivas “fatias” ao lado, (c) aspersão do indicador de pH à base de fenolftaleína e (d) detalhe da medida da profundidade carbonatada com auxílio do paquímetro



(a)



(b)



(c)



(d)

3.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Buscando uma melhor interpretação dos resultados, os valores de coeficientes de carbonatação natural foram submetidos à análise estatística. Essa forma de abordagem foi semelhante à empregada por Castro (2003), segundo a qual foi realizada uma análise estatística de projeto fatorial. Conforme mencionado naquele estudo, os projetos fatoriais são mais eficientes do que os experimentos simples, pois permitem tirar conclusões mais gerais, por meio de análise das interações das variáveis estudadas, e não apenas dos efeitos individuais destas.

A análise estatística dos coeficientes de carbonatação natural, que é o enfoque principal desta pesquisa, foi realizada mediante um projeto fatorial com três fatores em níveis fixos, quais

sejam: tipo de adição mineral, relação água/aglomerante e procedimento de cura. O modelo estatístico genérico que expressa essa análise é apresentado pela Equação 3.1, conforme Nanni e Ribeiro (1987):

$$x_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + \alpha\beta_{ij} + \alpha\gamma_{ik} + \beta\gamma_{jk} + \alpha\beta\gamma_{ijk} + \varepsilon_{ijk} \quad (3.1)$$

Em que:

μ = média geral;

α_i = influência do fator A, ou seja, efeito do tipo de adição mineral, $i = 1 \dots 6$;

β_j = influência do fator B, ou seja, efeito da relação água/aglomerante, $j = 1 \dots 3$;

γ_k = influência do fator C, ou seja, efeito do procedimento de cura, $k = 1$ e 2 ;

$\alpha\beta_{ij}$ = influência da interação dos fatores A e B, ou seja, efeito da interação do tipo de adição e relação água/aglomerante;

$\alpha\gamma_{ik}$ = influência da interação dos fatores A e C, ou seja, efeito da interação do tipo de adição e procedimento de cura;

$\beta\gamma_{jk}$ = influência da interação dos fatores B e C, ou seja, efeito da interação da relação água/aglomerante e procedimento de cura;

$\alpha\beta\gamma_{ijk}$ = influência da interação de todos os fatores, ou seja, efeito da interação tripla dos fatores;

ε_{ijk} = medida do erro experimental, onde $\varepsilon_{ijk} \rightarrow N(0, \sigma)$

Os testes de significância destes projetos fatoriais foram realizados por análise de variância (ANOVA) utilizando-se o programa *Statistica 7.0* da StatSoft®. As análises dos coeficientes de carbonatação foram feitas, primeiramente considerando todos os valores juntos, os quais utilizaram as medidas de todas as idades; posteriormente foram considerados apenas as medidas obtidas para a última idade, ou seja, a dez anos; e por fim considerando todas as idades, porém abordando as variáveis relação a/ag e cura de forma separadamente.

Após a realização da ANOVA, para cada situação citada anteriormente, havendo influência significativa das variáveis consideradas, foram realizadas as comparações múltiplas de médias, empregando-se o teste de Duncan (NANNI; RIBEIRO, 1987), para se verificar como se agrupam os distintos resultados, considerando as médias que não possuem diferenças significativas e aquelas que possuem diferenças significativas entre si.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados e as discussões relativas aos ensaios realizados no programa experimental. Dentre os resultados abordados, estão: o tratamento de valores espúrios que eliminaram os dados que estavam fora da distribuição normal do banco de dados; as profundidades de carbonatação natural dos diferentes concretos, considerando os valores individuais e os médios; as análises estatísticas dos coeficientes de carbonatação natural; a correlação entre os coeficientes de carbonatação acelerada e natural; e por fim a estimativa de vida útil dos diferentes concretos estudados, considerando todas as variáveis utilizadas neste trabalho e para a espessura de cobrimento adotada, de 25 mm.

4.1 TRATAMENTO DE VALORES ESPÚRIOS

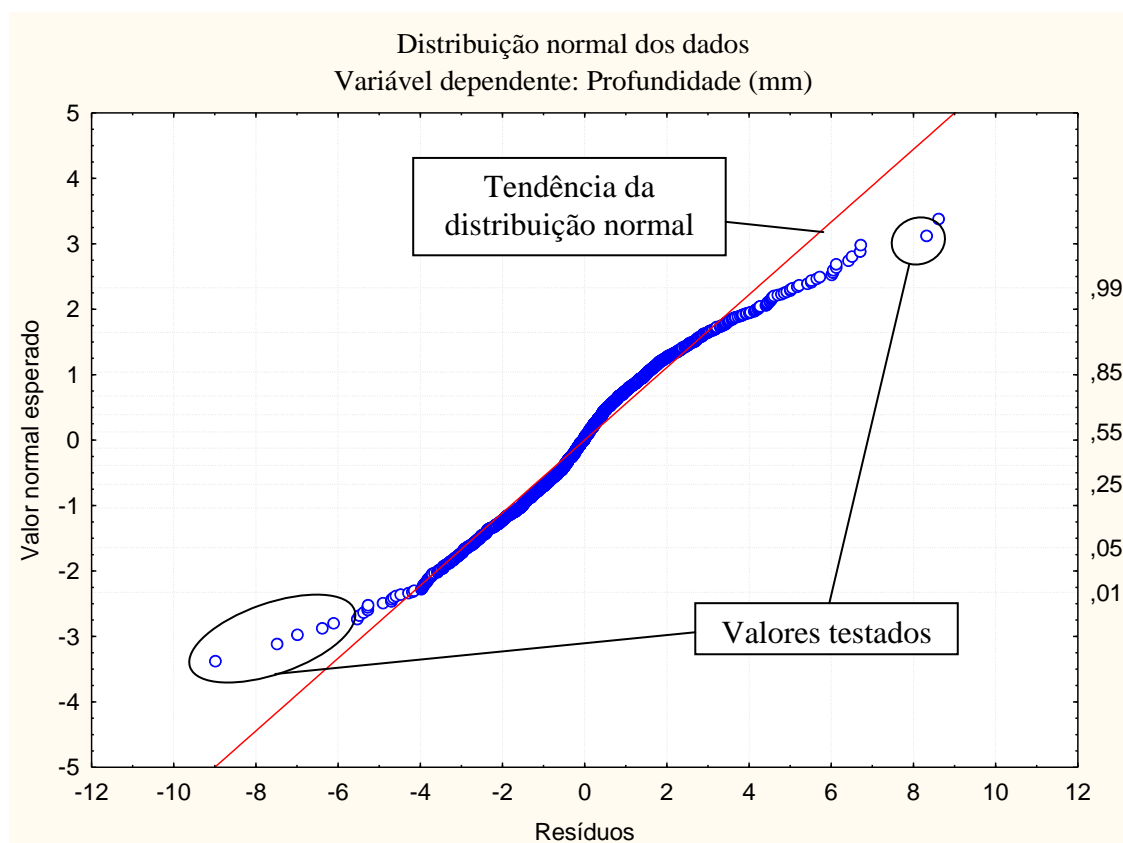
Após a elaboração do banco de dados contendo 1841 medidas representando todos os valores individuais das profundidades carbonatadas ao longo do tempo, foi necessário realizar um tratamento de valores espúrios, com o objetivo de eliminar os valores que estavam fora da distribuição normal do conjunto total de dados.

Para a identificação de valores espúrios foi utilizado o Teste de Dixon, referenciado pela ASTM E 178 (2008), o qual detecta a possível presença destes num determinado conjunto de dados. Este teste verifica se a diferença entre os valores máximo e mínimo e seus valores vizinhos está dentro de uma distribuição aceitável em relação ao conjunto de dados a que eles pertencem.

Para a realização do teste, os dados são ordenados de modo crescente e uma análise é feita para o maior e menor valor, suspeito de ser um valor espúrio. Depois de estabelecido um nível de significância o valor calculado é comparado com um valor crítico de tabela presente na ASTM E 178 (2008); caso ele seja menor que certo valor crítico, aceita-se que o valor em questão não é espúrio e caso o valor calculado seja maior que o valor crítico, conclui-se que o valor testado é um espúrio. Caso seja encontrado um valor espúrio dentro de determinado conjunto, repete-se o teste da mesma forma até que o conjunto não apresente valores espúrios.

Os conjuntos de valores testados neste trabalho foram determinados a partir da distribuição normal referente a todos os dados de profundidade individual considerando todas as idades, todas as relações a/ag, todos os tipos de cura e por fim todos os tipos de adições. Esta distribuição está apresentada na Figura 4.1 a seguir.

Figura 4.1 - Distribuição normal dos dados individuais de profundidade carbonatada



Os valores testados foram aqueles que estavam mais afastados da linha de tendência da distribuição normal e também dos outros valores do conjunto, circundados no gráfico da Figura 4.1. Identificados os possíveis valores espúrios, realizou-se o teste para os seguintes conjuntos de profundidades carbonatadas:

- Concreto com escória de alto forno, relação a/ag igual a 0,55 submetido à cura seca, com idade de três anos;
- Concreto com metacaulim, relação a/ag igual a 0,40 submetido à cura úmida, com idade de dez anos;

- Concreto com metacaulim, relação a/ag igual a 0,70 submetido à cura seca, com idade de três anos;
- Concreto com metacaulim, relação a/ag igual a 0,70 submetido à cura seca, com idade de dez anos;
- Concreto com sílica ativa, relação a/ag igual a 0,55 submetido à cura úmida, com idade de dez anos;
- Concreto com sílica ativa, relação a/ag igual a 0,70 submetido à cura seca, com idade de três anos;
- Concreto com cinza volante, relação a/ag igual a 0,70 submetido à cura úmida, com idade de três anos.

Após a realização do teste de Dixon para cada um dos conjuntos acima, obtiveram-se quatro dados individuais considerados espúrios, são eles: dois dados para o concreto com metacaulim, relação a/ag igual a 0,40 submetido à cura úmida, com idade de dez anos; e dois dados para o concreto com cinza volante, relação a/ag igual a 0,70 submetido à cura úmida, com idade de três anos. A partir da realização do teste, estes quatro dados foram excluídos do banco de dados, ficando conseqüentemente com um total de 1837 valores, apresentados no Apêndice C, que foram utilizados para a elaboração das análises que serão apresentadas nos itens a seguir.

4.2 PROFUNDIDADES DE CARBONATAÇÃO NATURAL DOS CONCRETOS EM FUNÇÃO DO TEMPO DE EXPOSIÇÃO – ANÁLISE DE COMPORTAMENTO

Neste item são apresentados os resultados das profundidades de carbonatação considerando os valores individuais medidos nas idades de 91 dias (0,25 anos), 182 dias (0,50 anos), 301 dias (0,82 anos), 3 anos, 7 anos, 9 anos e 10 anos. Os resultados de cada concreto com as diferentes adições minerais estão apresentados em forma de gráficos, relacionando a profundidade carbonatada em milímetros com o tempo em anos. Essas profundidades individuais estão no Apêndice C, juntamente com os coeficientes de carbonatação natural.

Para cada conjunto de resultados individuais das profundidades carbonatadas em relação às idades em que foram medidas, foi traçada uma linha de tendência que melhor representa a distribuição de dados para cada situação de concreto analisado, obtendo desta forma uma equação matemática para representar o desenvolvimento da frente de carbonatação natural em função do tempo. Para todas as situações a melhor equação para representar a distribuição de dados foi a de potência (de forma geral: $y = ax^b$), pois foi aquela que apresentou os maiores valores de coeficientes de determinação (R^2).

A seguir os resultados são apresentados em figuras que contemplam os gráficos para cada uma das seis situações para cada tipo de adição mineral feita aos concretos. Em cada gráfico será destacado com uma linha vermelha o valor da espessura de cobrimento (25 mm) adotada para os corpos de prova, permitindo desta forma uma melhor visualização do avanço da carbonatação em relação a esta camada de proteção da armadura.

Os concretos estudados foram codificados quanto ao tipo de adição mineral, relação a/ag e tipo de cura empregada em sua produção, conforme as seguintes descrições listadas a seguir, as quais juntas formam as denominações de cada uma das situações estudadas.

a) Tipo de adição mineral:

- Referência → R;
- Escória de alto-forno → E;
- Sílica ativa → SA;
- Cinza volante → CV;
- Cinza de casca de arroz → CA;
- Metacaulim → M.

b) Relação água/aglomerante:

- a/ag = 0,40 → 4;
- a/ag = 0,55 → 5;

- $a/ag = 0,70 \rightarrow 7$;

c) Procedimento de cura:

- cura úmida $\rightarrow H$;
- cura seca $\rightarrow 0$;

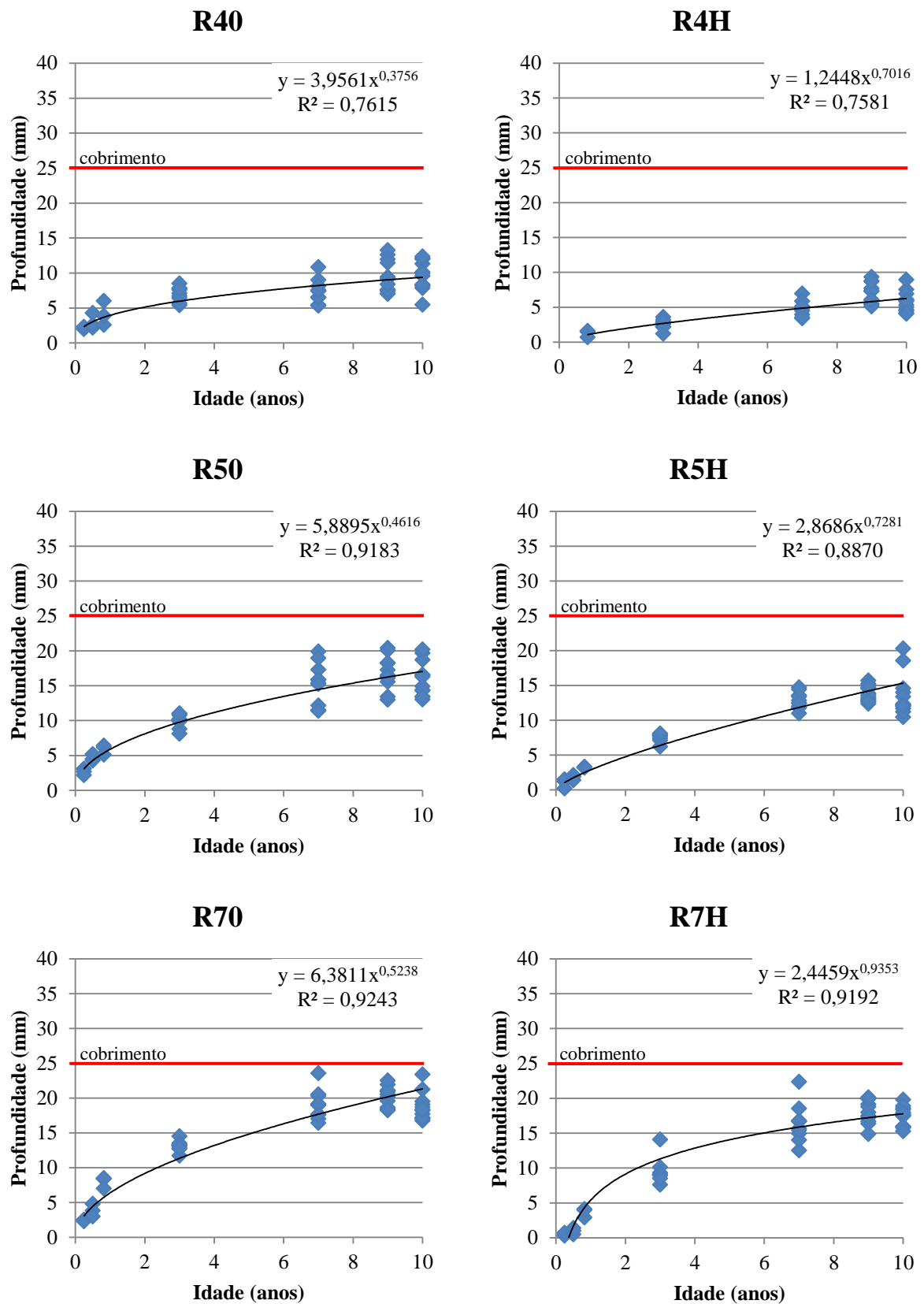
4.2.1 Concretos sem Adição (Situação de Referência)

Nos gráficos da Figura 4.2 a seguir são mostrados os comportamentos do avanço da frente de carbonatação para os concretos sem adição, para as três relações água/aglomerante distintas (0,40; 0,55 e 0,70) e submetidos às curas seca e úmida.

Para as medidas de profundidade individuais lançadas em função do tempo, observa-se que os valores medidos para o avanço da profundidade carbonatada de todas as situações estão abaixo da espessura de cobrimento (25 mm). Para a relação a/ag igual a 0,40 as profundidades individuais máximas não ultrapassaram 15 mm, apresentando os maiores valores em torno de 13 mm (medida aos 9 anos para os concretos submetidos à cura seca) e aproximadamente 9 mm (medida também aos 9 anos para os concretos submetidos à cura úmida).

Os concretos com relação a/ag igual a 0,55 apresentaram maiores valores que a situação anterior, os quais chegaram próximos de 20 mm para os dois tipos de cura, considerando as idades mais avançadas, 9 anos e 10 anos. Já os concretos com relação a/ag igual a 0,70 apresentaram profundidades máximas em torno de 23 mm para os dois tipos de cura, sendo na idade de 7 anos para o concreto curado de forma úmida e também aos 7 anos e 10 anos para ao concreto submetido à cura seca.

Figura 4.2 - Avanço da frente de carbonatação dos concretos sem adição, para as três relações a/ag distintas (0,40; 0,55 e 0,70) e submetidos às curas seca e úmida



Quando se comparam os valores individuais das profundidades carbonatadas, considerando a variação da relação a/ag, observa-se que os concretos sem adição são bastante sensíveis ao aumento da relação a/ag, já que ao se aumentar essa relação, aumenta-se de forma nítida as profundidades carbonatadas. Porém quando se comparam os valores das profundidades, considerando a variável cura, observa-se que estes valores, para uma mesma relação a/ag, permanecem quase os mesmos sofrendo apenas um sutil aumento quando o concreto é curado em local seco em relação à cura úmida.

De forma geral, os coeficientes de determinação (R^2) das equações que representam as distribuições dos dados individuais são representativos, pois ficaram todos acima de 0,75, sendo que a situação que teve sua equação mais próxima da distribuição de dados foi a da relação a/ag igual a 0,70 submetida à cura seca, no qual o valor de R^2 ficou igual a 0,92.

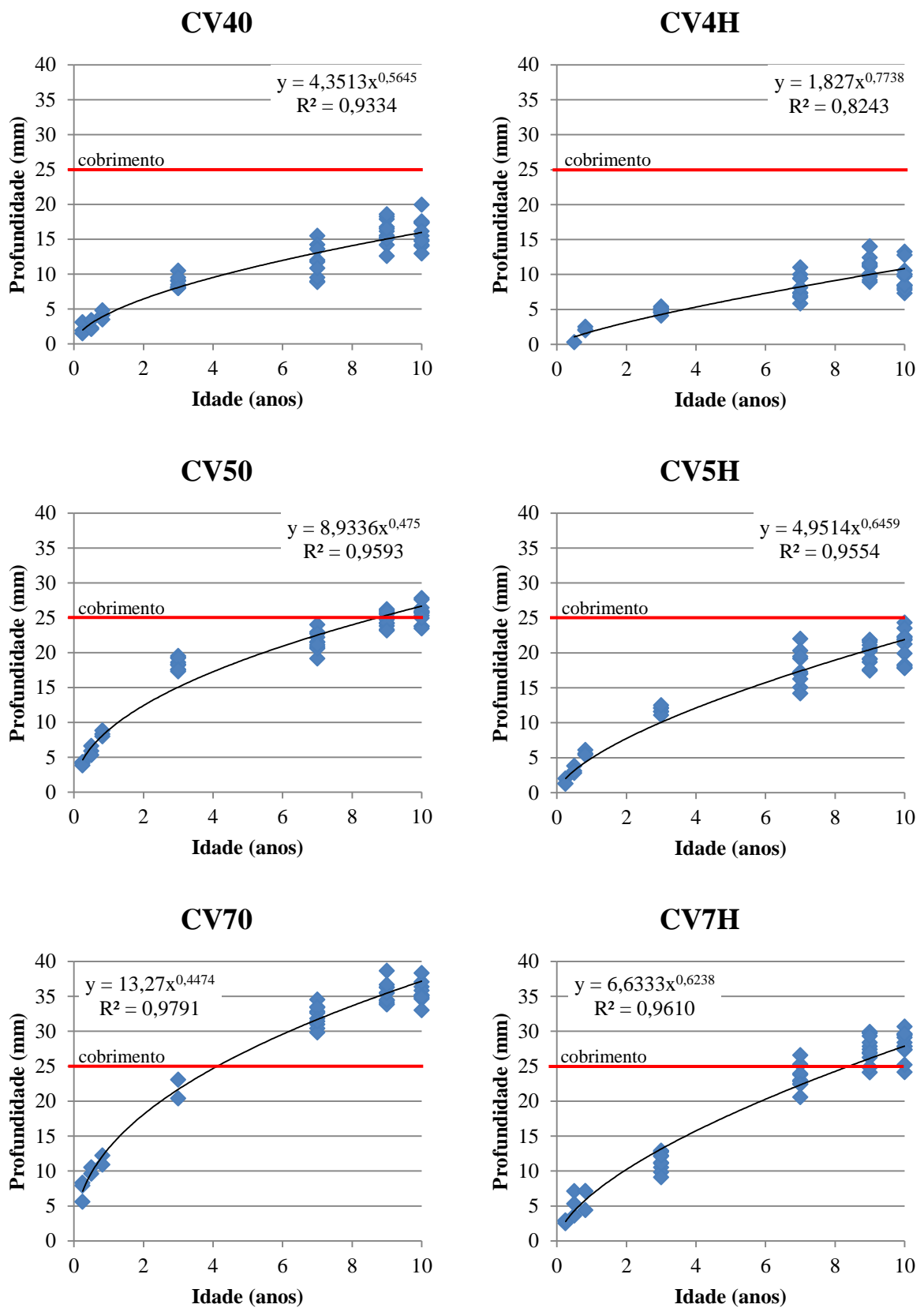
4.2.2 Concretos com Cinza Volante

Nos gráficos das Figuras 4.3 são mostrados os comportamentos do avanço da frente de carbonatação para os concretos com cinza volante, para as três relações água/aglomerante (0,40; 0,55 e 0,70) e submetidos à cura seca e úmida.

Dentre as seis situações analisadas de concretos com cinza volante, observa-se que três delas apresentaram profundidades individuais maiores que a espessura de cobrimento (25 mm), são elas: concreto com relação a/ag igual a 0,55 submetido à cura seca que ultrapassou a espessura de cobrimento aos 9 anos e apresentou profundidade máxima de aproximadamente 28 mm aos 10 anos; e as duas situações de cura dos concretos com relação a/ag igual a 0,70, os quais apresentaram profundidades máximas iguais a 31 mm aos 10 anos para a cura úmida e 40 mm aos 9 anos para cura seca, porém ultrapassando a espessura de cobrimento aos 4 anos e 9 anos, para as respectivas curas seca e úmida.

Outra situação que obteve valores bem próximos do limite da espessura de cobrimento foi o concreto com relação a/ag igual a 0,55 submetido à cura úmida, com profundidades que chegaram a 24 mm aos 10 anos. Os concretos com relação a/ag igual a 0,40 ficaram abaixo da espessura de cobrimento, com profundidade máxima de 20 mm aos 10 anos para aquele submetido à cura seca e de aproximadamente 15 mm aos 9 anos para o que foi submetido à cura úmida.

Figura 4.3 - Avanço da frente de carbonatação dos concretos com adição de cinza volante, para as três relações a/ag distintas (0,40; 0,55 e 0,70) e submetidos às curas seca e úmida



Quando se analisa a interferência da variação da relação a/ag nos valores individuais das profundidades carbonatadas, observa-se que os concretos com cinza volante são bastante sensíveis a esse parâmetro do concreto, uma vez que o seu aumento implica em fortes acréscimos das camadas carbonatadas. Este aumento significativo da profundidade carbonatada também é bastante notório quando se compara os valores dos concretos submetidos à cura seca em relação aos concretos curados de forma úmida. Esta diferença é mais evidente nos concretos com relação a/ag igual a 0,70.

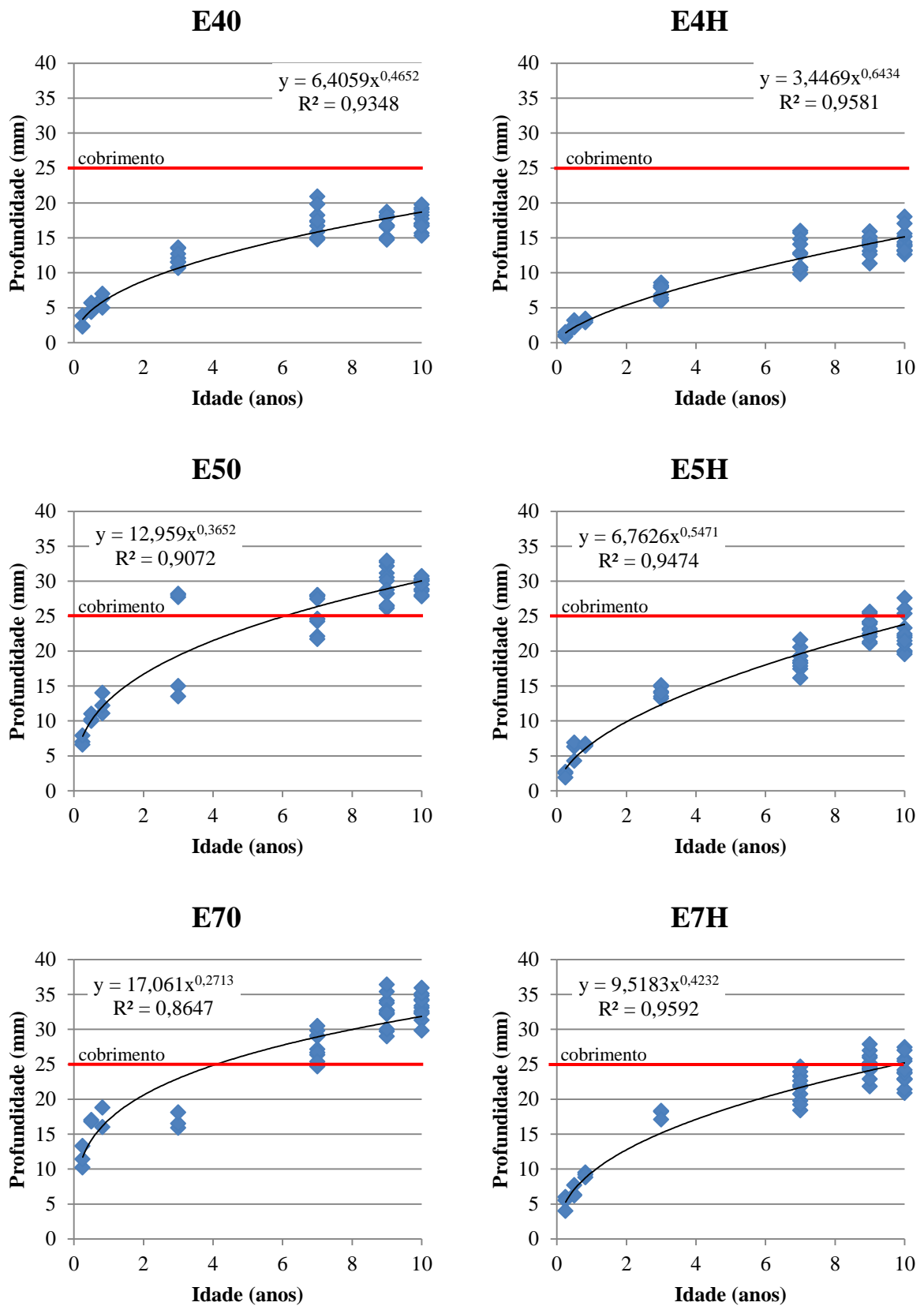
Observando os coeficientes de determinação (R^2) das equações que representam as distribuições dos dados individuais, pode-se dizer que estes são representativos, pois todos eles ficaram acima de 0,82, sendo que a situação que teve sua equação melhor ajustada em relação à distribuição de dados foi a de relação a/ag igual a 0,70 submetida à cura seca, no qual o valor de R^2 ficou igual a 0,98.

4.2.3 Concretos com Escória de Alto Forno

Nos gráficos das Figuras 4.4, são mostrados os comportamentos do avanço da frente de carbonatação para os concretos com escória de alto forno, para as três relações água/aglomerante (0,40; 0,55 e 0,70) e submetidos à cura seca e úmida.

Analisando os gráficos da Figura 4.4 observa-se que dentre as seis situações apresentadas, apenas os concretos com relação a/ag igual a 0,40 ficaram abaixo da espessura de cobrimento, apresentando profundidade máxima em torno de 20 mm aos 7 anos para o concreto submetido à cura seca e aos 10 anos ao curado de forma úmida. O concreto com relação a/ag de 0,55 com cura seca ultrapassou a espessura de cobrimento aos 6 anos e o com cura úmida aos 9 anos. Já os concretos com relação a/ag de 0,70 ultrapassaram a espessura de cobrimento aos 4 anos para a cura seca e aos 9 anos para a cura úmida. Dessa forma, quanto à carbonatação observa-se que os concretos com escória de alto forno não apresentam bom comportamento diante de relações a/ag médias e elevadas, ficando clara essa deficiência.

Figura 4.4 - Avanço da frente de carbonatação dos concretos com adição de escória de alto forno, para as três relações a/ag distintas (0,40; 0,55 e 0,70) e submetidos às curas seca e úmida



A utilização de escória não prescinde de um concreto com baixas relações a/ag, o que significa uma estrutura interna mais compacta, de menor porosidade. Esse comportamento também foi identificado nos estudos de Bourguignon (2004) e Costa *et al.* (2005), nos quais eles recomendam para diminuir os efeitos negativos da carbonatação, a utilização de concretos com maiores resistências à compressão associados a um tempo maior de cura úmida, a adoção de teores da adição (escória) não tão elevados e a redução da relação a/ag, que conseqüentemente contribuem para a redução da porosidade.

Os valores individuais máximos encontrados para os concretos com relação a/ag de 0,55 foi de aproximadamente 33 mm aos 9 anos, para o concreto submetido à cura seca, e 28 mm aos 10 anos, para aquele submetido à cura úmida. Para os concretos com relação a/ag igual a 0,70, têm-se as profundidades máximas de 37 mm aos 9 anos para aquele submetido à cura seca e 28 mm aos 9 anos para o submetido à cura úmida.

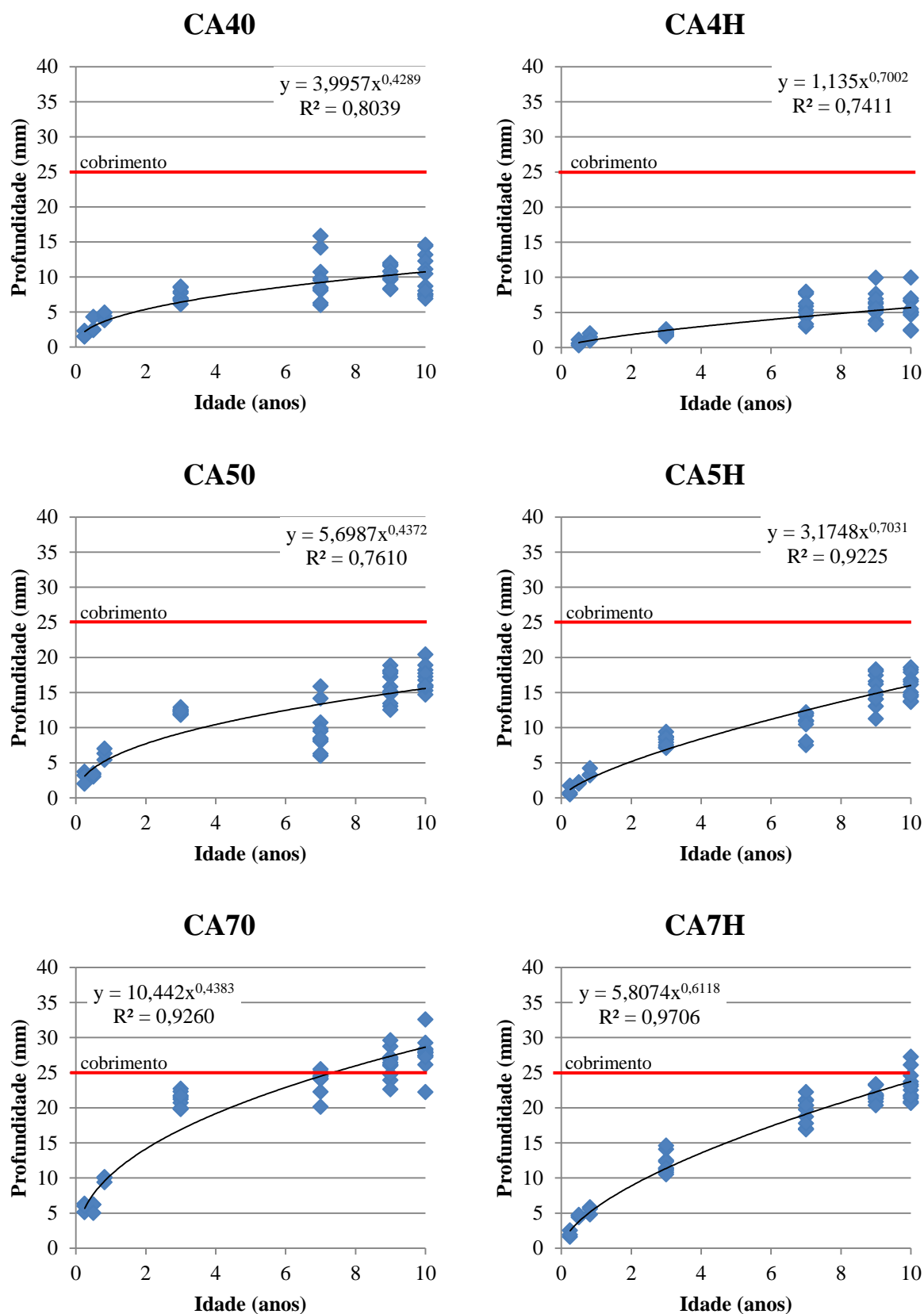
Em análise aos efeitos da variável relação a/ag pode-se destacar que esta adição apresentou grande aumento nos valores das profundidades individuais à medida que se aumentou a relação a/ag. Outra variável que altera de forma bastante evidente as profundidades individuais da carbonatação natural é a execução ou não de cura úmida, no qual se pode observar que os concretos submetidos à cura úmida apresentaram valores bem menores quando comparados aos mesmos submetidos à cura seca, da mesma forma como ocorreu para os concretos de cinza volante. Como destaca o boletim 12 do *Comité Euro-International du Béton* – CEB (1993), os concretos com cinza volante e escória de alto-forno são sensíveis à cura, o que significa que eles necessariamente e sistemicamente, devem estar associados a efetivos procedimentos de cura.

Ao analisar os coeficientes de determinação (R^2) das equações que representam as distribuições dos dados individuais, pode-se dizer que estes são representativos, pois todos eles ficaram acima de 0,86, sendo que a situação que obteve melhor ajuste foi a de relação a/ag igual a 0,70 submetida à cura úmida, no qual o valor de R^2 ficou igual a 0,96.

4.2.4 Concretos com Cinza de Casca de Arroz

Nos gráficos das Figuras 4.5, a seguir, são mostrados os comportamentos do avanço da frente de carbonatação para os concretos com cinza de casca de arroz, para as três relações água/aglomerante (0,40; 0,55 e 0,70) e submetidos à cura seca e úmida.

Figura 4.5 - Avanço da frente de carbonatação dos concretos com adição de cinza de casca de arroz, para as três relações a/ag distintas (0,40; 0,55 e 0,70) e submetidos às curas seca e úmida



Para as medidas de profundidade individuais lançadas em função do tempo, observa-se que somente os concretos com relação a/ag igual a 0,70 apresentam valores medidos acima da espessura de cobrimento (25 mm), com profundidade máxima de aproximadamente 28 mm aos 10 anos para o concreto submetido à cura úmida e de aproximadamente 33 mm aos 10 anos para o concreto submetido à cura seca, o qual ultrapassou a espessura de cobrimento já aos 7 anos de idade.

Para a relação a/ag igual a 0,40 as profundidades individuais máximas não ultrapassaram 16 mm, apresentando valores em torno de 16 mm (medidos aos 7 anos para os concretos submetidos à cura seca) e de aproximadamente 10 mm (medidos aos 9 anos e 10 anos para os concretos submetidos à cura úmida). Os concretos com relação a/ag igual a 0,55 apresentaram maiores valores, os quais chegaram próximos de 20 mm para os dois tipos de cura, considerando as idades mais avançadas.

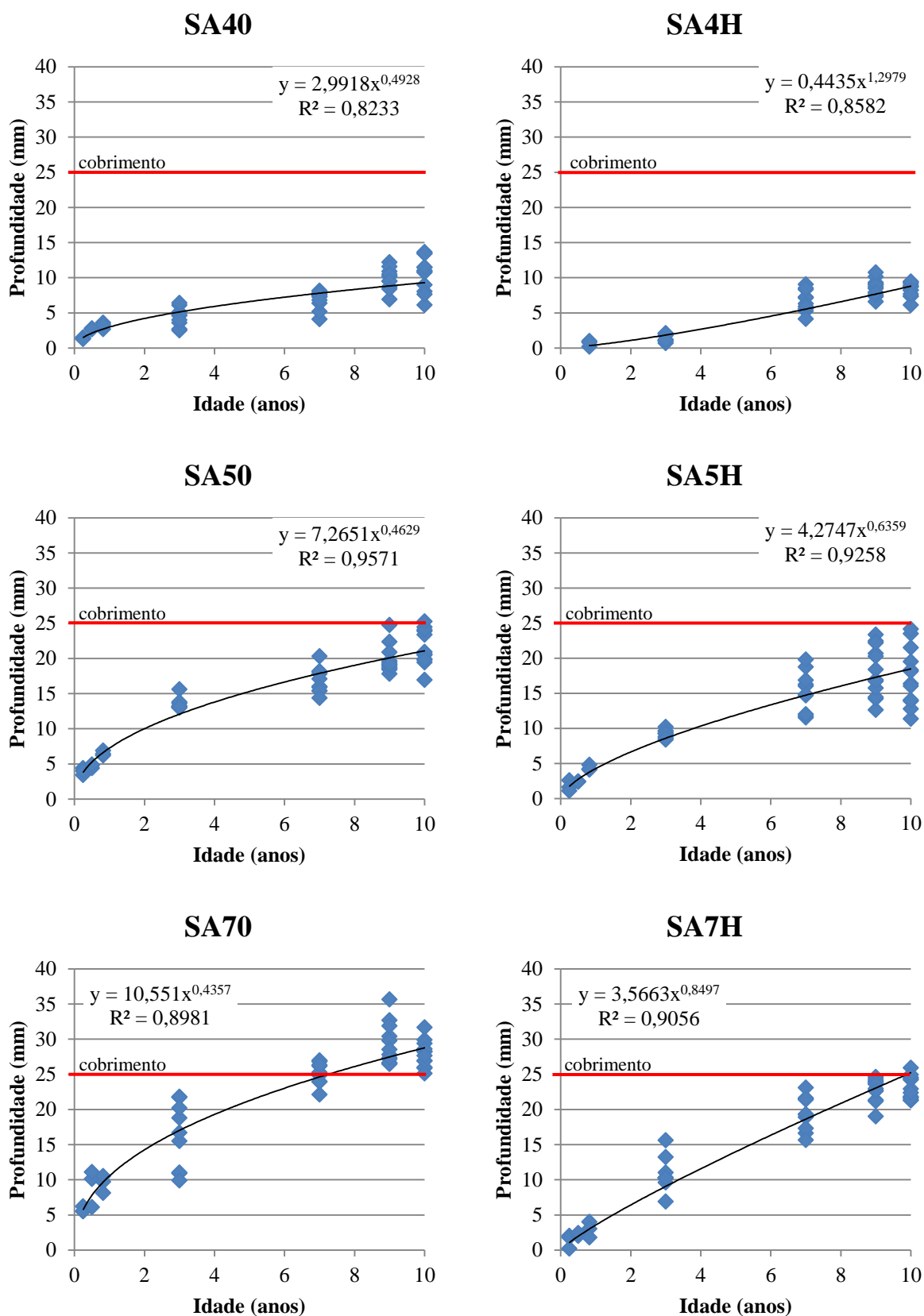
Quando se comparam os valores individuais das profundidades carbonatadas considerando a variação da relação a/ag , observa-se que são bastante sensíveis ao aumento da relação a/ag , já que ao se aumentar essa relação, aumenta-se de forma nítida as profundidades carbonatadas. Porém quando se comparam os valores das profundidades considerando a variável cura, observa-se que as profundidades medidas para as relações a/ag 0,40 e 0,55 apresentam menores variações do que para a relação a/ag 0,70, que apresentou uma variação máxima de aproximadamente 10 mm considerando os valores máximos. Em geral, a influência da cura é menor do que para os concretos de escória e de cinza volante.

De forma geral, os coeficientes de determinação (R^2) das equações que representam as distribuições dos dados individuais são representativos, pois ficaram todos acima de 0,74, sendo que a situação de melhor ajuste da curva foi a de relação a/ag igual a 0,70 submetida à cura úmida, em que o valor de R^2 ficou igual a 0,97.

4.2.5 Concretos com Sílica Ativa

Nos gráficos da Figura 4.6 são mostrados os comportamentos do avanço da frente de carbonatação para os concretos com sílica ativa, para as três relações água/aglomerante (0,40; 0,55 e 0,70) e submetidos à cura seca e úmida.

Figura 4.6 - Avanço da frente de carbonatação dos concretos com adição de sílica ativa, para as três relações a/ag distintas (0,40; 0,55 e 0,70) e submetidos às curas seca e úmida



Ao analisar os seis gráficos com as profundidades carbonatadas dos concretos com sílica ativa, observa-se que três deles apresentaram profundidades individuais acima da espessura de cobrimento, são eles: concreto com relação a/ag igual a 0,55 e cura seca, com profundidade máxima de cerca de 25 mm aos 10 anos; concretos com relação a/ag igual a 0,70 e cura úmida, com profundidade máxima de 26 mm aos 10 anos; e concretos com relação a/ag igual a 0,70 e cura seca, com profundidade máxima de 35 mm aos 9 anos, sendo que ultrapassou os 25 mm da espessura de cobrimento já aos 7 anos.

Ao analisar a distribuição das profundidades individuais em relação ao valor da relação a/ag observa-se que o aumento das profundidades carbonatadas dos concretos com relação a/ag de 0,40 para os concretos com relação a/ag de 0,55 é maior do que quando se passa da relação a/ag de 0,55 para relação a/ag de 0,70. Isto confirma o fato de superpozolanas de alta finura, como a sílica ativa, por exemplo, terem como requisito básico já uma estrutura interna de partida boa. Em outras palavras, com concretos pouco compactos e porosos, não se tem como potencializar as boas propriedades da sílica ativa.

Na comparação entre os valores de profundidade carbonatada em relação à variação de existência ou não de cura úmida, observa-se que as variações foram muito pequenas, podendo destacar apenas os concretos com relação a/ag igual a 0,70, no qual essa diferença apresentou um valor de cerca de 10 mm. Como a sílica ativa é fina, ela aumenta a coesão no estado plástico, assim como a superfície específica das partículas sólidas de modo geral, aumentando assim a área de contato sólido-líquido e, conseqüentemente, a capacidade de retenção de água no estado fresco (atuando despretensiosamente como um agente de cura). Também no estado endurecido, em função de uma estrutura refinada de poros, há uma maior capacidade de retenção de água, o que combate algumas formas de retração do concreto.

De forma geral, os coeficientes de determinação (R^2) das equações que representam as distribuições dos dados individuais foram adequados, pois ficaram todos acima de 0,82, sendo que a melhor situação foi a da relação a/ag igual a 0,55 submetida à cura seca, cujo valor de R^2 foi igual a 0,96.

4.2.6 Concretos com Metacaulim

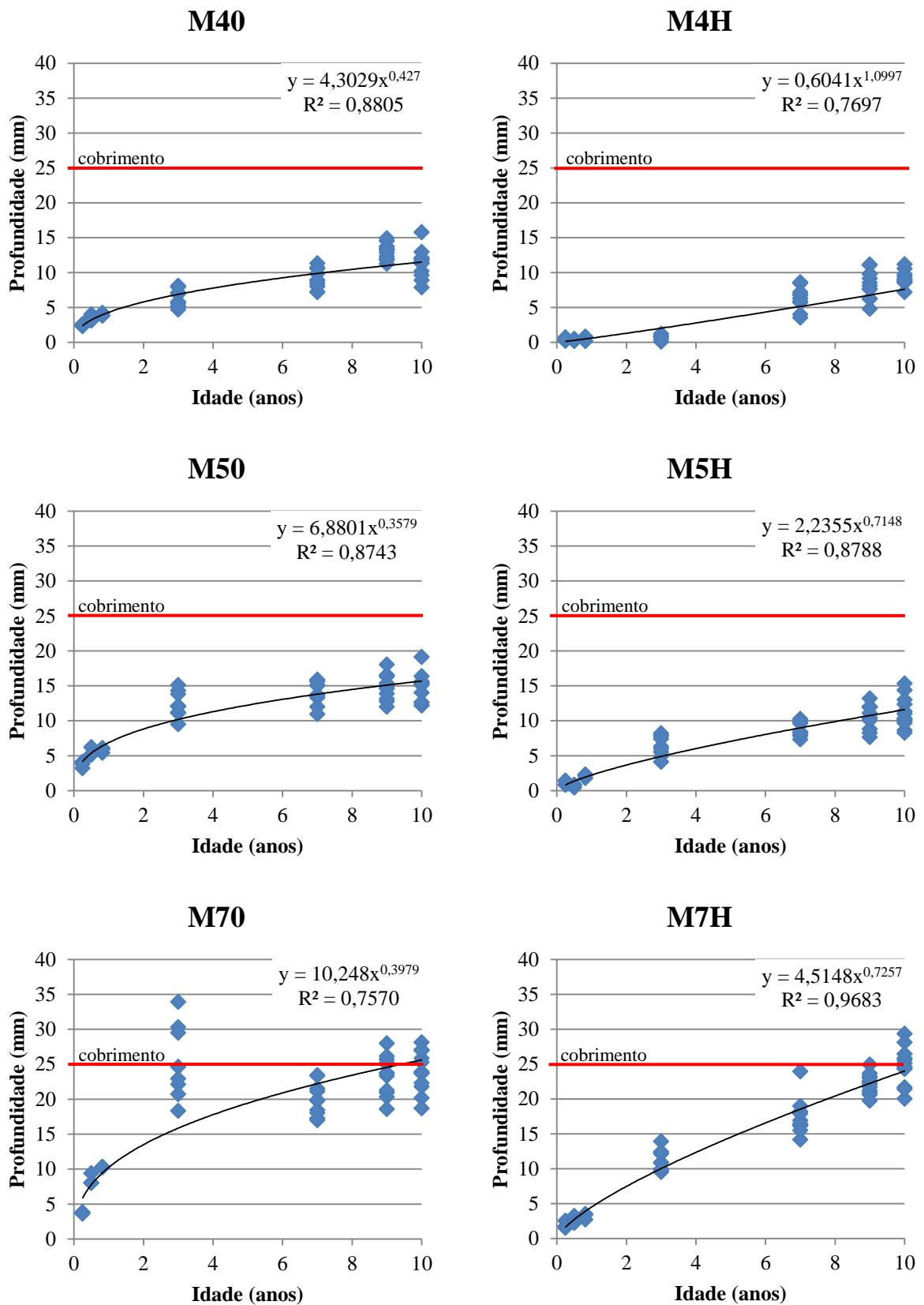
Nos gráficos da Figura 4.7 são mostrados os comportamento do avanço da frente de carbonatação para os concretos com metacaulim, para as três relações água/aglomerante (0,40; 0,55 e 0,70) e submetidos à cura seca e úmida.

De acordo com os gráficos da Figura 4.7 pode-se observar que apenas os concretos com relação a/ag igual a 0,70 ultrapassaram a espessura de cobrimento (25 mm). Na situação de cura seca e relações a/ag 0,55 e 0,70 (principalmente esta última), tem-se um comportamento inesperado para as profundidades medidas aos 3 anos, em que possivelmente houve algum equívoco no ensaio, o que fez com que houvesse profundidades tão dispersas e com valores demasiadamente altos. Esse provável erro pode ter sido causado alguma falha humana na leitura, por uma alteração da solução de medida, por alguma falha localizada do concreto no corpo de prova ou devido a outro motivo desconhecido. Apesar de aparentemente as medidas serem tipicamente de valores espúrios em relação ao conjunto de dados, ao aplicar o teste de Dixon no tratamento de valores espúrios, não foi encontrado nenhum problema com este conjunto de dados. De toda maneira, considerou-se este um comportamento espúrio, notadamente para a relação a/ag igual a 0,70.

As profundidades máximas para os concretos de relação a/ag igual a 0,70 foram de aproximadamente 35 mm aos 3 anos para cura seca (com a ressalva dos comentários anteriores) e de cerca de 30 mm aos 10 anos para os concretos submetidos à cura úmida.

Os concretos com relação a/ag de 0,55 apresentaram valores máximos de aproximadamente 20 mm aos 10 anos e 15 mm aos 10 anos para, respectivamente, as curas seca e úmida. Os concretos com relação a/ag de 0,40 apresentaram valores menores do que aqueles de relação a/ag 0,55, como esperado, tendo valores máximos iguais a 15 mm aos 10 anos e 12 mm aos 10 anos, para as curas seca e úmida, respectivamente.

Figura 4.7 - Avanço da frente de carbonatação dos concretos com adição de metacaulim, para as três relações a/ag distintas (0,40; 0,55 e 0,70) e submetidos às curas seca e úmida



Ao analisar o avanço da profundidade individual de carbonatação em relação à variável relação a/ag , percebe-se um aumento significativo nos valores à medida que se aumenta a relação a/ag , principalmente quando se aumenta a relação a/ag de 0,55 para 0,70. Quando se comparam as profundidades medidas em relação à execução de cura seca ou úmida, observa-se que a variação não é muito grande, ou seja, os concretos com metacaulim não apresentaram grandes variações quando recebem cura úmida ou cura seca. Em termos de comportamento global, o metacaulim se assemelha à sílica ativa.

De forma geral, os coeficientes de determinação (R^2) das equações que representam as distribuições dos dados individuais são representativos, pois ficaram todos acima de 0,75, sendo que a situação que teve sua equação melhor ajustada foi a de relação a/ag igual a 0,70 submetida à cura seca, no qual o valor de R^2 foi igual a 0,97.

4.2.7 Considerações Gerais sobre os Resultados Individuais

Analisando de forma global os resultados, observa-se que todas as situações com relação a/ag igual a 0,40 ficaram abaixo da espessura de cobrimento e que entre elas a que apresentou as menores profundidades foram os concretos com sílica ativa e referência enquanto que as maiores profundidades foram observadas nos concretos com escória de alto forno e com cinza volante, para as duas situações de cura.

Para os concretos com relação a/ag 0,55, nota-se que os melhores resultados foram apresentados pelos concretos com metacaulim e referência, os quais apresentaram valores abaixo da espessura de cobrimento. E os maiores valores foram dos concretos com escória de alto forno e com cinza volante.

Os concretos com relação a/ag igual a 0,70 foram os que apresentaram os maiores valores de profundidades carbonatadas, ficando apenas os concretos referência abaixo da espessura de cobrimento, para os dois procedimentos de cura. Os demais apresentaram valores individuais acima da espessura de cobrimento, sendo que os concretos com adição de cinza volante e com escória de alto forno foram os que apresentaram os maiores valores de carbonatação.

Diante de todos os resultados individuais apresentados anteriormente, observa-se que para todas as situações, os concretos que foram submetidos à cura úmida apresentaram menores profundidades de carbonatação do que os concretos com mesmas características, porém com

cura seca. Isto ressalta a importância da cura, principalmente para os concretos com escória e com cinza volante, especialmente nas relações a/ag mais altas.

A cura proporciona uma maior qualidade ao concreto, especialmente na região de cobrimento, de forma a criar uma camada compacta e bem consolidada, proporcionada pelo o aumento do grau de hidratação da pasta de cimento na superfície do concreto, contribuindo para a diminuição de sua porosidade (CASCUDO; CARASEK, 2011). Dessa forma a realização de cura em estruturas de concreto armado é de suma importância para que se possa melhorar a durabilidade dessas estruturas frente à carbonatação.

Considerando os valores individuais, observa-se também que todas as situações de concretos com adições apresentaram profundidades superiores às profundidades medidas no concreto de referência, situação sem adição. E que para todas as relações a/ag os concretos com menores profundidades foram os de referência seguidos dos com adição de sílica ativa e com metacaulim. Em contra partida tem-se que as maiores profundidades foram detectadas nos concretos com escória de alto forno e com cinza volante.

A seguir apresenta-se a Tabela 4.1, que contém as equações das linhas de tendências com seus respectivos coeficientes de determinação (R^2) para cada uma das situações apresentadas. Todas as linhas de tendência são representadas por funções de potência com expoente fracionário, bastante próximas do modelo de Tuutti (1982) que é baseado na primeira lei de Fick, onde a profundidade carbonatada (e) é estimada por meio da multiplicação de um coeficiente de carbonatação (k) que contempla a influência das diversas variáveis, pela raiz quadrada do tempo (\sqrt{t} ou $t^{0.5}$), conforme mostrada na Equação 4.1.

$$e = k \sqrt{t} \quad (4.1)$$

Tabela 4.1 – Equações das linhas de tendência que melhor representam os dados das profundidades individuais ao longo do tempo, para cada uma das situações.

Concreto	Equação	Coef. De determinação (R ²)
R40	$e_c = 3,9561 t^{0,3756}$	0,7615
R4H	$e_c = 1,2448 t^{0,7016}$	0,7581
R50	$e_c = 5,8895 t^{0,4616}$	0,9183
R5H	$e_c = 2,8686 t^{0,7281}$	0,8870
R70	$e_c = 6,3811 t^{0,5238}$	0,9243
R7H	$e_c = 2,4459 t^{0,9353}$	0,9192
CV40	$e_c = 4,3513 t^{0,5645}$	0,9334
CV4H	$e_c = 1,8270 t^{0,7738}$	0,8243
CV50	$e_c = 8,9336 t^{0,4750}$	0,9593
CV5H	$e_c = 4,9514 t^{0,6459}$	0,9554
CV70	$e_c = 13,270 t^{0,4474}$	0,9791
CV7H	$e_c = 6,6333 t^{0,6238}$	0,9610
E40	$e_c = 6,4059 t^{0,4652}$	0,9348
E4H	$e_c = 3,4469 t^{0,6434}$	0,9581
E50	$e_c = 12,959 t^{0,3652}$	0,9072
E5H	$e_c = 6,7626 t^{0,5471}$	0,9474
E70	$e_c = 17,061 t^{0,2713}$	0,8647
E7H	$e_c = 9,5183 t^{0,4232}$	0,9592
CA40	$e_c = 3,9957 t^{0,4289}$	0,8039
CA4H	$e_c = 1,1350 t^{0,7002}$	0,7411
CA50	$e_c = 5,6987 t^{0,4372}$	0,7610
CA5H	$e_c = 3,1748 t^{0,7031}$	0,9225
CA70	$e_c = 10,442 t^{0,4383}$	0,9260
CA7H	$e_c = 5,8074 t^{0,6118}$	0,9706
SA40	$e_c = 2,9918 t^{0,8233}$	0,8233
SA4H	$e_c = 0,4435 t^{0,8582}$	0,8582
SA50	$e_c = 7,2651 t^{0,4629}$	0,9571
SA5H	$e_c = 4,2747 t^{0,6359}$	0,9258
SA70	$e_c = 10,551 t^{0,4357}$	0,8981
SA7H	$e_c = 3,5663 t^{0,8497}$	0,9056
M40	$e_c = 4,3029 t^{0,4270}$	0,8805
M4H	$e_c = 0,6041 t^{1,0997}$	0,7697
M50	$e_c = 6,8801 t^{0,3579}$	0,8743
M5H	$e_c = 2,2355 t^{0,7148}$	0,8788
M70	$e_c = 10,248 t^{0,3979}$	0,7570
M7H	$e_c = 4,5148 t^{0,7257}$	0,9683
Média dos expoentes	0,5856	

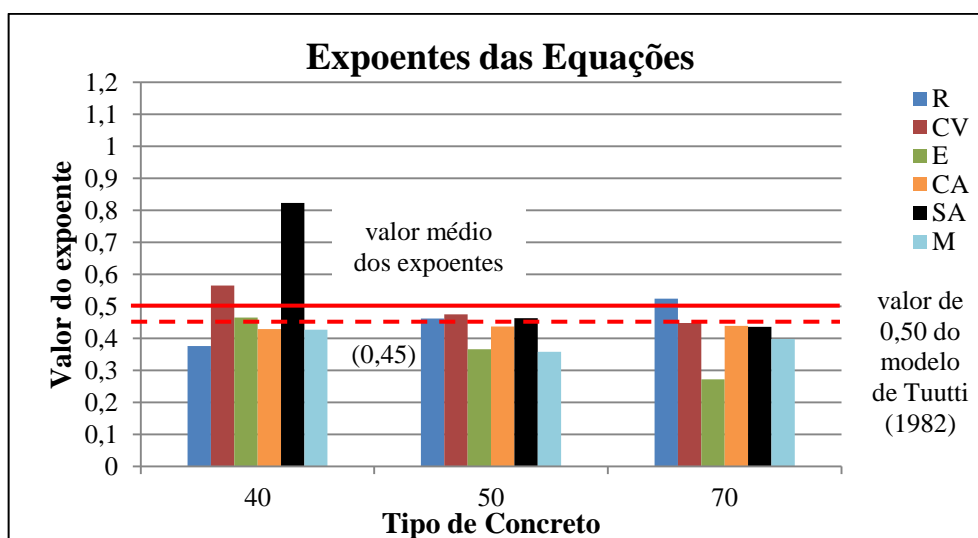
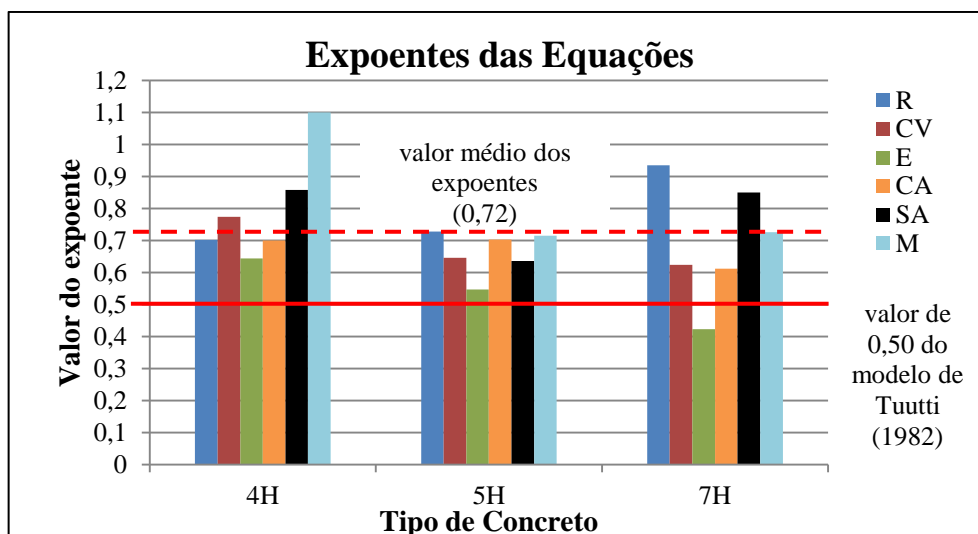
Por se tratar de distribuição de dados individuais, observa-se que os valores dos coeficientes de determinação obtidos são considerados bons, pois todos ficaram acima de 0,74, tendo valores bem próximos de 1 (um), tais como os concretos com adição de cinza volante com relação a/ag 0,70 submetidos aos dois tipos de cura, concreto com cinza de casca de arroz

com relação a/ag 0,70 submetido à cura úmida e também o concreto com metacaulim submetido à cura úmida, os quais apresentaram R^2 acima de 0,96. Outro fato a considerar é que os valores dos expoentes das equações de potência ficaram próximos de 0,50 apresentando uma média de 0,5856, fato que aproxima muito do modelo de Tuutti (1982) baseado na Lei de Fick, conforme comentário anterior, modelo este bastante utilizado para previsão da profundidade de carbonatação nos concretos.

Para melhor visualizar os valores dos expoentes constantes nas equações obtidas, para os diversos concretos, geraram-se os gráficos a e b da Figura 4.8, no qual estão destacados os valores de 0,50, que corresponde ao expoente do modelo de Tuutti (1982) e também a média dos expoentes para cada tipo de cura: 0,72 para os concretos submetidos à cura úmida e 0,45 para os concretos submetidos à cura seca. Os gráficos não possuem objetivo de realizar um estudo estatístico para se explicar os valores médios dos expoentes, mas apenas ilustrar a proximidade dos valores encontrados para os expoentes nas equações, do valor de 0,50 do expoente presente no modelo de Tutti (1982).

Pode-se observar que os valores dos expoentes obtidos para os concretos submetidos à cura seca aproximaram-se mais do valor de 0,50 representado no modelo citado. Outro fato a registrar é que a média global dos expoentes, considerando os dois tipos de cura, foi de 0,59.

Figura 4.8 – Valores dos expoentes das equações de potência encontradas para as linhas de tendência das profundidades individuais em função do tempo, (a) para os concretos curados de forma úmida e (b) para os concretos curados de forma seca



A partir das figuras anteriores pode-se observar que as situações que mais se aproximaram do modelo citado foram: concretos com cinza volante e com sílica ativa, ambos com relação a/ag 0,55 com cura seca e o concreto de referência com relação a/ag 0,70, submetido à cura seca.

4.3 PROFUNDIDADES DE CARBONATAÇÃO NATURAL DOS CONCRETOS EM FUNÇÃO DO TEMPO DE EXPOSIÇÃO - ANÁLISE COMPARATIVA DOS TIPOS DE ADIÇÕES

Os valores médios das profundidades de carbonatação são apresentados a seguir, em função do tempo de exposição, para cada tipo de relação a/ag e cura, permitindo desta forma a comparação direta dos concretos compostos com as diversas adições minerais, no tocante aos seus desempenhos frente ao fenômeno da carbonatação.

4.3.1 Concretos com Relação a/ag Igual a 0,40

Nas Figuras 4.9 e 4.10 são apresentadas as profundidades médias da frente de carbonatação em função do tempo para os concretos de relação a/ag igual a 0,40 com diferentes adições minerais considerando os dois tipos de cura, úmida e seca respectivamente.

Figura 4.9 - Avanço da profundidade média de carbonatação ao longo do tempo para os concretos de relação água/aglomerante igual a 0,40 submetidos à cura úmida.

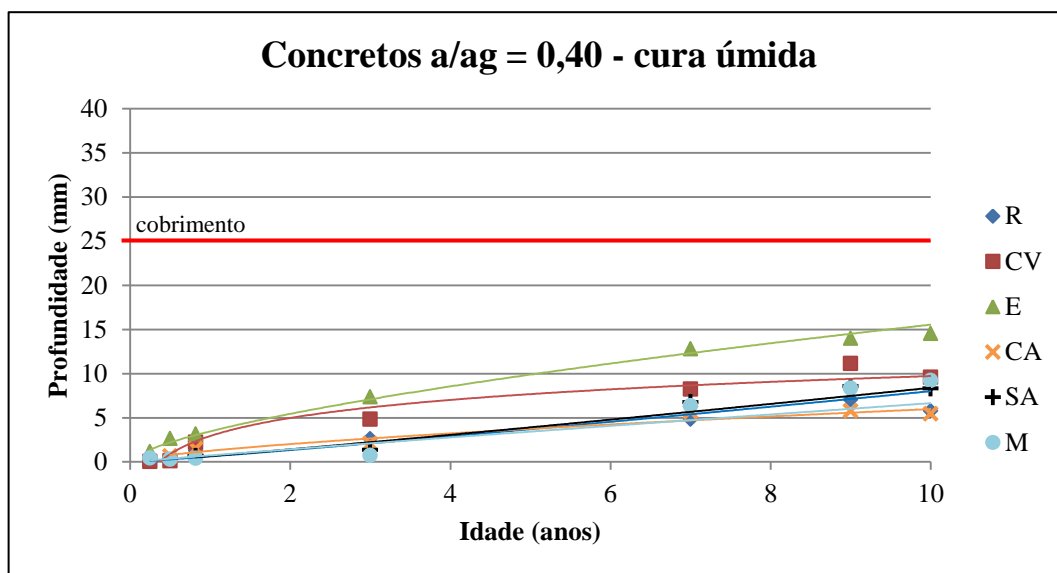
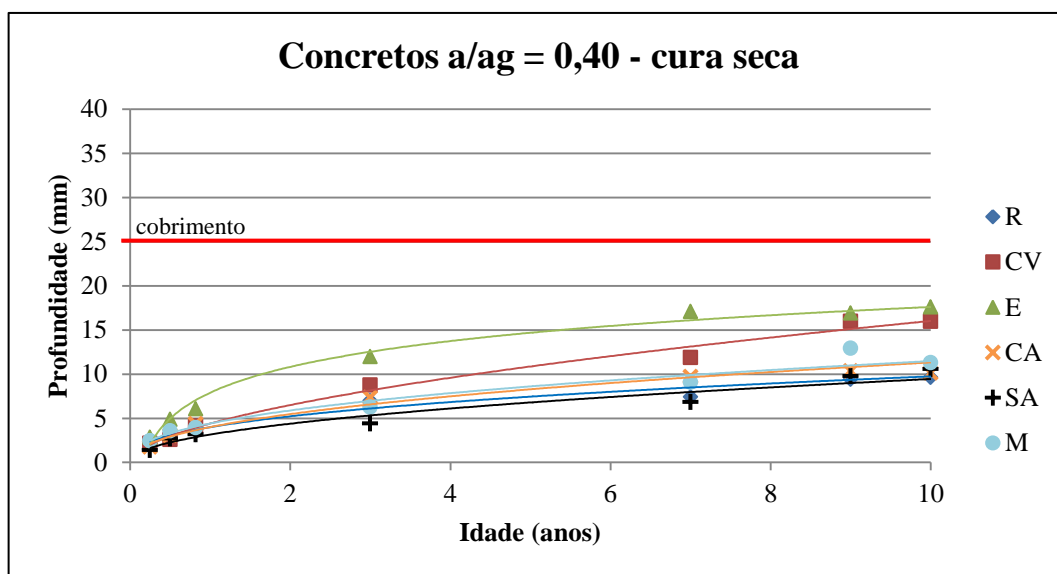


Figura 4.10 - Avanço da profundidade média de carbonatação ao longo do tempo para os concretos de relação água/aglomerante igual a 0,40 submetidos à cura em local seco.



Nas duas situações observa-se que a frente de carbonatação não ultrapassou a espessura de cobrimento, porém principalmente duas adições apresentaram avanço médio da espessura de carbonatação natural superior aos demais concretos durante todo o período de exposição, são elas: a escória de alto forno e a cinza volante. Para a cura úmida, as adições minerais que mais contribuíram para a diminuição da frente carbonatada após dez anos (tendo como base de comparação o concreto de referência), foram o metacaulim e a cinza de casca de arroz. Nos concretos submetidos à cura seca, pode-se observar que a curva da sílica ativa situa abaixo da referência todo o tempo e praticamente iguala a esta situação com 10 anos. De forma geral, excetuando-se os concretos com cinza volante e, principalmente, com escória de alto-forno, os demais concretos (com as outras adições minerais) apresentam curvas próximas ao concreto de referência.

4.3.2 Concretos com Relação a/ag Igual a 0,55

Nas Figuras 4.11 e 4.12 são apresentadas as profundidades médias da frente de carbonatação em função do tempo para os concretos de relação a/ag igual a 0,55, com diferentes adições minerais considerando os dois tipos de cura, úmida e seca.

Figura 4.11 - Avanço da profundidade média de carbonatação ao longo do tempo para os concretos de relação água/aglomerante igual a 0,55 submetidos à cura úmida

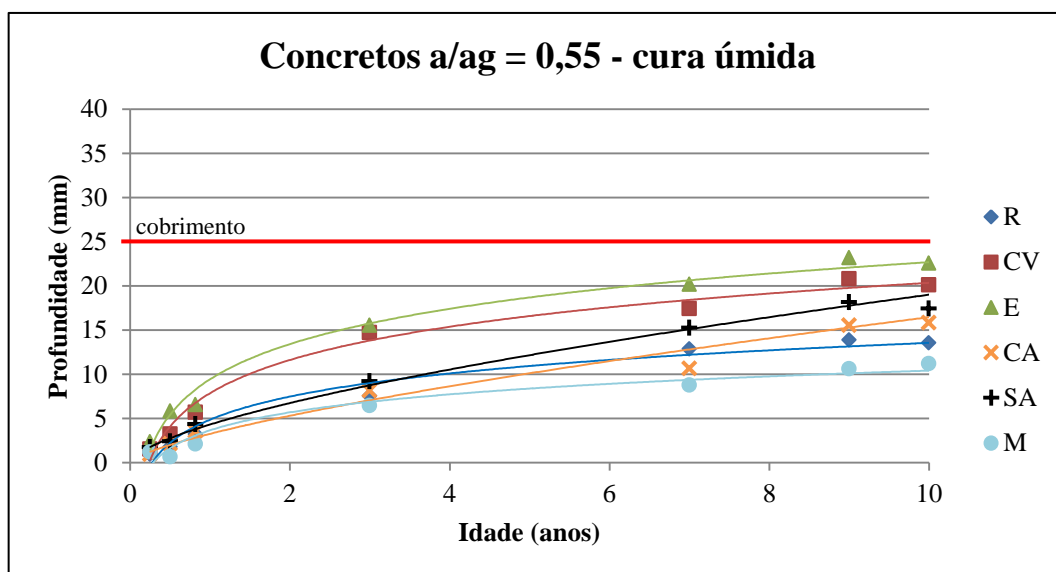
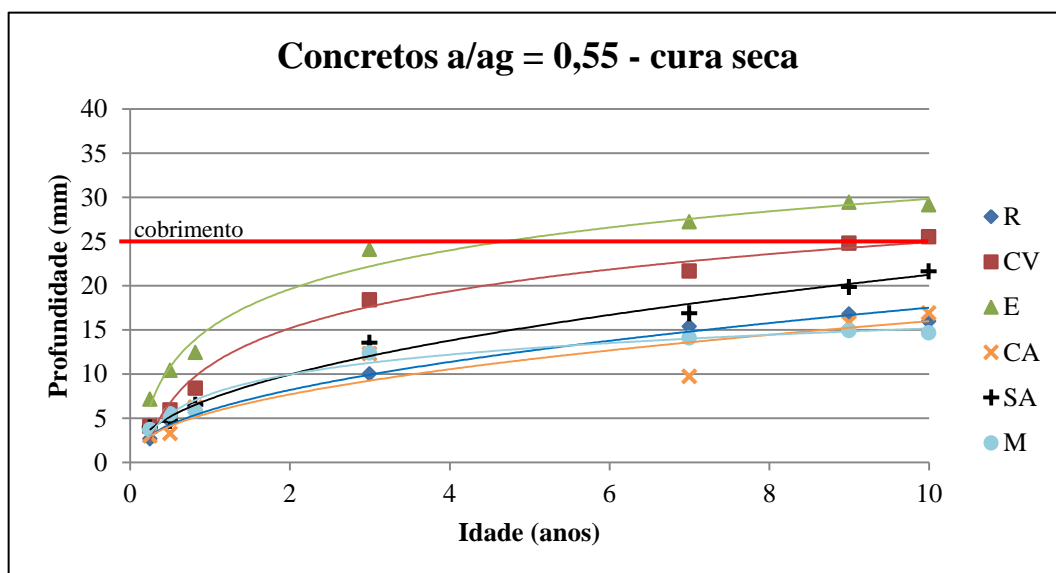


Figura 4.12 - Avanço da profundidade média de carbonatação ao longo do tempo para os concretos de relação água/aglomerante igual a 0,55 submetidos à cura em local seco



Nos concretos curados de forma úmida, observa-se que a frente de carbonatação de nenhuma das adições atinge a espessura de cobrimento; já na cura seca, a adição de escória foi a única que conduziu a frente de carbonatação para além da espessura de cobrimento, ficando o concreto com cinza volante no limiar desse cobrimento de 25 mm aos dez anos. O concreto com sílica ativa perde um pouco de performance nessa relação a/ag, mas as outras adições

(cinza de casca de arroz e metacaulim) ficam muito próximas do concreto referência, principalmente para a cura seca.

Nesta relação a/ag igual a 0,55, observa-se que para valores médios, nos concretos submetidos à cura úmida, aquele com metacaulim apresentou menores profundidades carbonatadas do que o referência em todo decorrer do tempo. Observa-se também que o concreto com adição de cinza de casca de arroz, durante mais da metade do período de exposição, igualmente ao metacaulim, apresentou menores valores de profundidade média carbonatada em comparação à situação de referência, entretanto a sua curva ultrapassa a referência próximo à idade de seis anos, permanecendo assim até a última medida realizada, aos 10 anos. Para os concretos submetidos à cura seca, observa-se que a curva de valores médios do concreto com cinza de casca de arroz ficou abaixo do referência durante todo decorrer do tempo e que o concreto com metacaulim, apesar de nos seis primeiros anos estar acima da curva de referência, a partir desta idade apresentou melhores resultados do que ele (referência) e aos dez anos até melhor do que o concreto com cinza de casca de arroz.

4.3.3 Concretos com Relação a/ag Igual a 0,70

Nas Figuras 4.13 e 4.14 são apresentadas as profundidades médias da frente de carbonatação em função do tempo para os concretos de relação a/ag igual a 0,70 com diferentes adições minerais, considerando os dois tipos de cura, úmida e seca.

Nas duas situações, têm-se que todas as adições minerais apresentaram resultados da frente de carbonatação superiores em relação ao concreto de referência. Nos concretos curados de forma úmida observa-se que a frente de carbonatação, após dez anos, ultrapassou a espessura de cobertura apenas para o concreto com adição de cinza volante e que para o processo de cura seca apenas os concretos de referência e com adição de metacaulim não ultrapassaram a espessura de cobertura.

Figura 4.13 - Avanço da profundidade média de carbonatação ao longo do tempo para os concretos de relação água/aglomerante igual a 0,70 submetidos à cura úmida

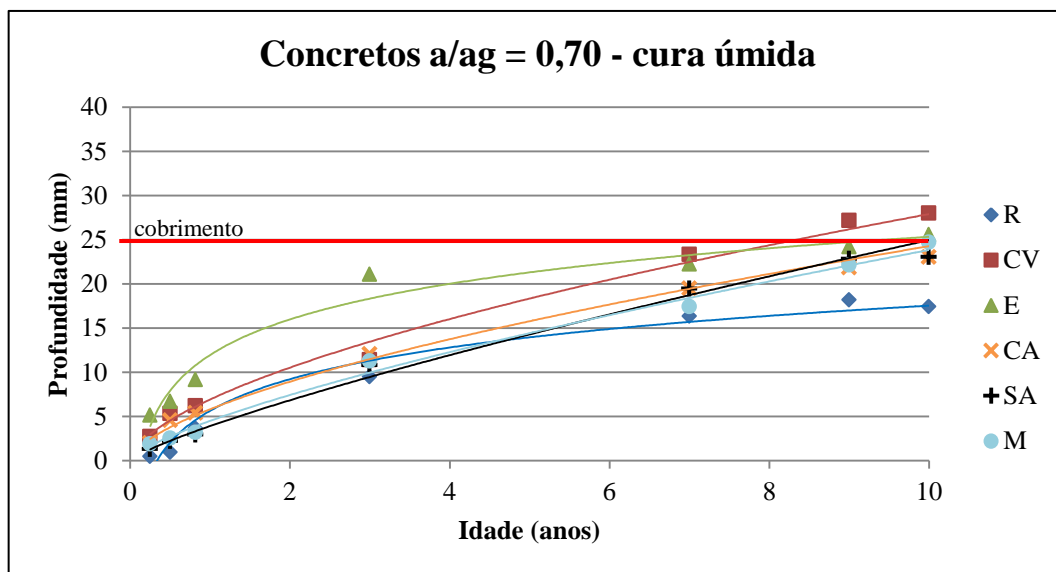
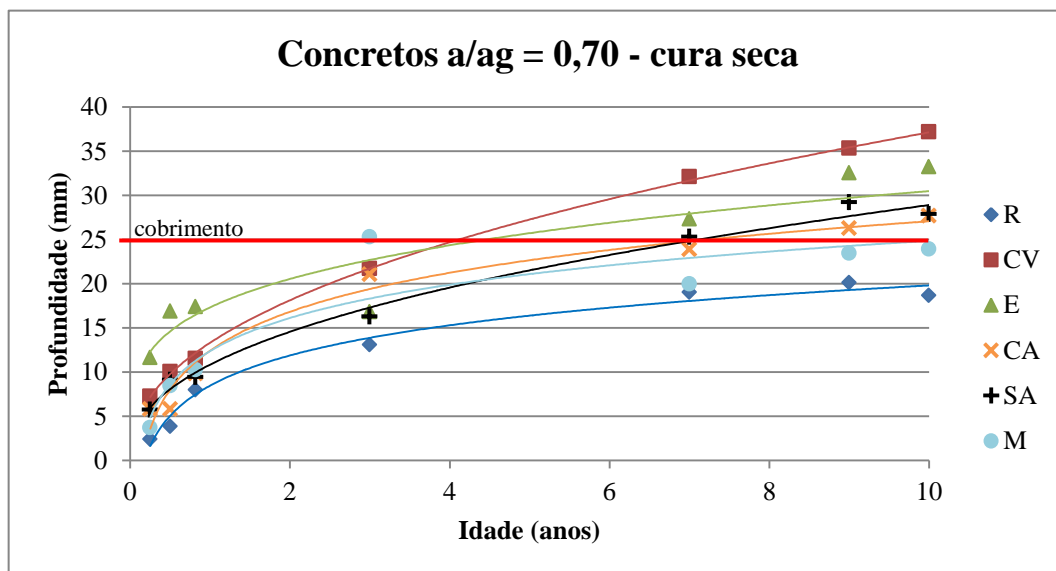


Figura 4.14 - Avanço da profundidade média de carbonatação ao longo do tempo para os concretos de relação água/aglomerante igual a 0,70 submetidos à cura em local seco



Para as duas situações de cura observa-se que as maiores profundidades carbonatadas foram apresentadas pelos concretos com adição de cinza volante e de escória de alto forno.

Diante dos diversos gráficos apresentados, pode-se observar que as adições minerais escória e cinza volante se destacam por apresentar desempenho inferior em relação a todas as situações,

notadamente quando se tem a pior condição de cura. Outro aspecto a ser considerado é que os desempenhos da cinza de casca de arroz e do metacaulim são muito próximos do referencial e, em algumas situações até superiores, notadamente nas relações a/ag mais baixas e com cura úmida. A sílica ativa mostrou resultados próximos aos das melhores adições e também ao do concreto de referência na relação a/ag igual a 0,4, porém à medida que as relações a/ag aumentam, ela perde performance e passa a apresentar resultados intermediários. Isto é indicativo de uma certa dependência dessa adição mineral, em termos de suas potencialidades no campo da durabilidade, em relação à porosidade da pasta de cimento e da estrutura interna do concreto.

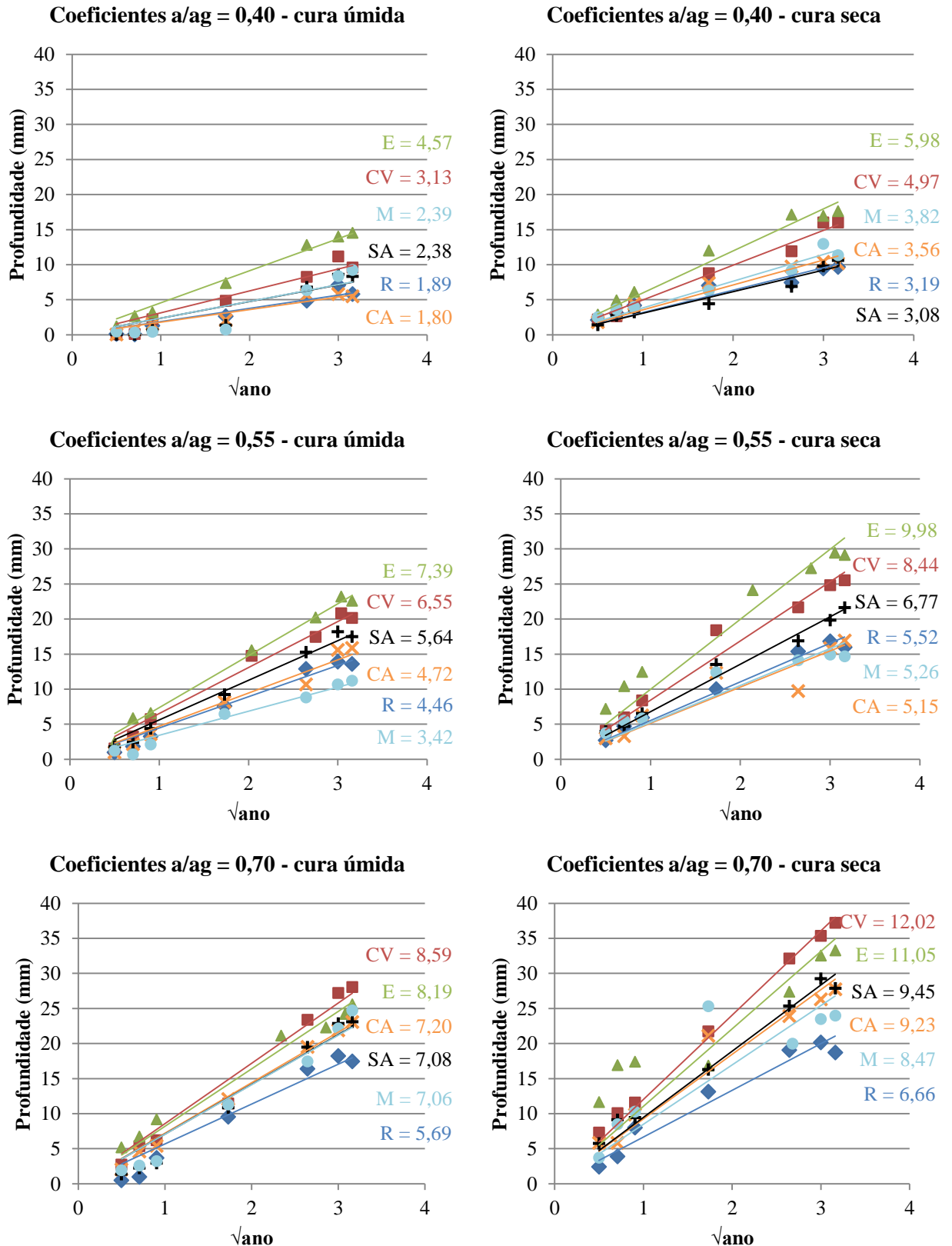
4.4 ANÁLISE DOS COEFICIENTES DE CARBONATAÇÃO NATURAL

Neste item estão apresentados os resultados dos coeficientes de carbonatação natural obtidos a partir da linearização da curva *profundidade versus tempo*. Em seguida, efetua-se uma análise estatística de variância (ANOVA), conforme o modelo descrito na Equação 3.1 do item 3.6, considerando os dados individuais de todas as idades e aqueles apenas da idade de 10 anos. Ao final, são realizadas comparações múltiplas de médias com o objetivo de se analisar o agrupamento dessas médias (considerando a variável “tipo de adição”), seja na análise global, seja separando por tipo de cura e relação a/ag.

4.4.1 Coeficientes de Carbonatação Natural

A Figura 4.15 apresenta a estimativa de média global dos coeficientes de carbonatação natural de todos os concretos para as medidas realizadas em todas as idades do estudo, considerando separadamente as três relações a/ag (0,40, 0,55 e 0,70) e também os dois tipos de cura (seca e úmida). Esses gráficos relacionam, nas abscissas, a raiz quadrada do tempo e, nas ordenadas, a espessura carbonatada. Dessa forma, tem-se a linearização dos gráficos mostrados anteriormente com função potencial, dando assim uma boa noção gráfica comparativa de desempenho, no tocante à carbonatação, dos diferentes concretos e situações da pesquisa.

Figura 4.15 - Coeficientes de carbonatação de todas as situações de concretos, contemplando todas as idades de análise, considerando separadamente as três relações a/ag (0,40; 0,55 e 0,70) e os dois tipos de cura (seca e úmida). Os valores médios de kn estão expressos em (mm/ $\sqrt{\text{ano}}$).



A Figura 4.15 possui, também, um caráter preditivo de vida útil, uma vez que permite a estimativa do tempo para a frente de carbonatação atingir determinada profundidade de cobertura. Considerando que a frente de carbonatação, ao atingir o nível das armaduras, provoca a sua despassivação, permitindo assim o início da corrosão, tem-se que o período de tempo estimado para se configurar esta situação pode ser considerado, conceitualmente, um conteúdo importante da vida útil de projeto.

O comportamento dos concretos que estão exibidos na Figura 4.15, correspondem aos valores dos coeficientes de carbonatação natural, que foram obtidos por regressão linear, a partir de valores médios das espessuras carbonatadas, em cada idade. Na Tabela 4.2 estão relacionados os valores destes coeficientes com os respectivos valores dos coeficientes de determinação (R^2) dos ajustes realizados.

Tabela 4.2 - Valores médios dos coeficientes de carbonatação natural com seus respectivos desvios padrões

Adição	R - Referência (sem adição)					
Relação a/ag	a/ag = 0,40		a/ag = 0,55		a/ag = 0,70	
Cura	úmida	seca	úmida	seca	úmida	seca
k (mm/ $\sqrt{\text{ano}}$)	1,92	3,19	4,46	5,52	5,69	6,66
R^2	0,91	0,89	0,97	0,98	0,94	0,95
Adição	E - Escória de alto forno					
Relação a/ag	a/ag = 0,40		a/ag = 0,55		a/ag = 0,70	
Cura	úmida	seca	úmida	seca	úmida	seca
k (mm/ $\sqrt{\text{ano}}$)	4,57	5,98	7,42	10,15	8,32	11,05
R^2	0,98	0,97	0,98	0,89	0,95	0,76
Adição	M - Metacaulim					
Relação a/ag	a/ag = 0,40		a/ag = 0,55		a/ag = 0,70	
Cura	úmida	seca	úmida	seca	úmida	seca
k (mm/ $\sqrt{\text{ano}}$)	2,39	3,82	3,42	5,26	7,06	8,50
R^2	0,79	0,95	0,96	0,86	0,95	0,96
Adição	SA - Sílica ativa					
Relação a/ag	a/ag = 0,40		a/ag = 0,55		a/ag = 0,70	
Cura	úmida	seca	úmida	seca	úmida	Seca
k (mm/ $\sqrt{\text{ano}}$)	2,44	3,08	5,64	6,77	7,08	9,45
R^2	0,78	0,95	0,98	0,98	0,95	0,98
Adição	CV - Cinza volante					
Relação a/ag	a/ag = 0,40		a/ag = 0,55		a/ag = 0,70	
Cura	úmida	seca	úmida	seca	úmida	Seca
k (mm/ $\sqrt{\text{ano}}$)	3,13	4,97	6,59	8,44	8,59	12,02
R^2	0,91	0,98	0,99	0,97	0,97	0,99
Adição	CA - Cinza de casca de arroz					
Relação a/ag	a/ag = 0,40		a/ag = 0,55		a/ag = 0,70	
Cura	úmida	seca	úmida	seca	úmida	seca
k (mm/ $\sqrt{\text{ano}}$)	1,80	3,56	4,72	5,15	7,20	9,23
R^2	0,91	0,94	0,96	0,85	0,99	0,94

De forma geral, os coeficientes de determinação (R^2) das linearizações apresentados na Tabela 4.2 são representativos, pois ficaram todos acima de 0,78, denotando assim bons ajustes das retas em relação a função linear.

4.4.2 Análises de variância dos dados de coeficientes de carbonatação

A seguir são apresentadas as análises de variância considerando os coeficientes obtidos para todas as idades e também os coeficientes considerando apenas a idade de 10 anos.

4.4.2.1 Coeficientes considerando todas as idades (medidas individuais)

Este método de análise e abordagem da carbonatação se pauta em procedimento adotado por Castro (2003), no qual se aplica o modelo de Tuutti (1982) ($k_n = e/\sqrt{t}$) para cada dado individual de espessura carbonatada, em cada idade.

Os coeficientes de carbonatação natural (k_n) foram, portanto, calculados a partir das medidas individuais, a fim de se obter um maior número de valores para uma mesma frente de carbonatação, permitindo dessa forma a realização de estudo estatístico por meio de análise de variância. Este procedimento representou um artifício para que se pudesse usar o modelo estatístico e assim proceder às análises de verificação da influência das variáveis e de suas interações, já que os coeficientes obtidos das regressões (como no subitem 4.4.1) são valores globais, que representam unicamente cada situação (desta forma não se consegue alimentar adequadamente o modelo fatorial de análise de variâncias, pois não se tem um número suficiente de graus de liberdade, dificultando assim a análise estatística). De toda maneira, no subitem 4.4.3, apresentam-se os valores médios do coeficiente de carbonatação obtidos pelas regressões (como em 4.4.1) e pelos valores individuais (considerando todas as idades – 4.4.2.1 e apenas a idade de 10 anos – 4.4.2.2), bem como as respectivas comparações múltiplas de média, que ressaltam não haver diferenças significativas entre esses diferentes métodos de análise. Ou seja, esta análise a partir de dados individuais na realidade converge para os resultados clássicos obtidos das regressões lineares, baseados nas leis de Fick (modelo de Tuutti), ao mesmo tempo que permite verificar estatisticamente o efeito das variáveis da pesquisa (fatores) e de suas interações nos valores do coeficiente de carbonatação natural.

Como o coeficiente de carbonatação natural está sendo calculado considerando a idade a partir da moldagem do corpo de prova, adota-se nula a carbonatação no instante zero. Assim, a parcela de carbonatação inicial não aparece na equação utilizada para se calcular o coeficiente de cada situação de acordo com a idade da medida da profundidade carbonatada.

Na Tabela 4.3 são apresentados os resultados obtidos na ANOVA para todos os concretos considerando as medidas realizadas em todas as idades, onde os valores de “F calculados” (F_{cal}) foram comparados com os valores de “F tabelados” (F_{tab}) para um nível de significância de 5%. O valor de F_{tab} é igual a $F_{\alpha=0,05}(\nu 1, \nu 2)$, obtido utilizando o *software Microsoft Excel*, que se baseia na tabela de Fisher sendo $\nu 1$ e $\nu 2$ os graus de liberdade do efeito avaliado e do resíduo, respectivamente.

Esta análise mostrou que o modelo fatorial adotado é significativo, uma vez que o valor F_{cal} é maior do que o F_{tab} ($99,47 > 1,17$). Além disso, o valor do coeficiente de determinação (R^2_{mod}) foi de 0,94, o que significa que 94% da variação total dos dados é explicada por este modelo.

A ANOVA mostrou que os efeitos individuais das variáveis resultaram em estatisticamente significativos, pois os valores de F_{cal} são maiores do que os valores de F_{tab} . Examinando os valores de F_{cal} , pode-se constatar que as variáveis cura e relação água/aglomerante foram os fatores mais influentes na velocidade de carbonatação, seguidas pelas variáveis tipo de adição e, com menor influência (mas ainda significativa), a idade.

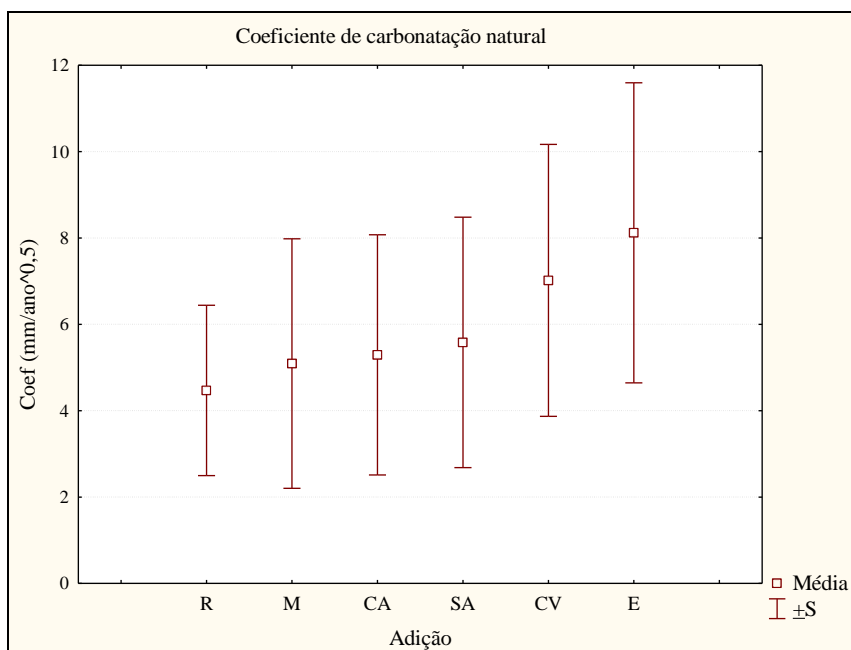
Tabela 4.3 - Resultados da análise de variância realizada com os dados individuais de coeficientes de carbonatação natural para todos os concretos, considerando todas as idades

Efeito	SQ	GL	MQ	F _{cal}	F _{tab}	Resultado
Modelo	17000,71	251	67,73	99,47	1,17	Significativo
Erro (resíduo)	1079,26	1585	0,68			
Total	18079,97	1836				
Adição	3018,87	5	603,77	886,70	2,22	Significativo
Relação a/ag	6182,85	2	3091,42	4540,07	3,00	Significativo
Cura	3161,72	1	3161,72	4643,31	3,85	Significativo
Idade (ano)	100,70	6	16,78	24,65	2,10	Significativo
Adição x Rel. a/ag	537,66	10	53,77	78,96	1,84	Significativo
Adição x Cura	155,57	5	31,11	45,70	2,22	Significativo
Rel. a/ag x Cura	226,00	2	113,00	165,95	3,00	Significativo
Adição x Idade	532,60	30	17,75	26,07	1,47	Significativo
Rel. a/ag x Idade	126,29	12	10,52	15,46	1,76	Significativo
Cura x Idade	966,03	6	161,01	236,45	2,10	Significativo
Adição x Rel. a/ag x Cura	133,89	10	13,39	19,66	1,84	Significativo
Adição x Rel. a/ag x Idade	636,77	60	10,61	15,59	1,33	Significativo
Adição x Cura x Idade	206,47	30	6,88	10,11	1,47	Significativo
Rel. a/ag x Cura x Idade	119,96	12	10,00	14,68	1,76	Significativo
Adição x Rel. a/ag x Cura x Idade	234,84	60	3,91	5,75	1,33	Significativo
Erro (resíduo)	1079,26	1585	0,68			
$R_{\text{mod}} = 0,97$ e $R^2_{\text{mod}} = 0,94$						
Onde: SQ = soma dos quadrados; GL = grau de liberdade; MQ = média dos quadrados; F = parâmetro de Fisher para o teste de significância dos efeitos; $R^2_{\text{mod}} = \text{coeficiente de determinação do modelo } (1 - \text{SQ}_{\text{erro}}/\text{SQ}_{\text{total}})$; $R_{\text{mod}} = \text{coeficiente de correlação do modelo.}$						

Em relação às interações dos fatores, pode-se observar que também resultaram significativas. Dentre as interações analisadas, pode-se dizer que o efeito da cura interferiu principalmente nos resultados de coeficientes de carbonatação em função do tempo (idade) e também da relação a/ag do concretos analisados. Isto era esperado haja vista que o tempo é determinante para que o fenômeno de carbonatação ocorra e que a relação a/ag afeta diretamente a porosidade dos concretos analisados. Há, portanto, sinergia entre as variáveis do estudo, o que significa que o efeito que uma variável isoladamente exerce sobre a carbonatação é influenciado ou alterado pelas outras variáveis do estudo. Por exemplo, observando a interação “tipo de cura” *versus* “idade de exposição”, que foi a mais significativa das interações, pode-se dizer que o efeito do tipo de cura no desempenho dos concretos quanto à carbonatação é influenciado pela idade de exposição e vice-versa.

A Figura 4.16 apresenta a estimativa de média global dos coeficientes de carbonatação natural de todos os concretos, considerando todas as três relações a/ag (0,40, 0,55 e 0,70) e também os dois tipos de curas (seca e úmida).

Figura 4.16 - Estimativa de média dos coeficientes de carbonatação natural, para cada tipo adição mineral empregada na produção dos concretos



Conforme comentado anteriormente, pode-se afirmar que o concreto com escória de alto forno (E) apresentou o pior desempenho em relação ao avanço da carbonatação natural, apresentando um coeficiente de carbonatação natural médio igual a 8,12 mm/√ano, sendo este o valor da média global.

Os concretos com adição de cinza de casca de arroz (CA) e de sílica ativa (SA) apresentaram desempenhos intermediários, com coeficientes de carbonatação iguais a 5,29 mm/√ano e 5,58 mm/√ano, respectivamente.

Nesta análise global dos coeficientes de carbonatação natural, o concreto de referência (R) apresentou isoladamente o melhor desempenho, com coeficiente igual a 4,47 mm/√ano, demonstrando que a reserva alcalina ainda é o efeito preponderante em termos de combate à carbonatação, mas o refinamento da microestrutura proporcionado pelas adições (efeito físico) se aproxima desse aspecto químico, como se tem, por exemplo, nos concretos com metacaulim.

Quanto à influência da relação a/ag, obteve-se que os valores também apresentaram diferenças significativas, tendo-se, pelo teste de Duncan, a formação de três grupos isolados, um para cada relação a/ag. Os melhores desempenhos foram verificados nos concretos com relação a/ag igual a 0,40, seguidos dos concretos com relação a/ag 0,55 e 0,70, respectivamente, sendo este um comportamento esperado.

4.4.2.2 Coeficientes considerando apenas a idade de 10 anos

Esta análise seguiu a mesma abordagem realizada anteriormente (subitem 4.4.2.1), porém foram consideradas apenas as medidas realizadas para a idade de 10 anos, ou seja, a idade mais avançada do estudo até o momento. Esta análise foi feita para verificar a representatividade dos resultados apenas do último ano em relação a todo o conjunto de dados, que considera as medidas executadas em todas as idades do estudo. Na Tabela 4.4 são apresentados os resultados obtidos na ANOVA para todos os concretos considerando apenas as medidas realizadas para a idade de dez anos.

Tabela 4.4 - Resultados da análise de variância realizada com os dados individuais de coeficientes de carbonatação natural para todos os concretos, considerando apenas a idade de dez anos

Efeito	SQ	GL	MQ	F _{cal}	F _{tab}	Resultado
Modelo	2585,75	35	73,88	154,75	1,45	Significativo
Erro (resíduo)	188,10	394	0,48			
Total	2773,85	429				
Adição	577,99	5	115,60	242,14	2,24	Significativo
Relação a/ag	1625,32	2	812,66	1702,26	3,02	Significativo
Cura	178,54	1	178,54	373,98	3,87	Significativo
Adição x Rel. a/ag	131,42	10	13,14	27,53	1,85	Significativo
Adição x Cura	38,76	5	7,75	16,24	2,24	Significativo
Rel. a/ag x Cura	2,22	2	1,11	2,32	3,02	Não significativo
Adição x Rel. a/ag x Cura	30,29	10	3,03	6,35	1,85	Significativo
Erro (resíduo)	188,10	394	0,48			
$R_{\text{mod}} = 0,97$ e $R^2_{\text{mod}} = 0,93$						
Onde: SQ = soma dos quadrados; GL = grau de liberdade; MQ = média dos quadrados; F = parâmetro de Fisher para o teste de significância dos efeitos; R^2_{mod} = coeficiente de determinação do modelo ($1 - \text{SQ}_{\text{erro}}/\text{SQ}_{\text{total}}$); R_{mod} = coeficiente de correlação do modelo.						

Esta análise mostrou que o modelo fatorial adotado é significativo, uma vez que o valor F_{cal} é maior do que o F_{tab} (154,75 > 1,45). Além disso, o valor do coeficiente de determinação

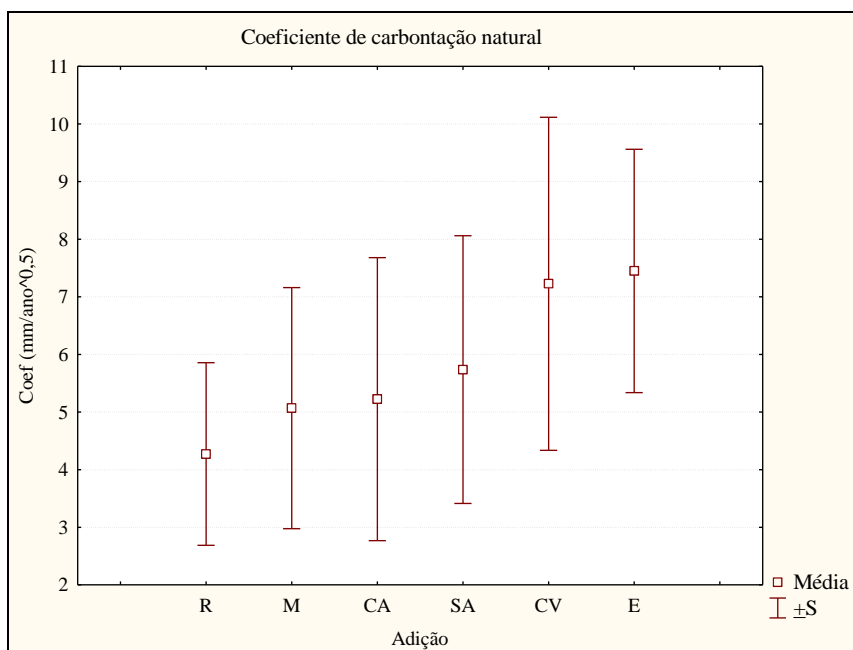
(R^2_{mod}) foi de 0,93, o que significa que 93% da variação total dos dados é explicada por este modelo.

Semelhante à análise feita para os dados considerando todas as idades, esta ANOVA mostrou que os efeitos individuais das variáveis resultaram em estatisticamente significativos, pois os valores de F_{cal} são maiores do que os valores de F_{tab} . Examinando os valores de F_{cal} , pode-se constatar que a variável relação água/aglomerante foi o fator mais influente na velocidade de carbonatação, seguidas pelas variáveis cura e tipo de adição que apresentaram valores menores (porém significativos).

Em relação às interações dos fatores, pode-se observar que elas também resultaram significativas, com exceção de apenas a interação entre relação a/ag e cura, que resultou em estatisticamente não significativa. Dentre as interações analisadas, pode-se dizer que as adições minerais interferiram estatisticamente nos resultados dos coeficientes de carbonatação, contudo essa influência é afetada pelas outras duas variáveis: relação a/ag e cura dos concretos analisados. O fato da interação “relação a/ag x cura” ter apresentado resultado não significativo, significa dizer que as duas variáveis não apresentam sinergia entre si, de modo que o efeito que a relação a/ag exerce sobre os resultados de coeficiente de carbonatação natural não sofre influência quanto ao tipo de cura empregado, sendo o pensamento inverso também verdadeiro, ou seja, a influência do tipo de cura no processo de carbonatação não é afetado pela relação a/ag.

A Figura 4.17 apresenta a estimativa de média global dos coeficientes de carbonatação natural de todos os concretos para apenas as medidas realizadas aos dez anos, considerando todas as três relações a/ag (0,40, 0,55 e 0,70) e também os dois tipos de curas (seca e úmida).

Figura 4.17 - Estimativa de média dos coeficientes de carbonatação natural, para cada tipo adição mineral empregada na produção dos concretos



Pela análise da Figura 4.17, observa-se que os concretos com adição de cinza volante (V) e com adição de escória de alto-forno (E) evidenciaram os piores desempenhos, apresentando, respectivamente, coeficientes de carbonatação iguais a 7,23 mm/ $\sqrt{\text{ano}}$ e 7,44 mm/ $\sqrt{\text{ano}}$, considerando a média global.

Os resultados ratificam, como visto nas análises anteriores, o desempenho apenas intermediário dos concretos com sílica ativa (SA), cujo coeficiente de carbonatação médio global é igual a 5,74 mm/ $\sqrt{\text{ano}}$. Na sequência e estatisticamente pertencendo a um mesmo grupo, aparecem os concretos com cinza de casca de arroz (CA) e com metacaulim (M), coeficientes de carbonatação iguais a 5,22 mm/ $\sqrt{\text{ano}}$ e 5,07 mm/ $\sqrt{\text{ano}}$, respectivamente. Por fim, têm-se os concretos de referência com o melhor desempenho global, isoladamente se situando no grupo de menor coeficiente de carbonatação (igual a 4,27 mm/ $\sqrt{\text{ano}}$).

Desta análise global comparativa entre as diferentes adições minerais, percebe-se uma inversão de comportamento em relação ao estudo acelerado conduzido por Castro (2003), em que o metacaulim e a sílica ativa tiveram performance superior inclusive à situação de referência. No estudo natural, o desempenho dos concretos com sílica ativa cai bastante e os concretos de referência suplantam o desempenho daqueles constituídos por metacaulim.

Quanto à influência da relação a/ag , observa-se que igualmente houve um efeito significativo desta variável sobre a carbonatação e que, também, formaram-se três grupos distintos, para as três relações a/ag . Os melhores desempenhos foram verificados nos concretos com relação a/ag igual a 0,40, seguidos dos concretos com relação a/ag 0,55 e 0,70, respectivamente, sendo este um comportamento esperado.

Em relação à comparação das análises feitas, considerando todas as idades e apenas a de dez anos, pode-se dizer que esta última apresentou resultados bastante parecidos com a análise de caráter mais global. A ordem crescente dos valores dos coeficientes de carbonatação foi a mesma apresentada nas duas análises. Outro fato a se levar em consideração é que os valores dos coeficientes para as duas análises foram muito similares, e apenas os concretos com escória de alto forno (E) apresentaram maior diferença em relação aos resultados das duas análises, todavia não tão pronunciada.

4.4.3 Comparação múltipla de médias

Após a realização da análise de variância (ANOVA) para os coeficientes de carbonatação natural utilizando os valores individuais considerando todas as idades de medidas e as medidas para somente os dez anos, fez-se a comparação múltipla de médias dos coeficientes efetuada pelo método de Duncan, de forma a verificar o desempenho proporcionado pelas adições minerais aos concretos estudados, obtidos por meio das seguintes situações: valores médios das profundidades por regressão linear, valores individuais considerando todas as idades e valores individuais considerando apenas as medidas feitas aos dez anos, a fim de comparar os resultados dos diferentes métodos adotados.

Na Figura 4.18 são apresentadas as três comparações múltiplas de médias citadas anteriormente (onde, abaixo dos códigos, são exibidos os valores médios globais dos coeficientes de carbonatação natural). A partir dela observa-se que ao se fazer a utilização do método de cálculo por meio dos valores individuais, não houve diferença na sequência de grandeza dos coeficientes e que estes possuem valores muito próximos, independente do método de análise. Constatou-se, apenas, pequenas mudanças no agrupamento das adições.

Figura 4.18 - Disposição dos grupos definidos pela comparação múltipla de médias, com os fatores ordenados de forma crescente quanto às médias globais dos coeficientes de carbonatação natural dos concretos para as situações (a) dos valores médios por regressão linear, (b) dos valores individuais considerando todas as idades e (c) dos valores individuais para a idade de dez anos

(a)					
\overline{R}	\overline{M}	\overline{CA}	\overline{SA}	\overline{CV}	\overline{E}
4,6	5,1	5,3	5,7	7,3	7,9
(b)					
\overline{R}	\overline{M}	\overline{CA}	\overline{SA}	\overline{CV}	\overline{E}
4,5	5,1	5,3	5,6	7,0	8,1
(c)					
\overline{R}	\overline{M}	\overline{CA}	\overline{SA}	\overline{CV}	\overline{E}
4,3	5,1	5,2	5,7	7,2	7,4

Para as três comparações múltiplas de médias, a sequência da esquerda para a direita mostra o sentido decrescente de performance, tendo a situação de referência mostrado ser sempre o melhor desempenho global, seguida dos concretos de metacaulim, cinza de casca de arroz, sílica ativa, cinza volante e escória de alto-forno. Os resultados obtidos pela aplicação do modelo de Tuutti em dados individuais da espessura carbonatada (situações b e c da Figura 4.18) mostram valores médios que convergem para os valores obtidos das regressões lineares, bem como descrevem a mesma sequência de desempenho das adições minerais. Os resultados são ainda mais próximos quando se tem um volume maior de dados (caso da situação b – envolvendo todas as idades), o que prova que a sistemática de análise por meio de “modelos individuais” converge para o modelo de Tuutti, cujo coeficiente de carbonatação é um produto de resultados (médios ou individuais) da espessura carbonatada com a raiz quadrada do tempo.

4.4.4 Análise dos Coeficientes Tratando as Variáveis Separadamente

Considerando que a utilização de valores individuais não modificam os resultados dos coeficientes de carbonatação natural, essa análise dos coeficientes considerando as variáveis separadamente foi feita com base nos valores individuais.

Foi realizada a comparação múltipla de médias para o fator tipo de adição, para cada valor de relação a/ag e também para cada tipo de cura, visando verificar, de forma específica e segmentada, o desempenho proporcionado pelas adições minerais aos concretos estudados. Essa comparação foi efetuada pelo método de Duncan, para um nível de significância de 5%, e os resultados estão apresentados na Figura 4.19, a seguir (em que, abaixo dos códigos, são exibidos os valores médios globais dos coeficientes de carbonatação natural, em $mm/\sqrt{\text{ano}}$).

Figura 4.19 - Disposição dos grupos definidos pela comparação múltipla de médias, com os fatores ordenados de forma crescente quanto às médias globais dos coeficientes de carbonatação natural dos concretos

Coeficientes $a/ag = 0,40$ - cura úmida						Coeficientes $a/ag = 0,40$ - cura seca					
\overline{CA}	\overline{R}	\overline{M}	\overline{SA}	\overline{CV}	\overline{E}	\overline{SA}	\overline{R}	\overline{CA}	\overline{M}	\overline{CV}	\overline{E}
1,61	1,66	1,88	1,93	2,78	4,35	3,05	3,42	3,71	3,94	4,86	6,15
Coeficientes $a/ag = 0,55$ - cura úmida						Coeficientes $a/ag = 0,55$ - cura seca					
\overline{M}	\overline{R}	\overline{CA}	\overline{SA}	\overline{CV}	\overline{E}	\overline{CA}	\overline{R}	\overline{M}	\overline{SA}	\overline{CV}	\overline{E}
3,25	4,21	4,46	5,38	6,30	7,34	5,39	5,64	5,72	6,93	8,67	10,82
Coeficientes $a/ag = 0,70$ - cura úmida						Coeficientes $a/ag = 0,70$ - cura seca					
\overline{R}	\overline{SA}	\overline{M}	\overline{CA}	\overline{CV}	\overline{E}	\overline{R}	\overline{M}	\overline{CA}	\overline{SA}	\overline{CV}	\overline{E}
5,18	6,46	6,53	6,93	8,09	8,55	6,70	9,20	9,65	9,75	12,24	12,38

Para a relação a/ag igual a 0,40, cura úmida, observa-se que houve a formação de quatro grupos distintos, nos quais os concretos com cinza de casca de arroz (CA) e de referência (R), bem como os concretos com metacaulim (M) e com sílica ativa (SA), apresentaram, respectivamente, os dois blocos de resultados de melhor desempenho e, dentro de cada um desses dois grupos, não houve diferenças significativas. Já os concretos com cinza volante (CV) e com escória (E) apresentaram diferenças significativas dos demais, ficando estes em dois grupos separados e com os maiores valores de k_n . Ainda nesta situação, ressalta-se que os concretos com cinza de casca de arroz (CA) e de referência (R) foram os que apresentaram os melhores resultados para os coeficientes de carbonatação natural, com os valores de $1,61 \text{ mm}/\sqrt{\text{ano}}$ e $1,66 \text{ mm}/\sqrt{\text{ano}}$, respectivamente. Em contrapartida, o concreto com escória (E) apresentou o maior coeficiente de carbonatação natural, igual a $4,35 \text{ mm}/\sqrt{\text{ano}}$.

Com a relação a/ag 0,40, porém com cura seca, observa-se a formação de cinco grupos de resultados, nos quais os concretos com cinza de casca de arroz (CA) e com metacaulim (M) não apresentaram diferenças significativas entre si, ficando em um mesmo grupo, separado dos demais concretos que ficaram isolados, cada um formando um grupo. Esses dois concretos apresentaram desempenho intermediário em relação ao avanço da frente de carbonatação, com valores de coeficientes de 3,71 mm/ $\sqrt{\text{ano}}$ e 3,94 mm/ $\sqrt{\text{ano}}$, respectivamente. Para esta situação o melhor resultado foi para o concreto com sílica ativa (SA) com coeficiente de 3,05 mm/ $\sqrt{\text{ano}}$ e o pior resultado foi apresentado pelo concreto com escória, com coeficiente igual a 6,15 mm/ $\sqrt{\text{ano}}$. Cabe salientar-se aqui, a boa performance que a sílica ativa teve em um sistema coeso e compacto, já de partida. Nesta situação, mesmo com a cura deficiente, o concreto com essa adição mineral se destacou dos demais, tendo a sílica ativa, muito provavelmente, contribuído para a retenção de água do concreto de forma geral, atuando assim como agente de cura e como um agente redutor de retração. Quanto à cinza de casca de arroz, percebe-se que ela perdeu desempenho (na análise comparativa com as outras adições) consoante a queda de qualidade da cura, mas esta tendência não se confirma nas relações a/ag mais altas.

Analisando os concretos com relação a/ag 0,55, cura úmida, observa-se a formação de cinco grupos de resultados, nos quais houve apenas um agrupamento de dois concretos, a saber: referência (R) e o concreto com cinza de casca de arroz (CA), que apresentaram resultados menores apenas do que o concreto com metacaulim (M), que por sua vez foi o que apresentou o melhor desempenho entre todas as adições, com k_n igual a 3,25 mm/ $\sqrt{\text{ano}}$. O pior resultado foi observado para o concreto com escória de alto forno (E), cujo coeficiente de carbonatação médio foi igual a 7,34 mm/ $\sqrt{\text{ano}}$.

Para a relação a/ag 0,55, cura seca, houve a formação de quatro grupos, nos quais o grupo que apresentou o melhor desempenho é formado por três concretos (que não apresentaram diferenças significativas entre si), sendo eles: concretos com cinza de casca de arroz (CA), de referência (R) e com metacaulim (M), com valores de coeficientes iguais a 5,39 mm/ $\sqrt{\text{ano}}$, 5,64 mm/ $\sqrt{\text{ano}}$ e 5,72 mm/ $\sqrt{\text{ano}}$, respectivamente. Neste caso, o concreto com escória (E) foi também o que apresentou o pior desempenho em relação ao avanço da frente de carbonatação, com um valor médio de coeficiente carbonatação igual a 10,82 mm/ $\sqrt{\text{ano}}$. Tiveram, portanto, destaque maior nesta relação a/ag de 0,55, os concretos com metacaulim, seguidos daqueles

constituídos por cinza de casca de arroz e pelos concretos de referência. Os concretos com sílica ativa tiveram comportamento apenas intermediário.

Os concretos de relação a/ag 0,70, submetidos à cura úmida, apresentaram cinco grupos distintos de resultados, nos quais o concreto referência foi o que apresentou melhor resultado com coeficiente de $5,18 \text{ mm}/\sqrt{\text{ano}}$, ficando com valor menor do que outras situações com relações a/ag menores, tais como todas as situações com a/ag 0,55 e cura seca, três situações com a/ag 0,55 e cura úmida, e ainda a situação com escória (E) de relação a/ag 0,40 e cura seca. Para esta situação, o pior desempenho foi apresentado pelo concreto com escória (E), com coeficiente igual a $8,55 \text{ mm}/\sqrt{\text{ano}}$.

Na situação dos concretos de relação a/ag 0,70 submetidos à cura seca, observa-se que esta foi a que apresentou os piores resultados para cada uma das adições empregadas. Nesta situação, observa-se a formação de quatro grupos distintos de resultados. O concreto de referência (R) foi o que apresentou o melhor resultado de coeficiente de carbonatação, $6,70 \text{ mm}/\sqrt{\text{ano}}$. Já o concreto com escória (E) juntamente com o concreto com cinza volante (CV), que não apresentaram diferenças significativas entre si, formaram o grupo que apresentou o pior desempenho em relação ao avanço da frente de carbonatação, com coeficientes iguais a $12,38 \text{ mm}/\sqrt{\text{ano}}$ e $12,24 \text{ mm}/\sqrt{\text{ano}}$, respectivamente. Nesta relação a/ag 0,7, que possui uma estrutura interna mais porosa e permeável, é perceptível o destaque do concreto de referência, haja vista que a ação física de refinamento e interceptação de poros, bem exercida pelas adições pozolânicas, passa a não ter eficiência em sistemas com alta porosidade. Neste caso, o mecanismo de combate ao CO_2 via “reserva alcalina” demonstra ser preponderante em relação ao efeito físico das pozolanas.

Para os concretos com adições e mesmo para a situação de referência, observa-se que os coeficientes de carbonatação aumentaram significativamente em função do aumento da relação a/ag , fato este que comprova que os concretos com relação a/ag maiores estão, de fato, muito mais suscetíveis à carbonatação prematura.

Já em relação à execução de cura úmida, observa-se que a sua adoção é de extrema importância, haja vista que o concreto com a mesma adição mineral carbonata bem mais rapidamente quando ela não é realizada. Este fato é comprovado pelo aumento significativo dos coeficientes de carbonatação dos concretos submetidos à cura seca em relação aos

concretos submetidos à cura úmida, principalmente nos caso das adições de escória e cinza volante.

De forma geral, os concretos de referência (R) foram os que apresentaram os melhores resultados, tendo em vista que ficou sempre entre os dois melhores desempenhos para todas as situações; contudo, o metacaulim (principalmente) e a cinza de casca de arroz apresentaram resultados gerais muito bons. Por outro lado, os concretos com cinza volante (CV) e com escória de alto-forno (E) foram os que apresentaram os piores desempenhos, tendo esta última adição resultado sempre nos maiores valores de coeficientes de carbonatação e a sílica ativa (SA), em geral, mostra um comportamento intermediário.

É preciso salientar, como comentário final, de todas essas análises anteriores em que se comparam desempenhos de concretos contendo adições minerais, que não há aqui a pretensão de se estabelecer uma generalização cabal de comportamentos ou de sugerir um *ranking* ou classificação de desempenho para as adições, pois as análises e conclusões se atêm aos materiais efetivamente empregados, com suas características e propriedades. Fica então a contribuição ao meio científico, com a ressalva de que eventuais inversões ou mudanças de comportamento podem existir em função dos materiais empregados e das características do ambiente.

4.5 CORRELAÇÃO ENTRE OS COEFICIENTES DE CARBONATAÇÃO ACELERADO E NATURAL

Na pesquisa de Castro (2003), a concentração de CO₂ utilizada no ambiente interno da câmara de seu programa experimental foi em torno de 5,5%, enquanto a concentração de CO₂ do presente trabalho, medida no local de exposição natural dos corpos de prova, foi de aproximadamente 0,034%. Segundo Neville (1982), esta concentração representa bem um meio rural e que essa concentração pode variar de acordo com o meio, como por exemplo, 0,10% para ambiente de laboratório e 0,30% (podendo chegar a 1%) em ambientes de grandes cidades.

Na Tabela 4.5, a seguir, constam os coeficientes de carbonatação natural médios globais (k_n) obtidos do presente trabalho, a partir de medidas realizadas durante cerca de 10 anos de exposição. Também constam nessa tabela, os valores médios dos coeficientes de carbonatação

acelerada (k_c), a partir do estudo de Castro (2003). Os valores de k_n e k_c estão expressos em $\text{mm}/\sqrt{\text{ano}}$.

Tabela 4.5 - Valores médios para os coeficientes de carbonatação acelerada e natural

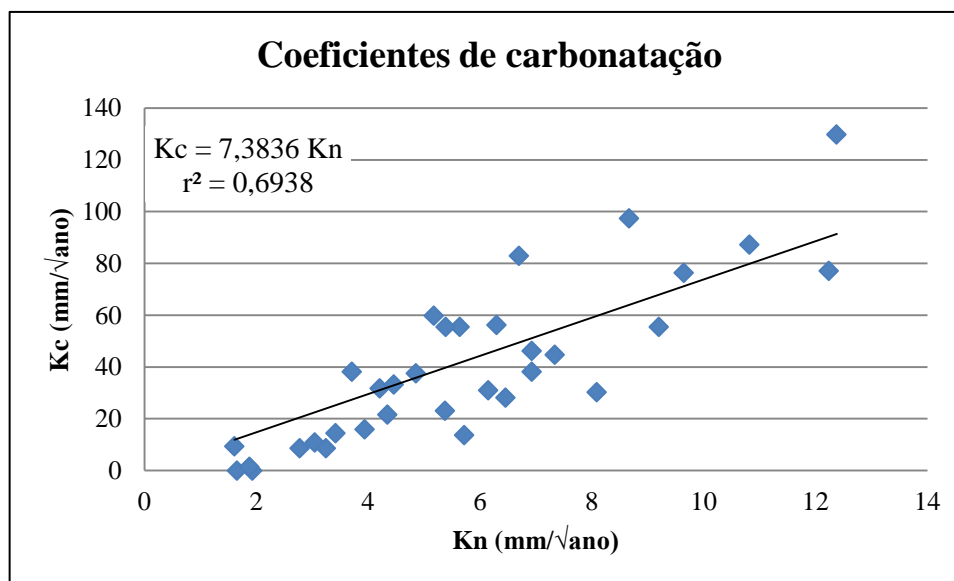
Concreto			Coeficientes de Carbonatação		Concreto			Coeficientes de Carbonatação	
Adição Mineral	Relação a/ag	Cura	k_C (mm/ $\sqrt{\text{ano}}$)	k_N (mm/ $\sqrt{\text{ano}}$)	Adição Mineral	Relação a/ag	Cura	k_C (mm/ $\sqrt{\text{ano}}$)	k_N (mm/ $\sqrt{\text{ano}}$)
REFERÊNCIA (SEM ADIÇÃO)	a/ag 0,40	C0	14,42	3,42	CINZA DE CASCA DE ARROZ	a/ag 0,40	C0	38,21	3,71
		CH	0,00	1,66			CH	9,37	1,61
	a/ag 0,55	C0	55,52	5,64		a/ag 0,55	C0	55,52	5,39
		CH	31,72	4,21			CH	33,17	4,46
	a/ag 0,70	C0	82,92	6,70		a/ag 0,70	C0	76,43	9,65
		CH	59,84	5,18			CH	38,21	6,93
SÍLICA ATIVA	a/ag 0,40	C0	10,82	3,05	ESCÓRIA DE ALTO-FORNO	a/ag 0,40	C0	31,00	6,15
		CH	0,00	1,93			CH	21,63	4,35
	a/ag 0,55	C0	46,14	6,93		a/ag 0,55	C0	87,24	10,82
		CH	23,07	5,38			CH	44,70	7,34
	a/ag 0,70	C0	6,48	9,75		a/ag 0,70	C0	129,78	12,38
		CH	28,12	6,46			CH	12,98	8,55
META-CAULIM	a/ag 0,40	C0	15,86	3,94	CINZA VOLANTE	a/ag 0,40	C0	37,49	4,86
		CH	1,44	1,88			CH	8,65	2,78
	a/ag 0,55	C0	13,70	5,72		a/ag 0,55	C0	97,34	8,67
		CH	8,65	3,25			CH	56,24	6,30
	a/ag 0,70	C0	55,52	9,20		a/ag 0,70	C0	77,15	12,24
		CH	13,70	6,53			CH	30,28	8,09

Onde: relação a/ag = relação água/aglomerante; C0 = procedimento de cura ao ar; CH = procedimento de cura úmida; k_C = coeficiente de carbonatação acelerada; k_N = coeficiente de carbonatação natural.

Os protótipos para o ensaio acelerado foram inseridos na câmara de carbonatação após atingirem 91 dias de idade e permaneceram no processo de carbonatação acelerada até registrarem a despassivação das armaduras (obtida pelo monitoramento do potencial eletroquímico de corrosão) ou quando completaram 7 ciclos de indução. Cada ciclo correspondeu a uma semana em câmara (com ataque de CO_2) e uma semana fora da câmara (sem ataque de CO_2).

Na Figura 4.20 é apresentado o gráfico com a correlação direta entre os dois coeficientes de carbonatação, acelerada (k_C) e natural (k_N), que apresentou um coeficiente de determinação (R^2), igual a 0,69.

Figura 4.20 - Correlação direta entre os coeficientes de carbonatação acelerada e natural



Analisando o gráfico da Figura 4.20, observa-se que existe uma tendência de correlação linear entre os pontos, denotando assim uma direta proporcionalidade destes dados. Percebe-se, no entanto certa dispersão dos dados, o que se reflete em um coeficiente de determinação (R^2) não tão elevado. Esta dispersão pode ser explicada por diferenças e por inversões do comportamento da carbonatação para os dois casos correlacionados. Na carbonatação acelerada, segundo Castro (2003), foram obtidos os seguintes resultados para os coeficientes de carbonatação, apresentados na Figura 4.21.

Figura 4.21 - Disposição dos resultados médios globais, para cada um dos tipos de cura, dos coeficientes de carbonatação acelerada (CASTRO, 2003)

Coeficientes acelerados - cura úmida					
\overline{M}	\overline{SA}	\overline{CA}	\overline{R}	\overline{E}	\overline{CV}
7,21	15,86	27,40	27,40	28,12	31,72
Coeficientes acelerados - cura seca					
\overline{SA}	\overline{M}	\overline{R}	\overline{E}	\overline{CA}	\overline{CV}
20,19	23,79	44,70	49,03	52,63	54,80

Já para a carbonatação natural os coeficientes apresentaram a seguinte ordem de resultados, com seus respectivos valores abaixo dos códigos (Figura 4.22).

Figura 4.22 - Disposição dos resultados médios globais, para cada um dos tipos de cura, dos coeficientes obtidos para a carbonatação natural

Coeficientes naturais - cura úmida					
\overline{R}	\overline{M}	\overline{CA}	\overline{SA}	\overline{CV}	\overline{E}
3,69	3,91	4,33	4,59	5,73	8,65
Coeficientes naturais - cura seca					
\overline{R}	\overline{CA}	\overline{M}	\overline{SA}	\overline{CV}	\overline{E}
5,25	6,25	6,27	6,58	8,37	9,61

Essa diferença de comportamento entre as duas diferentes formas de carbonatação revela que o desenvolvimento da frente de carbonatação é afetado, entre outros parâmetros climáticos, pela concentração de CO_2 do ambiente em que o concreto está inserido. Nesse sentido, atenção maior deve haver para os estudos de carbonatação acelerada em que se têm altas concentrações de CO_2 .

De toda maneira, considerando certa representatividade na correlação obtida e apresentada na Figura 4.20, percebe-se que o valor acelerado do coeficiente de carbonatação é igual ao coeficiente natural multiplicado por um fator aproximadamente igual a 7,4. Em linhas gerais, pode-se dizer que a velocidade do processo de carbonatação acelerada foi cerca de 7 vezes a velocidade do processo natural, para uma concentração de CO_2 do ambiente acelerado da ordem de 160 vezes a concentração do ambiente natural.

4.6 ESTIMATIVA DE VIDA ÚTIL POTENCIAL DO CONCRETO

Diante de todo o estudo realizado acerca do avanço da carbonatação natural, apresenta-se na Tabela 4.6 os valores que permitem estimar a vida útil do concreto diante do desenvolvimento da frente carbonatada, considerando uma espessura de cobrimento de 25 mm e que a partir desta espessura ocorre a despassivação da armadura, para cada situação de concreto analisada neste trabalho. De acordo com Ollivier e Vichot (2008), deve-se levar em conta que a frente de carbonatação real está um pouco adiante daquela que é obtida por determinação com o indicador de pH (por exemplo, em torno de 6 a 8 mm, com a fenolftaleína). Isto porque existe uma zona parcialmente carbonatada, onde o valor do pH é intermediário e entre 12 e 9, não identificável usando o indicador fenolftaleína. Lo e Lee (2002) concluíram que o coeficiente de carbonatação obtido pelo espectro infravermelho foi cerca de 24% maior que o obtido utilizando a fenolftaleína como indicador. Chang e Chen (2006) também utilizando esta mesma técnica, concluíram que a profundidade carbonatada no concreto é igual a duas vezes a profundidade medida com fenolftaleína. Assim, para garantir que avanço da frente de carbonatação seja corretamente estimado pelo ensaio colorimétrico, considerou-se nos cálculos um acréscimo de 5 mm do concreto como já carbonatado (valor adicional em relação às efetivas medidas experimentais).

Para a elaboração da Tabela 4.6, considerou-se a utilização do modelo de Tuutti (1982), baseado na Lei de Fick, que se mostrou bastante representativo para os dados estudados. Dessa forma, a Equação 4.3 utilizada considerou os valores dos coeficientes médios encontrados neste trabalho.

$$t = \left(\frac{e}{k_n} \right)^2 \quad (4.3)$$

Em que:

t = tempo efetivo de exposição para atingir a espessura de cobrimento (anos).

e = profundidade da frente carbonatada (mm), no caso igual a 20 mm, de acordo com consideração segundo Ollivier e Vichot (2008) feita anteriormente;

k_n = coeficiente de carbonatação natural (mm/ $\sqrt{\text{anos}}$).

Tabela 4.6 - Tempo necessário para a frente de carbonatação atingir 25 mm de espessura, atingindo assim o nível das armaduras

Relação a/ag	Tipo de Cura	Adição Mineral	k_n (mm/ $\sqrt{\text{ano}}$)	Tempo estimado para despassivação (anos)
Espessura de cobrimento = 25 mm				
0,40	Úmida	Referência	1,66	145
		Sílica ativa	1,93	107
		Metacaulim	1,88	113
		C. casca de arroz	1,61	154
		Cinza volante	2,78	51
		Escória	4,35	21
	Seca	Referência	3,42	34
		Sílica ativa	3,05	42
		Metacaulim	3,94	25
		C. casca de arroz	3,71	29
		Cinza volante	4,86	16
		Escória	6,15	10
0,55	Úmida	Referência	4,21	22
		Sílica ativa	5,38	13
		Metacaulim	3,25	37
		C. casca de arroz	4,46	20
		Cinza volante	6,30	10
		Escória	7,34	7
	Seca	Referência	5,64	12
		Sílica ativa	6,93	8
		Metacaulim	5,72	12
		C. casca de arroz	5,39	13
		Cinza volante	8,67	5
		Escória	10,82	3
0,70	Úmida	Referência	5,18	14
		Sílica ativa	6,46	9
		Metacaulim	6,53	9
		C. casca de arroz	6,93	8
		Cinza volante	8,09	6
		Escória	8,55	5
	Seca	Referência	6,70	8
		Sílica ativa	9,75	4
		Metacaulim	9,20	4
		C. casca de arroz	9,65	4
		Cinza volante	12,24	2
		Escória	12,38	2

As condições consideradas para encontrar esses valores de tempo de vida útil para os diversos concretos frente ao desenvolvimento da carbonatação natural são específicas para o ambiente da região de Goiânia, tais como os valores de temperatura ao longo do tempo, umidade

relativa do ar, concentração de CO₂, entre outras características do local de exposição. Além disso, devem-se considerar as variáveis utilizadas para o programa experimental, no que diz respeito à quantidade e tipo da adição mineral, níveis de relações a/ag e condições para a execução das curas úmida e seca.

De acordo com os resultados apresentados, pode-se observar que existe uma grande diferença entre os valores mínimo e máximo dos períodos de tempo em que a espessura de carbonatação dos concretos atingirá a espessura de cobrimento de 25 mm, possibilitando desta forma a despassivação da armadura. Foram obtidos tempos tão reduzidos, de apenas 2 anos (como nos casos dos concretos de relação a/ag 0,7 com cinza volante e escória de alto-forno, submetidos à cura seca), como também tempos consideráveis, de 154 e 145 anos (respectivamente para os concretos com cinza de casca de arroz e de referência, de relação a/ag 0,4 e submetidos à cura úmida). Com isso deve-se atentar para a utilização das características dos concretos frente à determinação da vida útil de projeto, pois na norma de desempenho NBR 15575 (ABNT, 2013) é recomendada uma estimativa de no mínimo 60 anos, idade na qual muitas situações listadas na Tabela 4.6 não atenderiam.

Outro fator a ressaltar é a importância da execução da cura úmida, pois se observa que a vida útil, em relação à carbonatação especificamente, dos concretos curados desta forma são sempre maiores do que aqueles que não tiveram a execução de nenhum tipo de cura, no caso a cura seca. Observa-se também que o aumento da relação a/ag combinada com a não execução de cura, pode implicar em redução drástica do tempo para despassivação da armadura, principalmente para os concretos referência e com cinza de casca de arroz.

Esses resultados de tempo de vida útil são bastante importantes e dão uma resposta bastante palpável e objetiva em termos da durabilidade de estruturas de concreto, já que muitas vezes a concepção e especificação do concreto armado é feita preocupando-se apenas com o atendimento da resistência à compressão e com o ajuste das questões práticas da operacionalidade de aplicação (trabalhabilidade). Diante dessa realidade, muitas empresas de serviço de concretagem (tendo por base as instaladas em Goiânia) estão produzindo concretos com relações a/ag elevadas (acima de 0,70), porém que atendem aos requisitos de resistência à compressão exigidos por seus clientes. Esta realidade revela que não há uma preocupação em relação aos requisitos de durabilidade das estruturas, pois de acordo com a Tabela 4.6 concretos tais características estão suscetíveis à despassivação da armadura em pouco tempo.

CAPÍTULO 5

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A seguir apresentam-se as considerações sobre a metodologia utilizada, as conclusões referentes ao trabalho desenvolvido e, por último, algumas sugestões para trabalhos futuros.

5.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE ALGUNS ASPECTOS DA METODOLOGIA ADOTADA

Para a obtenção dos dados desta pesquisa optou por utilizar dois procedimentos considerados mais práticos para a execução de medidas de frente de carbonatação do concreto. Primeiramente, para conseguir uma região do concreto recém fraturada foi utilizada a execução de corte refrigerado com água com disco diamantado, o qual apresentou resultados bem próximos dos resultados obtidos com o método mais comumente utilizado e difundido nas pesquisas sobre carbonatação do concreto, a quebra manual ou ruptura diametral. Esse método utilizado tornou-se mais vantajoso por apresentar maior praticidade na execução, haja vista ser feito com auxílio de uma máquina de corte, além de proporcionar uma superfície regular e plana, favorecendo a execução das medidas por meio do paquímetro e a utilização de recursos digitais, tais como as fotografias e medidas com auxílio de programa computacional.

O outro método utilizado está relacionado à forma de aplicação do indicador de pH, o qual optou pela utilização de pincel para o espalhamento do indicador. Os resultados de profundidades carbonatadas para este método também se apresentaram bastantes próximos dos resultados obtidos pelo método de aspersão por *spray*, que por sua vez é o mais usual entre as pesquisas de carbonatação. Assim esse método tornou-se a opção utilizada para a aplicação do indicador, devido ser menos problemático em relação à obstrução do bico do *spray* quando da utilização deste por tempo prolongado.

Um ponto importante na execução das medidas das profundidades carbonatadas é a escolha correta dos locais para serem realizadas, ou seja, locais onde não há a presença de fissuras no concreto em contato com a superfície, pois nestes locais a frente de carbonatação é mais profunda, haja vista a entrada do CO₂ ser mais facilitada. A consideração destes pontos pode

causar falseamento dos resultados; no presente trabalho, todas as medidas foram tomadas considerando apenas os locais sem a presença de fissuras, e de forma a considerar o mais representativo possível toda a área entre as armaduras, ou seja, a região considerada carbonatada, desconsiderando os cantos dos corpos de prova. Outro aspecto importante da execução das medidas das profundidades carbonatadas é a atenção a ser tomada nas regiões da pasta na qual se encontram os agregados, pois estes não sofrem alterações na coloração ao ser aplicado o indicador de pH; desta forma, deve-se considerar apenas as medidas entre a superfície do concreto e a delimitação entre as duas cores distintas formadas na pasta cimentícia e não nas bordas dos agregados.

Todos esses aspectos comentados da metodologia foram exaustivamente pensados e, por ocasião da adoção de procedimentos não usuais, estes foram testados de forma a se verificar a sua correspondência com procedimentos mais conhecidos e empregados. Somente após a convergência e similaridade de métodos novos e tradicionais, definiu-se pela técnica ou procedimento mais prático e exequível. Ficam, então, como contribuição a outros trabalhos, alguns desses procedimentos não tão usuais, mas que funcionaram bem nesta pesquisa.

5.2 CONCLUSÕES

O fenômeno da carbonatação natural é um processo que ocorre de forma lenta, com isso esta pesquisa desenvolvida a partir de um período longo de tempo, dez anos de exposição ao ambiente natural, apresentou a possibilidade de avaliar os resultados obtidos naturalmente de profundidades e coeficientes para os diferentes tipos de concretos com adições minerais. Dessa forma, a partir do trabalho desenvolvido, foram obtidas as seguintes conclusões:

- Considerando o comportamento do avanço da carbonatação natural dos concretos em função do tempo, apenas o concreto de referência apresentou, em todas as relações a/ag e nos dois tipos de cura, valores abaixo da espessura de cobrimento (25 mm), demonstrando dessa forma, que mesmo passando 10 anos de exposição em ambiente natural, nenhuma de suas situações permitiu a frente de carbonatação atingir o nível das armaduras;
- Para os concretos com escória de alto forno, observou-se que suas profundidades individuais foram as que apresentaram os maiores valores, sendo que dentre as seis

situações de concretos com escória, em quatro delas (relações a/ag 0,55 e 0,70 para os dois tipos de cura) as profundidades ultrapassaram 25 mm, o que deixa a armadura vulnerável à despassivação e à posterior corrosão. Com isso, uma hipótese seja que o menor teor de Ca(OH)_2 na matriz cimentícia proporciona uma menor quantidade potencial de íons cálcio disponíveis para a fixação e avanço do CO_2 , reduzindo desta forma o pH da solução dos poros e permitindo mais rapidamente o avanço da frente de carbonatação, principalmente nos concretos de maior porosidade, (concretos de relações a/ag mais altas, neste trabalho igual a 0,70, e que não foram submetidos à cura úmida);

- Ainda no âmbito da avaliação do comportamento do avanço da carbonatação natural em função do tempo, quanto maior a relação a/ag maiores são as profundidades carbonatadas e que os concretos submetidos à cura seca também apresentaram maiores profundidades carbonatadas em relação aos submetidos à cura úmida, sendo válida essa constatação para todas as situações de concretos;
- Salienta-se ainda, que algumas adições apresentaram maior sensibilidade a essas mudanças, a saber: os concretos com sílica ativa em relação a variável relação a/ag, confirmando a tendência das superpozolanas de alta finura e reatividade terem como pré-requisito básico já uma boa estrutura interna de partida, ou seja, com concretos pouco compactos e porosos, pode não se ter como potencializar as suas boas propriedades tão bem; e, também, os concretos com cinza volante e com escória de alto-forno em relação a variável cura, demonstrando haver forte dependência dessas adições minerais em relação a um bom procedimento de cura. Isto significa que, em função da finura, de aspectos químicos e mineralógicos e, enfim, da reatividade da escória e cinza volante empregadas nesta pesquisa, os concretos produzidos com essas adições devem estar associados a efetivos procedimentos de cura, de forma imperiosa e sistêmica;
- Para a representação das profundidades individuais de carbonatação em função do tempo, em forma de equação matemática, pode-se dizer que os melhores ajustes obtidos foram na forma de funções de potência com expoente fracionário próximos de 0,50, apresentando uma média de 0,5856. Os modelos matemáticos assim obtidos se aproximam bastante das equações obtidas em ajustes pelo modelo de Tuutti (1982),

que é baseado na lei de Fick, cuja expressão é bastante utilizada no meio científico para previsão da profundidade de carbonatação nos concretos; neste modelo, o cálculo da profundidade carbonatada é o produto entre um coeficiente de carbonatação (k) pela raiz quadrada do tempo ($e = k \sqrt{t}$);

- Na análise global dos coeficientes de carbonatação natural, o concreto de referência apresentou isoladamente o melhor desempenho, demonstrando que a reserva alcalina ainda é o efeito preponderante em termos de combate à carbonatação. Todavia, o refinamento da microestrutura proporcionado pelas adições (efeito físico), o que propicia em geral um sistema de poros tortuosos e menos interconectados, aproxima o desempenho das adições àquele decorrente do aspecto químico (reserva alcalina), como se tem, por exemplo, nos concretos com metacaulim, em maior destaque, e nos concretos com cinza de casca de arroz. A sílica ativa se comportou muito bem nos concretos de relação a/ag 0,4, mas perdeu performance nas outras relações a/ag, o que a deixou em uma posição geral apenas intermediária;
- Considerando as análises de variância feitas para todas as idades e apenas para o tempo de exposição de dez anos, pode-se dizer que o comportamento deste último caso é semelhante com a mesma ordem sequencial dos valores dos coeficientes de carbonatação e que os valores obtidos possuem ordem de grandeza bastante similar àqueles da análise geral, sendo assim seus resultados bastante representativos de todo o período;
- Considerando a análise feita dos coeficientes com todas as variáveis separadamente, os melhores resultados foram obtidos para os concretos de referência, pois estes ficaram sempre entre os dois melhores desempenhos para todas as situações; contudo, o metacaulim (principalmente) e a cinza de casca de arroz apresentaram resultados gerais muito bons. Por outro lado, os concretos com cinza volante e com escória de alto-forno foram os que apresentaram os piores desempenhos, tendo esta última adição resultado sempre nos maiores coeficientes de carbonatação;
- A ordem sequencial de desempenho dos resultados de coeficientes de carbonatação natural (k_n) apresentou-se diferente da que foi obtida pelos coeficientes acelerados (k_c) do trabalho de Castro (2003). Esta diferença de resultados entre as duas formas de

carbonatação revela que o desenvolvimento da frente de carbonatação é afetado, entre outros parâmetros climáticos, pela concentração de CO₂ do ambiente em que o concreto está inserido. Nesse sentido, atenção maior deve haver para os estudos de carbonatação acelerada em que se têm altas concentrações de CO₂. A correlação obtida entre os coeficientes de carbonatação natural em um período de 10 anos e aqueles provenientes de um processo acelerado (CASTRO, 2003), com concentração de CO₂ em torno de 5,5%, temperatura de (28±1)°C e umidade relativa de 65%, gerou a seguinte correspondência entre esses dois coeficientes: $k_c = 7,38 k_n$.

- O exercício de vida útil realizado com os coeficientes médios globais do presente trabalho mostrou uma enorme diferença de períodos de tempo para que a frente de carbonatação atingisse a espessura de cobrimento, igual a 25 mm. Dessa forma, foram obtidos tempos tão reduzidos, de apenas 4 anos (como nos casos dos concretos de relação a/ag 0,7 com cinza volante e escória de alto-forno, submetidos à cura seca), como também tempos consideráveis, de 241 e 226 anos (respectivamente para os concretos com cinza de casca de arroz e de referência, de relação a/ag 0,40 e submetidos à cura úmida).

5.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho evidenciou alguns aspectos que merecem estudos mais aprofundados, referentes tanto ao fenômeno da carbonatação natural em si como aos métodos e procedimentos empregados. Portanto, sugerem-se para futuros trabalhos os seguintes tópicos:

- Determinação da profundidade carbonatada para idades mais avançadas, de forma a avaliar o avanço da frente carbonatada em relação às medidas realizadas aos 10 anos, consolidando assim o fenômeno natural;
- Identificação das zonas carbonatada, parcialmente carbonatada e não carbonatadas dos concretos submetidos à carbonatação natural com exposição por um período superior a 10 anos, refinando assim a análise da carbonatação;
- Caracterização do sistema de poros dos diversos concretos contendo adições minerais, após o processo de carbonatação natural, mediante o emprego de técnicas apropriadas,

tais como: porosimetria por intrusão de mercúrio e porosimetria por dessorção de vapor de água;

- Caracterização da microestrutura dos concretos com diferentes adições minerais, por meio de ensaios como determinação de teor de hidróxido de cálcio remanescente, difração de raios X (DRX); microscopia eletrônica de varredura (MEV), análise térmica diferencial (ATD) e análise por termogravimetria (TG);
- Correlacionar os resultados da carbonatação natural com as características do concreto endurecido, tais como resistência à compressão, módulo de elasticidade, absorção de água por imersão e por capilaridade;
- Verificar a confiabilidade e representatividade, em termos da carbonatação natural, de alguns dos principais modelos de carbonatação existentes na literatura internacional, tendo como base a medida e a adoção de parâmetros desses modelos, a partir do controle e mensuração das variáveis constantes neles.

REFERÊNCIAS

ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregado para concreto. Rio de Janeiro, 1983, 5 p.

ABNT_____. **NBR 15 575**: Edificações habitacionais – Desempenho. Rio de Janeiro, 2013, 31 p.

ABNT_____. **NBR 5738**: Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos ou prismáticos de concreto. Rio de Janeiro, 1994, 9 p.

ABNT_____. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994, 4 p.

ABNT_____. **NBR 8522**: Concreto – Determinação do módulo de deformação estática e diagrama – Tensão-deformação – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984, 9 p.

ABNT_____. **NBR 9778**: Argamassa e concretos endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 1987, 4 p.

ABNT_____. **NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecido – Determinação da absorção da água por capilaridade – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1995, 2 p.

ABNT_____. **NBR 9833**: Concreto fresco – Determinação da massa específica e do teor de ar pelo método gravimétrico – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1987, 3 p.

ABNT_____. **NBR NM 47**: Concreto – Determinação do teor de ar em concreto fresco – Método pressométrico. Rio de Janeiro, 2002, 23 p.

ABNT_____. **NBR NM 67**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998, 8 p.

CASCUDO, O. **Influência das características do aço carbono destinado ao uso como armaduras para concreto armado no comportamento frente à corrosão**. 2000. 310p. Tese (Doutorado em Engenharia). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

ASMT: AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Practice for Dealing With Outlying Observations. E 178-08. **Annual Book of ASTM Standard**. United States, 2008, 18 p.

BELLEZZE, T.; ROVENTI, G.; BARBARESI, E.; RUFFINI, N.; FRATESI, R. Effect of concrete carbonation process on the passivating products of galvanized steel reinforcements. **Materials and Corrosion**. V. 62, n. 02, Italy, p. 155-160, 2011.

BOURGUIGNON, K. M. B. G. **Influência da resistência à compressão na carbonatação de concretos com diferentes teores de escória de alto-forno**. 2004. 170 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2004.

BRAUN, V. **Influência das condições de moldagem e cura nas características do cobrimento de diversos concretos.** 2003. 203 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2003.

CADORE, W. W. **Estudo da carbonatação da camada de cobrimento de protótipos de concreto com altos teores de adições minerais e cal hidratada.** 2008. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

CASCUDO, O. **Influência das características do aço carbono destinado ao uso como**

CASCUDO, O. O controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas. Goiânia, Editora UFG/São Paulo, 1997.

CASCUDO, O.; CARASEK, H. **Ação da carbonatação no concreto.** In: ISAIA, G. E. **Concreto: Ciência e Tecnologia.** 1. Ed. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2011. V. 2. 1984p.

CASTRO, A. **Influência das adições minerais na durabilidade do concreto sujeito à carbonatação.** 2003, 236 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2003.

CHANG, C. F. CHEN, J. W. **The experimental investigation of concrete carbonation depth.** *Cement and Concrete Research*, v. 36, p. 1760-1767, 2006.

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

COLLEPARDI, M.; CORRADI, M. VESIKARI, J. Tetracalcium aluminoferrite hydration in the presence of lime and gypsum. **Cement and Concrete Research**, v. 9, p. 431-437, 1989.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON (CEB). **Durability de estructuras de hormigón:** guia de diseño CEB. Madrid, 1993. (GE-HO-CEB – Boletim 12).

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON (CEB). Task Groups 5.1. New approach to durability design: an example for carbonation induced corrosion. **Bulletin 238**, 1997.

COSTA, M. P.; SILVA, M. G.; PINHEIRO, S. M. M.; SOUZA, F. L. S.; ZANDONADE, E.; COELHO, M. A. M.; MORIMOTO, T. **Concretos com altos teores de escória de alto forno: avaliação da carbonatação e da difusão de íons cloreto.** In: Congresso Brasileiro Do Concreto - IBRACON, 47°. Recife, 2005.

DALLA LANA, E. F. **Carbonatação da camada de cobrimento de protótipos de concreto com cinza volante e CAL.** 2005. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

DAS, B. B.; PANDEY, S. P. Influence of fineness of fly ash on the carbonation and electrical conductivity of concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering.** v. 23, n. 9, p. 1365-1368, 2011.

DUAN, P.; SHUI, Z.; CHEN, W.; SHEN, C. Influence of metakaolion pore structure-related properties and thermodynamic stability of hydrate phases of concrete in seawater environment. **Construction and Building Materials**. v. 36, p. 947-953, 2012.

DUPRAT, F.; SELIER, A.; NGUYEN, X. S. Incidence de l'incertitude sur l'état hydrique du béton dans la carbonatation: approche probabiliste. *In*: Transfert 2006 – Propriétés de Transferts des Géomatériaux. **Anais...** Lille, 2006.

DURACRETE, General Guidelines for Durability Design and Redesign. The European Union-Brite-Euram III, Project No. BE 95-1347, "Probabilistic Performance based Durability Design of Concrete Structures", Report No. T 7-01-1, 1999.

FERREIRA, R. B. **Influência das adições minerais nas características do concreto de cobrimento e seu efeito na corrosão de armadura induzida por cloretos**. 2003. 242 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2003.

FURNAS, Equipe de; Laboratório de Concreto. **Concretos massa, estrutural, projetado e compactado com rolo: ensaios e propriedades**. Pacelli de Andrade, W., ed. São Paulo, Pini, 1997.

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

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

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

HOPPE, A. E. **Carbonatação em concreto com cinza de casca de arroz sem moagem**. 2008. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

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

HYVERT, N. **Application de l'approche probabiliste à la durabilité des produits préfabriqués en béton**. 2009. 228 f. Thèse (Doctorat de L'université de Toulouse). Toulouse, 2009.

ISAIA, G. C. **Carbonatação do concreto: uma revisão**. Santa Maria, 41p. 1999.

ISAIA, G. C. GASTALDINI, A. ZERBINO, R. SENSALÉ, G. GIACCIO, G. BATIC, O. CURUTCHET, B. PREVOSTI, C. CERVO, T. **Viabilidade do emprego de cinza de casca de arroz natural em concreto estrutural**. Parte II: Propriedades da durabilidade. *In*: VI CONGRESO INTERNACIONAL SOBRE PATOLOGÍA Y RECUPERACIÓN DE ESTRUCTURAS, 2010, Córdoba, Argentina. Anais. Córdoba: 2010, 20 p.

IZQUIERDO, L. D. **Bases de diseño para un tratamiento probabilista de los procesos de corrosión de la armadura en hormigón.** 2003. Tese (Doctorado). Universidad Politécnica de Madrid, Canales y Puertos. 2003.

JIANG, L., LIN, B.; CAI, Y. A model for predicting carbonation of high-volume fly ash concrete. **Cement and Concrete Research**, v.30, p. 668-702, 2000.

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.** 1995. 168 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

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

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

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.

MARTINELLI JÚNIOR, L. A. **Carbonatação natural de protótipos de concreto com cinza de casca de arroz.** 2010. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais.** 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008. 674 p.

MENDES, M. V. A. S. **Avaliação das propriedades de transporte de massa em concretos contendo adições minerais.** 2009. 175 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2009.

NANNI, L. F. RIBEIRO, J. L. **Planejamento e avaliação de experimentos.** Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1987.

NEVILLE, A. M. **Propriedade do Concreto.** São Paulo, Editora Pini, 1982, 738 p.

OLLIVIER, J. P. VICHOT, A. **La Durabilité des Bétons: Bases Scientifiques Pour la Formulation de Bétons Durables Dans Leur Environnement.** 1^a Ed. Ponts et Chaussées (Presses): 2008. V. 1. 868 p.

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

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

PAPADAKIS, V. G.; VAYENAS, C. G.; FARDIS, M. N. Fundamental concrete carbonation model and application to durability of reinforced concrete. *In: Durability of Building Materials and Components*, 1990, Brighton. **Proceedings...** London, p. 27-38, 1991.

PARROT, L. J. **A review of carbonation in reinforced concrete**. Cement and concrete association, report, 1994.

PAULA COUTO, A. B. **Influência das condições de cura nas características do cobrimento de diferentes concretos**. 167 f. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2003.

PAULETTI, C. **Estimativa da carbonatação natural de materiais cimentícios a partir de ensaios acelerados e de modelos de predição**. 2009. 285 f. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

PETER, M. A. MUNTEAN, A. MEIER, S. A. BOHM, M. Competition of several carbonation reactions in concrete: a parametric study. **Cement and Concrete Research**. V. 38, n. 12, p. 1385-1393, 2008.

POSSAN, E. **Contribuição ao estudo da carbonatação do concreto com adição de sílica ativa em ambiente natural e acelerado**. 2004. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

POSSAN, E. **Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano**. 2010. 265 f. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

POUEY, M. T. F. **Beneficiamento da Cinza de Casca de Arroz residual com vistas à produção de cimento portland e/ou pozolânico**. 2006. 345 p. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

REBMANN, M. S. **Durabilidade de concretos estruturais com baixo consumo de cimento portland e alta resistência**. 2011. 213 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

RÉUNION INTERNATIONALE DES LABORATOIRES D'ESSAIS ET DE RECHERCHES SUR LES MATÉRIAUX ET LES CONSTRUCTIONS – RILEM. Measurement of hardened concrete carbonation depth: RILEM Recommendation CPC-18. **Materials and Structures**, p. 453-455, 1988.

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

SCHIESSL, P. Zur Frage der zulässigen Rissbreite und der erforderlichen Betondeckung in Stahlbetonbau unter besonderer Berücksichtigung der Karbonatisierung de Betons. Eutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 255, Berlin, Alemania, 175 p. 1976.

SENTLER, L. Stochastic Characterization of Carbonation of Concrete. *In: Third International Conference on Durability of Building Materials and Components*. Technical Research Centre of Finland, Espoo, p. 569-580. 1984.

SILVA, V. M.; LIBORIO, J. B. L. Influência da sílica ativa e tipos de cimentos Portland na carbonatação. *In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2002, Natal. Anais...* Natal: 2002. P. 351-357.

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

TASCA, M. **Estudo da carbonatação natural de concretos com pozolanas: monitoramento em longo prazo e análise da microestrutura.** 2012. 183 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal de Santa Maria.

TAYLOR, H. F. W. **Cement Chemistry.** 2nd Edition. London: Thomas Telford, 1997. 459 p.

THIÉRY, M. **Modélisation de la carbonatation atmosphérique des bétons - Prise en compte des effets cinétiques et de l'état hydrique.** 2005. 347 f. Thèse de doctorat, École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 2005.

TUUTTI, K. **Corrosion of steel in concrete.** Stockholm, Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1982.

VESIKARI, E. Service life prediction of concrete structures with regard to corrosion of reinforcement. *In: Technical Research Centre of Finland.* Report n° 553, Finland, 1988, 53 p.

VIEIRA, F. M. P. **Contribuição ao estudo da corrosão de armaduras em concretos com adição de sílica ativa.** 2003. 242 f. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

WOLF, J. **Influência do teor de calcário na carbonatação de argamassas de cimento branco.** 2010. 241 f. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

YONGSHENG, J.; YINGSHU, Y.; JIANLI, S.; YUQIANG, M.; SHAOPING, L. Comparison of Concrete Carbonation Process under Natural Condition and High CO₂ Concentration Environments. **Journal of Wuhan University of Technology-Mater**, Berlin, p. 515-522, 2010.

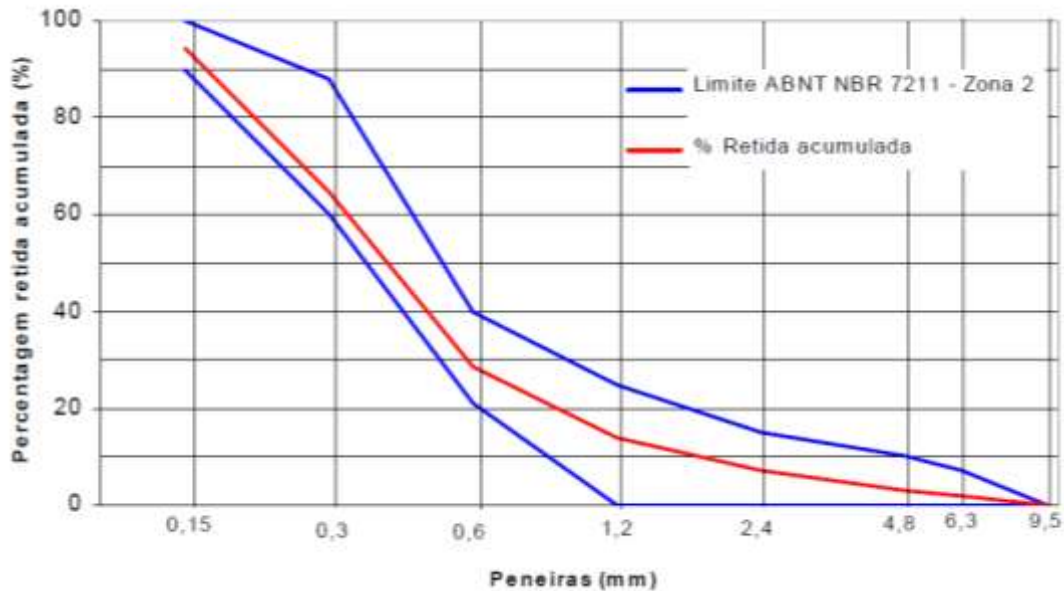
**APÊNDICE A – CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS
UTILIZADOS**

A.1 AGREGADO MIÚDO

Tabela A.1 - Caracterização do agregado miúdo (CASTRO, 2003)

Ensaio Realizados	Método	Areia Natural	Exigência segundo a NBR 7211:1983
Absorção de água (%)	NBR NM 30:2001	0,5	N.E.
Módulo de Finura	NBR 7217:1987	2,13	N.E.
Massa específica - Chapman (kg/dm ³)	NBR 9776:1987	2,64	N.E.
Massa unitária - estado solto (kg/dm ³)	NBR 7251:1982	1,49	N.E.
Teor de argila e materiais friáveis (%)	NBR 7218:1987	0,26	≤ 1,5
Teor de material pulverulento (%)	NBR 7219:1987	2,62	≤ 5,0
Impurezas orgânicas (+/- clara)	NBR NM 49:2001	+ clara	Não pode ser mais escura que a solução padrão

Figura A.1 - Curva de distribuição granulométrica do agregado miúdo (CASTRO, 2003)

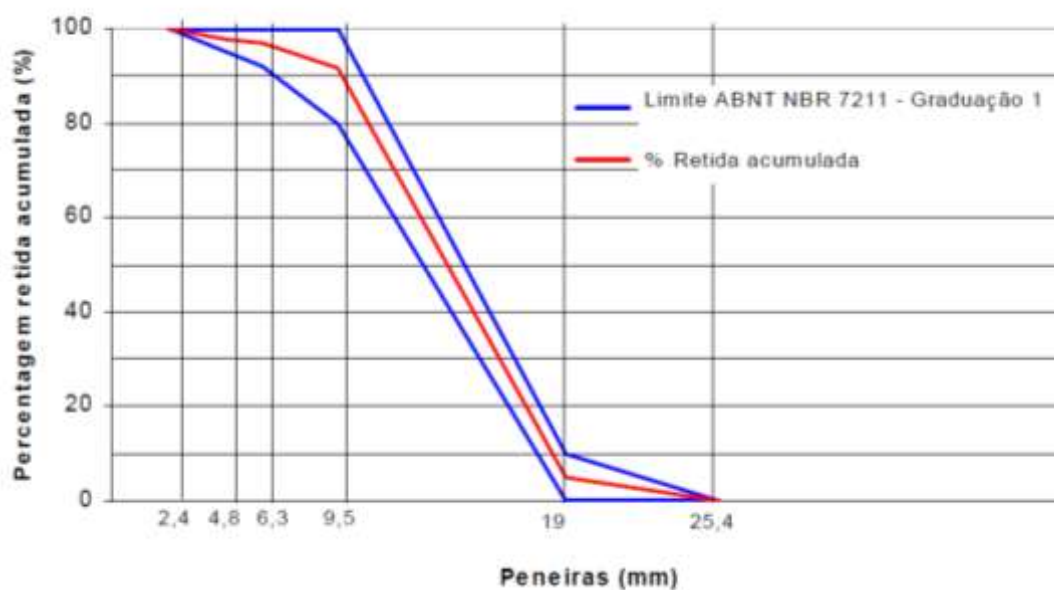


A.2 AGREGADO GRAÚDO

Tabela A.2 - Caracterização do agregado graúdo (CASTRO, 2003)

Ensaio Realizados	Método	Brita 19 mm	Exigência segundo a NBR 7211:1983
Absorção de água (%)	NBR 9937:1987	0,60	N.E.
Índice de forma (c/e)	NBR 7809:1983	2,40	N.E.
Módulo de Finura	NBR 7217:1987	6,95	N.E.
Massa específica S.S.S. (kg/dm ³)	NBR 9937:1987	2,75	N.E.
Massa unitária - estado solto (kg/dm ³)	NBR 7251:1982	1,48	N.E.
Teor de argila e materiais friáveis (%)	NBR 7218:1987	0,00	N.E.
Teor de material pulverulento (%)	NBR 7219:1987	1,23	≤ 1,00

Figura A.2 - Curva de distribuição granulométrica do agregado graúdo (CASTRO, 2003)



A.3 CIMENTO PORTLAND

Tabela A.3 - Caracterização do cimento Portland (CASTRO, 2003)

Característica ou Propriedade Determinada		Método de Ensaio	Resultado	Exigência segundo a NBR 11578:1991	
Massa específica (kg/dm ³)		NBR NM 23:1998	3,04	N.E.	
Finura	Resíduo na peneira 200 (%)	NBR 11579:1991	1,70	≤ 12	
	Resíduo na peneira 325 (%)	NBR 12826:1993	12,10	N.E.	
	Área específica Blaine (m ³ /kg)	NBR NM 76:1998	3860	≥ 2600	
Tempos de pega	Início de pega (h, min)	NBR 11581:1991	2h 00	≥ 1 h	
	Fim de pega h, min)		3h 00	≤ 10 h	
Água de Consistência – Pasta (%)		NBR 11580:1991	27,00	N.E.	
Resistência à Compressão (MPa)	3 dias	NBR 7215:1996	21,20	≥ 10	
	7 dias		29,50	≥ 20	
	28 dias		35,80	≥ 32 e ≤ 49	
Componentes Químicos (%)	Perda ao fogo	NBR 5743:1989	6,57	≤ 6,5	
	Resíduo insolúvel	NBR 5744:1989	1,76	≤ 2,5	
	Dióxido de silício (SiO ₂)	Procedimento FURNAS n. 1.02.135	18,74	N.E.	
	Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)		5,07	N.E.	
	Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)		3,25	N.E.	
	Óxido de cálcio (CaO)		60,72	N.E.	
	Óxido de cálcio livre (CaO)		1,70	N.E.	
	Óxido de magnésio (MgO)		0,72	≤ 6,5	
	Trióxido de enxofre (SO ₃)		3,06	≤ 4,0	
	Sulfato de cálcio (CaSO ₄)		-	5,20	N.E.
Álcalis totais (%)	Óxido de sódio (Na ₂ O)		Procedimento FURNAS n. 1.02.31	0,32	N.E.
	Óxido de potássio (K ₂ O)			0,51	N.E.
	Equivalente alcalino em Na ₂ O	0,65		N.E.	

A.4 ADIÇÕES MINERAIS

Tabela A.4 - Principais características das adições minerais (CASTRO, 2003)

Característica ou Propriedade Determinada		Método de Ensaio	Escória de Alto-forno	Cinza Volante	Cinza de Casca de Arroz	Meta-caulinita	Sílica Ativa	Exigência segundo a NBR 13956 ⁽⁴⁾	Exigência segundo a NBR 12653 ⁽⁵⁾
Massa específica (kg/dm ³)		NBR NM 23:1998	2,90	2,33	2,20	2,54	2,20	N.E.	N.E.
Área específica BET (m ² /kg)		-	900	1500	19 690	21 250	15 990	≥ 15 000 e ≤ 30 000	N.E.
Componentes Químicos (%)	Perda ao fogo	NBR 5743:1989	0,31	1,23	9,75	4,29	4,12	≤ 6,00	≤ 6,0 ⁽⁶⁾
	Dióxido de silício (SiO ₂)	Procedimento FURNAS n. 1.02.135 ⁽¹⁾	35,04	61,99	82,78	46,70	91,05	≥ 85,00	N.E.
	Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)		12,43	23,30	0,53	41,41	0,17	N.E.	N.E.
	Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)		0,16	5,40	1,99	3,49	0,30	N.E.	N.E.
	Óxido de cálcio total (CaO)		41,58	2,03	1,05	0,53	0,77	N.E.	N.E.
	Óxido de magnésio (MgO)		8,68	1,91	1,26	0,53	0,75	N.E.	N.E.
	Anidrido sulfúrico (SO ₃)		0,12	-	0,05	0,61	0,52	N.E.	≤ 5,0 ⁽⁷⁾
	Óxido de sódio (Na ₂ O)		Procedimento FURNAS n. 1.02.31 ⁽²⁾	0,31	0,43	0,17	0,00	0,21	N.E.
	Óxido de potássio (K ₂ O)	0,55		3,01	0,63	0,25	0,27	N.E.	N.E.
	Equivalente alcalino (Na ₂ O)	0,67		2,41	0,58	0,16	0,39	≤ 1,5	N.E.
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ (%)		-	47,63	90,69	85,30	91,60	91,52	N.E.	≥ 70,0 ⁽⁸⁾
Índice de Atividade Pozolânica ⁽³⁾ com o cimento (%)		NBR 5752:1992	96,30	123,30	121,90	118,20	109,80	N.E.	N.E.

Obs.: Essas adições minerais são tratadas como produtos comerciais, portanto não possuem informações sobre os processos de queima e moagem.

(1) Fluorescência por raios X
(2) Espectrofotometria de absorção atômica
(3) Para misturas contendo as adições minerais nos mesmos teores utilizados na produção dos concretos
(4) ABNT NBR 13956:1997 – Sílica ativa para uso em cimento Portland, concreto, argamassa e pasta de cimento Portland – Especificação
(5) ABNT NBR 12653:1992 – Materiais pozolânicos: Especificações. Essa norma é utilizada para as demais adições minerais
(6) Para materiais de classe N (no caso, metacaulim) a exigência do parâmetro perda ao fogo passa para valores ≤ 10,0%
(7) Para materiais de classe N (no caso, metacaulim) a exigência do parâmetro anidrido sulfúrico passa para valores ≤ 4,0%
(8) Para materiais de classe E (no caso, escória de alto-forno e cinza de casca de arroz) a exigência do parâmetro SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ passa para valores ≥ 50,0%
N.E. Não Especificado

Figura A.4 - Difratoograma de raios X da cinza volante (CASTRO, 2003)

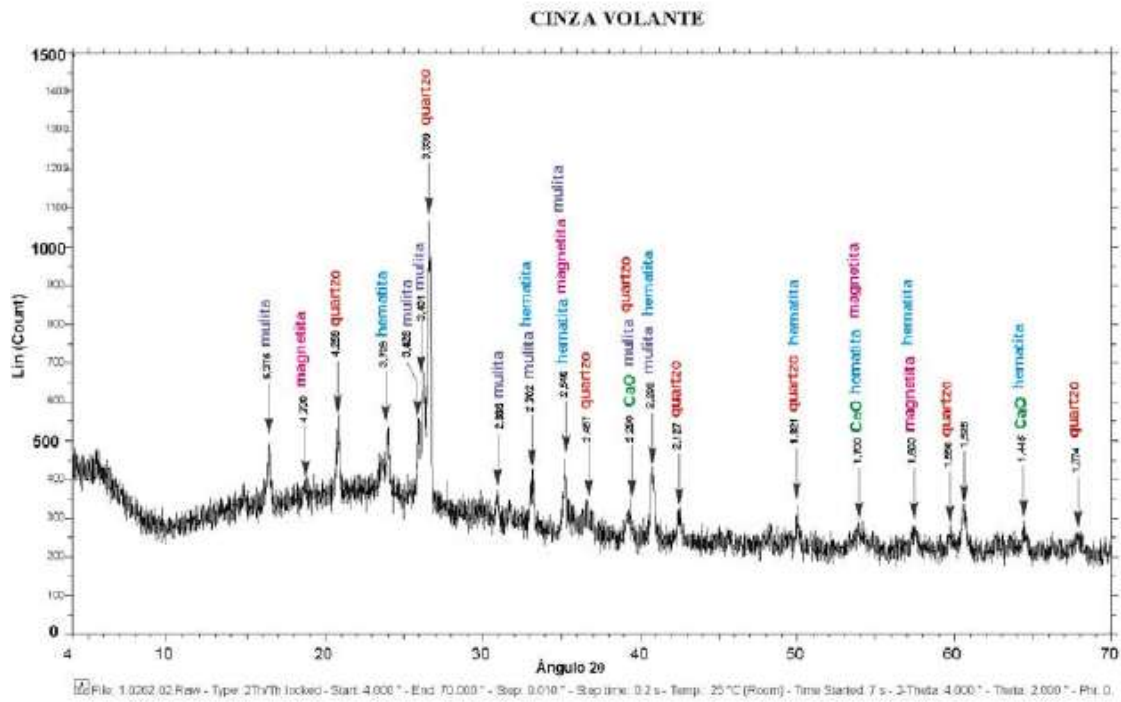


Figura A.5 - Difratoograma de raios X da escória de alto forno (CASTRO, 2003)

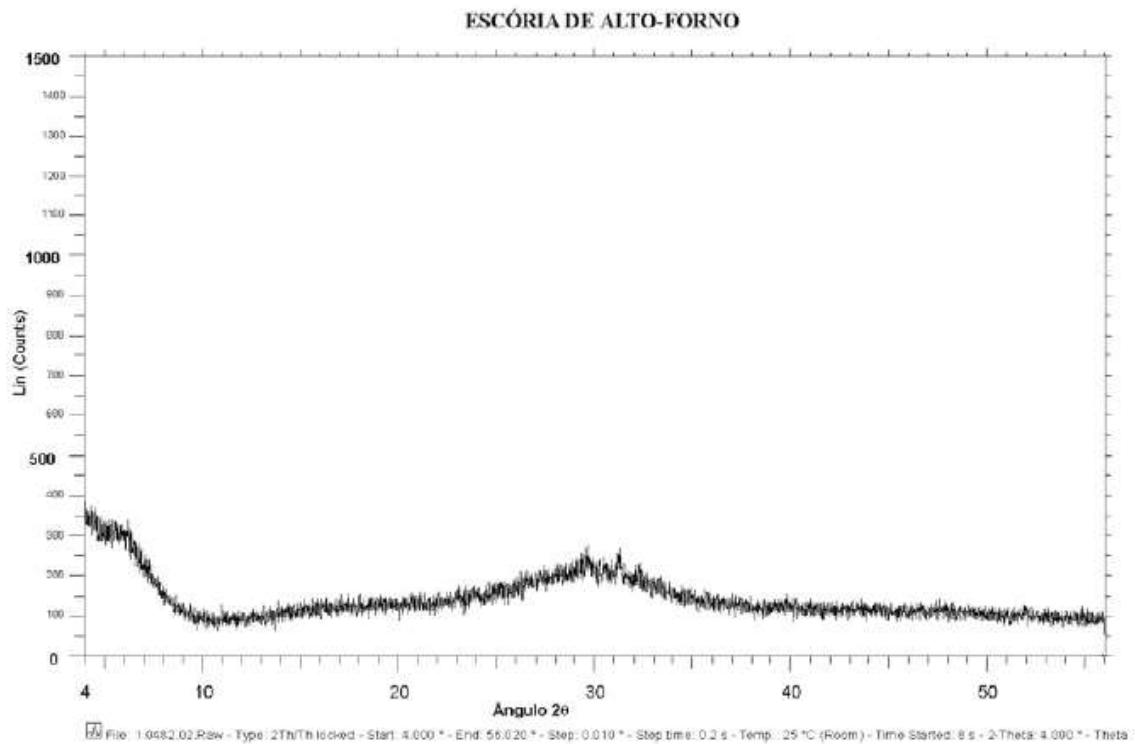


Figura A.6 - Difratoograma de raios X da cinza de casca de arroz (CASTRO, 2003)

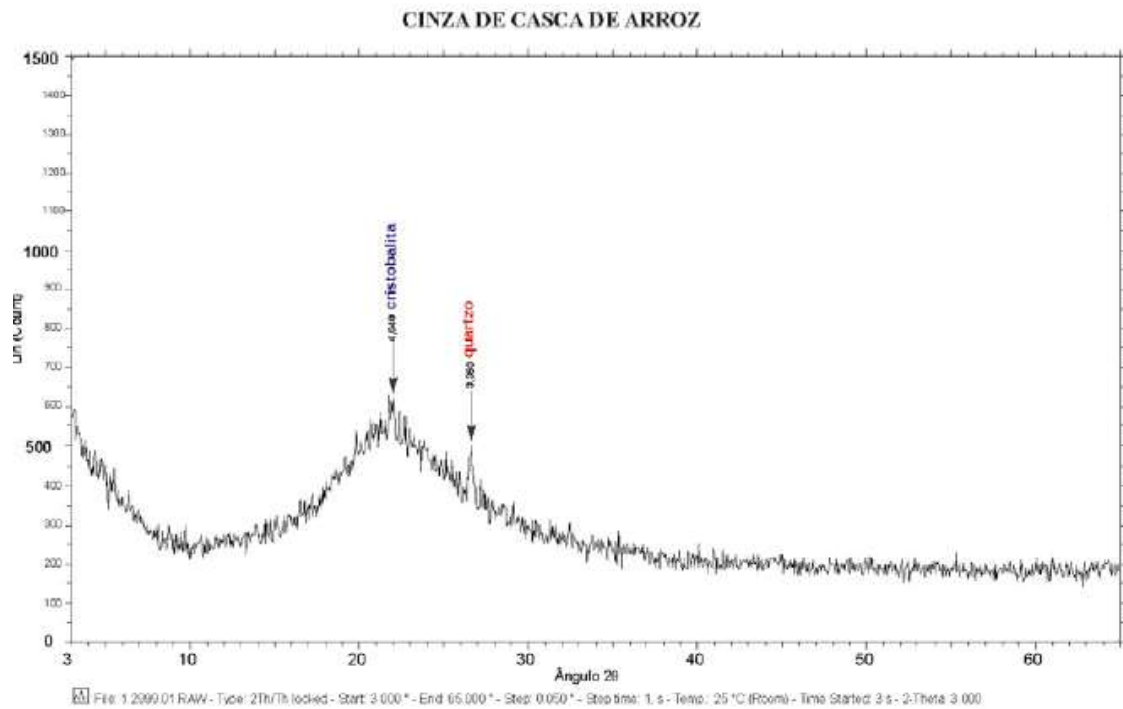


Figura A.7 - Difratoograma de raios X da cinza de sílica ativa (CASTRO, 2003)

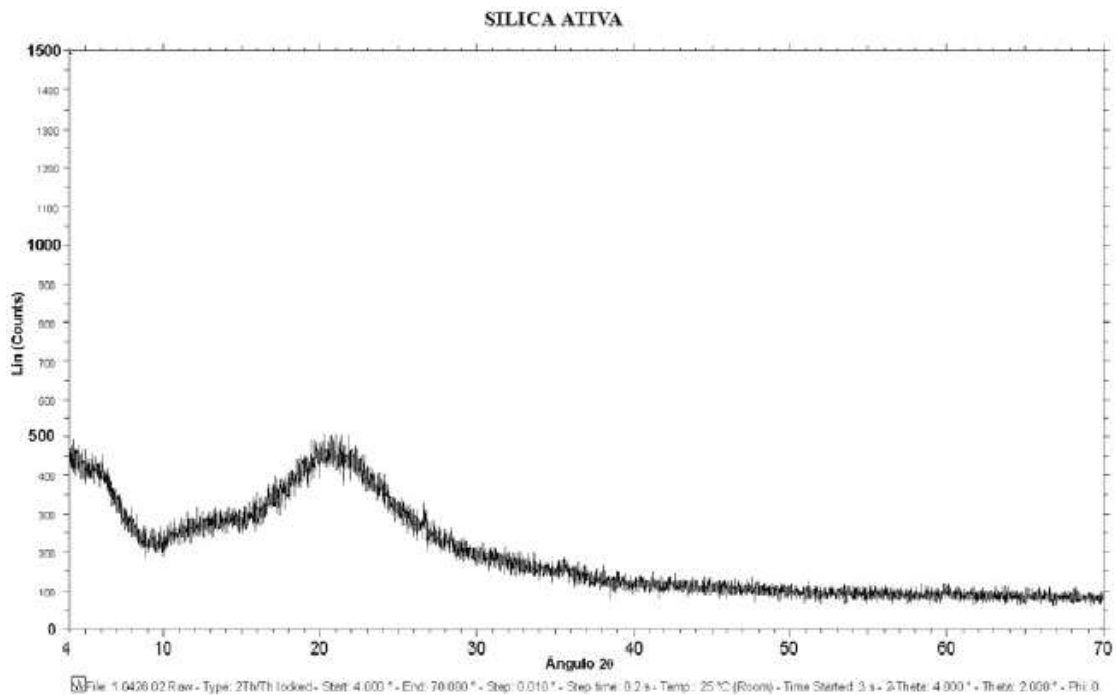
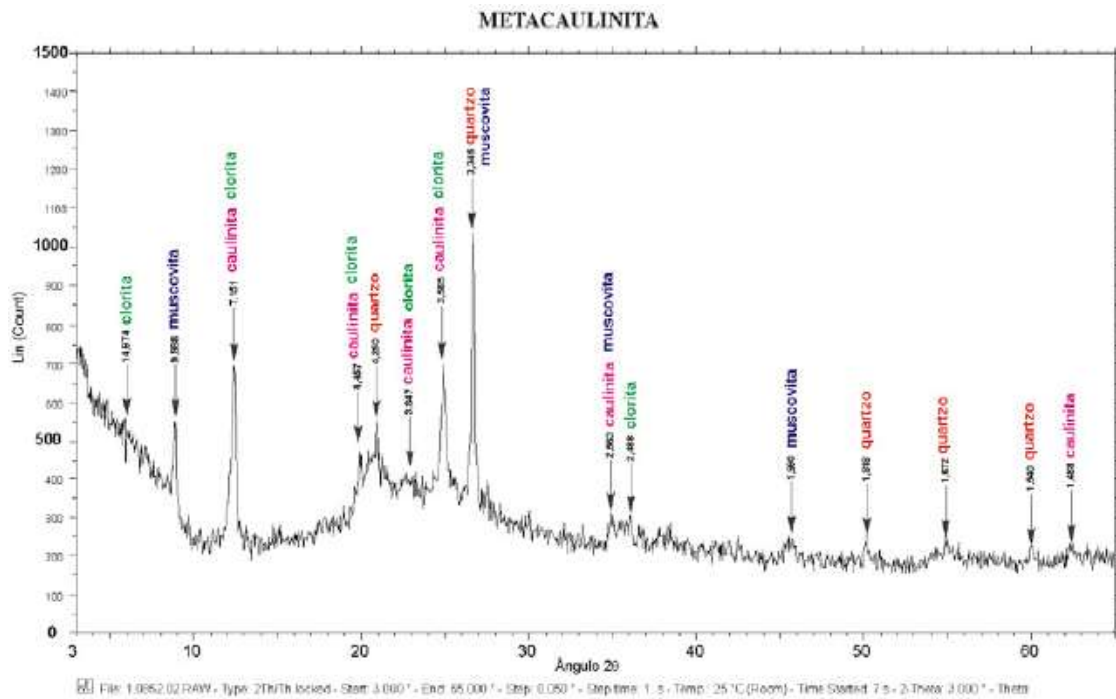


Figura A.8 - Difratograma de raios X da cinza de metacaulim (CASTRO, 2003)



A.5 CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO FRESCO

Tabela A.5 - Caracterização dos concretos de relação água/aglomerante 0,40, no estado fresco (CASTRO, 2003)

Tipo de Adição		Sílica Ativa	C. Casca de Arroz	Metacaulim	Cinza Volante	Escória de Alto-Forno	Concreto Referência
Teor de Adição (%) – substituição parcial da massa de cimento		10	10	10	25	65	0
Relação a/ag real ⁽¹⁾		0,39	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
Traço em massa de aglomerante (cimento : adição : areia : pedra)		0,90 : 0,10 : 0,77 : 2,07	0,90 : 0,10 : 0,77 : 2,07	0,90 : 0,10 : 0,77 : 2,07	0,75 : 0,25 : 0,77 : 2,05	0,35 : 0,65 : 0,78 : 2,08	1,0 : 0,0 : 0,78 : 2,10
Massa de Aglomerante (kg/m ³) (cimento + adição)		552,0	552,0	552,0	552,0	552,0	552,0
Traço em massa de cimento (cimento : adição : areia : pedra)		1,0 : 0,11 : 0,86 : 2,30	1,0 : 0,11 : 0,86 : 2,30	1,0 : 0,11 : 0,86 : 2,30	1,0 : 0,33 : 1,02 : 2,73	1,0 : 1,86 : 2,22 : 5,95	1,0 : 0,0 : 0,78 : 2,10
Consumo de cimento (kg/m ³)		496,8	496,8	496,8	414,0	193,2	552,0
Teor de argamassa em massa		0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46
Teor de aditivo químico em relação à massa de aglomerante (%)	Plastificante	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
	Superplastificante	0,90	0,17	0,15	0,05	0,10	0,00
Consistência pelo abatimento do tronco de cone NBR NM 67: 1998	Valor requerido (mm)	80 ± 10	80 ± 10	80 ± 10	80 ± 10	80 ± 10	80 ± 10
	Valor medido (mm)	115	60	70	90	75	90
Massa específica (kg/dm ³) NBR 9833:1987		2,332	2,366	2,392	2,298	2,407	2,404
Teor de ar (%) NBR NM 47:2002		1,6	1,0	1,4	1,0	0,9	1,2
⁽¹⁾ Valor da relação a/ag obtida após a correção da quantidade de água presente nos agregados e aditivos químicos							

Tabela A.6 - Caracterização dos concretos de relação água/aglomerante 0,55, no estado fresco (CASTRO, 2003)

Tipo de Adição		Sílica Ativa	C. Casca de Arroz	Metacaulim	Cinza Volante	Escória de Alto-Forno	Concreto Referência
Teor de Adição (%) – substituição parcial da massa de cimento		10	10	10	25	65	0
Relação a/ag real ⁽¹⁾		0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55
Traço em massa de aglomerante (cimento : adição : areia : pedra)		0,90 : 0,10 : 1,69 : 3,13	0,90 : 0,10 : 1,69 : 3,13	0,90 : 0,10 : 1,69 : 3,13	0,75 : 0,25 : 1,68 : 3,11	0,35 : 0,65 : 1,70 : 3,14	1,0 : 0,0 : 1,70 : 3,15
Massa de Aglomerante (kg/m ³) (cimento + adição)		368,0	368,0	368,0	368,0	368,0	368,0
Traço em massa de cimento (cimento : adição : areia : pedra)		1,0 : 0,11 : 1,88 : 3,47	1,0 : 0,11 : 1,88 : 3,47	1,0 : 0,11 : 1,88 : 3,47	1,0 : 0,33 : 2,24 : 4,15	1,0 : 1,86 : 4,84 : 8,96	1,0 : 0,0 : 1,70 : 3,15
Consumo de cimento (kg/m ³)		331,2	331,2	331,2	276,0	128,8	368,0
Teor de argamassa em massa		0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46
Teor de aditivo químico em relação à massa de aglomerante (%)	Plastificante	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
	Superplastificante	0,50	0,09	0,00	0,00	0,06	0,00
Consistência pelo abatimento do tronco de cone NBR NM 67: 1998	Valor requerido (mm)	80 ± 10	80 ± 10	80 ± 10	80 ± 10	80 ± 10	80 ± 10
	Valor medido (mm)	70	70	70	90	80	75
Massa específica (kg/dm ³) NBR 9833:1987		2,380	2,408	2,341	2,384	2,399	2,391
Teor de ar (%) NBR NM 47:2002		1,0	0,6	1,7	0,8	1,0	1,5

⁽¹⁾ Valor da relação a/ag obtida após a correção da quantidade de água presente nos agregados e aditivos químicos

Tabela A.7 - Caracterização dos concretos de relação água/aglomerante 0,70, no estado fresco (CASTRO, 2003)

Tipo de Adição		Sílica Ativa	C. Casca de Arroz	Metacaulim	Cinza Volante	Escória de Alto-Forno	Concreto Referência
Teor de Adição (%) – substituição parcial da massa de cimento		10	10	10	25	65	0
Relação a/ag real ⁽¹⁾		0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70
Traço em massa de aglomerante (cimento : adição : areia : pedra)		0,90 : 0,10 : 2,60 : 4,26	0,90 : 0,10 : 2,60 : 4,26	0,90 : 0,10 : 2,60 : 4,26	0,75 : 0,25 : 2,58 : 4,24	0,35 : 0,65 : 2,60 : 4,28	1,0 : 0,0 : 2,61 : 4,28
Massa de Aglomerante (kg/m ³) (cimento + adição)		274,0	274,0	274,0	274,0	274,0	274,0
Traço em massa de cimento (cimento : adição : areia : pedra)		1,0 : 0,11 : 2,88 : 4,74	1,0 : 0,11 : 2,88 : 4,74	1,0 : 0,11 : 2,88 : 4,74	1,0 : 0,33 : 3,45 : 5,66	1,0 : 1,86 : 7,42 : 12,22	1,0 : 0,0 : 2,61 : 4,28
Consumo de cimento (kg/m ³)		246,6	246,6	246,6	205,5	95,9	274,0
Teor de argamassa em massa		0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46
Teor de aditivo químico em relação à massa de aglomerante (%)	Plastificante	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63
	Superplastificante	0,74	0,49	0,00	0,00	0,00	0,00
Consistência pelo abatimento do tronco de cone NBR NM 67: 1998	Valor requerido (mm)	80 ± 10	80 ± 10	80 ± 10	80 ± 10	80 ± 10	80 ± 10
	Valor medido (mm)	75	90	70	70	80	90
Massa específica (kg/dm ³) NBR 9833:1987		2,423	2,407	2,378	2,380	2,395	2,410
Teor de ar (%) NBR NM 47:2002		1,0	0,5	1,4	0,5	0,8	0,8
⁽¹⁾ Valor da relação a/ag obtida após a correção da quantidade de água presente nos agregados e aditivos químicos							

**APÊNDICE B – PROCEDIMENTO PARA MEDIDA DA
PROFUNDIDADE MÉDIA DA FRENTE DE
CARBONATAÇÃO COM AUXÍLIO DO PROGRAMA
COMPUTACIONAL *AUTOCAD***

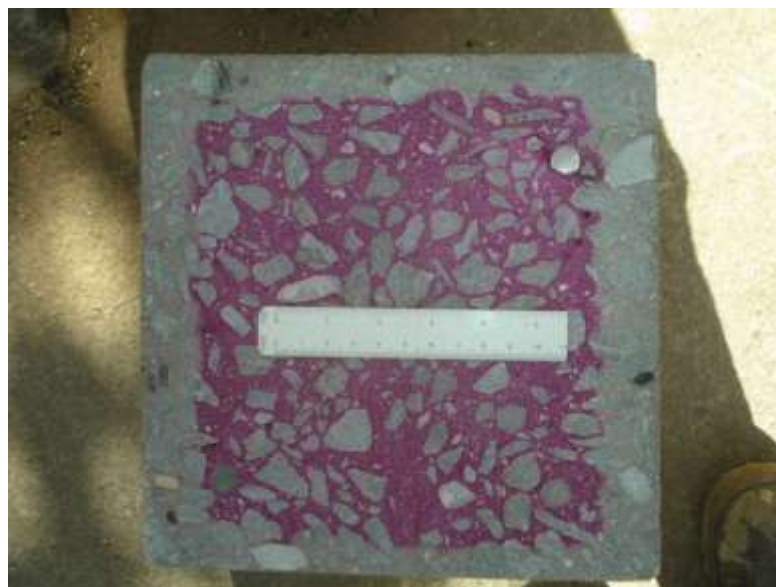
No procedimento utilizando o programa computacional, a delimitação da área foi realizada com base nas imagens dos corpos de prova registradas no momento dos ensaios as quais estão acompanhadas de uma escala que permitiu a calibração dos recursos utilizados. Procedimento semelhante foi empregado por Pauletti (2009).

Todas as amostras cortadas e aspergidas com a fenolftaleína foram fotografadas com uma câmera fotográfica digital. As medidas de profundidade de carbonatação foram realizadas nas imagens digitais, com auxílio do programa *AutoCAD*.

As imagens foram acompanhadas de uma escala, o que permitiu a calibração dos recursos utilizados. As etapas para realização das medidas de cada imagem são as seguintes:

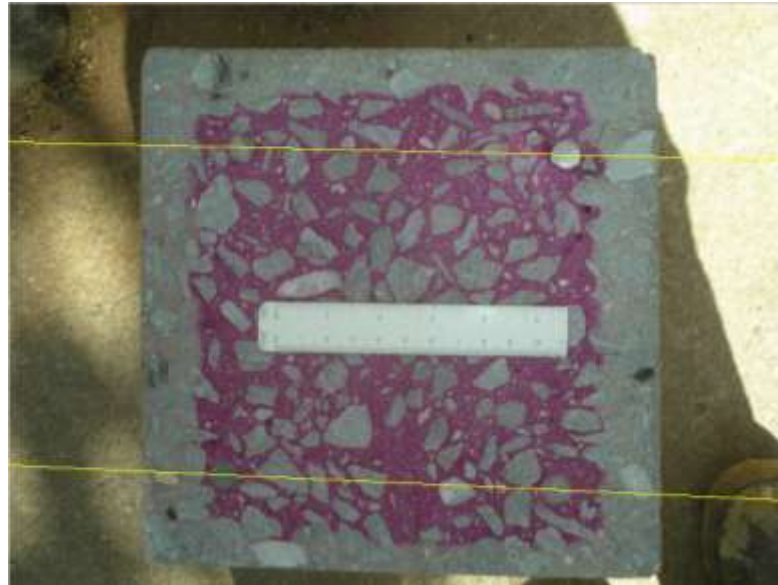
- Abertura da imagem no programa computacional (Figura B.1);
- Calibração dimensional das imagens, através da escala que acompanha a imagem;

Figura B.1 - Imagem digital da amostra com escala para calibração



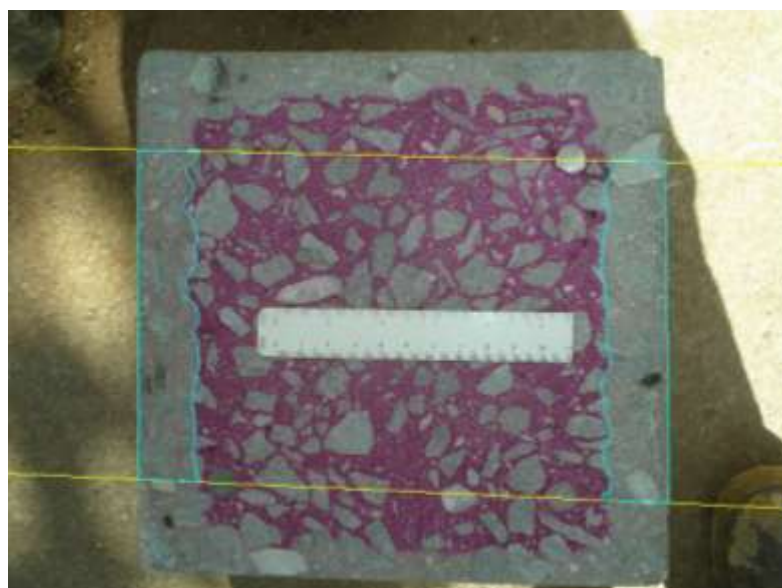
- Delimitação entre as armaduras do corpo de prova, de modo a considerar apenas essa região para obtenção da média da profundidade carbonatada (Figura B.2);

Figura B.2 - Delimitação entre as armaduras do corpo de prova



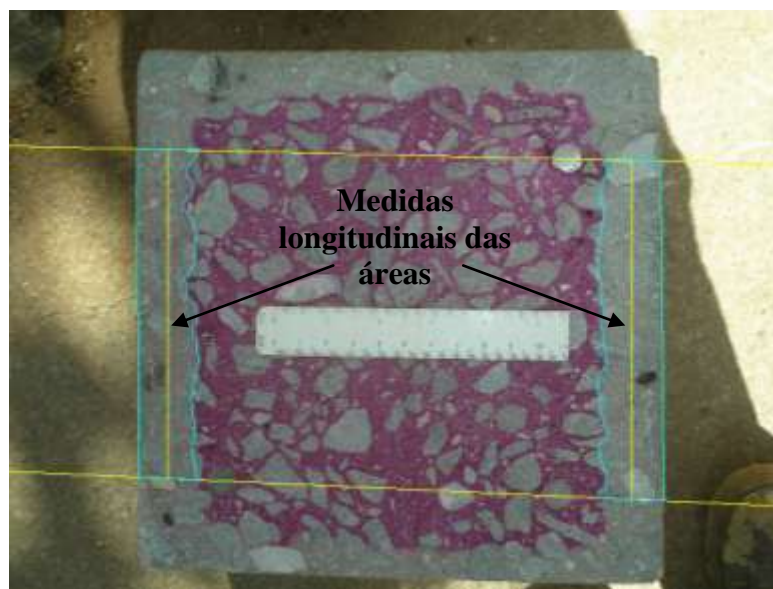
- Delimitação da área carbonatada entre as armaduras em cada uma das laterais do corpo de prova, delimitada pelas linhas traçadas na Figura B.2, conforme ilustrado na Figura B.3. Na delimitação da área carbonatada foi necessário tomar cuidado com as regiões que continham os agregados, pois estes não são alterados pelo indicador de pH; assim tornou-se necessária a eliminação da região contendo parte do agregado, passando a linha por cima dos agregados de forma a continuar a tendência de coloração nas duas extremidades dos agregados;

Figura B.3 - Medição da área carbonatada entre as armaduras



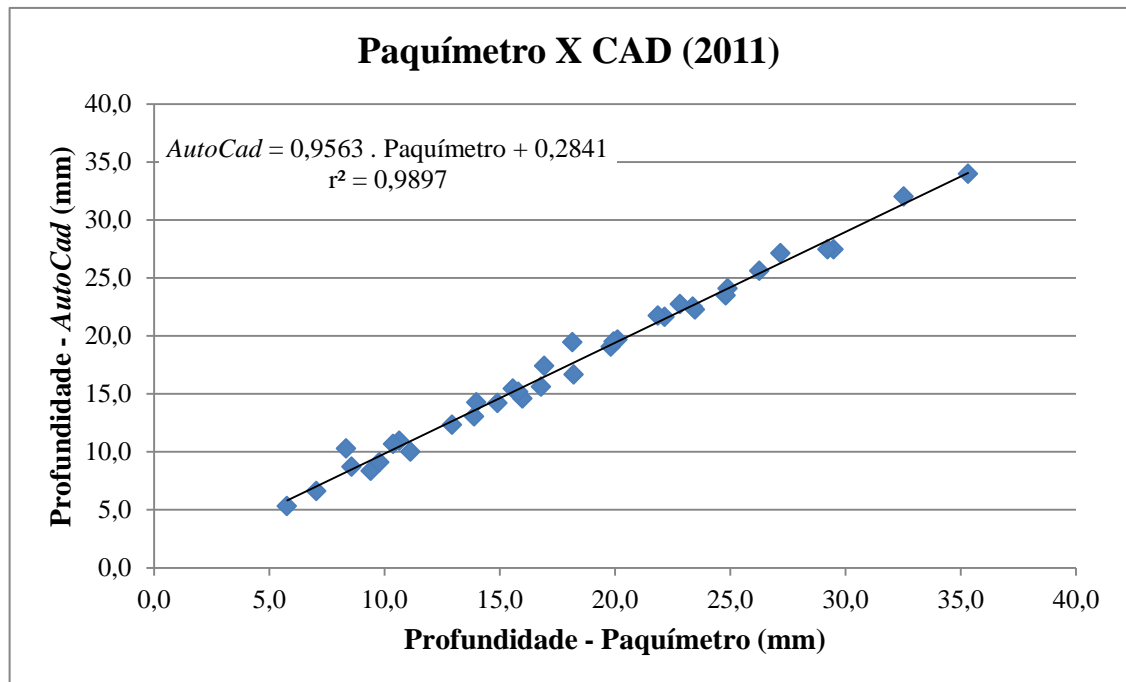
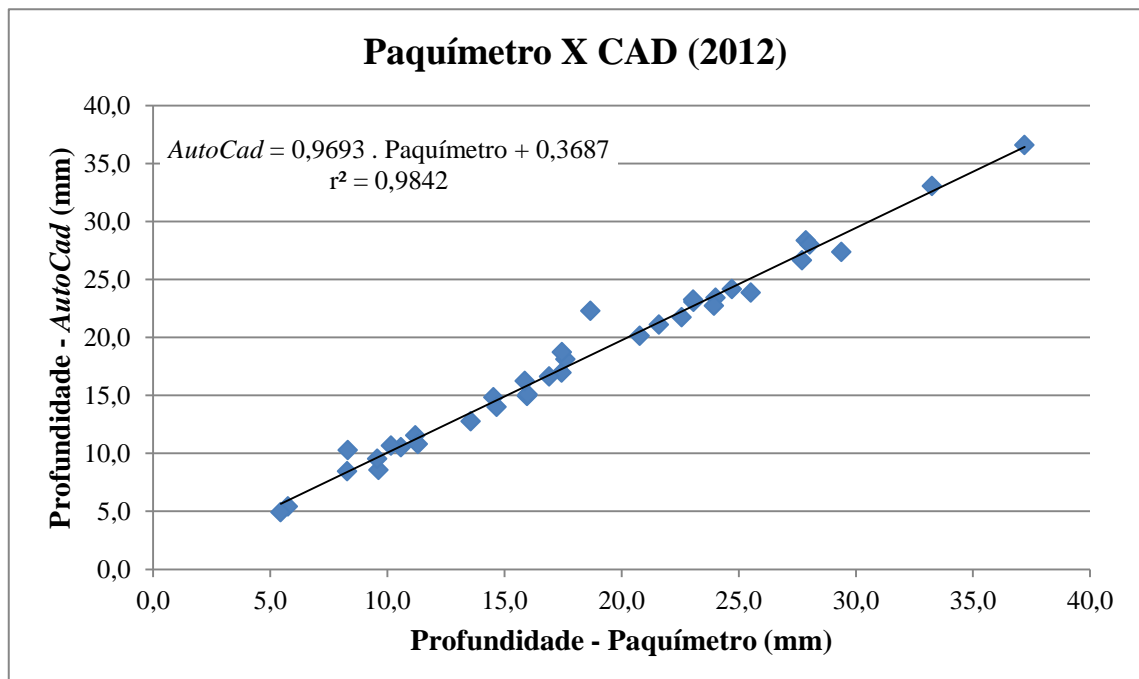
- Medição da distância entre as duas delimitações da área formada, conforme a Figura B.4 (medida longitudinal das áreas circunscritas do cobrimento, indicada pela reta amarela), para cálculo da profundidade de carbonatação média de cada lateral, através da divisão da área por essa distância;

Figura B.4 - Determinação da profundidade de carbonatação média de cada lateral



Após a realização das medidas foram feitos dois gráficos para os anos de 2011 e 2012 respectivamente, apresentados nas Figuras B.5 e B.6, comparando os valores médios obtidos por meio da média das profundidades medidas com paquímetro e por meio deste método detalhado anteriormente.

Diante dos resultados apresentados nos gráficos, observa-se que a partir da equação obtida da curva ajustada na correlação (com coeficientes de determinação (R^2) acima de 0,98), que as medidas ficaram bastante próximas.

Figura B.5 – Correlação entre profundidades médias obtidas por paquímetro e *AutoCad* para o ano de 2011Figura B.6 – Correlação entre profundidades médias obtidas por paquímetro e *AutoCad* para o ano de 2012

**APÊNDICE C – PROFUNDIDADES CARBONATADAS E
COEFICIENTES DE CARBONATAÇÃO NATURAL**

C.1 CONCRETOS DE REFERÊNCIA

Tabela C.1 – Valores de profundidades carbonatadas e coeficientes de carbonatação natural para concretos de referência com relação a/ag igual a 0,40 e cura úmida

Idade (ano)	Profundidade (mm)	Coefficiente (mm/ $\sqrt{\text{ano}}$)	Idade (ano)	Profundidade (mm)	Coefficiente (mm/ $\sqrt{\text{ano}}$)
0,25	0,00	0,00	9,00	7,32	2,44
0,25	0,00	0,00	9,00	7,34	2,45
0,25	0,20	0,40	9,00	5,36	1,79
0,50	0,00	0,00	9,00	9,33	3,11
0,50	0,00	0,00	9,00	6,08	2,03
0,50	0,00	0,00	9,00	5,53	1,84
0,82	1,50	1,66	9,00	5,10	1,70
0,82	1,60	1,77	9,00	8,72	2,91
0,82	0,70	0,77	9,00	7,71	2,57
3,00	2,60	1,50	9,00	7,28	2,43
3,00	2,20	1,27	9,00	8,74	2,91
3,00	1,20	0,69	9,00	6,02	2,01
3,00	3,60	2,08	10,00	4,63	1,46
3,00	3,20	1,85	10,00	7,55	2,39
3,00	2,70	1,56	10,00	5,99	1,89
3,00	2,90	1,67	10,00	8,94	2,83
3,00	2,20	1,27	10,00	6,92	2,19
3,00	2,80	1,62	10,00	5,02	1,59
7,00	3,95	1,49	10,00	5,33	1,69
7,00	3,53	1,33	10,00	4,06	1,28
7,00	5,09	1,92	10,00	4,48	1,42
7,00	6,95	2,63	10,00	6,12	1,94
7,00	5,88	2,22	10,00	5,84	1,85
7,00	4,91	1,86	10,00	4,18	1,32
7,00	4,50	1,70			
7,00	3,40	1,29			
7,00	4,86	1,84			
7,00	5,10	1,93			

Tabela C.2 – Valores de profundidades carbonatadas e coeficientes de carbonatação natural para concretos de referência com relação a/ag igual a 0,40 e cura seca

Idade (ano)	Profundidade (mm)	Coeficiente (mm/$\sqrt{\text{ano}}$)	Idade (ano)	Profundidade (mm)	Coeficiente (mm/$\sqrt{\text{ano}}$)
0,25	2,00	4,00	9,00	12,62	4,21
0,25	2,00	4,00	9,00	9,44	3,15
0,25	2,30	4,60	9,00	13,26	4,42
0,50	2,20	3,11	9,00	7,06	2,35
0,50	2,60	3,68	9,00	7,43	2,48
0,50	4,30	6,08	9,00	11,96	3,99
0,82	2,60	2,87	9,00	11,44	3,81
0,82	3,90	4,31	9,00	7,52	2,51
0,82	6,00	6,63	9,00	7,01	2,34
3,00	7,10	4,10	9,00	9,20	3,07
3,00	5,40	3,12	9,00	7,63	2,54
3,00	6,70	3,87	9,00	8,38	2,79
3,00	7,80	4,50	10,00	7,87	2,49
3,00	5,70	3,29	10,00	9,57	3,03
3,00	8,50	4,91	10,00	10,12	3,20
3,00	7,60	4,39	10,00	5,48	1,73
3,00	6,40	3,70	10,00	8,21	2,60
3,00	7,80	4,50	10,00	8,37	2,65
7,00	9,00	3,40	10,00	11,32	3,58
7,00	5,34	2,02	10,00	12,10	3,83
7,00	7,57	2,86	10,00	9,96	3,15
7,00	8,15	3,08	10,00	12,01	3,80
7,00	10,85	4,10	10,00	12,36	3,91
7,00	5,42	2,05	10,00	8,16	2,58
7,00	6,47	2,45			
7,00	6,56	2,48			
7,00	7,46	2,82			
7,00	7,41	2,80			

Tabela C.3 – Valores de profundidades carbonatadas e coeficientes de carbonatação natural para concretos de referência com relação a/ag igual a 0,55 e cura úmida

Idade (ano)	Profundidade (mm)	Coefficiente (mm/$\sqrt{\text{ano}}$)	Idade (ano)	Profundidade (mm)	Coefficiente (mm/$\sqrt{\text{ano}}$)
0,25	1,20	2,40	9,00	13,85	4,62
0,25	1,50	3,00	9,00	12,81	4,27
0,25	0,20	0,40	9,00	13,22	4,41
0,50	2,10	2,97	9,00	13,02	4,34
0,50	1,90	2,69	9,00	14,55	4,85
0,50	1,40	1,98	9,00	12,38	4,13
0,82	3,20	3,53	9,00	15,69	5,23
0,82	3,30	3,64	9,00	13,57	4,52
0,82	3,20	3,53	9,00	15,22	5,07
3,00	6,20	3,58	9,00	14,71	4,90
3,00	7,40	4,27	9,00	15,03	5,01
3,00	7,80	4,50	9,00	12,65	4,22
3,00	8,00	4,62	10,00	14,58	4,61
3,00	7,80	4,50	10,00	10,44	3,30
3,00	8,00	4,62	10,00	13,99	4,42
3,00	7,10	4,10	10,00	12,21	3,86
3,00	7,70	4,45	10,00	12,35	3,91
3,00	8,10	4,68	10,00	11,69	3,70
7,00	10,98	4,15	10,00	20,29	6,42
7,00	12,01	4,54	10,00	18,58	5,88
7,00	13,56	5,13	10,00	13,40	4,24
7,00	12,46	4,71	10,00	11,20	3,54
7,00	12,84	4,85	10,00	12,10	3,83
7,00	14,73	5,57	10,00	11,96	3,78
7,00	11,80	4,46			
7,00	13,37	5,05			
7,00	14,42	5,45			
7,00	12,43	4,70			

Tabela C.4 – Valores de profundidades carbonatadas e coeficientes de carbonatação natural para concretos de referência com relação a/ag igual a 0,55 e cura seca

Idade (ano)	Profundidade (mm)	Coefficiente (mm/√ano)	Idade (ano)	Profundidade (mm)	Coefficiente (mm/√ano)
0,25	3,10	6,20	9,00	20,41	6,80
0,25	2,70	5,40	9,00	20,09	6,70
0,25	2,20	4,40	9,00	15,56	5,19
0,50	4,50	6,36	9,00	18,29	6,10
0,50	4,30	6,08	9,00	13,01	4,34
0,50	5,20	7,35	9,00	13,42	4,47
0,82	6,40	7,07	9,00	17,26	5,75
0,82	6,20	6,85	9,00	18,24	6,08
0,82	5,10	5,63	9,00	16,37	5,46
3,00	10,10	5,83	9,00	16,25	5,42
3,00	9,90	5,72	9,00	16,52	5,51
3,00	8,80	5,08	9,00	16,12	5,37
3,00	10,20	5,89	10,00	19,70	6,23
3,00	11,00	6,35	10,00	16,59	5,25
3,00	8,10	4,68	10,00	16,56	5,24
3,00	10,80	6,24	10,00	14,39	4,55
3,00	10,10	5,83	10,00	13,42	4,24
3,00	11,00	6,35	10,00	13,02	4,12
7,00	17,31	6,54	10,00	18,73	5,92
7,00	19,91	7,53	10,00	20,20	6,39
7,00	15,89	6,01	10,00	16,28	5,15
7,00	15,37	5,81	10,00	14,91	4,71
7,00	11,50	4,35	10,00	14,30	4,52
7,00	18,95	7,16	10,00	13,43	4,25
7,00	15,82	5,98			
7,00	15,23	5,76			
7,00	12,18	4,60			
7,00	11,42	4,32			

Tabela C.5 – Valores de profundidades carbonatadas e coeficientes de carbonatação natural para concretos de referência com relação a/ag igual a 0,70 e cura úmida

Idade (ano)	Profundidade (mm)	Coefficiente (mm/√ano)	Idade (ano)	Profundidade (mm)	Coefficiente (mm/√ano)
0,25	0,30	0,60	9,00	16,35	5,45
0,25	0,40	0,80	9,00	14,89	4,96
0,25	0,70	1,40	9,00	17,48	5,83
0,50	0,50	0,71	9,00	16,69	5,56
0,50	1,00	1,41	9,00	19,16	6,39
0,50	1,40	1,98	9,00	17,98	5,99
0,82	4,10	4,53	9,00	20,01	6,67
0,82	2,90	3,20	9,00	18,77	6,26
0,82	4,00	4,42	9,00	19,91	6,64
3,00	9,00	5,20	9,00	20,14	6,71
3,00	10,10	5,83	9,00	17,24	5,75
3,00	7,60	4,39	9,00	19,97	6,66
3,00	9,30	5,37	10,00	17,45	5,52
3,00	9,10	5,25	10,00	19,79	6,26
3,00	9,00	5,20	10,00	15,79	4,99
3,00	9,00	5,20	10,00	17,58	5,56
3,00	14,10	8,14	10,00	17,69	5,59
3,00	8,50	4,91	10,00	18,58	5,88
7,00	18,54	7,01	10,00	18,40	5,82
7,00	14,95	5,65	10,00	18,90	5,98
7,00	12,53	4,74	10,00	15,97	5,05
7,00	15,69	5,93	10,00	15,93	5,04
7,00	16,69	6,31	10,00	17,95	5,68
7,00	14,00	5,29	10,00	15,29	4,84
7,00	22,38	8,46			
7,00	16,79	6,35			
7,00	16,70	6,31			
7,00	15,42	5,83			

Tabela C.6 – Valores de profundidades carbonatadas e coeficientes de carbonatação natural para concretos de referência com relação a/ag igual a 0,70 e cura seca

Idade (ano)	Profundidade (mm)	Coefficiente (mm/$\sqrt{\text{ano}}$)	Idade (ano)	Profundidade (mm)	Coefficiente (mm/$\sqrt{\text{ano}}$)
0,25	2,50	5,00	9,00	20,93	6,98
0,25	2,40	4,80	9,00	18,48	6,16
0,25	2,30	4,60	9,00	20,16	6,72
0,50	3,80	5,37	9,00	21,94	7,31
0,50	4,80	6,79	9,00	19,57	6,52
0,50	3,00	4,24	9,00	18,32	6,11
0,82	8,40	9,28	9,00	20,53	6,84
0,82	8,50	9,39	9,00	18,65	6,22
0,82	7,00	7,73	9,00	21,05	7,02
3,00	12,70	7,33	9,00	21,09	7,03
3,00	13,20	7,62	9,00	22,50	7,50
3,00	13,10	7,56	9,00	18,23	6,08
3,00	14,50	8,37	10,00	17,03	5,39
3,00	13,10	7,56	10,00	19,06	6,03
3,00	11,70	6,75	10,00	19,50	6,17
3,00	13,50	7,79	10,00	18,69	5,91
3,00	13,30	7,68	10,00	16,75	5,30
3,00	12,80	7,39	10,00	17,69	5,59
7,00	17,02	6,43	10,00	18,19	5,75
7,00	20,32	7,68	10,00	21,24	6,72
7,00	20,53	7,76	10,00	23,38	7,39
7,00	19,11	7,22	10,00	17,20	5,44
7,00	16,41	6,20	10,00	17,07	5,40
7,00	17,64	6,67	10,00	18,31	5,79
7,00	18,97	7,17			
7,00	23,57	8,91			
7,00	19,14	7,23			
7,00	17,60	6,65			

C.2 CONCRETOS COM ESCÓRIA DE ALTO FORNO

Tabela C.7 – Valores de profundidades carbonatadas e coeficientes de carbonatação natural para concretos com escória de alto forno com relação a/ag igual a 0,40 e cura úmida

Idade (ano)	Profundidade (mm)	Coefficiente (mm/√ano)	Idade (ano)	Profundidade (mm)	Coefficiente (mm/√ano)
0,25	0,90	1,80	9,00	14,73	4,91
0,25	1,10	2,20	9,00	14,29	4,76
0,25	1,50	3,00	9,00	13,77	4,59
0,50	3,20	4,53	9,00	14,26	4,75
0,50	2,50	3,54	9,00	15,93	5,31
0,50	2,20	3,11	9,00	14,49	4,83
0,82	3,20	3,53	9,00	11,35	3,78
0,82	2,90	3,20	9,00	13,12	4,37
0,82	3,40	3,75	9,00	12,64	4,21
3,00	8,60	4,97	9,00	13,99	4,66
3,00	6,00	3,46	9,00	15,17	5,06
3,00	8,20	4,73	9,00	14,08	4,69
3,00	8,10	4,68	10,00	13,92	4,40
3,00	6,40	3,70	10,00	14,10	4,46
3,00	7,90	4,56	10,00	12,63	3,99
3,00	6,90	3,98	10,00	13,79	4,36
3,00	7,90	4,56	10,00	14,42	4,56
3,00	6,10	3,52	10,00	18,03	5,70
7,00	10,38	3,92	10,00	13,25	4,19
7,00	16,00	6,05	10,00	13,11	4,15
7,00	10,71	4,05	10,00	15,21	4,81
7,00	12,87	4,86	10,00	13,17	4,16
7,00	12,68	4,79	10,00	15,62	4,94
7,00	9,81	3,71	10,00	17,04	5,39
7,00	15,72	5,94			
7,00	14,79	5,59			
7,00	10,78	4,07			
7,00	14,08	5,32			

Tabela C.8 – Valores de profundidades carbonatadas e coeficientes de carbonatação natural para concretos com escória de alto forno com relação a/ag igual a 0,40 e cura seca

Idade (ano)	Profundidade (mm)	Coefficiente (mm/√ano)	Idade (ano)	Profundidade (mm)	Coefficiente (mm/√ano)
0,25	2,40	4,80	9,00	16,57	5,52
0,25	3,90	7,80	9,00	17,92	5,97
0,25	2,30	4,60	9,00	18,67	6,22
0,50	4,60	6,51	9,00	18,19	6,06
0,50	5,70	8,06	9,00	15,02	5,01
0,50	4,40	6,22	9,00	16,72	5,57
0,82	6,30	6,96	9,00	16,79	5,60
0,82	5,00	5,52	9,00	14,92	4,97
0,82	7,00	7,73	9,00	18,73	6,24
3,00	11,60	6,70	9,00	14,74	4,91
3,00	11,50	6,64	9,00	18,15	6,05
3,00	12,10	6,99	9,00	16,81	5,60
3,00	13,60	7,85	10,00	19,29	6,10
3,00	13,50	7,79	10,00	17,08	5,40
3,00	12,70	7,33	10,00	16,72	5,29
3,00	10,70	6,18	10,00	18,25	5,77
3,00	10,80	6,24	10,00	17,75	5,61
3,00	11,50	6,64	10,00	18,68	5,91
7,00	14,78	5,59	10,00	15,67	4,96
7,00	15,07	5,70	10,00	15,31	4,84
7,00	17,29	6,54	10,00	16,99	5,37
7,00	20,93	7,91	10,00	16,70	5,28
7,00	15,85	5,99	10,00	19,08	6,03
7,00	18,23	6,89	10,00	19,77	6,25
7,00	16,71	6,32			
7,00	17,44	6,59			
7,00	19,85	7,50			
7,00	14,91	5,64			

Tabela C.9 – Valores de profundidades carbonatadas e coeficientes de carbonatação natural para concretos com escória de alto forno com relação a/ag igual a 0,55 e cura úmida

Idade (ano)	Profundidade (mm)	Coefficiente (mm/√ano)	Idade (ano)	Profundidade (mm)	Coefficiente (mm/√ano)
0,25	2,70	5,40	9,00	23,01	7,67
0,25	2,50	5,00	9,00	25,63	8,54
0,25	1,90	3,80	9,00	21,11	7,04
0,50	4,30	6,08	9,00	24,15	8,05
0,50	6,30	8,91	9,00	23,89	7,96
0,50	6,90	9,76	9,00	21,32	7,11
0,82	6,40	7,07	9,00	24,16	8,05
0,82	6,70	7,40	9,00	23,18	7,73
0,82	6,60	7,29	9,00	24,17	8,06
3,00	14,20	8,20	9,00	22,09	7,36
3,00	13,20	7,62	9,00	25,39	8,46
3,00	14,90	8,60	9,00	22,49	7,50
3,00	13,50	7,79	10,00	22,19	7,02
3,00	15,10	8,72	10,00	19,84	6,27
3,00	14,00	8,08	10,00	25,35	8,02
7,00	17,46	6,60	10,00	21,94	6,94
7,00	19,28	7,29	10,00	20,00	6,32
7,00	18,30	6,92	10,00	19,54	6,18
7,00	18,60	7,03	10,00	27,62	8,73
7,00	19,26	7,28	10,00	23,32	7,37
7,00	20,56	7,77	10,00	22,44	7,10
7,00	21,63	8,18	10,00	20,99	6,64
7,00	16,13	6,10	10,00	21,45	6,78
7,00	17,84	6,74	10,00	26,05	8,24
7,00	18,26	6,90			

Tabela C.10 – Valores de profundidades carbonatadas e coeficientes de carbonatação natural para concretos com escória de alto forno com relação a/ag igual a 0,55 e cura seca

Idade (ano)	Profundidade (mm)	Coefficiente (mm/√ano)	Idade (ano)	Profundidade (mm)	Coefficiente (mm/√ano)
0,25	7,00	14,00	9,00	31,15	10,38
0,25	6,60	13,20	9,00	32,18	10,73
0,25	7,90	15,80	9,00	30,55	10,18
0,50	10,20	14,42	9,00	26,43	8,81
0,50	10,00	14,14	9,00	30,08	10,03
0,50	11,00	15,56	9,00	32,69	10,90
0,82	11,10	12,26	9,00	32,93	10,98
0,82	14,00	15,46	9,00	28,26	9,42
0,82	12,20	13,47	9,00	28,21	9,40
3,00	15,00	8,66	9,00	26,13	8,71
3,00	28,20	16,28	9,00	28,76	9,59
3,00	13,50	7,79	9,00	26,54	8,85
3,00	27,70	15,99	10,00	30,05	9,50
3,00	28,00	16,17	10,00	30,35	9,60
7,00	27,79	10,50	10,00	28,84	9,12
7,00	24,59	9,29	10,00	30,26	9,57
7,00	27,98	10,58	10,00	29,51	9,33
7,00	24,26	9,17	10,00	28,59	9,04
7,00	24,56	9,28	10,00	30,00	9,49
7,00	28,02	10,59	10,00	28,84	9,12
7,00	28,01	10,59	10,00	27,83	8,80
7,00	27,47	10,38	10,00	28,01	8,86
7,00	22,10	8,35	10,00	29,54	9,34
7,00	21,70	8,20	10,00	30,71	9,71

Tabela C.11 – Valores de profundidades carbonatadas e coeficientes de carbonatação natural para concretos com escória de alto forno com relação a/ag igual a 0,70 e cura úmida

Idade (ano)	Profundidade (mm)	Coefficiente (mm/$\sqrt{\text{ano}}$)	Idade (ano)	Profundidade (mm)	Coefficiente (mm/$\sqrt{\text{ano}}$)
0,25	6,00	12,00	9,00	24,34	8,11
0,25	5,50	11,00	9,00	21,81	7,27
0,25	4,00	8,00	9,00	24,14	8,05
0,50	7,70	10,89	9,00	25,17	8,39
0,50	6,30	8,91	9,00	22,86	7,62
0,50	6,20	8,77	9,00	24,47	8,16
0,82	9,50	10,49	9,00	25,95	8,65
0,82	8,80	9,72	9,00	24,71	8,24
0,82	9,20	10,16	9,00	26,21	8,74
3,00	18,20	10,51	9,00	24,31	8,10
3,00	18,30	10,57	9,00	26,95	8,98
3,00	17,10	9,87	9,00	27,85	9,28
7,00	22,00	8,32	10,00	23,83	7,54
7,00	20,75	7,84	10,00	22,86	7,23
7,00	24,66	9,32	10,00	22,79	7,21
7,00	23,28	8,80	10,00	20,88	6,60
7,00	23,91	9,04	10,00	21,38	6,76
7,00	21,74	8,22	10,00	22,91	7,24
7,00	18,39	6,95	10,00	27,41	8,67
7,00	19,75	7,46	10,00	23,70	7,49
7,00	19,21	7,26	10,00	24,18	7,65
7,00	22,60	8,54	10,00	25,76	8,15
			10,00	25,44	8,04
			10,00	27,01	8,54

Tabela C.12 – Valores de profundidades carbonatadas e coeficientes de carbonatação natural para concretos com escória de alto forno com relação a/ag igual a 0,70 e cura seca

Idade (ano)	Profundidade (mm)	Coefficiente (mm/$\sqrt{\text{ano}}$)	Idade (ano)	Profundidade (mm)	Coefficiente (mm/$\sqrt{\text{ano}}$)
0,25	10,20	20,40	9,00	29,70	9,90
0,25	11,40	22,80	9,00	32,16	10,72
0,25	13,30	26,60	9,00	34,07	11,36
0,50	17,00	24,04	9,00	32,31	10,77
0,50	16,80	23,76	9,00	32,67	10,89
0,82	16,00	17,67	9,00	33,74	11,25
0,82	18,80	20,76	9,00	32,70	10,90
3,00	15,90	9,18	9,00	28,98	9,66
3,00	16,50	9,53	9,00	29,99	10,00
3,00	18,10	10,45	9,00	35,39	11,80
7,00	27,15	10,26	9,00	36,40	12,13
7,00	26,33	9,95	9,00	32,34	10,78
7,00	29,13	11,01	10,00	31,29	9,89
7,00	29,00	10,96	10,00	33,07	10,46
7,00	29,80	11,26	10,00	33,37	10,55
7,00	24,68	9,33	10,00	34,28	10,84
7,00	30,47	11,52	10,00	34,79	11,00
7,00	26,68	10,08	10,00	32,59	10,31
7,00	24,85	9,39	10,00	29,81	9,43
7,00	25,38	9,59	10,00	32,39	10,24
			10,00	32,25	10,20
			10,00	34,10	10,78
			10,00	35,11	11,10
			10,00	35,94	11,37

C.3 CONCRETOS COM METACAULIM

Tabela C.13 – Valores de profundidades carbonatadas e coeficientes de carbonatação natural para concretos com metacaulim com relação a/ag igual a 0,40 e cura úmida

Idade (ano)	Profundidade (mm)	Coefficiente (mm/√ano)	Idade (ano)	Profundidade (mm)	Coefficiente (mm/√ano)
0,25	0,70	1,40	9,00	11,05	3,68
0,25	0,20	0,40	9,00	9,15	3,05
0,25	0,40	0,80	9,00	11,14	3,71
0,50	0,50	0,71	9,00	6,20	2,07
0,50	0,20	0,28	9,00	4,81	1,60
0,50	0,20	0,28	9,00	8,08	2,69
0,82	0,80	0,88	9,00	6,27	2,09
0,82	0,20	0,22	9,00	9,79	3,26
0,82	0,20	0,22	9,00	8,54	2,85
3,00	0,00	0,00	9,00	7,58	2,53
3,00	0,80	0,46	9,00	9,80	3,27
3,00	0,80	0,46	9,00	7,66	2,55
3,00	0,90	0,52	10,00	9,43	2,98
3,00	1,20	0,69	10,00	10,55	3,34
3,00	0,00	0,00	10,00	8,54	2,70
3,00	0,10	0,06	10,00	9,04	2,86
3,00	0,00	0,00	10,00	11,18	3,54
3,00	0,50	0,29	10,00	7,18	2,27
7,00	8,60	3,25	10,00	8,70	2,75
7,00	6,85	2,59	10,00	9,02	2,85
7,00	8,46	3,20	10,00	9,76	3,09
7,00	5,71	2,16	10,00	8,75	2,77
7,00	3,52	1,33			
7,00	6,76	2,56			
7,00	6,32	2,39			
7,00	4,00	1,51			
7,00	5,92	2,24			
7,00	7,17	2,71			

Tabela C.14 – Valores de profundidades carbonatadas e coeficientes de carbonatação natural para concretos com metacaulim com relação a/ag igual a 0,40 e cura seca

Idade (ano)	Profundidade (mm)	Coefficiente (mm/√ano)	Idade (ano)	Profundidade (mm)	Coefficiente (mm/√ano)
0,25	2,50	5,00	9,00	13,21	4,40
0,25	2,30	4,60	9,00	12,83	4,28
0,25	2,60	5,20	9,00	13,73	4,58
0,50	4,00	5,66	9,00	11,96	3,99
0,50	3,70	5,23	9,00	11,25	3,75
0,50	3,10	4,38	9,00	11,78	3,93
0,82	3,80	4,20	9,00	14,54	4,85
0,82	4,20	4,64	9,00	14,89	4,96
0,82	3,80	4,20	9,00	12,35	4,12
3,00	6,90	3,98	9,00	13,44	4,48
3,00	7,10	4,10	9,00	11,88	3,96
3,00	5,20	3,00	9,00	13,37	4,46
3,00	8,10	4,68	10,00	11,67	3,69
3,00	7,90	4,56	10,00	11,28	3,57
3,00	4,70	2,71	10,00	10,18	3,22
3,00	5,80	3,35	10,00	7,86	2,49
3,00	5,60	3,23	10,00	12,02	3,80
3,00	5,10	2,94	10,00	15,76	4,98
7,00	8,38	3,17	10,00	12,96	4,10
7,00	7,17	2,71	10,00	11,95	3,78
7,00	7,24	2,74	10,00	12,13	3,84
7,00	8,92	3,37	10,00	11,33	3,58
7,00	9,85	3,72	10,00	8,90	2,81
7,00	8,00	3,02	10,00	9,63	3,05
7,00	8,78	3,32			
7,00	11,31	4,27			
7,00	10,70	4,04			
7,00	10,56	3,99			

Tabela C.15 – Valores de profundidades carbonatadas e coeficientes de carbonatação natural para concretos com metacaulim com relação a/ag igual a 0,55 e cura úmida

Idade (ano)	Profundidade (mm)	Coefficiente (mm/√ano)	Idade (ano)	Profundidade (mm)	Coefficiente (mm/√ano)
0,25	0,80	1,60	9,00	10,47	3,49
0,25	1,40	2,80	9,00	10,29	3,43
0,25	1,40	2,80	9,00	8,81	2,94
0,50	0,40	0,57	9,00	11,10	3,70
0,50	0,80	1,13	9,00	7,66	2,55
0,50	0,80	1,13	9,00	8,26	2,75
0,82	2,30	2,54	9,00	11,93	3,98
0,82	1,80	1,99	9,00	13,18	4,39
0,82	2,20	2,43	9,00	10,04	3,35
3,00	4,90	2,83	9,00	11,94	3,98
3,00	6,30	3,64	9,00	11,98	3,99
3,00	7,90	4,56	9,00	12,04	4,01
3,00	7,80	4,50	10,00	15,32	4,84
3,00	5,50	3,18	10,00	14,37	4,54
3,00	8,20	4,73	10,00	12,35	3,91
3,00	6,00	3,46	10,00	8,62	2,73
3,00	7,40	4,27	10,00	9,93	3,14
3,00	4,10	2,37	10,00	11,33	3,58
7,00	7,31	2,76	10,00	10,13	3,20
7,00	7,81	2,95	10,00	10,98	3,47
7,00	7,97	3,01	10,00	10,33	3,27
7,00	9,59	3,62	10,00	8,26	2,61
7,00	9,99	3,78	10,00	9,66	3,05
7,00	8,38	3,17	10,00	13,01	4,11
7,00	8,28	3,13			
7,00	10,24	3,87			
7,00	8,37	3,16			
7,00	9,85	3,72			

Tabela C.16 – Valores de profundidades carbonatadas e coeficientes de carbonatação natural para concretos com metacaulim com relação a/ag igual a 0,55 e cura seca

Idade (ano)	Profundidade (mm)	Coefficiente (mm/$\sqrt{\text{ano}}$)	Idade (ano)	Profundidade (mm)	Coefficiente (mm/$\sqrt{\text{ano}}$)
0,25	4,10	8,20	9,00	15,33	5,11
0,25	3,20	6,40	9,00	16,55	5,52
0,25	3,80	7,60	9,00	11,98	3,99
0,50	6,20	8,77	9,00	13,12	4,37
0,50	5,20	7,35	9,00	16,35	5,45
0,50	5,10	7,21	9,00	18,01	6,00
0,82	5,40	5,96	9,00	12,73	4,24
0,82	6,10	6,74	9,00	14,80	4,93
0,82	5,90	6,52	9,00	16,33	5,44
3,00	12,10	6,99	9,00	13,86	4,62
3,00	14,30	8,26	9,00	14,57	4,86
3,00	9,50	5,48	9,00	15,30	5,10
3,00	12,01	6,93	10,00	19,10	6,04
3,00	13,80	7,97	10,00	15,59	4,93
3,00	11,10	6,41	10,00	15,58	4,93
3,00	11,20	6,47	10,00	15,08	4,77
3,00	15,10	8,72	10,00	12,22	3,86
3,00	12,10	6,99	10,00	16,35	5,17
7,00	15,11	5,71	10,00	12,15	3,84
7,00	15,60	5,90	10,00	15,35	4,85
7,00	13,55	5,12	10,00	15,27	4,83
7,00	15,84	5,99	10,00	14,01	4,43
7,00	15,83	5,98	10,00	12,61	3,99
7,00	11,99	4,53	10,00	12,63	3,99
7,00	10,94	4,13			
7,00	13,29	5,02			
7,00	15,00	5,67			
7,00	13,71	5,18			

Tabela C.17 – Valores de profundidades carbonatadas e coeficientes de carbonatação natural para concretos com metacaulim com relação a/ag igual a 0,70 e cura úmida

Idade (ano)	Profundidade (mm)	Coefficiente (mm/√ano)	Idade (ano)	Profundidade (mm)	Coefficiente (mm/√ano)
0,25	2,50	5,00	9,00	22,37	7,46
0,25	1,50	3,00	9,00	21,16	7,05
0,25	1,70	3,40	9,00	24,90	8,30
0,50	2,30	3,25	9,00	20,88	6,96
0,50	3,20	4,53	9,00	22,56	7,52
0,50	2,20	3,11	9,00	23,24	7,75
0,82	3,50	3,87	9,00	22,08	7,36
0,82	3,40	3,75	9,00	21,68	7,23
0,82	2,70	2,98	9,00	22,98	7,66
3,00	10,90	6,29	9,00	20,59	6,86
3,00	9,50	5,48	9,00	19,71	6,57
3,00	9,80	5,66	9,00	23,65	7,88
3,00	12,10	6,99	10,00	25,07	7,93
3,00	10,80	6,24	10,00	20,01	6,33
3,00	12,30	7,10	10,00	25,82	8,17
3,00	13,90	8,03	10,00	29,32	9,27
3,00	9,90	5,72	10,00	25,55	8,08
3,00	12,40	7,16	10,00	24,60	7,78
7,00	17,86	6,75	10,00	24,31	7,69
7,00	16,90	6,39	10,00	24,30	7,68
7,00	18,18	6,87	10,00	21,40	6,77
7,00	23,94	9,05	10,00	28,08	8,88
7,00	16,13	6,10	10,00	21,64	6,84
7,00	16,28	6,15	10,00	26,41	8,35
7,00	14,15	5,35			
7,00	16,44	6,21			
7,00	15,47	5,85			
7,00	18,96	7,17			

Tabela C.18 – Valores de profundidades carbonatadas e coeficientes de carbonatação natural para concretos com metacaulim com relação a/ag igual a 0,70 e cura seca

Idade (ano)	Profundidade (mm)	Coefficiente (mm/√ano)	Idade (ano)	Profundidade (mm)	Coefficiente (mm/√ano)
0,25	3,80	7,60	9,00	25,64	8,55
0,25	3,70	7,40	9,00	27,98	9,33
0,25	3,60	7,20	9,00	25,01	8,34
0,50	8,00	11,31	9,00	23,29	7,76
0,50	9,40	13,29	9,00	25,18	8,39
0,50	8,00	11,31	9,00	26,11	8,70
0,82	10,20	11,26	9,00	23,68	7,89
0,82	10,30	11,37	9,00	18,57	6,19
0,82	10,30	11,37	9,00	20,91	6,97
3,00	18,30	10,57	9,00	20,30	6,77
3,00	22,10	12,76	9,00	21,23	7,08
3,00	33,90	19,57	9,00	23,74	7,91
3,00	20,70	11,95	10,00	28,10	8,89
3,00	24,60	14,20	10,00	23,89	7,55
3,00	30,30	17,49	10,00	25,82	8,17
3,00	22,90	13,22	10,00	26,92	8,51
3,00	29,50	17,03	10,00	23,69	7,49
7,00	23,41	8,85	10,00	23,66	7,48
7,00	23,33	8,82	10,00	20,17	6,38
7,00	21,50	8,13	10,00	18,67	5,90
7,00	21,10	7,98	10,00	21,77	6,88
7,00	19,86	7,51	10,00	27,07	8,56
7,00	18,43	6,97	10,00	22,30	7,05
7,00	19,76	7,47	10,00	25,25	7,98
7,00	18,02	6,81			
7,00	16,99	6,42			
7,00	17,23	6,51			
0,25	3,80	7,60			

C.4 CONCRETOS COM SÍLICA ATIVA

Tabela C.19 – Valores de profundidades carbonatadas e coeficientes de carbonatação natural para concretos com sílica ativa com relação a/ag igual a 0,40 e cura úmida

Idade (ano)	Profundidade (mm)	Coefficiente (mm/√ano)	Idade (ano)	Profundidade (mm)	Coefficiente (mm/√ano)
0,25	0,00	0,00	9,00	8,72	2,91
0,25	0,00	0,00	9,00	7,33	2,44
0,25	0,00	0,00	9,00	10,16	3,39
0,50	0,00	0,00	9,00	9,31	3,10
0,50	0,00	0,00	9,00	9,11	3,04
0,50	0,00	0,00	9,00	6,60	2,20
0,82	1,00	1,10	9,00	8,49	2,83
0,82	0,20	0,22	9,00	7,53	2,51
0,82	0,80	0,88	9,00	9,03	3,01
3,00	1,20	0,69	9,00	10,77	3,59
3,00	2,10	1,21	9,00	7,88	2,63
3,00	0,70	0,40	9,00	7,90	2,63
3,00	1,00	0,58	10,00	9,20	2,91
3,00	1,80	1,04	10,00	7,41	2,34
3,00	1,00	0,58	10,00	8,73	2,76
3,00	1,10	0,64	10,00	8,93	2,82
3,00	2,00	1,15	10,00	8,69	2,75
3,00	1,10	0,64	10,00	7,37	2,33
7,00	7,24	2,74	10,00	9,47	2,99
7,00	5,26	1,99	10,00	6,11	1,93
7,00	7,14	2,70	10,00	8,23	2,60
7,00	6,30	2,38	10,00	9,40	2,97
7,00	9,07	3,43	10,00	8,23	2,60
7,00	5,60	2,12	10,00	7,68	2,43
7,00	5,91	2,23			
7,00	8,32	3,14			
7,00	8,51	3,22			
7,00	4,15	1,57			

Tabela C.20 – Valores de profundidades carbonatadas e coeficientes de carbonatação natural para concretos com sílica ativa com relação a/ag igual a 0,40 e cura seca

Idade (ano)	Profundidade (mm)	Coeficiente (mm/√ano)	Idade (ano)	Profundidade (mm)	Coeficiente (mm/√ano)
0,25	1,50	3,00	9,00	8,74	2,91
0,25	1,40	2,80	9,00	9,53	3,18
0,25	1,30	2,60	9,00	10,89	3,63
0,50	2,70	3,82	9,00	8,68	2,89
0,50	2,80	3,96	9,00	10,18	3,39
0,50	2,70	3,82	9,00	12,22	4,07
0,82	2,70	2,98	9,00	10,25	3,42
0,82	3,60	3,98	9,00	11,58	3,86
0,82	3,30	3,64	9,00	6,93	2,31
3,00	2,50	1,44	9,00	10,49	3,50
3,00	4,60	2,66	9,00	9,49	3,16
3,00	5,10	2,94	9,00	8,41	2,80
3,00	2,70	1,56	10,00	11,44	3,62
3,00	4,70	2,71	10,00	6,11	1,93
3,00	6,10	3,52	10,00	8,99	2,84
3,00	3,60	2,08	10,00	13,64	4,31
3,00	4,00	2,31	10,00	11,01	3,48
3,00	6,40	3,70	10,00	10,74	3,40
7,00	4,12	1,56	10,00	13,48	4,26
7,00	5,18	1,96	10,00	13,45	4,25
7,00	8,16	3,08	10,00	10,89	3,44
7,00	7,32	2,77	10,00	11,51	3,64
7,00	7,30	2,76	10,00	8,05	2,55
7,00	7,91	2,99	10,00	7,66	2,42
7,00	6,37	2,41			
7,00	7,59	2,87			
7,00	7,66	2,90			
7,00	6,83	2,58			

Tabela C.21 – Valores de profundidades carbonatadas e coeficientes de carbonatação natural para concretos com sílica ativa com relação a/ag igual a 0,55 e cura úmida

Idade (ano)	Profundidade (mm)	Coefficiente (mm/√ano)	Idade (ano)	Profundidade (mm)	Coefficiente (mm/√ano)
0,25	2,60	5,20	9,00	23,34	7,78
0,25	1,60	3,20	9,00	22,43	7,48
0,25	1,10	2,20	9,00	16,91	5,64
0,50	2,40	3,39	9,00	20,66	6,89
0,50	2,40	3,39	9,00	12,63	4,21
0,50	2,40	3,39	9,00	14,23	4,74
0,82	4,80	5,30	9,00	22,17	7,39
0,82	4,10	4,53	9,00	20,26	6,75
0,82	4,20	4,64	9,00	18,37	6,12
3,00	8,80	5,08	9,00	14,45	4,82
3,00	9,60	5,54	9,00	15,74	5,25
3,00	9,30	5,37	9,00	16,72	5,57
3,00	9,30	5,37	10,00	21,50	6,80
3,00	10,20	5,89	10,00	19,49	6,16
3,00	8,40	4,85	10,00	18,30	5,79
3,00	9,60	5,54	10,00	13,88	4,39
3,00	9,20	5,31	10,00	11,35	3,59
3,00	8,60	4,97	10,00	12,76	4,04
7,00	18,76	7,09	10,00	23,50	7,43
7,00	16,03	6,06	10,00	24,16	7,64
7,00	16,25	6,14	10,00	16,34	5,17
7,00	11,55	4,37	10,00	18,14	5,74
7,00	14,69	5,55	10,00	16,02	5,07
7,00	19,81	7,49	10,00	14,02	4,43
7,00	16,85	6,37			
7,00	14,85	5,61			
7,00	11,76	4,44			
7,00	11,99	4,53			

Tabela C.22 – Valores de profundidades carbonatadas e coeficientes de carbonatação natural para concretos com sílica ativa com relação a/ag igual a 0,55 e cura seca

Idade (ano)	Profundidade (mm)	Coefficiente (mm/√ano)	Idade (ano)	Profundidade (mm)	Coefficiente (mm/√ano)
0,25	3,40	6,80	9,00	24,74	8,25
0,25	4,40	8,80	9,00	22,38	7,46
0,25	4,00	8,00	9,00	18,69	6,23
0,50	4,40	6,22	9,00	17,82	5,94
0,50	4,80	6,79	9,00	18,58	6,19
0,50	4,90	6,93	9,00	19,67	6,56
0,82	6,90	7,62	9,00	20,87	6,96
0,82	6,20	6,85	9,00	19,12	6,37
0,82	6,40	7,07	9,00	18,41	6,14
3,00	15,60	9,01	9,00	18,93	6,31
3,00	13,60	7,85	9,00	19,45	6,48
3,00	13,00	7,51	9,00	19,17	6,39
3,00	13,00	7,51	10,00	23,87	7,55
3,00	13,20	7,62	10,00	23,39	7,40
3,00	13,10	7,56	10,00	24,46	7,73
3,00	13,20	7,62	10,00	20,62	6,52
3,00	13,80	7,97	10,00	19,90	6,29
3,00	13,10	7,56	10,00	19,42	6,14
7,00	20,30	7,67	10,00	24,06	7,61
7,00	18,17	6,87	10,00	25,25	7,98
7,00	17,80	6,73	10,00	20,49	6,48
7,00	16,00	6,05	10,00	20,93	6,62
7,00	18,10	6,84	10,00	19,75	6,25
7,00	17,10	6,46	10,00	16,94	5,36
7,00	15,90	6,01			
7,00	15,38	5,81			
7,00	15,39	5,82			
7,00	14,39	5,44			

Tabela C.23 – Valores de profundidades carbonatadas e coeficientes de carbonatação natural para concretos com sílica ativa com relação a/ag igual a 0,70 e cura úmida

Idade (ano)	Profundidade (mm)	Coefficiente (mm/√ano)	Idade (ano)	Profundidade (mm)	Coefficiente (mm/√ano)
0,25	0,20	0,40	9,00	24,33	8,11
0,25	2,00	4,00	9,00	23,68	7,89
0,25	1,80	3,60	9,00	19,01	6,34
0,50	2,00	2,83	9,00	23,89	7,96
0,50	2,30	3,25	9,00	24,59	8,20
0,50	2,40	3,39	9,00	24,07	8,02
0,82	4,00	4,42	9,00	21,32	7,11
0,82	3,00	3,31	9,00	22,96	7,65
0,82	1,80	1,99	9,00	21,18	7,06
3,00	6,90	3,98	9,00	22,61	7,54
3,00	9,60	5,54	9,00	23,58	7,86
3,00	11,00	6,35	9,00	22,64	7,55
3,00	10,20	5,89	10,00	21,28	6,73
3,00	10,30	5,95	10,00	25,91	8,19
3,00	13,20	7,62	10,00	21,31	6,74
3,00	10,30	5,95	10,00	21,81	6,90
3,00	10,20	5,89	10,00	21,68	6,86
3,00	15,60	9,01	10,00	22,92	7,25
7,00	18,89	7,14	10,00	24,21	7,66
7,00	19,29	7,29	10,00	24,35	7,70
7,00	16,62	6,28	10,00	24,55	7,76
7,00	17,31	6,54	10,00	24,93	7,88
7,00	15,65	5,92	10,00	21,59	6,83
7,00	21,61	8,17	10,00	22,35	7,07
7,00	23,08	8,72			
7,00	21,39	8,08			
7,00	19,30	7,29			
7,00	21,48	8,12			

Tabela C.24 – Valores de profundidades carbonatadas e coeficientes de carbonatação natural para concretos com sílica ativa com relação a/ag igual a 0,70 e cura seca

Idade (ano)	Profundidade (mm)	Coefficiente (mm/√ano)	Idade (ano)	Profundidade (mm)	Coefficiente (mm/√ano)
0,25	5,50	11,00	9,00	35,65	11,88
0,25	6,20	12,40	9,00	32,67	10,89
0,25	5,50	11,00	9,00	27,79	9,26
0,50	6,10	8,63	9,00	26,62	8,87
0,50	10,10	14,28	9,00	30,39	10,13
0,50	11,10	15,70	9,00	31,88	10,63
0,82	9,70	10,71	9,00	29,79	9,93
0,82	10,50	11,60	9,00	27,15	9,05
0,82	8,10	8,94	9,00	26,45	8,82
3,00	18,80	10,85	9,00	26,55	8,85
3,00	21,70	12,53	9,00	28,51	9,50
3,00	10,90	6,29	9,00	27,31	9,10
3,00	15,50	8,95	10,00	28,21	8,92
3,00	21,80	12,59	10,00	29,89	9,45
3,00	11,00	6,35	10,00	26,87	8,50
3,00	16,70	9,64	10,00	25,88	8,18
3,00	20,20	11,66	10,00	25,99	8,22
3,00	9,90	5,72	10,00	25,13	7,95
7,00	26,86	10,15	10,00	29,39	9,29
7,00	26,15	9,88	10,00	31,65	10,01
7,00	26,97	10,19	10,00	28,22	8,92
7,00	24,84	9,39	10,00	28,59	9,04
7,00	23,93	9,04	10,00	26,92	8,51
7,00	22,12	8,36	10,00	27,64	8,74
7,00	23,94	9,05			
7,00	25,24	9,54			
7,00	26,81	10,13			
7,00	26,29	9,94			

C.5 CONCRETOS COM CINZA VOLANTE

Tabela C.25 – Valores de profundidades carbonatadas e coeficientes de carbonatação natural para concretos com cinza volante com relação a/ag igual a 0,40 e cura úmida

Idade (ano)	Profundidade (mm)	Coefficiente (mm/√ano)	Idade (ano)	Profundidade (mm)	Coefficiente (mm/√ano)
0,25	0,00	0,00	9,00	8,93	2,98
0,25	0,00	0,00	9,00	9,92	3,31
0,25	0,10	0,20	9,00	11,64	3,88
0,50	0,00	0,00	9,00	12,41	4,14
0,50	0,00	0,00	9,00	11,11	3,70
0,50	0,30	0,42	9,00	14,01	4,67
0,82	2,50	2,76	9,00	10,07	3,36
0,82	2,00	2,21	9,00	9,20	3,07
0,82	2,10	2,32	9,00	9,66	3,22
3,00	4,10	2,37	9,00	11,25	3,75
3,00	5,20	3,00	9,00	13,98	4,66
3,00	5,40	3,12	9,00	11,43	3,81
3,00	4,60	2,66	10,00	13,24	4,19
3,00	4,60	2,66	10,00	10,03	3,17
3,00	5,00	2,89	10,00	8,06	2,55
3,00	4,50	2,60	10,00	7,31	2,31
3,00	4,80	2,77	10,00	9,76	3,09
3,00	5,10	2,94	10,00	8,33	2,63
7,00	6,75	2,55	10,00	12,78	4,04
7,00	5,85	2,21	10,00	8,47	2,68
7,00	7,30	2,76	10,00	7,78	2,46
7,00	11,00	4,16	10,00	10,54	3,33
7,00	7,38	2,79	10,00	8,44	2,67
7,00	10,00	3,78	10,00	10,01	3,17
7,00	9,45	3,57			
7,00	9,43	3,56			
7,00	6,93	2,62			
7,00	8,11	3,07			

Tabela C.26 – Valores de profundidades carbonatadas e coeficientes de carbonatação natural para concretos com cinza volante com relação a/ag igual a 0,40 e cura seca

Idade (ano)	Profundidade (mm)	Coefficiente (mm/√ano)	Idade (ano)	Profundidade (mm)	Coefficiente (mm/√ano)
0,25	1,90	3,80	9,00	17,88	5,96
0,25	3,10	6,20	9,00	16,77	5,59
0,25	1,50	3,00	9,00	15,13	5,04
0,50	2,30	3,25	9,00	16,14	5,38
0,50	2,10	2,97	9,00	14,17	4,72
0,50	3,40	4,81	9,00	15,51	5,17
0,82	4,10	4,53	9,00	12,59	4,20
0,82	4,80	5,30	9,00	15,26	5,09
0,82	3,50	3,87	9,00	15,01	5,00
3,00	8,00	4,62	9,00	18,24	6,08
3,00	10,50	6,06	9,00	16,51	5,50
3,00	8,50	4,91	9,00	18,58	6,19
3,00	8,20	4,73	10,00	17,55	5,55
3,00	9,00	5,20	10,00	17,31	5,47
3,00	9,10	5,25	10,00	15,48	4,90
3,00	8,10	4,68	10,00	14,02	4,43
3,00	9,50	5,48	10,00	14,18	4,48
3,00	8,00	4,62	10,00	14,89	4,71
7,00	15,47	5,85	10,00	17,43	5,51
7,00	13,60	5,14	10,00	19,94	6,31
7,00	8,96	3,39	10,00	17,35	5,49
7,00	8,85	3,34	10,00	12,93	4,09
7,00	9,50	3,59	10,00	16,14	5,10
7,00	14,20	5,37	10,00	14,74	4,66
7,00	13,60	5,14			
7,00	12,00	4,54			
7,00	11,75	4,44			
7,00	10,85	4,10			

Tabela C.27 – Valores de profundidades carbonatadas e coeficientes de carbonatação natural para concretos com cinza volante com relação a/ag igual a 0,55 e cura úmida

Idade (ano)	Profundidade (mm)	Coefficiente (mm/$\sqrt{\text{ano}}$)	Idade (ano)	Profundidade (mm)	Coefficiente (mm/$\sqrt{\text{ano}}$)
0,25	1,30	2,60	9,00	18,66	6,22
0,25	2,00	4,00	9,00	20,23	6,74
0,25	1,30	2,60	9,00	19,14	6,38
0,50	3,80	5,37	9,00	21,52	7,17
0,50	2,80	3,96	9,00	19,06	6,35
0,50	3,10	4,38	9,00	21,77	7,26
0,82	6,10	6,74	9,00	17,43	5,81
0,82	5,60	6,18	9,00	17,59	5,86
0,82	5,40	5,96	9,00	20,45	6,82
3,00	12,10	6,99	9,00	20,61	6,87
3,00	11,60	6,70	9,00	21,87	7,29
3,00	11,60	6,70	9,00	21,10	7,03
3,00	12,10	6,99	10,00	24,32	7,69
3,00	11,10	6,41	10,00	21,97	6,95
3,00	12,50	7,22	10,00	21,84	6,91
7,00	19,20	7,26	10,00	21,23	6,71
7,00	22,01	8,32	10,00	22,32	7,06
7,00	20,32	7,68	10,00	23,53	7,44
7,00	17,25	6,52	10,00	18,10	5,72
7,00	15,06	5,69	10,00	17,81	5,63
7,00	14,20	5,37	10,00	19,92	6,30
7,00	19,48	7,36	10,00	22,21	7,02
7,00	16,97	6,41	10,00	18,27	5,78
7,00	17,03	6,44	10,00	17,83	5,64
7,00	16,25	6,14			

Tabela C.28 – Valores de profundidades carbonatadas e coeficientes de carbonatação natural para concretos com cinza volante com relação a/ag igual a 0,55 e cura seca

Idade (ano)	Profundidade (mm)	Coeficiente (mm/$\sqrt{\text{ano}}$)	Idade (ano)	Profundidade (mm)	Coeficiente (mm/$\sqrt{\text{ano}}$)
0,25	4,10	8,20	9,00	26,22	8,74
0,25	4,30	8,60	9,00	23,83	7,94
0,25	3,80	7,60	9,00	24,17	8,06
0,50	5,90	8,34	9,00	25,48	8,49
0,50	6,60	9,33	9,00	23,31	7,77
0,50	5,30	7,50	9,00	26,06	8,69
0,82	8,00	8,83	9,00	24,71	8,24
0,82	8,30	9,17	9,00	25,60	8,53
0,82	8,80	9,72	9,00	25,09	8,36
3,00	19,50	11,26	9,00	24,26	8,09
3,00	18,30	10,57	9,00	25,84	8,61
3,00	18,60	10,74	9,00	23,15	7,72
3,00	17,30	9,99	10,00	25,68	8,12
3,00	18,20	10,51	10,00	23,74	7,51
3,00	19,30	11,14	10,00	23,77	7,52
3,00	19,20	11,09	10,00	25,88	8,18
3,00	17,60	10,16	10,00	23,44	7,41
3,00	17,50	10,10	10,00	26,41	8,35
7,00	21,52	8,13	10,00	25,96	8,21
7,00	22,17	8,38	10,00	25,72	8,13
7,00	22,93	8,67	10,00	25,29	8,00
7,00	20,80	7,86	10,00	24,93	7,88
7,00	24,00	9,07	10,00	27,80	8,79
7,00	22,70	8,58	10,00	27,58	8,72
7,00	21,48	8,12			
7,00	19,13	7,23			
7,00	20,60	7,79			
7,00	21,10	7,98			

Tabela C.29 – Valores de profundidades carbonatadas e coeficientes de carbonatação natural para concretos com cinza volante com relação a/ag igual a 0,70 e cura úmida

Idade (ano)	Profundidade (mm)	Coeficiente (mm/$\sqrt{\text{ano}}$)	Idade (ano)	Profundidade (mm)	Coeficiente (mm/$\sqrt{\text{ano}}$)
0,25	2,90	5,80	9,00	27,38	9,13
0,25	2,50	5,00	9,00	27,81	9,27
0,25	2,80	5,60	9,00	24,91	8,30
0,50	3,60	5,09	9,00	24,10	8,03
0,50	7,10	10,04	9,00	29,87	9,96
0,50	5,30	7,50	9,00	26,23	8,74
0,82	7,10	7,84	9,00	26,81	8,94
0,82	7,10	7,84	9,00	24,79	8,26
0,82	4,40	4,86	9,00	28,38	9,46
3,00	10,50	6,06	9,00	26,94	8,98
3,00	12,10	6,99	9,00	29,70	9,90
3,00	12,80	7,39	9,00	29,31	9,77
3,00	9,80	5,66	10,00	24,14	7,63
3,00	11,20	6,47	10,00	29,43	9,31
3,00	12,90	7,45	10,00	27,31	8,64
3,00	11,10	6,41	10,00	29,53	9,34
3,00	9,10	5,25	10,00	25,18	7,96
3,00	12,70	7,33	10,00	27,81	8,79
3,00	12,20	7,04	10,00	30,65	9,69
7,00	25,25	9,54	10,00	28,38	8,97
7,00	23,78	8,99	10,00	29,08	9,20
7,00	22,91	8,66	10,00	27,81	8,79
7,00	20,57	7,77	10,00	29,65	9,38
7,00	22,81	8,62	10,00	27,38	8,66
7,00	22,96	8,68			
7,00	23,92	9,04			
7,00	22,42	8,47			
7,00	22,40	8,47			
7,00	26,56	10,04			

Tabela C.30 – Valores de profundidades carbonatadas e coeficientes de carbonatação natural para concretos com cinza volante com relação a/ag igual a 0,70 e cura seca

Idade (ano)	Profundidade (mm)	Coefficiente (mm/$\sqrt{\text{ano}}$)	Idade (ano)	Profundidade (mm)	Coefficiente (mm/$\sqrt{\text{ano}}$)
0,25	5,60	11,20	9,00	36,26	12,09
0,25	8,30	16,60	9,00	33,86	11,29
0,25	7,90	15,80	9,00	34,10	11,37
0,50	9,60	13,58	9,00	35,46	11,82
0,50	10,50	14,85	9,00	38,64	12,88
0,82	12,20	13,47	9,00	34,41	11,47
0,82	10,90	12,04	9,00	33,82	11,27
3,00	20,36	11,75	9,00	34,41	11,47
3,00	23,06	13,31	9,00	36,27	12,09
7,00	33,46	12,65	9,00	34,47	11,49
7,00	30,98	11,71	9,00	35,50	11,83
7,00	32,82	12,40	9,00	36,65	12,22
7,00	34,50	13,04	10,00	36,35	11,49
7,00	30,41	11,49	10,00	35,16	11,12
7,00	32,59	12,32	10,00	35,81	11,32
7,00	33,40	12,62	10,00	34,61	10,94
7,00	31,80	12,02	10,00	35,11	11,10
7,00	29,81	11,27	10,00	40,07	12,67
7,00	31,41	11,87	10,00	42,85	13,55
			10,00	37,04	11,71
			10,00	34,85	11,02
			10,00	33,01	10,44
			10,00	38,32	12,12
			10,00	43,25	13,68

C.6 CONCRETOS COM CINZA DE CASCA DE ARROZ

Tabela C.31 – Valores de profundidades carbonatadas e coeficientes de carbonatação natural para concretos com cinza de casca de arroz com relação a/ag igual a 0,40 e cura úmida

Idade (ano)	Profundidade (mm)	Coefficiente (mm/ $\sqrt{\text{ano}}$)	Idade (ano)	Profundidade (mm)	Coefficiente (mm/ $\sqrt{\text{ano}}$)
0,25	0,00	0,00	9,00	6,22	2,07
0,25	0,00	0,00	9,00	6,46	2,15
0,25	0,00	0,00	9,00	9,92	3,31
0,50	0,60	0,85	9,00	5,78	1,93
0,50	1,10	1,56	9,00	5,27	1,76
0,50	0,30	0,42	9,00	7,65	2,55
0,82	1,50	1,66	9,00	3,80	1,27
0,82	2,00	2,21	9,00	3,29	1,10
0,82	1,00	1,10	9,00	6,94	2,31
3,00	2,20	1,27	9,00	4,97	1,66
3,00	1,90	1,10	9,00	3,34	1,11
3,00	1,90	1,10	9,00	5,57	1,86
3,00	1,80	1,04	10,00	2,52	0,80
3,00	2,10	1,21	10,00	5,14	1,63
3,00	2,60	1,50	10,00	4,96	1,57
3,00	2,10	1,21	10,00	4,64	1,47
3,00	2,40	1,39	10,00	4,92	1,56
3,00	1,60	0,92	10,00	4,98	1,57
7,00	7,64	2,89	10,00	2,41	0,76
7,00	7,93	3,00	10,00	6,61	2,09
7,00	4,40	1,66	10,00	9,95	3,15
7,00	5,33	2,01	10,00	6,70	2,12
7,00	2,97	1,12	10,00	6,99	2,21
7,00	3,33	1,26	10,00	5,51	1,74
7,00	7,85	2,97			
7,00	5,88	2,22			
7,00	6,29	2,38			
7,00	4,94	1,87			

Tabela C.32 – Valores de profundidades carbonatadas e coeficientes de carbonatação natural para concretos com cinza de casca de arroz com relação a/ag igual a 0,40 e cura seca

Idade (ano)	Profundidade (mm)	Coefficiente (mm/$\sqrt{\text{ano}}$)	Idade (ano)	Profundidade (mm)	Coefficiente (mm/$\sqrt{\text{ano}}$)
0,25	2,30	4,60	9,00	11,57	3,86
0,25	1,50	3,00	9,00	9,77	3,26
0,25	1,50	3,00	9,00	10,79	3,60
0,50	4,30	6,08	9,00	9,60	3,20
0,50	2,50	3,54	9,00	11,70	3,90
0,50	2,40	3,39	9,00	11,99	4,00
0,82	4,40	4,86	9,00	11,79	3,93
0,82	3,80	4,20	9,00	10,82	3,61
0,82	4,90	5,41	9,00	9,74	3,25
3,00	8,50	4,91	9,00	8,24	2,75
3,00	7,90	4,56	9,00	8,35	2,78
3,00	6,80	3,93	9,00	10,21	3,40
3,00	7,70	4,45	10,00	14,41	4,56
3,00	6,90	3,98	10,00	13,15	4,16
3,00	7,00	4,04	10,00	12,26	3,88
3,00	8,60	4,97	10,00	7,49	2,37
3,00	6,60	3,81	10,00	7,26	2,30
3,00	6,10	3,52	10,00	7,59	2,40
7,00	10,71	4,05	10,00	14,57	4,61
7,00	9,80	3,70	10,00	11,09	3,51
7,00	6,00	2,27	10,00	10,46	3,31
7,00	8,31	3,14	10,00	8,66	2,74
7,00	8,05	3,04	10,00	6,89	2,18
7,00	14,17	5,36	10,00	8,01	2,53
7,00	15,84	5,99			
7,00	9,50	3,59			
7,00	8,49	3,21			
7,00	6,28	2,37			

Tabela C.33 – Valores de profundidades carbonatadas e coeficientes de carbonatação natural para concretos com cinza de casca de arroz com relação a/ag igual a 0,55 e cura úmida

Idade (ano)	Profundidade (mm)	Coefficiente (mm/$\sqrt{\text{ano}}$)	Idade (ano)	Profundidade (mm)	Coefficiente (mm/$\sqrt{\text{ano}}$)
0,25	1,70	3,40	9,00	16,58	5,53
0,25	0,50	1,00	9,00	18,28	6,09
0,25	0,70	1,40	9,00	17,45	5,82
0,50	2,20	3,11	9,00	18,07	6,02
0,50	2,20	3,11	9,00	13,02	4,34
0,50	2,00	2,83	9,00	14,06	4,69
0,82	3,30	3,64	9,00	18,01	6,00
0,82	3,20	3,53	9,00	14,67	4,89
0,82	4,20	4,64	9,00	16,17	5,39
3,00	8,30	4,79	9,00	15,13	5,04
3,00	8,70	5,02	9,00	11,28	3,76
3,00	9,40	5,43	9,00	14,07	4,69
3,00	7,10	4,10	10,00	18,25	5,77
3,00	8,70	5,02	10,00	15,04	4,76
3,00	7,20	4,16	10,00	18,58	5,88
3,00	7,90	4,56	10,00	17,87	5,65
3,00	8,60	4,97	10,00	16,82	5,32
3,00	7,50	4,33	10,00	16,55	5,23
7,00	12,00	4,54	10,00	14,66	4,64
7,00	11,00	4,16	10,00	16,14	5,10
7,00	10,98	4,15	10,00	13,64	4,31
7,00	11,71	4,43	10,00	14,40	4,55
7,00	7,50	2,83	10,00	13,77	4,35
7,00	12,18	4,60	10,00	14,63	4,63
7,00	12,00	4,54			
7,00	10,85	4,10			
7,00	10,46	3,95			
7,00	8,00	3,02			

Tabela C.34 – Valores de profundidades carbonatadas e coeficientes de carbonatação natural para concretos com cinza de casca de arroz com relação a/ag igual a 0,55 e cura seca

Idade (ano)	Profundidade (mm)	Coeficiente (mm/√ano)	Idade (ano)	Profundidade (mm)	Coeficiente (mm/√ano)
0,25	3,70	7,40	9,00	14,76	4,92
0,25	3,20	6,40	9,00	13,03	4,34
0,25	2,00	4,00	9,00	13,44	4,48
0,50	3,00	4,24	9,00	15,81	5,27
0,50	3,50	4,95	9,00	17,22	5,74
0,50	3,30	4,67	9,00	18,15	6,05
0,82	5,40	5,96	9,00	14,95	4,98
0,82	6,30	6,96	9,00	15,17	5,06
0,82	7,00	7,73	9,00	12,53	4,18
3,00	12,20	7,04	9,00	18,85	6,28
3,00	11,80	6,81	9,00	17,74	5,91
3,00	12,60	7,27	9,00	18,00	6,00
3,00	12,90	7,45	10,00	20,42	6,46
3,00	12,00	6,93	10,00	17,26	5,46
3,00	11,90	6,87	10,00	18,19	5,75
3,00	12,50	7,22	10,00	15,77	4,99
3,00	12,40	7,16	10,00	16,05	5,08
3,00	12,30	7,10	10,00	15,26	4,83
7,00	10,71	4,05	10,00	16,75	5,30
7,00	9,80	3,70	10,00	18,89	5,97
7,00	6,00	2,27	10,00	17,73	5,61
7,00	8,31	3,14	10,00	14,71	4,65
7,00	8,05	3,04	10,00	15,80	5,00
7,00	14,17	5,36	10,00	15,99	5,06
7,00	15,84	5,99			
7,00	9,50	3,59			
7,00	8,49	3,21			
7,00	6,28	2,37			

Tabela C.35 – Valores de profundidades carbonatadas e coeficientes de carbonatação natural para concretos com cinza de casca de arroz com relação a/ag igual a 0,70 e cura úmida

Idade (ano)	Profundidade (mm)	Coefficiente (mm/$\sqrt{\text{ano}}$)	Idade (ano)	Profundidade (mm)	Coefficiente (mm/$\sqrt{\text{ano}}$)
0,25	2,50	5,00	9,00	21,63	7,21
0,25	1,60	3,20	9,00	23,18	7,73
0,25	1,90	3,80	9,00	21,64	7,21
0,50	4,40	6,22	9,00	21,73	7,24
0,50	4,60	6,51	9,00	20,83	6,94
0,50	4,70	6,65	9,00	23,31	7,77
0,82	5,80	6,41	9,00	21,38	7,13
0,82	4,80	5,30	9,00	21,81	7,27
0,82	5,60	6,18	9,00	21,92	7,31
3,00	14,10	8,14	9,00	21,25	7,08
3,00	12,50	7,22	9,00	23,32	7,77
3,00	14,60	8,43	9,00	20,33	6,78
3,00	12,30	7,10	10,00	23,70	7,49
3,00	11,10	6,41	10,00	27,23	8,61
3,00	11,30	6,52	10,00	22,52	7,12
3,00	10,80	6,24	10,00	21,36	6,75
3,00	11,40	6,58	10,00	20,84	6,59
3,00	10,50	6,06	10,00	23,30	7,37
7,00	17,01	6,43	10,00	20,68	6,54
7,00	16,89	6,38	10,00	21,75	6,88
7,00	18,70	7,07	10,00	21,60	6,83
7,00	20,32	7,68	10,00	26,10	8,25
7,00	19,73	7,46	10,00	24,57	7,77
7,00	17,78	6,72	10,00	23,05	7,29
7,00	21,13	7,99			
7,00	21,00	7,94			
7,00	22,23	8,40			
7,00	20,33	7,68			

Tabela C.36 – Valores de profundidades carbonatadas e coeficientes de carbonatação natural para concretos com cinza de casca de arroz com relação a/ag igual a 0,70 e cura seca

Idade (ano)	Profundidade (mm)	Coefficiente (mm/√ano)	Idade (ano)	Profundidade (mm)	Coefficiente (mm/√ano)
0,25	6,30	12,60	9,00	23,92	7,97
0,25	5,10	10,20	9,00	24,74	8,25
0,25	6,00	12,00	9,00	27,05	9,02
0,50	6,20	8,77	9,00	28,72	9,57
0,50	6,20	8,77	9,00	25,97	8,66
0,50	5,00	7,07	9,00	26,13	8,71
0,82	10,10	11,15	9,00	26,85	8,95
0,82	10,00	11,04	9,00	29,58	9,86
0,82	9,40	10,38	9,00	26,09	8,70
3,00	21,50	12,41	9,00	27,21	9,07
3,00	19,90	11,49	9,00	26,40	8,80
3,00	21,20	12,24	9,00	22,62	7,54
3,00	22,70	13,11	10,00	22,22	7,03
3,00	20,70	11,95	10,00	28,36	8,97
3,00	19,80	11,43	10,00	27,83	8,80
3,00	22,30	12,87	10,00	26,14	8,27
3,00	19,90	11,49	10,00	27,39	8,66
3,00	21,70	12,53	10,00	27,98	8,85
7,00	24,10	9,11	10,00	32,56	10,30
7,00	25,11	9,49	10,00	28,22	8,92
7,00	24,51	9,26	10,00	29,23	9,24
7,00	24,50	9,26	10,00	27,83	8,80
7,00	22,24	8,41	10,00	27,46	8,68
7,00	20,14	7,61	10,00	27,21	8,60
7,00	24,20	9,15			
7,00	24,49	9,26			
7,00	25,49	9,63			
7,00	24,07	9,10			