

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL**

**ESTUDO DA CARBONATAÇÃO EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS
PRODUZIDOS COM O EMPREGO DE ADITIVOS REDUTORES DE
PERMEABILIDADE POR CRISTALIZAÇÃO CAPILAR**

Christopher Augusto Campos

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
Fevereiro/2018

CHRISTOPHER AUGUSTO CAMPOS

**ESTUDO DA CARBONATAÇÃO EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS
PRODUZIDOS COM O EMPREGO DE ADITIVOS REDUTORES DE
PERMEABILIDADE POR CRISTALIZAÇÃO CAPILAR**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Construção Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Construção Civil. Área de concentração: Construção Civil. Linha de pesquisa: Materiais Cimentícios.

Orientador: Prof. Dr. Aldo Giuntini de Magalhães

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2018

C198e

Campos, Christopher Augusto.

Estudo da carbonatação em compósitos cimentícios produzidos com o emprego de aditivos redutores de permeabilidade por cristalização capilar [manuscrito] / Christopher Augusto Campos. – 2018.
xxv, 132 f., enc.: il.

Orientador: Aldo Giuntini de Magalhães.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Apêndices: f. 123-132.

Bibliografia: f. 112-122.

1. Construção civil - Teses. 2. Materiais de construção - Teses.
3. Carbonatação - Teses. 4. Cimento portland - Teses. 5. Cristalização - Teses. I. Magalhães, Aldo Giuntini de. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 691(043)


CHRÍSTOPHER AUGUSTO CAMPOS

**"ESTUDO DA CARBONATAÇÃO EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS
PRODUZIDOS COM ADITIVOS REDUTORES DE PERMEABILIDADE POR
CRISTALIZAÇÃO CAPILAR"**

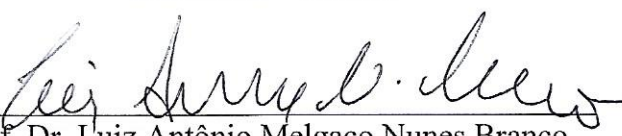
Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Construção Civil e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Construção Civil do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais.

Belo Horizonte, 21 de fevereiro de 2018

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Aldo Giuntini de Magalhães
Orientador – UFMG



Prof. Dr. Luiz Antônio Melgaço Nunes Branco
UFMG



Prof.ª Dr.ª Sofia Maria Carrato Diniz
UFMG

Eu dedico este trabalho à todos que passaram pela minha vida e que contribuíram, direta ou indiretamente, para o meu crescimento e para a formação da pessoa que sou hoje.

“Continuo acreditando que o segredo da vida é ter um sonho para me fazer levantar determinado e sempre um motivo para me fazer dormir agradecido.”

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao engenheiro de todas as obras em minha vida, Deus! Por me conceder saúde para concretizar os meus objetivos e por me guiar em todas as decisões.

Aos professores do mestrado pelos conhecimentos transmitidos ao longo desta jornada e que foram de extrema valia para o meu desenvolvimento acadêmico.

Ao Prof. Aldo Giuntini, não apenas pela orientação, mas pelo auxílio, apoio, presença e ensinamentos durante a execução do trabalho.

Aos colaboradores dos Laboratórios de Metalurgia e do Centro de Microscopia da Escola de Engenharia da UFMG pela ajuda nos ensaios de caracterização dos materiais e pelo ensaio de MEV. Sem este apoio, a realização deste trabalho não teria sido possível.

Aos funcionários do Laboratório de Concreto da Escola de Engenharia da UFMG por disponibilizar os equipamentos e o espaço para a realização dos ensaios.

Aos meus colegas Ruan e Lucas por me ajudarem durante meses a consolidar os dados experimentais deste trabalho. Sem o apoio de vocês dois, a realização deste trabalho seria impossível.

Ao Laboratório de Materiais Cimentícios da Escola de Engenharia da UFMG (LabMac) pelo fornecimento da infraestrutura necessária para realização dos ensaios.

À Holcim, ao IPT, aos fabricantes dos aditivos, pelos materiais e apoio técnico.

À empresa AFiatec pelo desenvolvimento das fôrmas necessárias para a execução dos ensaios relativos à carbonatação.

Às empresas LENC e LABCON pelo apoio no ensaio de resistência à compressão.

Ao CNPq, à FAPEMIG e à CAPES pelo apoio financeiro.

A todos vocês, ofereço minha gratidão e o mais sincero muito obrigado!!

“Agradeço todas as dificuldades que enfrentei; não fosse por elas, eu não teria saído do lugar. As facilidades nos impedem de caminhar. Mesmo as críticas nos auxiliam muito.”

Chico Xavier

RESUMO

A reação do ácido carbônico (H_2CO_3), proveniente da dissolução do dióxido de carbono (CO_2) atmosférico, com os álcalis originários da hidratação do cimento Portland é a principal causa da redução do pH do líquido intersticial presente nos poros dos compósitos de matriz cimentícia. A velocidade de avanço da frente de carbonatação está condicionada a fatores que estão diretamente relacionados à sua composição, às condições de exposição e às características de sua microestrutura. O sistema de distribuição de poros dos compósitos de cimento Portland, por sua vez, é fortemente influenciado pelos parâmetros de dosagem, dentre os quais, dá-se destaque ao uso de aditivos e à relação água/cimento utilizada. Neste contexto, o presente trabalho buscou verificar os efeitos de dois aditivos redutores de permeabilidade por cristalização capilar dosados em duas diferentes relações água/cimento e acompanhar a variação do potencial hidrogeniônico (pH) de corpos de prova (CPs) cilíndricos e prismáticos de argamassa com dimensão padrão de (5 x 10) cm, preparados a partir de seis traços distintos e acondicionados em câmara de carbonatação, com condições controladas de umidade, temperatura e concentração de CO_2 . Para tal, foi realizado o monitoramento do avanço da frente de carbonatação utilizando-se, como indicador, uma solução de fenolftaleína preparada conforme os padrões da norma ISO 1920-12 (2015), paralelamente à medição da variação do pH na superfície do compósito cimentício, utilizando-se equipamento específico para este fim. Para avaliar as alterações na microestrutura de poros da matriz cimentícia do material, um corpo de prova na dimensão (2 x 4) cm, de cada um dos seis traços estudados, foi ensaiado aos 56 dias de carbonatação acelerada, por meio da técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV). Comprovou-se que o uso do equipamento para leitura de pH permite um monitoramento eficiente da variação do pH em função do tempo de carbonatação, tornando-se possível detectar a redução de alcalinidade em regiões não assinaladas pelo indicador de fenolftaleína, pelo fato dos valores de pH apresentarem-se acima da faixa de viragem da solução aspergida. A partir das imagens obtidas no ensaio de MEV foi possível visualizar a densificação do material presente na borda e na camada mais central dos CPs. Os resultados obtidos acusaram grande variação na velocidade de avanço da frente de carbonatação acompanhada da redução do pH dos CPs, em função do aditivo e da relação água/cimento utilizada na mistura, bem como da geometria estabelecida para o CP. Tais resultados mostraram relação direta entre a velocidade do avanço da frente de carbonatação e as características da microestrutura de cada um dos traços ensaiados.

Palavras-Chave: carbonatação, aditivos redutores de permeabilidade por cristalização capilar, relação água/cimento, compósitos cimentícios, pH.

ABSTRACT

The reaction of carbonic acid (H_2CO_3), released during dissolution of atmospheric carbon dioxide (CO_2), with alkalis derived from hydration of Portland cement is the main cause of pH reduction in interstitial liquids existing within pores of cement-matrix composites. The forward speed of the carbonation front depends on factors that are directly related to its composition, exposure conditions, and microstructural characteristics. The system of pore distribution in Portland cement composites, in turn, is strongly influenced by dosing parameters. Among these dosing parameters, the use of additives and water/cement ratios bear great significance. The proposed work was, therefore, sought to verify the effects of two additives, of the capillary crystallization permeability reducer type, measured in two different water/cement ratios in order to monitor the hydrogenionic potential (pH) variation of cylindrical and prismatic mortar specimens (CPs). These specimens measured 5×10 cm each, were prepared using six different traits, and subsequently conditioned in carbonation chambers under controlled conditions of humidity, temperature, and CO_2 concentration. The forward speed of the carbonation front was monitored using, as indicator, a phenolphthalein solution prepared in accordance with ISO 1920-12 (2015) standards. Simultaneously, we measured surface pH variation of the cement composite by means of equipment specific to this purpose. In order to evaluate changes in the pore microstructure of the cementitious material matrix, we tested a 2×4 cm specimen, extracted from each of the six traits investigated, which were maintained under 56 days of accelerated carbonation, using the scanning electron microscopy (SEM) technique. Results of these tests demonstrated that use of the above equipment for pH determination facilitates efficient monitoring of pH variation as a function of carbonation time. This also helped facilitate the tracking of alkalinity reduction in regions not disclosed by the phenolphthalein indicator, since the pH values exceeded the turning range of the sprayed solution. From images obtained via SEM, it was possible to envision the densification of the material present on the edge and in the most central layer of CPs. The results helped disclose great variation in the forward speed of the carbonation front, along with pH reduction of CPs, as a function of the additive and of the water/cement ratio used when preparing the mixture, as well as the geometry established for CP. Thus, a direct relationship between the forward speed of the carbonation front and microstructural properties of each tested trait was revealed.

Key Words: carbonation, capillary crystallization permeability reducing additives, water/cement ratio, cementitious composites, pH.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Modelo de Tuuti para a corrosão do aço no concreto	10
Figura 2 – Diagrama de Pourbaix do Sistema Fe-H ₂ O a 25° C	11
Figura 3 – MEV de concreto carbonatado durante 7 dias nas concentrações: (a) 0% de CO ₂ , (b) 10% de CO ₂ , (c) 20% de CO ₂ , (d) 50% de CO ₂	12
Figura 4 – Profundidade de carbonatação em função do tempo	15
Figura 5 – Aumento da concentração de CO ₂ ao longo dos anos	16
Figura 6 – Avanço da frente de carbonatação para diferentes concentrações de CO ₂	18
Figura 7 – Grau de carbonatação em função da umidade relativa do ar (%)	19
Figura 8 – Influência da umidade relativa do ar na carbonatação	20
Figura 9 – Influência da temperatura na carbonatação	21
Figura 10 – Influência da relação a/c sobre a profundidade de carbonatação	27
Figura 11 – Profundidade de carbonatação de compósitos de diferentes relações	28
Figura 12 – Comparação dos volumes aparente (a) e do esqueleto (b) de um concreto	30
Figura 13 – Representação esquemática de penetração de CO ₂ no concreto	32
Figura 14 – Influência da cura sobre a profundidade carbonatada	34
Figura 15 – Evolução da carbonatação em função da relação a/c para diferentes condições de cura	35
Figura 16 – Corpo de prova prismático selado em 1 e exposto em 2	38
Figura 17 – Medidor de pH de superfície	43
Figura 18 – pH externo dos corpos de prova carbonatados	44
Figura 19 – pH interno dos corpos de prova carbonatados	44
Figura 20 – MEV e EDS da amostra de basalto antes do processo de carbonatação .	46
Figura 21 – MEV e EDS da amostra de basalto após o processo de carbonatação	46

Figura 22 – Fotomicrografia da presença de Ca(OH)_2 nas fissuras do concreto	47
Figura 23 – Fotomicrografia do cristal de Ca(OH)_2 disperso no compósito	47
Figura 24 – Fotomicrografia de calcita de magnésio em torno dos poros da amostra após 56 dias de carbonatação	48
Figura 25 – MEV de um concreto exposto a uma taxa de carbonatação acelerada de 20% de CO_2 por 7 dias	48
Figura 26 – Difractogramas das áreas superficiais e internas de compósitos cimentícios	50
Figura 27 – Difractogramas das amostras contendo de 0-40% de MgO após 7 dias de carbonatação	51
Figura 28 – Difractogramas das amostras contendo de 0-40% de MgO após 56 dias de carbonatação	51
Figura 29 – Difractogramas de amostras carbonatadas e não carbonatadas	52
Figura 30 – Princípio de funcionamento de um instrumento de difração a laser	54
Figura 31 – Microestrutura de concretos com e sem PRAC	58
Figura 32 – Amostras de concreto seccionadas a 50 mm da superfície (a) sem aditivo cristalizante (b) com aditivo cristalizante	59
Figura 33 – CP V-ARI utilizado - Granulometria a laser ($d_{10\%} = 1,39 \mu\text{m}$; $d_{50\%} = 11,40 \mu\text{m}$; $d_{90\%} = 24,62 \mu\text{m}$)	62
Figura 34 – Caracterização da fração do aditivo A pelo método do pó em amostra total passante na peneira #200 (abertura de $75\mu\text{m}$)	64
Figura 35 – Caracterização da fração do aditivo B pelo método do pó em amostra total passante na peneira #200 (abertura de $75\mu\text{m}$)	65
Figura 36 – Granulometria a laser do ADITIVO A ($d_{10\%} = 0,83 \mu\text{m}$; $d_{50\%} = 5,31 \mu\text{m}$; $d_{90\%} = 19,08 \mu\text{m}$)	66
Figura 37 – Granulometria a laser do ADITIVO B ($d_{10\%} = 0,85 \mu\text{m}$; $d_{50\%} = 6,08 \mu\text{m}$; $d_{90\%} = 19,87 \mu\text{m}$)	66

Figura 38 – Moldes para os CPs (a) cilíndricos (5 x 10) cm; (b) prismáticos (5 x 10) cm; (c) cilíndricos (2 x 4) cm	72
Figura 39 – Mesa vibratória para adensamento dos CPs	72
Figura 40 – Prensa utilizada no ensaio de compressão axial dos CPs	77
Figura 41 – Câmara de carbonatação acelerada	77
Figura 42 – Corte do CP prismático	78
Figura 43 – 1ª etapa de corte do CP cilíndrico	79
Figura 44 – 2ª etapa de corte do CP cilíndrico	79
Figura 45 – Medição do pH em CPs (a) prismáticos e (b) cilíndricos	80
Figura 46 – Medição da profundidade de carbonatação em CP prismático	81
Figura 47 – Medição da profundidade de carbonatação em CP cilíndrico: (a) primeiro corte (b) segundo corte	82
Figura 48 – Microscópio eletrônico de varredura utilizado no experimento	83
Figura 49 – Dimensão das amostras para leitura no microscópio	83
Figura 50 – Colocação da amostra na câmara do microscópio	83
Figura 51 – Resistência à compressão dos traços com fator $a/c = 0,55$ aos 3, 7 e 28 dias	87
Figura 52 – Resistência à compressão dos traços com fator $a/c = 0,65$ aos 3, 7 e 28 dias	87
Figura 53 – pH externo médio do topo e da base dos CPs cilíndricos com relação $a/c = 0,55$, obtido por meio do ensaio de carbonatação acelerada	92
Figura 54 – pH externo médio do topo e da base dos CPs cilíndricos com relação $a/c = 0,65$, obtido por meio do ensaio de carbonatação acelerada	93
Figura 55 – pH externo médio dos CPs cilíndricos e prismáticos com relação $a/c = 0,55$, obtido por meio do ensaio de carbonatação acelerada	95
Figura 56 – pH externo médio dos CPs cilíndricos e prismáticos com relação $a/c = 0,65$, obtido por meio do ensaio de carbonatação acelerada	95

Figura 57 – pH interno médio dos CPs cilíndricos e prismáticos com relação $a/c = 0,55$, obtido por meio do ensaio de carbonatação acelerada	98
Figura 58 – pH interno médio dos CPs cilíndricos e prismáticos com relação $a/c = 0,65$, obtido por meio do ensaio de carbonatação acelerada	98
Figura 59 – Avanço da frente de carbonatação em CPs cilíndricos 5 x 10 (cm) aferido com indicador de fenolftaleína em períodos pré-estabelecidos .	99
Figura 60 – Curvas ajustadas para predição do avanço da frente de carbonatação em CPs cilíndricos submetidos a ensaio de carbonatação acelerada	101
Figura 61 – Avanço da frente de carbonatação em CPs prismáticos 5 x 10 (cm) aferido com indicador de fenolftaleína em períodos pré-estabelecidos ..	102
Figura 62 – Curvas ajustadas para predição do avanço da frente de carbonatação em CPs prismáticos submetidos a ensaio de carbonatação acelerada	104
Figura 63 – Comparativo entre as curvas ajustadas para predição do avanço da frente de carbonatação, dos CPs prismáticos e cilíndricos, produzidos com relação $a/c = 0,55$	105
Figura 64 – Comparativo entre as curvas ajustadas para predição do avanço da frente de carbonatação, dos CPs prismáticos e cilíndricos, produzidos com relação $a/c = 0,65$	105
Figura 65 – Imagens geradas por MEV dos traços: (a) 0,55 Referência, (b) 0,55 Aditivo A, (c) 0,55 Aditivo B, (d) 0,65 Referência, (e) 0,65 Aditivo A, (f) 0,65 Aditivo B de seção próxima a borda das amostras após período de carbonatação acelerada de 56 dias	107
Figura 66 – Imagens geradas por MEV dos traços: (a) 0,55 Referência, (b) 0,55 Aditivo A, (c) 0,55 Aditivo B, (d) 0,65 Referência, (e) 0,65 Aditivo A, (f) 0,65 Aditivo B de seção no centro das amostras após período de carbonatação acelerada de 56 dias	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Volume de poros abertos de compósitos cimentícios aos 28 dias	31
Tabela 2 – Composição dos elementos presentes no compósito com aditivo	50
Tabela 3 – Propriedades físicas e mecânicas do CP V-ARI utilizado	61
Tabela 4 – Propriedades químicas do CP V-ARI utilizado	61
Tabela 5 – Frações granulométricas da areia utilizada	63
Tabela 6 – CPs cilíndricos para ensaio de resistência à compressão	68
Tabela 7 – CPs prismáticos para ensaio de carbonatação pela variação do pH	69
Tabela 8 – CPs cilíndricos para ensaio de carbonatação pela variação do pH	69
Tabela 9 – CPs cilíndricos para ensaio de microscopia eletrônica de varredura	69
Tabela 10 – Quantidade de materiais para o traço a/c 0,55 (Referência)	70
Tabela 11 – Quantidade de materiais para o traço a/c 0,55 (Aditivo A)	70
Tabela 12 – Quantidade de materiais para o traço a/c 0,55 (Aditivo B)	70
Tabela 13 – Quantidade de materiais para o traço a/c 0,65 (Referência)	70
Tabela 14 – Quantidade de materiais para o traço a/c 0,65 (Aditivo A)	71
Tabela 15 – Quantidade de materiais para o traço a/c 0,65 (Aditivo B)	71
Tabela 16 – Resistência média à compressão dos CPs cilíndricos (5 x 10) cm	86
Tabela 17 – pH médio dos lotes dos CPs cilíndricos (5 x 10) cm com relação a/c = 0,55 após o condicionamento	88
Tabela 18 – pH médio dos lotes dos CPs cilíndricos (5 x 10) cm com relação a/c = 0,65 após o condicionamento	89
Tabela 19 – Média global do pH dos traços produzidos em CPs cilíndricos (5 x 10) cm, após a primeira etapa do condicionamento	89
Tabela 20 – pH médio dos lotes dos CPs prismáticos (5 x 10) cm com relação a/c = 0,55 após o condicionamento	90

Tabela 21 – pH médio dos lotes dos CPs prismáticos (5 x 10) cm com relação a/c = 0,65 após o condicionamento	90
Tabela 22 – Média global do pH dos traços produzidos em CPs prismáticos (5 x 10) cm, após a primeira etapa do condicionamento	91
Tabela 23 – pH externo médio do topo e da base dos CPs cilíndricos com relação a/c = 0,55, obtido por meio do ensaio de carbonatação acelerada	92
Tabela 24 – pH externo médio do topo e da base dos CPs cilíndricos com relação a/c = 0,65, obtido por meio do ensaio de carbonatação acelerada	93
Tabela 25 – pH externo médio dos CPs cilíndricos e prismáticos com relação a/c = 0,55, obtido por meio do ensaio de carbonatação acelerada	94
Tabela 26 – pH externo médio dos CPs cilíndricos e prismáticos com relação a/c = 0,65, obtido por meio do ensaio de carbonatação acelerada	94
Tabela 27 – pH interno médio dos CPs cilíndricos e prismáticos com relação a/c = 0,55, obtido por meio do ensaio de carbonatação acelerada	97
Tabela 28 – pH interno médio dos CPs cilíndricos e prismáticos com relação a/c = 0,65, obtido por meio do ensaio de carbonatação acelerada	97
Tabela 29 – Profundidade de carbonatação medida nos CPs cilíndricos (5 x 10) cm após aplicação de solução fenolftaleína	100
Tabela 30 – Constante de difusibilidade dos traços ensaiados com CPs cilíndricos .	101
Tabela 31 – Profundidade de carbonatação medida nos CPs prismáticos (5 x 10) cm após aplicação de solução fenolftaleína	103
Tabela 32 – Constante de difusibilidade dos traços ensaiados com CPs prismáticos	103
Tabela 33 – Dimensões geométricas médias e volume dos CPs cilíndricos (5 x 10) cm na dosagem 0,55 aferidas após o processo de desforma ...	124
Tabela 34 – Dimensões geométricas médias e volume dos CPs cilíndricos (5 x 10) cm na dosagem 0,65 aferidas após o processo de desforma ...	125
Tabela 35 – Dimensões geométricas médias e volume dos CPs prismáticos (5 x 10) cm na dosagem 0,55 aferidas após o processo de desforma ...	126

Tabela 36 – Dimensões geométricas médias e volume dos CPs prismáticos (5 x 10) cm na dosagem 0,65 aferidas após o processo de desforma ...	127
Tabela 37 – Massa dos CPs cilíndricos (5 x 10) cm na dosagem 0,55 pós períodos de cura e acondicionamento	128
Tabela 38 – Massa dos CPs cilíndricos (5 x 10) cm na dosagem 0,65 pós períodos de cura e acondicionamento	129
Tabela 39 – Massa dos CPs prismáticos (5 x 10) cm na dosagem 0,55 pós períodos de cura e acondicionamento	130
Tabela 40 – Massa dos CPs prismáticos (5 x 10) cm na dosagem 0,65 pós períodos de cura e acondicionamento	131
Tabela 41 – Média das massas dos CPs cilíndricos (5 x 10) cm pós períodos de cura e acondicionamento	132
Tabela 42 – Média das massas dos CPs prismáticos (5 x 10) cm pós períodos de cura e acondicionamento	132

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a/c	Relação água/cimento
μ -CT	Microtomografia computadorizada de raios-X
2D	Duas dimensões
3D	Três dimensões
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
ASE	Área superficial específica
BS EN	British Standard European Norm
CBIC	Câmara Brasileira da Indústria da Construção
CCD	Charge coupled devices
CP	Corpo de prova
CEN	Committee European Norm
COPASA	Companhia de Saneamento de Minas Gerais
C/S	Cálcio/sílica
DRX	Difração de raios-X
EDS	Espectrometria de dispersão de energia
FRX	Fluorescência de raios-X
H/S	Água/sílica
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MIP	Porosimetria por intrusão de mercúrio
MSE	Microssonda eletrônica
NBR	Norma brasileira

NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
PE	Potencial eletroquímico
PF	Perda ao fogo
pH	Potencial Hidrogeniônico
PRAH	Aditivos redutores de permeabilidade à pressão hidrostática
PRAC	Aditivos redutores de permeabilidade por cristalização capilar
RI	Resíduo insolúvel
TGA	Termogravimetria
UR	Umidade relativa do ar

LISTA DE UNIDADES

%	por cento
°C	grau Celsius
Å	angstrom
cm ² /g	centímetro quadrado por grama
g	grama
g/cm ³	grama por centímetro cúbico
g/m ² . s	grama por metro quadrado segundo
g/m ³	grama por metro cúbico
K	Kelvin
kg/m ³	quilograma por metro cúbico
kV	quilovolt
m	metro
m ²	metro quadrado
m ² /s	metro quadrado por segundo
µm	micrômetro
mg	miligrama
mm	milímetro
MPa	mega pascal
MPa/s	mega pascal por segundo
nm	nanômetro
Pa	pascal
ppm	parte por milhão
s	segundo

tf tonelada força

LISTA DE SÍMBOLOS

Al	alumínio
Al ₂ O ₃	óxido de alumínio
C	carbono
Ca	cálcio
Ca ⁺⁺	cálcio ionizado
CaO	óxido de cálcio
Ca(OH) ₂	hidróxido de cálcio
CaCO ₃	carbonato de cálcio
CH ₂	hidróxido de cálcio
Cl	cloro
Cl ⁻	cloro ionizado
CO ₂	dióxido de carbono ou anidrido carbônico
CP III	cimento Portland de alto forno
CP V-ARI	cimento Portland de alta resistência inicial
CP V-ARI RS-MS	cimento Portland de alta resistência inicial resistente à sulfatos com sílica micro pulverizada
Cr	cromo
C-S-H	silicato de cálcio hidratado
Cu	cobre
C ₃ S	silicato tricálcico
C ₂ S	silicato dicálcico
C ₃ A	aluminato tricálcico
C ₄ AF	ferroaluminato tetracálcico
Fe	ferro

Fe_2O_3	hematita ou óxido de ferro
Fe_2O_4	magnetita
H_2S	gás sulfídrico
H_2O	água
H_2CO_3	ácido carbônico
HCl	hidróxido de cloro
He	hélio
Hg	mercúrio
K	potássio
K^+	potássio ionizado
K_2O	óxido de potássio
Mg	magnésio
MgO	óxido de magnésio
Mn	manganês
N_2	nitrogênio
Na	sódio
Na^+	sódio ionizado
O	oxigênio
OH^-	hidroxila
P	fósforo
S	enxofre
Si	silício
SiO_2	óxido de silício
SO_2	dióxido de enxofre
SO_3	trióxido de enxofre

SO ₄ ⁻	sulfato
Sr	estrôncio
Ti	titânio
Zn	zinco
Zr	zircônio

SUMÁRIO

RESUMO	vii
ABSTRACT	viii
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	xiii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xvi
LISTA DE UNIDADES	xviii
LISTA DE SÍMBOLOS	xx
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Importância e justificativa	4
1.2 Objetivo geral	5
1.3 Objetivos específicos	5
1.4 Estrutura do trabalho	6
2. REVISÃO DA LITERATURA	8
2.1 Carbonatação	8
2.2 Mecanismos de transporte do CO ₂ para o interior do concreto	12
2.3 Fatores determinantes da carbonatação	16
2.3.1 Condições de exposição	16
a) Concentração de CO ₂	16
b) Umidade relativa do ar	18
c) Temperatura	20
2.3.2 Características dos materiais constituintes	22
a) Cimento	22
b) Adições minerais	24

c) Relação água/cimento	26
d) Porosidade	28
e) Fissuras	31
2.3.3 Aplicação e cura do concreto	32
2.3.4 Condições de ensaio de carbonatação acelerada	36
2.4 Carbonatação acelerada e carbonatação natural	39
2.5 Medição da carbonatação por meio de indicadores químicos	40
2.6 Medição da carbonatação por sonda indicadora de pH	43
2.7 Técnicas de ensaio para determinação da profundidade de carbonatação	45
2.7.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	45
2.7.2 Difração de raios-X (DRX)	49
2.7.3 Adsorção de nitrogênio (ASE)	52
2.7.4 Granulometria a laser	53
2.8 Aditivos químicos para compósitos cimentícios	53
2.8.1 Aditivos redutores de permeabilidade por cristalização capilar	57
3. MATERIAIS E MÉTODOS	60
3.1 Materiais utilizados	60
3.1.1 Cimento	60
3.1.2 Areia	62
3.1.3 Água	63
3.1.4 Aditivos	63
a) Composição química qualitativa	63
b) Identificação das fases cristalinas	64
c) Área superficial específica	65
d) Dimensão granulométrica	65

3.2 Plano experimental	66
3.2.1 Dosagem da argamassa	68
3.2.2 Moldagem, adensamento, cura e secagem dos corpos de prova	71
3.3 Métodos de ensaio	76
3.3.1 Resistência à compressão	76
3.3.2 Carbonatação	76
a) Preparo das amostras	78
b) Medição de pH com sonda	79
c) Medição de pH com indicador de fenolftaleína	80
3.3.3 MEV	82
3.4 Desvios e incertezas	84
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	85
4.1 Resistência à compressão	85
4.2 Acompanhamento da variação do pH	88
4.2.1 Determinação do pH após o condicionamento	88
4.2.2 Acompanhamento do pH ao longo do ensaio de carbonatação acelerada	92
4.3 Acompanhamento do avanço da frente de carbonatação	98
4.4 Avaliação da microestrutura dos CPs por meio de MEV	106
5. CONCLUSÕES	109
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	112
7. APÊNDICE	123

1

INTRODUÇÃO

A cadeia produtiva da construção tem um importante papel no desenvolvimento sustentável. Os impactos causados no meio ambiente são variados e se estendem desde a extração de matérias primas até o fim da vida útil dos produtos construídos. Segundo dados divulgados no *Guia de Boas Práticas em Sustentabilidade na Indústria da Construção* (CBIC, 2012), em escala global, a construção é responsável por 12% do consumo total de água no planeta enquanto a produção de cimento é responsável por 5% da emissão de gases de efeito estufa. Além disso, as atividades construtivas geram 40% de todos os resíduos produzidos pela sociedade.

A busca crescente pela sustentabilidade do setor da construção, faz com que a análise do ciclo de vida dos produtos ganhe cada vez mais importância. Quanto maior for a durabilidade (vida útil) dos insumos e sistemas utilizados, menor a exploração de recursos naturais, renováveis ou não, menor o consumo de água e de energia, menor o teor de poluentes gerados nas fábricas e no transporte das matérias primas e dos produtos. Este fato tem imposto novos desafios para as estruturas de concreto armado, uma vez que a NBR 15575 (ABNT, 2013), estabelece que as mesmas devem apresentar um período de durabilidade potencial mínimo de 50 anos, considerando periodicidade e processos de manutenção.

Contudo, o que se observa é que as estruturas de concreto armado não vem conseguindo atingir a durabilidade desejada, iniciando seu processo de deterioração em um espaço de tempo muito menor do que o programado.

De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014), os aspectos referentes à durabilidade das estruturas vão além da escolha e consumo dos materiais, da relação água/cimento (*a/c*) especificada, da análise estrutural propriamente dita, das condições climáticas de exposição e da agressividade

do meio ao qual as mesmas serão submetidas. É necessário estabelecer nos projetos requisitos e procedimentos para controle e monitoramento das matérias primas, do processo executivo e das manutenções preventivas inerentes às estruturas de concreto armado no intuito de protegê-las dos mecanismos de degradação ou deterioração.

Os agentes de deterioração podem exercer suas ações diretamente sobre o concreto e/ou sobre a armadura. Os mecanismos preponderantes relacionados diretamente à deterioração do concreto são a lixiviação, o ataque de sulfatos e as reações álcali-agregado; como consequências destes mecanismos verifica-se: a fissuração e expansão do concreto acompanhado da perda de resistência do material e deslocamento da sua camada de cobrimento. Para a armadura, o processo de corrosão do aço, com perda de seção útil das barras e de resistência, se inicia pela despassivação, causada principalmente pela carbonatação e pelo ataque de cloretos.

Os fatores intervenientes nos processos de deterioração do concreto são a agressividade do meio ambiente (gases de efeito ácido e outros agentes deletérios), presença de água, o tamanho médio e a interconectividade dos poros nas suas camadas de cobrimento, a permeabilidade e a existência de fissuras.

Conforme Andrade (1992), a durabilidade do aço nas estruturas de concreto armado depende da existência da alcalinidade. Ela surge durante o processo de hidratação do cimento, quando é gerado um conglomerado sólido, constituído pelas fases hidratadas do material e pela fase aquosa que ocupa a rede de poros intersticiais e capilares do concreto. A alcalinidade gerada apresenta um potencial hidrogênioônico (pH) suficiente para passivar o aço, protegendo-o da corrosão, propiciando uma barreira que inibe alterações físicas e químicas na camada de concreto que o cerca, desencadeada pela ação de agentes agressivos externos (KASMIERCZAK, 1995).

A película passivadora que protege a armadura pode ser destruída predominantemente por dois mecanismos. O primeiro, pela ação de íons cloreto e o segundo, pela perda da alcalinidade do concreto, em decorrência da difusão do dióxido de carbono (CO_2) na estrutura dos poros de sua matriz, onde é dissolvido, formando o ácido carbônico (H_2CO_3), o qual reage com os álcalis da solução ali presentes, principalmente, com o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), formando o carbonato de cálcio (CaCO_3), caracterizando o fenômeno da carbonatação. A despassivação da

armadura também pode se dar pela combinação destes dois mecanismos (HELENE, 1993; HEWLETT, 1998; NEVILLE, 2012; BOUNY *et al.* 2014).

Neville (2012) relata que o CaCO_3 produzido, não representa por si só, uma ação deletéria para os concretos, mas, o consumo dos álcalis durante o fenômeno da carbonatação leva à redução do pH das soluções intersticiais dos poros e capilares, que, em condições naturais, possuem pH altamente básico, se mantendo usualmente entre 12,6 e 13,5. Nos casos das estruturas armadas, a perda de alcalinidade pode levar a despassivação das armaduras, facilitando o início de um processo de corrosão (BOUNY *et al.* 2014; RIBEIRO, 2014).

Desta forma, são de grande importância os estudos conduzidos no sentido de monitorar o avanço do processo de carbonatação e sua influência na durabilidade das estruturas de concreto armado. Na constituição da estrutura interna do concreto são observadas, basicamente, três partes distintas: pasta de cimento, agregado e zona de transição pasta/agregado. Apesar da aparência sólida, trata-se de um material com uma rede interna de poros, vazios capilares e fissuras que podem conter líquidos ou gases em seu interior. Considerando que a penetração de agentes agressivos como o CO_2 é influenciada pela porosidade e permeabilidade presente na superfície do concreto, é pertinente avaliar neste aspecto, a adição de materiais que tenham a capacidade de promover formações cristalinas nos poros, vazios capilares e na zona de transição pasta-agregado da microestrutura endurecida do mesmo.

O uso de adições minerais, geralmente, resulta em concretos com melhores características técnicas, devido às alterações na estrutura interna da pasta de cimento hidratada e da zona de transição entre matriz e agregado que causam a redução da porosidade capilar do concreto, dificultando a penetração de agentes agressivos, e na diminuição do calor de hidratação, diminuindo a incidência de fissuras de origem térmica (DAL MOLIN, 2011).

Conforme Moraes (2001), as adições minerais (sílica ativa e metacaulim), quando incorporadas ao concreto, desempenham um papel fundamental sobre os mecanismos que atuam na microestrutura dos poros, propiciando o bloqueio e a obstrução dos vazios capilares pela atuação da finura dos grãos, caracterizando, assim o seu efeito físico e, pela ação química, promovendo o refinamento dos poros e dos grãos.

Os aditivos redutores de permeabilidade por cristalização capilar tem sido utilizados a fim de preencher os vazios da microestrutura do concreto, desencadeando um processo catalítico de formação de cristais não solúveis com os produtos químicos inertes presentes em seus poros - hidróxido de cálcio, sais minerais, óxidos minerais e partículas de cimento não hidratadas e sub-hidratadas (TAKAGI *et al.* 2004).

Com base no exposto, este trabalho pretende avaliar o avanço da frente de carbonatação em compósitos de matriz cimentícia produzidos com o emprego de aditivos impermeabilizantes por cristalização capilar, apontando as potencialidades e limitações da adoção destes materiais por meio de um aparelho específico para medição de pH em superfície, associado à utilização do indicador de fenolftaleína. O uso deste equipamento permitiu monitorar a perda de alcalinidade das amostras em períodos pré-estabelecidos. Já o uso da fenolftaleína permitiu estimar a profundidade da frente de carbonatação no material.

Paralelamente, foi realizado um ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) para avaliar a ação dos aditivos na microestrutura do material por meio da análise de imagens.

1.1 Importância e justificativa

Em seu relatório publicado em março de 2015, a National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), divulgou que, a concentração de dióxido de carbono na atmosfera global, ultrapassou a concentração mensal de 400 partes por milhão (ppm), um recorde histórico. Tal realidade, tem estimulado várias pesquisas visando avaliar o impacto da ação de gases de efeito ácido, em particular o CO₂ na durabilidade das estruturas de concreto armado.

Inúmeros são os estudos que abordam a carbonatação em compósitos de cimento Portland, bem como em compósitos com adições de cinza volante, escória de alto-forno e metacaulim. Pesquisas sobre nanopartículas de dióxido de sílica e dióxido de titânio introduzidos em pastas cimentícias mostram a eficiência destes materiais no preenchimento de poros e aumento da resistência à compressão (CHEN *et al.* 2012). Contudo, há poucas pesquisas referentes à carbonatação de compósitos produzidos com aditivos redutores de permeabilidade por cristalização capilar, havendo assim uma demanda para estudos sobre o assunto.

Possan (2004) em seu estudo sobre o comportamento do concreto produzido com sílica ativa para diferentes relações a/c, enfatiza que a carbonatação em concretos moldados com fator a/c igual ou inferior a 0,45 praticamente não se altera em função da utilização da sílica ativa, independentemente do teor utilizado. Entretanto, ela ressalta que o refinamento da microestrutura da matriz hidratada, decorrente da atividade pozolânica da sílica ativa, restringe a difusão do CO₂ e reduz o avanço da frente de carbonatação, apesar do menor teor remanescente de Ca(OH)₂. Desta forma, fica evidente que o teor de Ca(OH)₂ na matriz hidratada não é o único parâmetro responsável por restringir o avanço da frente de carbonatação, ou seja, a porosidade, a distribuição do diâmetro dos poros e a interconectividade da rede capilar exercem influência significativa sobre a carbonatação do concreto. Em suma, para concretos com relação a/c superiores a 0,45, prepondera o teor de Ca(OH)₂ na matriz hidratada como parâmetro controlador da carbonatação do concreto, enquanto que, para relações a/c inferiores a 0,45, a microestrutura passa a controlar o avanço da carbonatação.

Embora os estudos de durabilidade de materiais cimentícios, em sua maioria, tenham como foco a análise de concretos, neste trabalho optou-se por trabalhar com argamassas para favorecer o preparo das amostras.

1.2 Objetivo geral

Esta pesquisa pretende avaliar o avanço da frente de carbonatação em compósitos cimentícios produzidos com o emprego de aditivos redutores de permeabilidade por cristalização capilar após serem submetidos a um processo de carbonatação acelerada.

Os compósitos em questão serão argamassas, produzidas de acordo com os parâmetros especificados na NBR 7215 (ABNT, 1996), utilizando o cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI).

1.3 Objetivos específicos

Este estudo tem como objetivos específicos comparar o desempenho de compósitos de matriz cimentícia produzidos com e sem os aditivos redutores de permeabilidade por cristalização capilar, quanto aos seguintes aspectos:

- o seu efeito na resistência à compressão axial;
- o seu efeito na variação do potencial hidrogeniônico e no avanço da frente de carbonatação de dois traços dosados com relações água/cimento distintas;
- o efeito da geometria dos corpos de prova, cilíndricos e prismáticos, na avaliação do desempenho dos compósitos;
- avaliação qualitativa de sua microestrutura por meio da microscopia eletrônica de varredura (MEV).

1.4 Estrutura do Trabalho

Este trabalho encontra-se estruturado em seis capítulos e um apêndice.

No capítulo 2, é feita uma revisão bibliográfica, na qual é fornecida uma visão geral dos tópicos de maior relevância deste estudo. Primeiramente, são apresentados os conceitos básicos relacionados à carbonatação, com especial enfoque aos fatores inerentes ao fenômeno. Em um segundo momento, é feito uma abordagem sobre as condições de ensaio, as técnicas de medição, bem como alguns ensaios de caracterização comumente utilizados nas pesquisas sobre a carbonatação. Em um terceiro momento são apresentados os principais aditivos químicos utilizados em compósitos cimentícios, com ênfase nos redutores de permeabilidade.

No Capítulo 3, estão dispostos os materiais e os métodos utilizados, detalhando os procedimentos do plano experimental como: a caracterização dos materiais, a moldagem dos corpos de prova fabricados, a preparação das amostras e a descrição dos ensaios executados.

No capítulo 4, são apresentados os resultados obtidos para cada ensaio executado e é realizada uma verificação dos mesmos. Estes resultados são apresentados de modo a possibilitar uma análise comparativa entre a velocidade do avanço da frente de carbonatação acompanhada da redução do pH dos CPs, em função da relação a/c, da inserção do aditivo cristalizante utilizado na mistura e da geometria dos corpos de prova utilizada.

O capítulo 5 apresenta as conclusões, e no capítulo 6 são apresentadas as referências bibliográficas, sendo seguido por um apêndice.

Ao longo de todo o texto, apesar das recomendações da NBR 14724 (ABNT, 2011), a identificação das figuras será feita da forma clássica, ou seja, aparecerá na parte inferior da mesma, recebendo uma numeração sequencial referenciada.

2

REVISÃO DA LITERATURA

O presente capítulo dedica-se à compreensão dos aspectos básicos referentes à carbonatação de compósitos de matriz de cimento Portland, enfatizando os mecanismos, os fatores, as condições de ensaio e as técnicas de medição inerentes ao fenômeno. Além disto, são apresentadas as principais técnicas para caracterização dos materiais constituintes das misturas e determinação da frente de carbonatação utilizadas para o estudo do tema proposto. Por fim é abordado o comportamento dos aditivos redutores de permeabilidade por cristalização capilar enfatizando os efeitos mais relevantes que os mesmos produzem sobre o material.

2.1 Carbonatação

A carbonatação é um fenômeno físico-químico decorrente da reação ácida de gases presentes no ambiente com os produtos alcalinos do concreto, provenientes da reação de hidratação do cimento Portland, capaz de reduzir o pH do líquido intersticial presente nos poros destes compósitos de valores usualmente entre 13,5 e 12,6 para valores inferiores a 9.

Durante o processo de cura do concreto, uma rede de poros é formada ficando preenchida por uma solução contendo hidróxidos alcalinos constituídos principalmente de íons de HO^- , Ca^{++} , Na^+ , K^+ , SO_4^- , que promovem uma elevada alcalinidade na pasta de cimento (JÚNIOR, 2010). Entretanto, o fenômeno da carbonatação atua neutralizando a presença destes íons o que, conseqüentemente, promove a redução no pH da solução presente nos poros do material.

Os principais gases que levam à redução do pH da solução existente nos poros do concreto e 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 dióxido de carbono (CO_2), este último encontrado comumente no meio ambiente em maior ou menor concentração.

O CO₂ é o que apresenta maior incidência nas reações de neutralização, fato que justifica o nome do processo. Nestas, ocorrem a transformação dos íons alcalinos, como os cátions de sódio, potássio e cálcio, em sais de carbonatos dos respectivos elementos (CASCUDO E CARASEK, 2011), reduzindo a alcalinidade do meio a níveis capazes de alterar as condições de estabilidade química da película passivadora das barras de aço presentes na estrutura.

A difusão de CO₂ na fase gasosa presente nos poros e posterior dissolução na água, forma o ácido carbônico como descrito na Equação 1.



Em seguida, o ácido carbônico reage com o hidróxido de cálcio dissolvido, gerando a precipitação do carbonato de cálcio como descrito na Equação 2.



Papadakis *et al.* (1991) definem o processo de carbonatação em três principais etapas:

1ª) O Ca(OH)₂ formado nas reações de hidratação do cimento, é dissolvido pela água presente na solução dos poros como descrito na Equação 3.



2ª) O CO₂ penetra no concreto por difusão por meio da fase gasosa do poro da matriz e se dissolve na solução aquosa como descrito nas Equações 4 e 5.



3ª) O CO₂ reage com o Ca(OH)₂ dissolvido, bem como com os outros produtos carbonatáveis da pasta de cimento, como descrito na Equação 6.



A carbonatação é controlada, portanto, pela difusão do gás e pelos mecanismos da reação química, sendo seu progresso determinado pelas características químicas da pasta de cimento e pela permeabilidade do material (BERNAL *et al.* 2014).

A redução da alcalinidade das soluções intersticiais presentes na estrutura de concreto armado, favorecem a corrosão das armaduras quando determinadas condições forem reunidas, tais como: presença de água, diferença de potencial, acesso ao oxigênio, etc (PAULETTI, 2009).

A corrosão é considerada o principal meio de degradação das estruturas de concreto armado, o que evidentemente, limita sua vida útil (POSSAN, 2010). Da mesma forma, Helene (1993) relata que as estruturas de concreto armado, quando sujeitas à processos corrosivos generalizados por ação da carbonatação, têm sua vida útil reduzida, comprometendo sua estabilidade global, sua segurança e sua estética.

Conforme Tuuti (1982), a corrosão das armaduras desencadeada pelo fenômeno da carbonatação apresenta duas fases distintas, como indica a Figura 1.

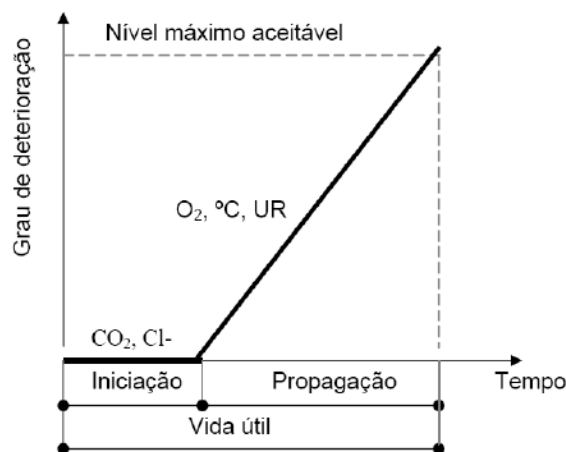


Figura 1 - Modelo de Tuuti para a corrosão do aço no concreto
Fonte: Adaptado de TUUTI (1982), pág. 18.

Na primeira, denominada período de iniciação, ocorre a penetração dos agentes agressivos até que estes atinjam a armadura, despassivando-a, sem que a estrutura perca sua funcionalidade. Na segunda, denominada período de propagação, há uma aceleração do processo de degradação da estrutura, comprometendo tanto a estabilidade estrutural quanto seu aspecto visual.

Em concretos amados, cujo pH seja da ordem de 13,5 a uma temperatura de 25°C, as armaduras encontram-se em um estado eletroquímico que impede a corrosão (devido à imunidade ou à existência de um filme passivo que as envolve). Esta camada de passivação provê ao aço uma proteção química que inibe o acesso de umidade, oxigênio e agentes agressivos à superfície do

aço devido ao equilíbrio entre o alto valor do pH e um potencial eletroquímico (PE) propício no meio aquoso (FIGUEIREDO E MEIRA, 2013). Se o pH decresce, caindo para valores abaixo de um valor limite em torno de 9, a corrosão pode ser desencadeada segundo o potencial apresentado pelo aço, conforme ilustra a Figura 2.

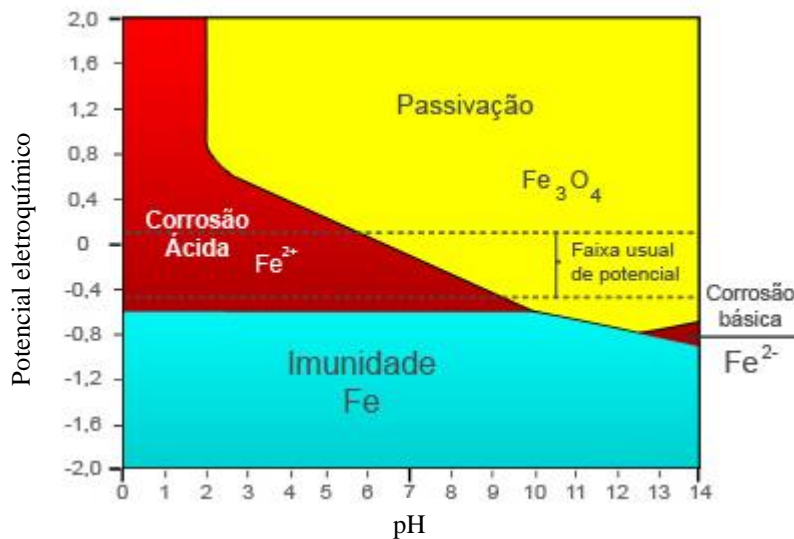


Figura 2 - Diagrama do Sistema Fe-H₂O a 25°C

Fonte: Adaptado de POURBAIX (1974), pág.171. Disponível em <www.aecweb.com.br>.

Verifica-se no diagrama de Pourbaix três possíveis situações do aço: imunidade, passivação e corrosão. Na imunidade, em que o potencial eletroquímico é negativo, não há corrosão do aço, independentemente do pH (proteção catódica). Na passivação, há a formação de uma película fina composta de hematita (Fe₂O₃) e magnetita (Fe₃O₄), tornando a velocidade da corrosão desprezível (aço imerso no concreto com alto valor do pH). Na corrosão, há a perda da película passivadora e o início da corrosão (BOUNY *et al.* 2014).

Os produtos da corrosão apresentam volumes superiores ao metal íntegro. Devido à expansão destes, iniciam-se tensões no concreto que culminam no aparecimento de fissuras, fragmentações e deslocamentos, comprometendo o desempenho, a segurança e a durabilidade da estrutura.

Cui *et al.* (2015), enfatizam que a alteração da microestrutura do material em decorrência da carbonatação, torna a superfície do mesmo mais densa, devido o preenchimento dos poros superficiais, diminuindo dessa maneira, a taxa de difusão de CO₂. A Figura 3 retrata o

comportamento dos materiais investigados pelos pesquisadores sob três diferentes concentrações de CO₂.

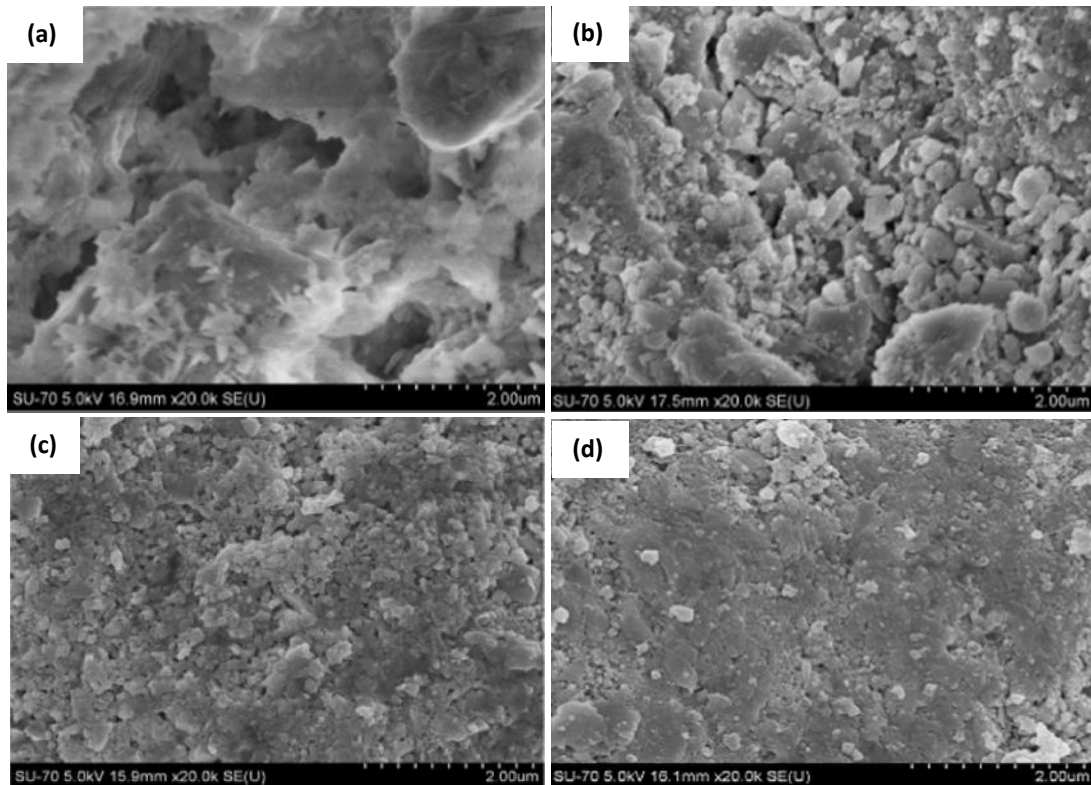


Figura 3 – MEV de concreto carbonatado durante 7 dias nas concentrações: (a) 0% de CO₂, (b) 10% de CO₂, (c) 20% de CO₂, (d) 50% de CO₂

Fonte: CUI *et al.* (2015), pág. 525.

É possível perceber por meio das imagens, a densificação e a conseqüente redução da porosidade do material, devido à precipitação de CaCO₃ em sua microestrutura.

2.2 Mecanismos de transporte do CO₂ para o interior do concreto

O avanço da frente de carbonatação está diretamente relacionado à facilidade que o CO₂ encontra para se difundir através da camada de cobertura do concreto. Desta forma, a estrutura e a distribuição dos poros, a configuração das fissuras e a condição hídrica presente nos vazios do material são fatores determinantes para o ingresso do CO₂ no interior da matriz cimentícia. Além disto, fatores ambientais como temperatura, umidade e vento são condicionantes para o processo (PAPADAKIS *et al.* 1991; NEVILLE, 1997; ISAIA, 1999; HOUST e WITTMANN, 2002).

Os fatores que controlam a permeabilidade e a porosidade da matriz cimentícia estão associados a mistura e dosagem (qualidade do concreto) e à execução (adensamento e espessura de cobrimento), relação água/aglomerante, tipo de cimento, adições e condições de cura. Estes condicionantes por sua vez, dificultam ou facilitam o ingresso dos agentes agressivos para o interior do material (CASCUDO,1997; KULAKOWSKI, 2002; SILVA, 2007; POSSAN, 2010).

A absorção capilar e a difusão superficial são os mecanismos de transporte preponderantes que regulam o ingresso de CO₂ no concreto, por meio da conectividade de seus poros e fissuras.

De acordo com Neville (2012), a absorção capilar é um fenômeno que ocorre em estruturas porosas e consiste na ação de forças de atração dos capilares da estrutura sobre os líquidos que estão em contato com sua superfície. A água é absorvida devido à tensão superficial nas paredes dos poros, levando consigo agentes deletérios como o CO₂.

No mecanismo de difusão superficial, as moléculas de CO₂ adsorvidas pela umidade são transportadas ao longo das paredes dos poros, por movimentos aleatórios, num fluxo a partir de regiões de maior concentração para regiões de menor concentração de CO₂. O fluxo de transferência de massa (F) por meio de uma unidade de área de seção do concreto (A) é expressa em função da quantidade de massa de CO₂ transportado (m) e do tempo (t), como descrito na Equação 7.

$$F = m/t \cdot 1/A \quad \text{(Equação 7)}$$

Onde:

F = fluxo (g/m².s);

m = massa da substância (g);

t = tempo (s);

A = área (m²).

Logo, quanto maior a diferença de concentração de CO₂ entre dois meios, maior será a velocidade de avanço da frente de carbonatação (HOUST *et al.* 2002).

A difusão de CO₂ no material pode ser modelada pelas leis de Fick, que ocorre quando os poros são maiores que os diâmetros médios dos caminhos livres das moléculas de gás. Se a difusão ocorre em estado estacionário, pode ser modelada pela primeira lei de Fick, em que a penetração do gás é diretamente proporcional à diferença de concentração de CO₂ entre dois meios. Caso seja em condição transiente, como é o caso da carbonatação, pode ser descrita pela segunda lei de Fick (PAULETTI, 2004). Desta forma, quanto maior o gradiente de concentração entre o meio externo e o interior do concreto, ou entre a porção carbonatada e a não carbonatada, maior será a velocidade de penetração da frente de carbonatação.

Conforme Neville (1997), a primeira lei de Fick é expressa, como descrito na Equação 8.

$$J = -D \cdot dc/dL \quad (\text{Equação 8})$$

Onde:

J = fluxo de CO₂ (g/m².s);

D = coeficiente de difusão (m²/s);

dc = concentração molar (g/m³);

dL = distância (m).

O sinal negativo do coeficiente de difusão (-D) na Equação 8 indica que a direção de difusão é contrária ao gradiente de concentração (dc/dL), ou seja, o fluxo de transporte tem origem onde há maiores concentrações e destino onde há menores concentrações.

A segunda lei de Fick é expressa, como descrito na Equação 9:

$$\partial c/\partial t = D \cdot \partial^2 c/\partial x^2 \quad (\text{Equação 9})$$

Onde:

c = concentração molar (g/m³);

t = tempo (s);

D = coeficiente de difusão (m²/s);

x = distância (m).

A lei de difusão de Fick é aplicada para descrever a profundidade de carbonatação como função do tempo. Com base na segunda lei de Fick, muitos modelos complexos com múltiplas variáveis foram desenvolvidos de forma empírica com a finalidade de determinar a profundidade de carbonatação, onde a maioria sugere que esse valor é proporcional a raiz quadrada do tempo, como descrito na Equação 10 (SIMAS, 2007).

$$e_c = k\sqrt{t} \quad (\text{Equação 10})$$

Onde:

e_c = espessura carbonatada em mm;

t = tempo em anos ou meses;

k = constante que depende da difusividade efetiva do CO_2 através do concreto.

A representação gráfica da Equação 10, pode ser vista na Figura 4.

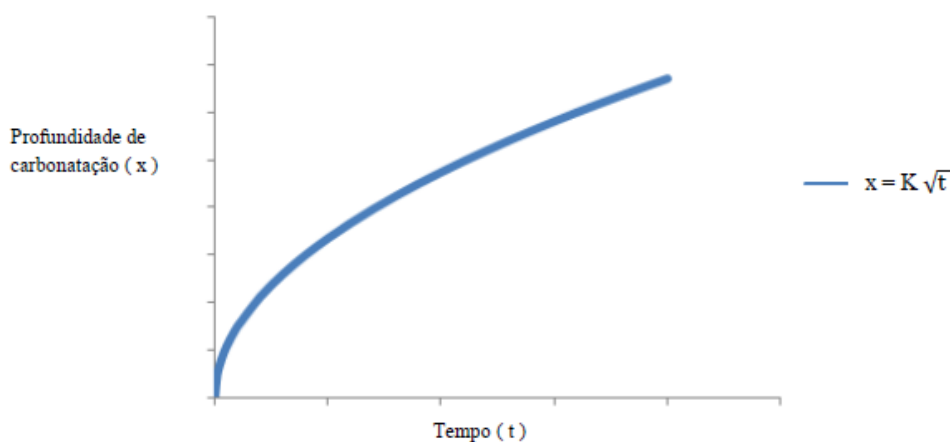


Figura 4 – Profundidade de carbonatação em função do tempo
Fonte: SIMAS (2007), p. 24.

Conforme Andrade (1992), k é uma constante cujo valor pode ser determinado quando se conhece a espessura da capa carbonatada e a idade da estrutura. Uma vez conhecido k , pode-se prever a velocidade de avanço da frente de carbonatação. A espessura da capa superficial carbonatada denomina-se “profundidade de carbonatação” e a redução do pH pode ser visualizada através de um indicador químico apropriado, pela mudança de cor.

Segundo Neville (2012), por meio da difusão do CO_2 , o avanço da carbonatação acontece a uma taxa decrescente progressivamente da superfície para o interior do concreto, pois depende

uma taxa decrescente progressivamente da superfície para o interior do concreto, pois depende do teor de umidade dos poros, que também varia com a distância da profundidade em relação à superfície.

2.3 Fatores determinantes da carbonatação

A velocidade de penetração da frente de carbonatação é determinada por fatores que estão diretamente vinculados às condições de exposição, à composição química dos materiais, aos processos de execução e às características oriundas do concreto.

A seguir, serão feitas considerações sobre os fatores que influenciam na carbonatação dos compósitos de matriz cimentícia.

2.3.1 Condições de exposição

a) Concentração de CO₂

A concentração de CO₂ no ar é um parâmetro ambiental importante na taxa de carbonatação. Nas últimas décadas a concentração de CO₂ tem se elevado de maneira acentuada, principalmente após 1750, com a primeira revolução industrial. Estudos atuais mostram que há uma tendência de que até o final do século, a concentração de CO₂ atinja o dobro da atual, como se observa na Figura 5.

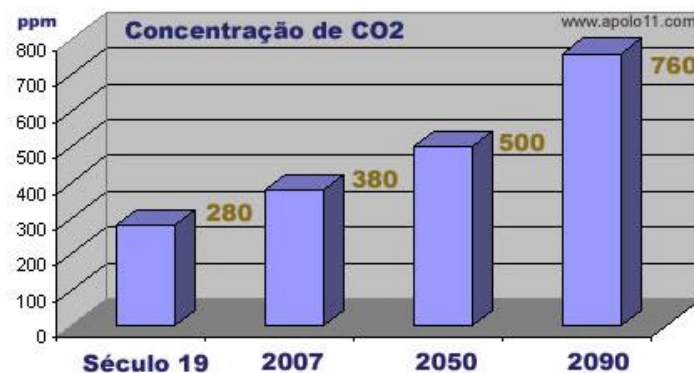


Figura 5 – Aumento da concentração de CO₂ ao longo dos anos
Fonte: APOLO 11. Disponível em <www.apolo11.com/relogiocarbonico.php>.

Há significativas diferenças nas concentrações de CO₂ quando se comparam ambientes fechados e abertos. A carbonatação em ambientes fechados geralmente é superior à observada em ambientes abertos, que permitem a renovação constante do ar (HO e LEWIS, 1987; KASMIERCZAK, 1995; KOKUBU e NAGATAKI, 1989).

Saetta e Vitaliani (2004) apresentam concentrações de CO₂ usuais em diferentes ambientes:

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

Segundo Neville (2012), altas concentrações de CO₂ aumentam a agressividade do ambiente, e, conseqüentemente, a velocidade de carbonatação e o risco de deterioração do concreto. Estudos de Cui *et al.* (2015) confirmam que amostras de concreto de mesma idade apresentam maior profundidade de carbonatação quando expostas à taxas de concentração de CO₂ maiores, conforme mostra a Figura 6.

Em síntese, a profundidade da camada cimentícia carbonatada aumenta inicialmente com grande rapidez, prosseguindo mais lentamente e tendendo a uma profundidade máxima, (HELENE, 1993). Cui *et al.* (2015) comprovam que o incremento na profundidade de carbonatação ocorre até determinada concentração de CO₂. Os pesquisadores em questão afirmam que em concretos submetidos a concentrações muito altas (acima de 50%), a variação do avanço da frente de carbonatação é muito pequena, devido ao fechamento completo dos poros do material, enquanto que em concentrações mais baixas de CO₂ (2-20%) o avanço da frente de carbonatação aumenta de forma significativa.

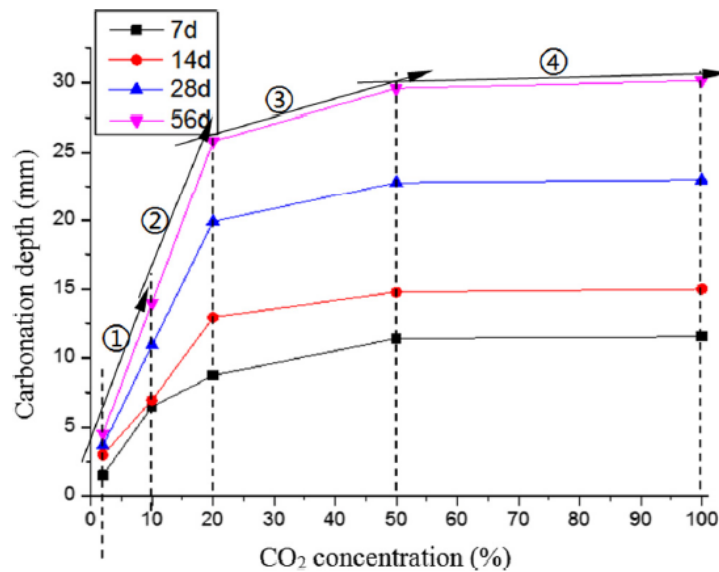


Figura 6 – Avanço da frente de carbonatação para diferentes concentrações de CO₂
 Fonte: CUI *et al.* (2015), p. 524.

Conforme Tasca (2012), a concentração de CO₂ no ambiente é fator preponderante no estudo da carbonatação em concreto. No entanto, esse fator, por si só, não é responsável pela profundidade carbonatada, devendo estar associado a outros fatores ambientais que facilitam a difusão do CO₂ no interior da matriz cimentícia.

b) Umidade relativa do ar

Segundo Cascudo (1997), a umidade relativa do ambiente determina o grau de saturação dos poros do concreto. Em compósitos saturados, a água obstrui os poros, dificultando o processo de difusão do CO₂. Por outro lado, em um compósito seco, a insuficiência de moléculas de água para reagir com o CO₂ impede que ocorra a reação de carbonatação propriamente dita. Em ambientes sujeitos a intempéries frequentes, como chuva e o sol intenso, a carbonatação da superfície do concreto é lenta ou praticamente nula. Em locais protegidos, onde a umidade se mantém na faixa de 50% a 80%, a velocidade de avanço da frente de carbonatação é alta, contribuindo para a deterioração do concreto num prazo mais curto. Em suma a água possui duplo papel na carbonatação: ela pode bloquear os poros do material e ser o meio favorável para propiciar a reação entre o CO₂ e o Ca(OH)₂ (PAPADAKIS *et al.* 1991).

Conforme Adorna (2016), a carbonatação se desenvolve, portanto, quando os poros do concreto se encontram parcialmente saturados, havendo condições do CO_2 se difundir e água para reagir com o mesmo.

Não há consenso entre os pesquisadores quanto a um valor de umidade relativa ideal para acelerar as reações de carbonatação, mas sim de um intervalo. Bakker (1988), aponta que a umidade mais propensa para o avanço da frente de carbonatação encontra-se na faixa de 60%. Em estudo realizado por Wolf e Dal Molin (1989), corpos de prova de concreto de diversos tipos de cimento e relações água/cimento variando de 0,4 a 1,0 foram submetidos a umidades relativas de 30, 50, 70 e 90%. As maiores profundidades de carbonatação foram encontradas em umidade relativa de 70%. Helene (1993), afirma que as maiores velocidades de carbonatação ocorrem em umidade relativa entre 60% e 85%. De acordo com Silva (1995), em umidades extremas o processo de carbonatação é dificultado devido à dualidade do papel da água. Segundo o autor, a umidade “ótima” para o processo ocorre por volta dos 60%, confirmando estudos realizados por Verbeck e Foster (1950) *apud* Venuat e Alexandre (1969). Tal constatação pode ser visualizada pela Figura 7.

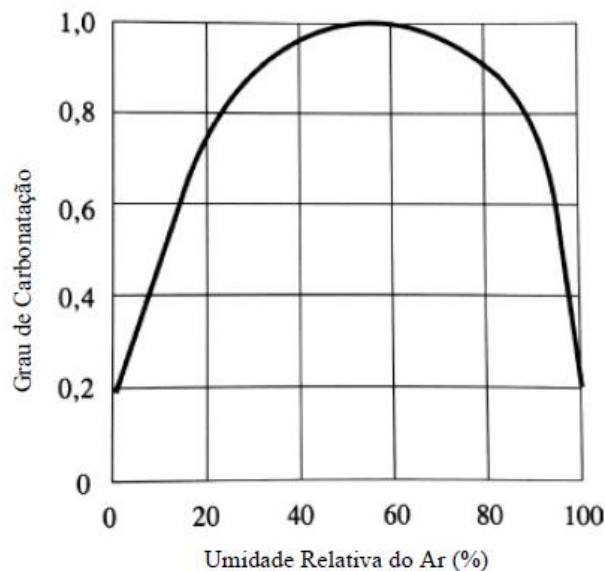


Figura 7 – Grau de carbonatação em função da umidade relativa do ar (%)
Fonte: VERBECK e FOSTER (1950) *apud* VENUAT e ALEXANDRE (1969), pág. 11.

Isaia (1999), ratifica que a velocidade de carbonatação depende do grau de saturação dos poros, porquanto a difusão do CO_2 é maior na faixa de umidade relativa entre 50 e 80%. A velocidade com que a frente de carbonatação avança depende do histórico dos períodos de seca e chuva

sucessivos, devendo-se avaliar a umidade relativa média anual efetiva, a qual governará o avanço da carbonatação natural. De acordo com Neville (2012), estudos realizados em laboratórios indicaram que o pico da carbonatação ocorre com taxas de umidade relativa entre 50% e 70%. Já segundo Bouny *et al.* (2014), a carbonatação é máxima para umidades relativas em torno de 65%, levando em consideração regiões de clima temperado.

Li *et al.* (2013) mostram a influência da umidade relativa sobre o fenômeno da carbonatação, por meio da exposição de concretos de cimento Portland a diversas taxas de umidade, para um valor constante de temperatura. Os resultados são apresentados na Figura 8.

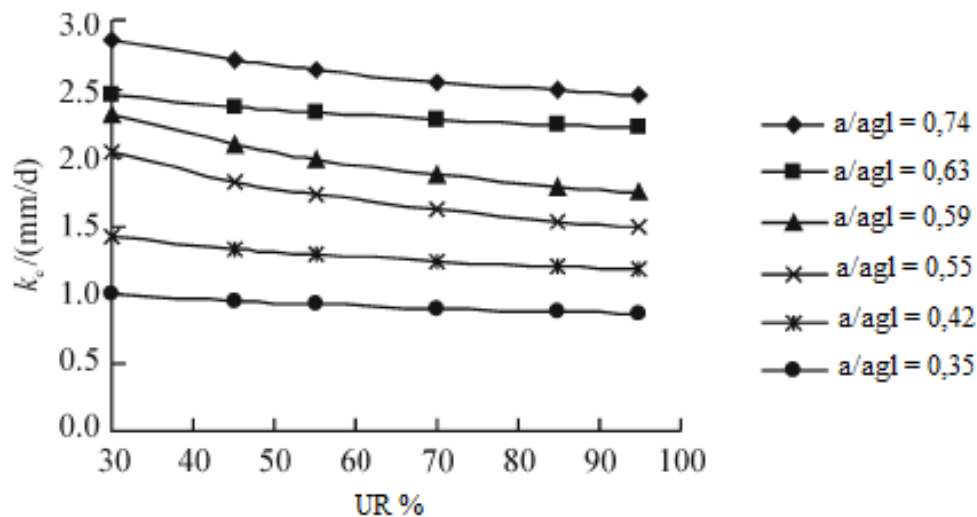


Figura 8 – Influência da umidade relativa do ar na carbonatação
Fonte: LI *et al.* (2013), p. 947.

É possível notar pela Figura 8 que o aumento da umidade relativa acarreta uma diminuição do avanço da frente de carbonatação.

c) Temperatura

A temperatura exerce grande influência no desenvolvimento das reações químicas e deve ser considerada na análise da durabilidade da estrutura. Segundo Helene (1993), a deterioração nas estruturas situadas em países de clima equatorial e tropical é mais grave e mais intensa que nas

estruturas similares situadas em clima temperado; logo, quanto maior for a temperatura, maior será o grau de agressividade no concreto.

A temperatura não pode ser desprezada no processo de carbonatação, pois é um fator importante na taxa de corrosão da armadura. O aumento da temperatura acelera a velocidade das reações e a mobilidade dos íons. Por outro lado, sua redução pode provocar a condensação nos locais em que haja umidade (ANDRADE, 1992).

Kasmierczac (1995) afirma que a velocidade de carbonatação é afetada pelas variações de temperatura, pois esta exerce influência direta no surgimento de vapor d'água ou na saturação dos poros capilares, aumentando também a velocidade de difusão.

Segundo Roy *et al.* (1996), a temperatura parece influenciar significativamente na profundidade de carbonatação. Os pesquisadores encontraram, em concretos com mesmo nível de resistência à compressão, profundidades de carbonatação em Singapura (temperatura média ~ 28 °C) na ordem de 70% maiores do que no Reino Unido e Europa em geral (temperatura média ~ 8 a 9°C).

Li *et al.* (2013) investigaram a influência da temperatura sobre a carbonatação de concretos de cimento Portland, para um valor constante de umidade relativa. Os resultados descritos na Figura 9 evidenciaram maiores profundidades de carbonatação em concretos com maior relação água/aglomerante submetidos a temperaturas mais altas.

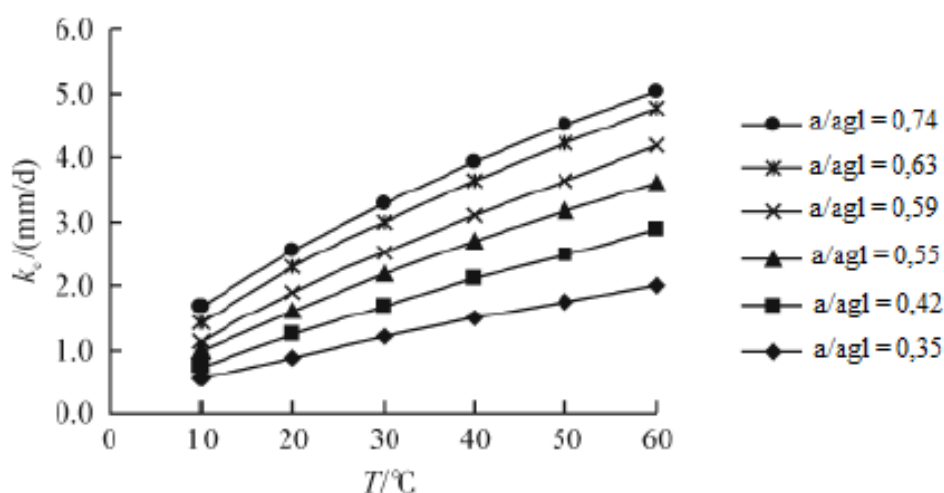


Figura 9 – Influência da temperatura na carbonatação
Fonte: LI *et al.* (2013), p. 947.

2.3.2 Características dos materiais constituintes

a) Cimento

A composição química do cimento determina a quantidade total de álcalis disponíveis para as reações de neutralização, ou seja, a quantidade de óxidos, hidróxidos, silicatos e aluminatos presentes na matriz cimentícia (KULAKOWSKI, 2002).

Segundo Isaia (1999), a velocidade da frente de carbonatação depende dentre outros fatores da composição química do cimento, uma vez que o avanço é proporcional à reserva alcalina disponível na matriz da pasta de cimento, em especial, dos teores de álcalis e dos compostos hidratados.

Os principais compostos presentes no cimento Portland são: o silicato tricálcico (C_3S), o silicato dicálcico (C_2S), o aluminato tricálcico (C_3A) e o ferroaluminato tetracálcico (C_4AF).

Conforme Neville (2012), a hidratação destes compostos ocorre conforme descrito nas Equações 11 e 12:



Onde:

C_3S = Silicato tricálcico

H = água

$C_3S_2H_3$ = Silicato de cálcio hidratado

CH_2 = Hidróxido de cálcio

Observa-se que os dois produtos formados pela reação de hidratação dos silicatos C_3S e C_2S são o silicato de cálcio hidratado ($C_3S_2H_3$) e o hidróxido de cálcio (CH_2). O silicato de cálcio hidratado se caracteriza por apresentar relações C/S (cálcio/sílica) e H/S (água/sílica) diferentes,

variando de acordo com a temperatura e pH. A relação C/S pode variar de 0,6 a 2,0 (CHANG e FANG, 2015). Estes compostos reagem com o CO_2 , sendo consumidos na reação de carbonatação. Sendo assim, a quantidade dos compostos C_3S e C_2S no cimento influencia no processo de carbonatação.

Conforme o *American Concrete Institute* (ACI, 1991), comitê 222, o tipo e a finura do cimento conferem diferentes características ao concreto. Cimentos com adições, sob certas condições, podem diminuir a reserva alcalina, e, concomitantemente, também diminuir a permeabilidade e aumentar a resistividade elétrica.

Diversos autores abordam o comportamento da carbonatação em concretos produzidos com o emprego de cimentos compostos. Wolf e Dal Molin (1989) apresentam em seu trabalho que a velocidade do avanço da frente de carbonatação em cimentos de alto-forno e pozolânicos é superior à encontrada no cimento Portland comum. Monteiro (1996) relata que o cimento CPIII (cimento Portland de alto forno) e o CPV-ARI-RS-MS (cimento Portland de alta resistência inicial resistente à sulfatos com sílica micro pulverizada) apresentam desempenho inferior frente à carbonatação, quando comparados à cimentos sem adição, com menor tempo para iniciação da corrosão. Neville (1997) afirma que os cimentos compostos resultam em menores teores de Ca(OH)_2 , sendo necessário uma quantidade menor de CO_2 para produzir CaCO_3 . Segundo Abreu (2004), cimentos com baixos teores de cinza volante (15%), carbonatam mais que cimentos comuns. De acordo com Figueiredo (2005), o cimento com adição de cinza volante, escória de alto-forno ou sílica ativa são mais vulneráveis à carbonatação, devido às reações pozolânicas com o consumo e redução da reserva alcalina de Ca(OH)_2 , facilitando a difusão do CO_2 . Já para baixos teores de adição mineral, o consumo da reserva alcalina é menor, e se obtém o refinamento dos poros e dos grãos. Pereira e Monteiro (2011), reafirmam esta hipótese de que cimentos que utilizam maiores teores de adição possuem um desempenho inferior no que se refere à resistência à carbonatação apesar do efeito benéfico de refinamento dos poros.

Segundo Helene (1993), a medida que há um aumento da quantidade de adições ativas ao clínquer Portland na produção dos cimentos, a solução intersticial do concreto apresenta uma menor quantidade de Ca(OH)_2 . Bouny *et al.* (2014), afirmam que a redução da quantidade de reserva alcalina, ou seja, de Ca(OH)_2 , promove o aumento da velocidade de difusão do CO_2 e

da frente de carbonatação. Neste caso, a difusão do CO_2 é mais rápida, pois o gás, para avançar e reduzir o pH, precisa consumir menos Ca(OH)_2 , que está presente em menor quantidade na pasta com menor teor de cimento.

Por outro lado, Neville (1997) afirma que em compósitos produzidos com cimentos compostos ocorre o efeito de densificação da estrutura de poros da matriz cimentícia, o que diminui a difusividade do CO_2 e contribui para que a carbonatação ocorra de forma mais lenta.

Balayssac *et al.* (1995) verificaram que a profundidade de carbonatação diminui com o aumento do consumo de cimento independentemente do tempo de cura. Cascudo e Carasek (2011), também reforçam essa hipótese, quando afirmam que nesta situação, a porosidade do concreto e a difusão são reduzidas.

b) Adições minerais

Mehta e Monteiro (2008) definem adições minerais como materiais silicosos adicionados ao concreto, em relação a massa cimentícia total, em proporções que variam desde 6 a 70%. Podem ser naturais, utilizadas em seu estado bruto ou submetidas à ativação térmica, ou podem ser subprodutos industriais.

As adições minerais, quando incorporadas ao concreto, promovem alterações químicas e físicas no mesmo. O efeito químico decorre da reação entre a adição mineral e o Ca(OH)_2 , formado durante as reações de hidratação do cimento Portland, resultando na formação de silicato de cálcio hidratado adicional (DAL MOLIN, 2011). Denominada de reação pozolânica, a reação entre a pozolana e o Ca(OH)_2 se dá de maneira lenta, resultando em taxas de liberação de calor e desenvolvimento de resistência igualmente lentas. Os produtos da reação pozolânica preenchem os espaços capilares, proporcionando melhoras físicas na estrutura do concreto, através do refinamento dos poros (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Segundo Cascudo e Carasek (2011), o emprego de adições minerais (escória de alto-forno, cinza volante, sílica ativa, fíleres) modificam os equilíbrios químicos no interior do concreto e podem trazer consequências para o pH do líquido intersticial, alterando a estabilidade da camada passiva.

Helene (1993) explica que as adições minerais reduzem a porosidade, a permeabilidade e aumentam a resistência à compressão de compósitos cimentícios, entretanto, aumentam a velocidade do avanço da frente de carbonatação.

Isaia *et al.* (2008) afirmam que quando parte do cimento é substituído por adições minerais, as reações de hidratação e/ou pozolânicas formam compostos hidratados mais homogêneos e induzem à diminuição de hidróxido de cálcio, originando pastas mais densas pelo refinamento dos poros, o que dificulta a percolação de fluidos agressivos.

Dal Molin (2011) aborda os efeitos físicos da incorporação de adições minerais no concreto. Em seu estudo, a pesquisadora destaca o efeito microfíler, o refinamento da estrutura dos poros, dos produtos de hidratação e as alterações na microestrutura da zona de transição. As minúsculas partículas das adições minerais preenchem os vazios da matriz de cimento, podendo funcionar como pontos de nucleação para os produtos de hidratação, formando um grande número de pequenos cristais, diminuindo a porosidade e permeabilidade da pasta.

Zeng *et al.* (2012) investigaram as características da estrutura de poros durante o processo de hidratação de cimentos com adição de grandes volumes de cinza volante, através dos ensaios de termogravimetria, porosimetria por intrusão de mercúrio e adsorção/dessorção de nitrogênio. Os autores destacam o papel duplo exercido pela cinza volante como adição mineral no cimento: fornecer mais pontos de nucleação para a precipitação dos produtos de hidratação do cimento e formação de produtos que colmatam a estrutura de poros já existente.

Lesti *et al.* (2013) verificaram que compósitos de matriz cimentícia contendo adições minerais após serem submetidos a um processo de carbonatação acelerada durante um período de seis meses apresentaram taxas de carbonatação relativamente baixas. Os pesquisadores ressaltam que as adições preencheram os poros do material de maneira significativa, inibindo a entrada de CO₂.

Nunes (2014), ao analisar a carbonatação em concretos com adição de cinza de casca de arroz de diferentes teores de carbono grafítico, observou que, para um mesmo nível de resistência, os coeficientes de carbonatação aumentavam à medida que o teor de adição mineral aumentava.

Auroy *et al.* (2015) mostram que pastas contendo adições pozolânicas submetidas a uma carbonatação natural de 3% de CO₂ contribuíram para uma queda significativa da porosidade total e para a modificação do tamanho e distribuição dos poros presentes na microestrutura das amostras.

Leemann *et al.* (2015) estudaram a difusão do CO₂ em concretos com adição de: a) calcário em pó, b) mistura de calcário em pó com cinza volante de baixo teor de cálcio, c) escória granulada de alto-forno e d) dois tipos de cimento Portland comum. Todos os concretos com adição mineral apresentaram aumento na difusão do CO₂ em relação ao concreto de referência (para um mesmo nível de resistência), com exceção do concreto com adição de escória, que apresentou difusão bastante baixa em relação aos demais.

c) Relação água/cimento

A relação água/cimento possui influência direta no fenômeno da carbonatação dos concretos, porque determina, em primeira instância, a quantidade e o tamanho dos poros do concreto endurecido (MEHTA *et al.* 2008).

Ollivier *et al.* (2008) *apud* Cascudo *et al.* (2011) mostram a influência da relação a/c sobre a profundidade de carbonatação. Segundo os autores, há uma relação linear entre a profundidade de carbonatação e a raiz quadrada do tempo, confirmando que a difusão é o fenômeno dominante no processo de carbonatação para uma ampla gama de relações a/c.

A NBR 6118 (ABNT, 2014) define os valores máximos das relações a/c para diferentes estruturas expostas a ambientes com diferentes níveis de agressividade. As que forem dimensionadas para níveis mais elevados devem ter seus compósitos elaborados com uma relação a/c mais baixa, para que haja uma menor formação de vazios capilares e por consequência se obtenha uma estrutura menos permeável.

Conforme Figueiredo (2005), a velocidade de carbonatação aumenta quando o ambiente possui maior concentração de CO₂, contudo, essa influência é maior para compósitos cimentícios com elevada relação água/cimento. Segundo o pesquisador, altas relações água/cimento estão

diretamente relacionadas com o aumento da quantidade, dimensão e continuidade dos poros no concreto endurecido. Como resultado, a porosidade eleva a permeabilidade e as chances de difusão de CO_2 . Compósitos de matriz cimentícia com baixa relação água/cimento resultam em estruturas mais compactas e, conseqüentemente, mais resistentes à carbonatação. A Figura 10 mostra a profundidade de carbonatação ao longo do tempo para compósitos de matriz cimentícias de diferentes relações a/c.

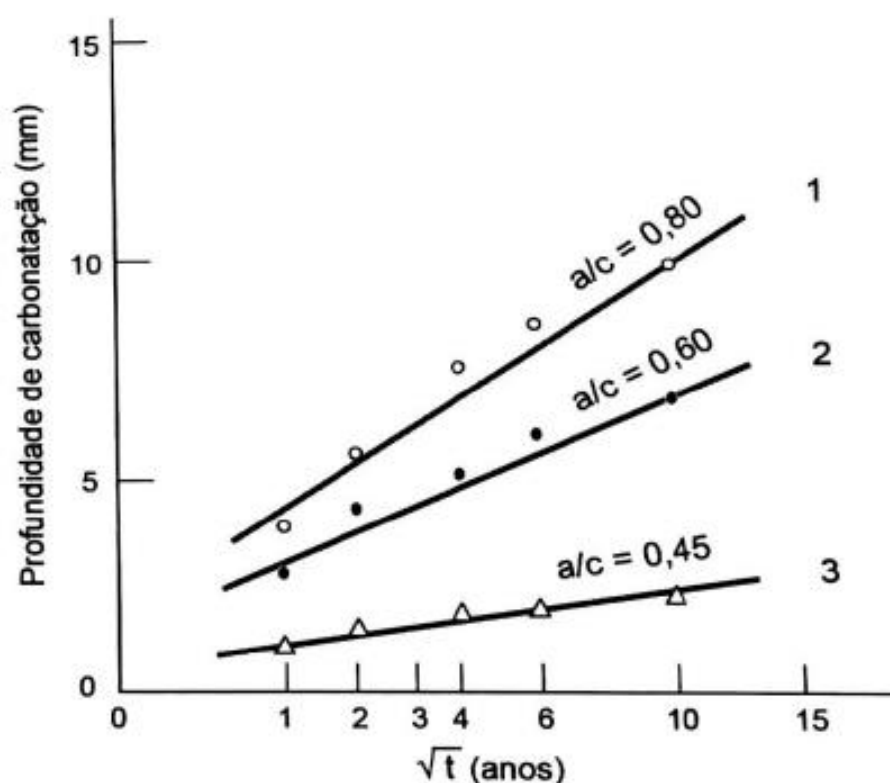


Figura 10 – Influência da relação a/c sobre a profundidade de carbonatação
Fonte: BOUNY *et al.* (2014), pág. 276.

Li *et al.* (2013) estudaram amostras de concreto de cimento Portland comum, com diferentes relações a/c e expostas a diferentes condições climáticas. Observou-se que, independente das condições de temperatura e umidade relativa do ar, quanto maior era a relação a/c da amostra, maior a profundidade de carbonatação da mesma.

Campos *et al.* 2016, mostram que compósitos de matriz cimentícia com maior relação a/c quando submetidos a altas concentrações de CO_2 apresentam maior profundidade de carbonatação, como ilustra a Figura 11.

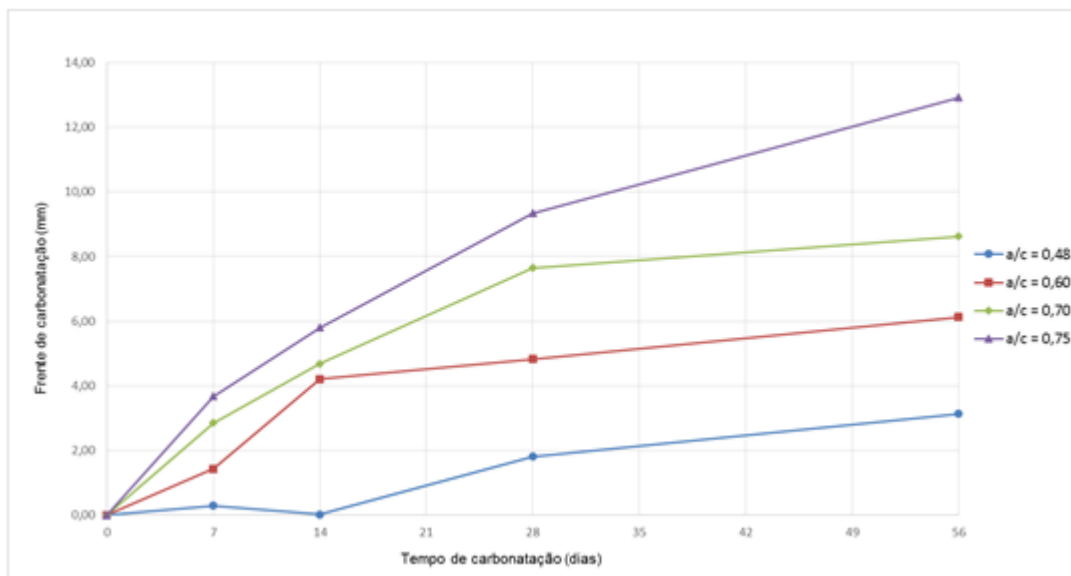


Figura 11 – Profundidade de carbonatação de compósitos cimentícios de diferentes relações a/c
 Fonte: CAMPOS *et al.* (2016), pág. 12.

d) Porosidade

O fator fundamental de controle da carbonatação é a difusibilidade da pasta de cimento endurecido. A difusibilidade é função do sistema de poros da pasta endurecida (NEVILLE, 2012).

A microestrutura de um concreto é essencialmente porosa. Os poros se encontram presentes na pasta de cimento, possuindo diversos tamanhos e podendo ou não estar preenchidos com soluções. A distribuição dos poros está atrelada a fatores como a dosagem do concreto, cura, quantidade e tipo de adições e aditivos químicos (PAULON e KIRCHHEIM, 2011).

Conforme Cota (2016), os vazios presentes no concreto se originam do excesso de água da mistura necessária à obtenção da trabalhabilidade conveniente; da diminuição do volume absoluto que acompanha a hidratação dos constituintes do cimento; do ar eventualmente ou propositalmente arrastado durante o processo de mistura, além de fissuras de origens térmica, de retração e mecânica. A estas causas inerentes podem ser somadas as consequências da má elaboração e má dosagem do material, responsáveis pelo aparecimento de vazios de maior dimensão.

Os poros do concreto podem ser classificados tanto em relação ao seu tamanho, quanto em relação a sua capacidade de impedir a percolação de fluidos (KULAKOWSKI, 2002). Conforme Stroeven *et al.* (2010), a estrutura dos poros estão entre as características mais significativas da microestrutura do material, uma vez que influenciam a sua permeabilidade e durabilidade. Os autores enfatizam que a adequada caracterização da estrutura de poros é crucial para a modelagem da permeabilidade e para a garantia do desempenho e durabilidade do material.

Andrade (1992) em suas pesquisas, faz uma correlação entre porosidade e permeabilidade do concreto: porosidade menor que 10% indica boa qualidade e compactação; entre 10 e 15%, indica boa qualidade, porém permeável e não adequado para ambientes agressivos; acima de 15%, muito permeável e inadequado para proteger a armadura por muito tempo. Bauer (1995) afirma que a interligação dos poros torna o concreto permeável aos líquidos e aos gases. Mohammed *et al.* (2013) reforçam essa hipótese ao enfatizarem que a permeabilidade e as propriedades de transporte de água, vapor e contaminantes dependem da capilaridade e da interconectividade dos poros do concreto.

Parrot (1987) relata a influência da estrutura da pasta de cimento na carbonatação do concreto. Ele explica que quanto maior o tamanho médio dos poros e maior a interconectividade entre eles, maior será a facilidade de difusão do CO₂. A presença de poros abertos é determinante para a difusão do gás carbônico no material (PAPADAKIS, 1991).

Neville (1997) explica que a porosidade pode ser determinada pela proporção do volume total de concreto que é ocupada pelos poros. Se os poros forem interligados, contribuem para o deslocamento dos fluidos, contudo, uma alta porosidade não significa que o material detenha alta permeabilidade. Desta forma, a porosidade pode ser expressa conforme descreve a Equação 13.

$$P = \frac{VP}{VA} \quad (\text{Equação 13})$$

Onde:

P = porosidade

VP = volume ocupado pelos poros

VA = volume aparente

O volume aparente é aquele que considera a forma geométrica do objeto, ou seja, é o seu volume geométrico. Já o volume ocupado pelos poros é o conjunto de vazios acessíveis (poros abertos) e inacessíveis (poros fechados) presentes no material. Uma das maneiras de se obter o volume ocupado pelos poros abertos de um compósito de matriz cimentícia é por meio da diferença do seu volume geométrico pelo volume do seu esqueleto. Este último, leva em consideração a massa física e os poros fechados existentes na amostra (COTA, 2016). A Figura 12 ilustra o comparativo entre o volume aparente e o volume do esqueleto em um concreto.

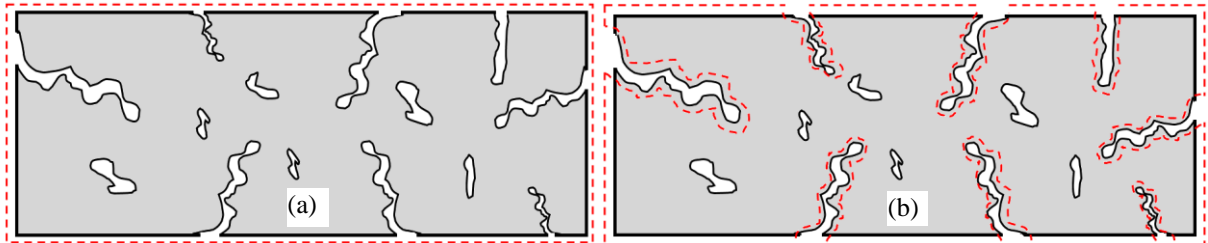


Figura 12 – Comparação dos volumes aparente (a) e do esqueleto (b) de um concreto
Fonte: COTA (2016), pág. 37.

Conforme Papadakis *et al.* (1989), devido a carbonatação, há uma redução na porosidade e concomitante diminuição na média de diâmetro de poros. A porosidade decresce com o tempo em decorrência do volume de sólidos dos produtos das reações químicas de hidratação e carbonatação depositados.

Ishida e Maekama (2000) constataram que os poros se tornam mais finos após a carbonatação, entretanto, ressaltam que não há consenso em como a porosidade e sua distribuição mudam. Os autores indicam que o volume do cristal de CaCO_3 é aproximadamente 11,7% maior que a do Ca(OH)_2 .

Morandeu *et al.* (2014) observaram, ao investigar os efeitos da carbonatação sobre o Ca(OH)_2 e o C-S-H, que a carbonatação resultava em uma redução da porosidade. Ao reagir com o CO_2 , o C-S-H sofria uma descalcificação, resultando em um C-S-H com menor volume molar. Essa perda de volume, porém, era compensada pela reação do Ca(OH)_2 com o CO_2 e a consequente formação do CaCO_3 . Cascudo e Carasek (2011) afirmam que, no que se refere ao processo de

carbonatação do C-S-H, um aumento do volume de poros mais finos pode ser observado, mesmo que a porosidade total da mistura sofra redução.

Campos *et al.* (2016) verificaram que compósitos de matriz cimentícia de maior relação a/c apresentaram aos 28 dias, um volume maior de poros abertos, como se observa na Tabela 1, permitindo um maior fluxo de difusão de CO₂, que, por sua vez, contribuiu diretamente para o aumento da velocidade do avanço da frente de carbonatação.

Tabela 1 – Volume de poros abertos de compósitos cimentícios aos 28 dias

Traço	a/c = 0,48	a/c = 0,60	a/c = 0,70	a/c = 0,75
Poros Abertos (% do Volume Total)	10,6	17,5	20,5	21,6

Fonte: CAMPOS *et al.* (2016), pág. 13.

e) Fissuras

A fissuração é um fenômeno inevitável no concreto armado devido à baixa resistência do concreto à tração. A posição das fissuras nos elementos estruturais - abertura, trajetória e espaçamento podem servir para indicar as causas.

Segundo Júnior (2010), as configurações das fissuras derivadas da deficiência do processo de cura e sobrecarga nas estruturas de concreto são um dos fatores envolvidos no transporte de substâncias potencialmente nocivas ao compósito e às armaduras que o envolvem.

Conforme Figueiredo (2005), por meio das fissuras, agentes agressivos como os íons Cl⁻ ou o CO₂ podem penetrar e romper a passividade da armadura. No caso de fissura transversal à armadura, a região próxima a fissura atuará, como ânodo, enquanto que as regiões laterais atuarão como cátodo. No caso de fissura longitudinal sobre a armadura, a região adjacente à armadura atuará como ânodo e a região inferior da armadura como cátodo, desencadeando o processo corrosivo. A Figura 13 esquematiza o processo de penetração e difusão do CO₂ na região fissurada.

Dependendo das características da fissura, da alcalinidade do concreto e da quantidade de água presente, pode ocorrer o fenômeno de autocicratização da fissura, ou seja o acúmulo de carbonatos na superfície da fissura.

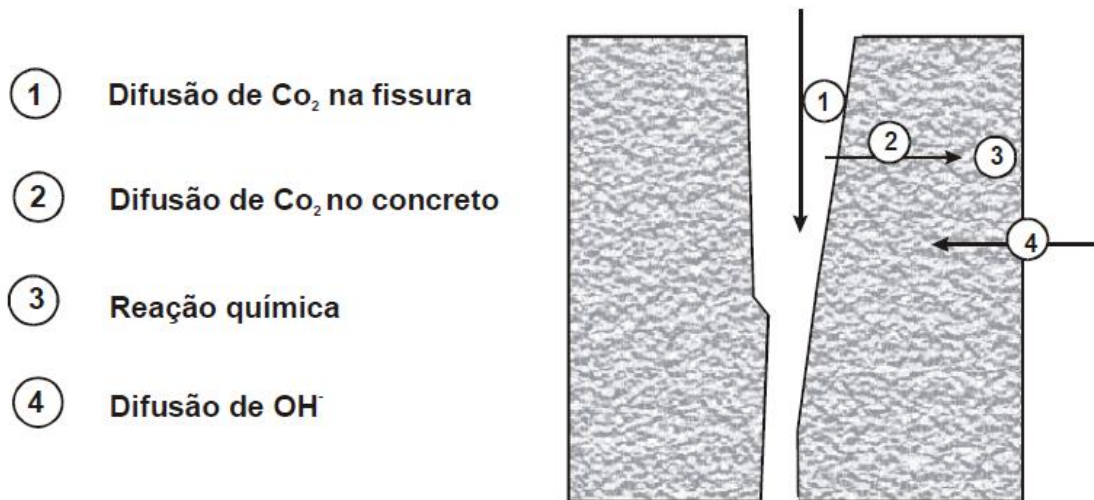


Figura 13 - Representação esquemática de penetração de CO_2 no concreto
Fonte: FIGUEIREDO (2005), pág. 831.

2.3.3 Aplicação e cura do concreto

A qualidade da aplicação do concreto é um fator preponderante para a sua durabilidade e refere-se, principalmente, ao adensamento e à cura.

De acordo com Bouny *et al.* (2014), a qualificação da mão de obra na execução das fôrmas, no processo de vibração e de acabamento do concreto, influenciam a velocidade da frente de carbonatação. Concretos com baixa permeabilidade dificultam a entrada de agentes agressivos. Segundo Mehta e Monteiro (2008), a segregação dos materiais constituintes do concreto podem ocorrer em razão da vibração excessiva no adensamento ou em virtude do lançamento do material a partir de grandes alturas. Além disto, a segregação pode ser consequência do processo de exsudação, que é uma característica das misturas de um concreto muito fluido.

O adensamento deficiente pode gerar falhas, como ninhos de concretagem, excesso de ar aprisionado, alterações na porosidade, facilitando, desta forma, a penetração e a propagação da frente de carbonatação (KULAKOWSKI, 2002).

Pelo fato da difusão do CO₂ depender da porosidade, a cura tem importante papel na formação da microestrutura e no avanço da profundidade de carbonatação. Quanto maior o tempo e mais eficiente for o método de cura empregado, maior será o grau de hidratação do cimento, menor será a porosidade e a permeabilidade e, por consequência, menor será a carbonatação (FIGUEIREDO, 2005). Quanto maior o grau de hidratação do cimento, maior será a densificação da matriz e menor será a taxa de penetração de agentes agressivos (ISAIA, 1999).

Segundo Mehta e Monteiro (2008), o intuito da cura é evitar a perda de umidade e controlar a temperatura por um período suficiente para o compósito cimentício atingir um nível de resistência desejável.

De acordo com Pauletti (2004), no que se refere ao tipo de cura empregada, nota-se, que a grande maioria dos pesquisadores optam pela realização de cura úmida ou submersa por um período que pode variar de 7 a 28 dias. Isto porque a cura submersa ou úmida propicia as melhores condições para hidratação do cimento e consequente fechamento dos poros. A manutenção da umidade é essencial para impedir que a água necessária para a hidratação das partículas de cimento sofra evaporação excessiva, evitando o aparecimento de vazios capilares.

Segundo Neville (2012), o processo de cura do concreto tem grande influência na carbonatação, obtendo-se uma maior porosidade quando se utiliza cura seca ao invés de cura úmida.

Cascudo e Carasek (2011) comentam que uma cura inadequada conduz, por falta de água, a uma hidratação insuficiente da camada superficial do concreto, o que aumenta a porosidade e, consequentemente, a sensibilidade dessa camada à carbonatação. A redução do tempo de cura pode, então, provocar consequências negativas a longo prazo, ao passo que uma cura úmida prolongada limita a profundidade de carbonatação.

Conforme Júnior (2010), quando se utilizam adições minerais no concreto, sob o ponto de vista da carbonatação, uma cura executada de modo efetivo (e por período mais prolongado) proporciona melhor desenvolvimento das reações pozolânicas e refinamento dos poros da estrutura, podendo reduzir a permeabilidade e, de certa forma, compensar o efeito negativo do consumo de Ca(OH)₂.

Balayssac *et al.* (1995) concluíram que as condições de cura, particularmente, o tempo de cura úmida, têm larga influência na durabilidade dos concretos. Os pesquisadores observaram que o aumento do período de cura de 1 para 3 dias elevou o desempenho contra o avanço da carbonatação em 10%, para concretos com teor de cimento de 300 kg/m³, e em 50%, para concretos com teor de cimento de 420 kg/m³.

De acordo com a Figura 14, concretos produzidos com cimento contendo 70% de escória e submetidos a uma cura ineficaz, são mais afetados pela carbonatação quando comparados a concretos produzidos com cimento Portland comum. Além disto, a maior redução no avanço da profundidade de carbonatação ocorre, principalmente, se a cura for mantida durante os primeiros 7 dias de idade. Segundo Bouny *et al.* (2014), quanto maior o tempo de cura, menor será a profundidade de carbonatação. A cura inadequada leva a uma hidratação insuficiente da superfície do concreto aumentando a porosidade e, conseqüentemente, a carbonatação.

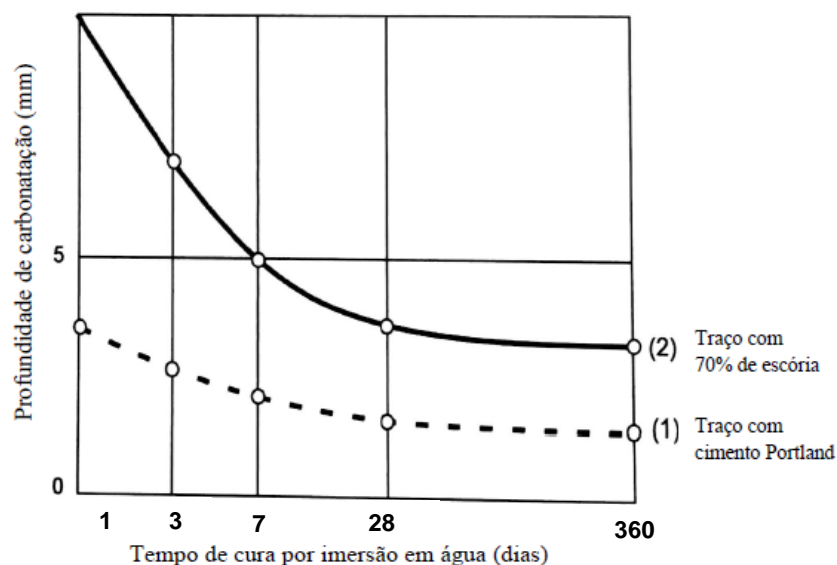


Figura 14 – Influência da cura sobre a profundidade carbonatada
Fonte: BOUNY *et al.* (2014), p.278.

Lo e Lee (2002), fizeram um comparativo da cura ao ar com a cura úmida. Os pesquisadores verificaram que concretos curados em água apresentaram 72% da carbonatação de concretos curados ao ar, após 3 meses de ensaio acelerado. Os autores afirmam que o material quando curado ao ar possui poros maiores e mais canais intercomunicáveis, aumentando a velocidade de difusão de CO₂.

Bouny *et al.* (2014) salientam que para uma determinada relação a/c, a profundidade de carbonatação sempre será maior quando é realizada a cura seca ao invés da cura úmida. Em estudos realizados, os pesquisadores observaram que aumentando o período da cura úmida de 1 dia para 3 dias, houve uma redução da profundidade de carbonatação em cerca de 40%, conforme se observa na Figura 15. Este fato se deve ao aumento do grau de hidratação do cimento que reduz a porosidade, a permeabilidade e as fissuras da camada superficial do concreto.

Rabehi *et al.* (2013) estudaram a correlação entre a absorção inicial da camada de cobrimento do concreto com a profundidade de carbonatação. Para isto, foram moldadas amostras de concreto com dois tipos diferentes de cimento Portland com períodos de cura de 3, 7 e 28 dias. À medida que o período de cura aumentava, a absorção inicial da camada de cobrimento e a profundidade de carbonatação diminuía. Os pesquisadores mostram que a cura influencia as reações de hidratação do concreto, promovendo a colmatação dos poros capilares.

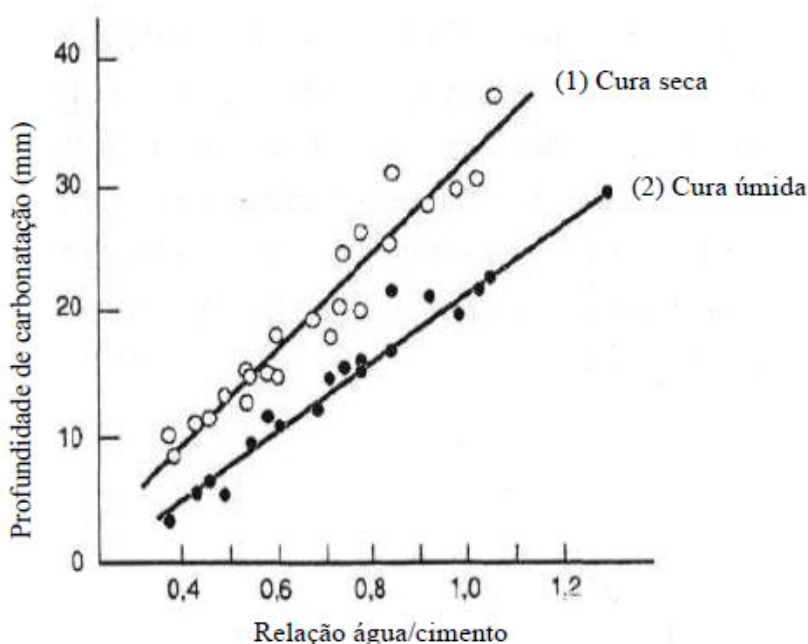


Figura 15 – Evolução da carbonatação em função da relação a/c para diferentes condições de cura
Fonte: BOUNY *et al.* (2014), pág. 277.

A carbonatação em concretos com adição de escória de alto-forno foi estudada por Gruyaert *et al.* (2013), que avaliaram os efeitos de diferentes períodos de cura (1, 3, 6 e 18 meses) sobre a profundidade de carbonatação de concretos com teores de 0%, 50%, 70% e 85% de escória em

substituição ao cimento. Os pesquisadores notaram que para todos os teores de substituição estudados, houve uma diminuição da profundidade de carbonatação à medida que se aumentou o período de cura. Eles destacam que houve uma grande diminuição na profundidade de carbonatação quando o período de cura foi ampliado de 1 para 3 meses, mas que a diminuição da mesma foi menos significativa para períodos de cura maiores.

2.3.4 Condições de ensaio de carbonatação acelerada

As condições de ensaio de carbonatação acelerada do concreto estão relacionadas com a forma dos corpos de prova, o condicionamento e as condições de exposição no interior da câmara (temperatura, umidade e teor de CO₂).

Segundo Pauletti (2006), o tipo e a forma das amostras são fatores importantes para os estudos de carbonatação. Kulakowski (2002) fez uma comparação entre a profundidade de carbonatação de amostras de argamassa cilíndricas (diâmetro de 50 mm e altura de 100 mm) e prismáticas (dimensões de 40 mm x 40 mm x 160 mm), para um mesmo material e iguais condições de exposição. A pesquisadora constatou que o corpo de prova prismático apresentou uma profundidade de carbonatação média de 9,23 mm, enquanto que para o corpo de prova cilíndrico este valor foi de 13,81 mm, ou seja, cerca de 50% maior. A razão disto é atribuída à possível soma de vetores na difusão do CO₂ das amostras cilíndricas. No exemplo citado, as amostras não foram impermeabilizadas em nenhuma das faces e foram rompidas transversalmente à face de menor dimensão. Os pesquisadores que utilizaram corpos de prova cilíndricos (ISAIA, 1999; VAGHETTI, 1999; VENQUIARUTO, 2002), em geral, impermeabilizaram as laterais mantendo o topo e base dos mesmos livres e romperam diametralmente essas amostras, evitando, assim, a soma de vetores na difusão do CO₂.

Pauletti (2006) comenta que as dimensões dos corpos de prova geralmente estão relacionadas com a quantidade de medidas a serem realizadas e com o tempo de medição das profundidades carbonatadas. O emprego de cubos e cilindros é conveniente quando se pretende realizar a medição em uma ou duas idades específicas. Já o emprego de prismas é mais interessante quando se deseja obter um número maior de idades de ensaio.

A norma ISO 1920-12 (2015) recomenda, para estudos de carbonatação em concretos, a adoção de corpos de prova prismáticos nas dimensões 10 mm x 10 mm x 400 mm.

O condicionamento, por vezes também chamado de sazonalidade, constitui a etapa entre a cura das amostras e o início do ensaio de carbonatação propriamente dito, quando os corpos de prova são submetidos à ação do CO₂ (PAULETTI, 2009).

As diferentes formas de condicionamento podem resultar em profundidades de carbonatação diversas para um mesmo material. Esta etapa é um ponto crítico e não deve ser ignorada (PAPADAKIS, 2000).

Cascudo e Carasek (2011), destacam a importância da realização de um condicionamento antes da exposição dos corpos de prova à ação do CO₂. Este condicionamento, constituído de uma etapa de pré-secagem e outra de distribuição de umidade, visa a padronização das amostras e da cinética das reações.

Um problema bastante comum nas pesquisas é a ausência desta etapa ou a omissão na descrição do condicionamento (PAULETTI, 2009). Bahador e Jong (2006) concluíram que a maior razão para diferentes resultados em ensaios acelerados de carbonatação está nos diversos condicionamentos utilizados por distintos pesquisadores.

Pauletti (2006) afirma que muitos pesquisadores adotam colocar as amostras em ambiente de laboratório por um período pré-determinado, contudo, trata-se de um ambiente muito variável, mais ainda se comparado entre as diferentes regiões do país. Seria necessário pelo menos fazer uso de um ambiente com temperatura e umidade constantes. Outro procedimento de sazonalidade adotado por alguns pesquisadores é o prescrito pela RILEM TC 116-PCD (1999). Nesta recomendação técnica, na parte “A”, é especificado o condicionamento de corpos de prova de concreto para medição da permeabilidade a gases e à absorção de água. Conforme descrito na recomendação, após a cura, os corpos de prova devem ser colocados em estufa a 50 ± 1°C até alcançar a perda de massa pré-estabelecida. Em seguida, devem ser embalados de forma a impedir a perda ou o ganho de umidade e acondicionados na estufa por mais 14 dias, para redistribuição da umidade restante na amostra. Posteriormente, os CPs devem ser levados para uma sala climatizada para realização do ensaio de carbonatação. Estes devem permanecer

embalados por mais 24 horas para que sua temperatura se iguale à da sala. Em seguida, as embalagens devem ser abertas e as amostras devem ser colocadas na câmara de carbonatação. Segundo a própria RILEM TC 116- PCD (1999), este procedimento é recomendado sempre que se deseja obter umidade uniforme nas amostras de ensaio, fator de interesse para os ensaios de carbonatação.

A norma ISO 1920-12 (2015) recomenda que os CPs prismáticos moldados sejam acondicionados em câmara úmida que mantenha temperatura constante de $(27 \pm 2) ^\circ\text{C}$ e umidade relativa mínima de 95%. Após (22 ± 2) horas, os mesmos devem ser retirados das fôrmas e transferidos em caráter imediato para um recipiente de água que apresente temperatura constante de $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$. Em regiões de clima tropical, a temperatura da água pode ser ajustada para a faixa de $(27 \pm 2) ^\circ\text{C}$. A norma em questão enfatiza que o processo de cura no recipiente de água deve perdurar por 28 dias. Após este período, os CPs devem ser retirados da água e acondicionados em um ambiente laboratorial que mantenha uma temperatura na faixa de 18 até $29 ^\circ\text{C}$ durante 14 dias. A norma permite acondicionar os CPs em outros ambientes alternativos, desde que os mesmos sejam devidamente controlados. Transcorrido os 14 dias, a norma recomenda que as faces superior, inferior, laterais menores sejam seladas com cera de parafina ou material similar para impedir a penetração de CO_2 e permitir que a carbonatação ocorra somente nas duas faces longitudinais dos CPs, conforme ilustra a Figura 16.



Figura 16 – Corpo de prova prismático selado em 1 e exposto em 2
Fonte: Norma ISO 1920-12 (2015), pág. 4.

Com relação a diferentes materiais, Pauletti (2006) relata que diversos pesquisadores optam por trabalhar com argamassas, a fim de minimizar a influência do agregado graúdo na determinação da frente de carbonatação. Além disto, em comparação ao concreto, os corpos de prova de argamassa podem ter dimensões reduzidas. Desta maneira, a quantidade de material demandado para a confecção dos CPs é menor; uma quantidade maior de amostras pode ser disposta na câmara de carbonatação; os CPs se adequam às características dos equipamentos de ensaio e o processo de leitura do avanço da frente de carbonatação torna-se simplificado.

2.4 Carbonatação acelerada e carbonatação natural

Na literatura, encontram-se diversos trabalhos realizados com o objetivo de acompanhar o avanço da frente da carbonatação, utilizando métodos naturais e métodos acelerados. Nos trabalhos que utilizam métodos naturais, o fenômeno da carbonatação acontece espontaneamente no concreto, que é exposto ao meio ambiente em condições ambientais diferentes, variáveis e cíclicas (POSSAN, 2004; TASCA, 2012).

Ensaio acelerados consistem na reprodução, através do uso de câmaras de carbonatação, de um ambiente favorável à ocorrência das reações de carbonatação no concreto (CASCUDO e CARASEK 2011). Neste processo, os teores de CO_2 , umidade e temperatura são mantidos em condições constantes. Segundo Neville (2012), as concentrações de CO_2 mais frequentemente usadas nos testes de carbonatação acelerada situam-se entre 4% e 5%, e umidade relativa entre 60% e 70%.

A umidade relativa da câmara de carbonatação afeta diretamente a velocidade de deslocamento da frente de carbonatação. Caso a umidade relativa seja muito baixa, valores inferiores a 50%, a propagação da carbonatação dentro da peça é minimizada, pois a água é insuficiente para a dissolução do CO_2 , logo não há a formação do H_2CO_3 . A umidade relativa muito alta também reduz o avanço da frente de carbonatação. Isso ocorre, pois quando a rede capilar está saturada de água, o transporte de CO_2 reduz significativamente, o que inibe as reações químicas da carbonatação (VERBECK e FOSTER, 1950; HELENE, 1993; SILVA, 1995; RAISDORFER, 2015).

Bernal *et al.* (2014) estudaram a carbonatação natural em concretos com escória álcali-ativada. Amostras de concreto foram expostas, durante 7 anos, a um ambiente urbano com umidade relativa entre 70 e 76%, temperaturas entre 19 e 38°C e concentração de CO₂, medida durante os 8 primeiros meses, entre 310 e 410 ppm. As profundidades de carbonatação natural foram, então, comparadas com as profundidades obtidas em um ensaio acelerado, com teor de CO₂ de 1%. Os autores observaram que as profundidades de carbonatação após 7 anos de exposição ambiental, eram muito menores do que os valores previstos pelo ensaio acelerado. Isto foi atribuído às diferenças termodinâmicas entre as condições acelerada e natural, que alteram os processos que controlam a carbonatação.

Segundo Saeki *et al.* (1971) *apud* Simas (2007), quando a carbonatação ocorre no meio ambiente em quantidades normais de CO₂, a difusão do mesmo na matriz cimentícia acontece naturalmente e o excesso de água que não reage com o CO₂ tem tempo suficiente para deixar o corpo de prova, mantendo o equilíbrio com a umidade exterior. No caso da carbonatação acelerada, o teor de água da matriz cimentícia se torna mais elevado do que a umidade dentro da câmara de carbonatação. Com o aumento da quantidade de CO₂ reagindo com a umidade da superfície da matriz cimentícia, a difusão tende a ser mais rápida retendo umidade no corpo de prova, necessitando de uma menor quantidade da umidade exterior na reação.

A norma ISO 1920-12 (2015) orienta que para estudos de carbonatação, corpos de prova de concreto prismáticos devem ser armazenados em uma câmara de carbonatação com condições controladas de CO₂, temperatura e umidade relativa, pré-definidos a $(3,0 \pm 0,5) \%$, $(22 \pm 2) ^\circ\text{C}$ e $(55 \pm 5) \%$, respectivamente, por um período de 70 dias. Em locais de clima quente, as condições na câmara de carbonatação podem ter temperatura $(27 \pm 2) ^\circ\text{C}$ e umidade relativa de $(65 \pm 5) \%$.

2.5 Medição da carbonatação por meio de indicadores químicos

Segundo Ribeiro (2014) a verificação da profundidade de carbonatação é um dos testes mais simples para se avaliar os fenômenos que podem favorecer a corrosão em concreto armado. Tradicionalmente se utilizam indicadores à base de fenolftaleína ou equivalentes, que indicam a mudança de pH entre 8 e 11 e podem ser empregados com sucesso. A fenolftaleína apresenta

coloração róseo-avermelhada com valores de pH iguais ou superiores a 9,5 e incolor abaixo deste valor. A timolftaleína apresenta coloração azulada com valores de pH da ordem de 10,5 ou superior e incolor abaixo deste valor. Em geral aplica-se uma solução de 1 g de fenolfataleína dissolvida em 50 g de álcool e 50 g de água, que é borrifada na superfície da fratura. Os autores alertam que qualquer determinação desta natureza deve ser cuidadosa e recomendam não aspergir a solução sobre corpos de prova serrados, molhados ou alterados por deficiência de técnicas de amostragem. Deve-se, então, quebrar uma porção local (normalmente por flexão) e imediatamente aplicar o indicador. Normalmente, admite-se que o concreto não está carbonatado quando, ao se aspergir o indicador, ele adquirir em sua superfície a coloração vermelha carmim; caso fique incolor, assume-se que o concreto está carbonatado (PEREIRA E MONTEIRO, 2011).

Ainda que os indicadores químicos não consigam mostrar com precisão onde se encontra a frente de carbonatação, eles têm a capacidade de identificar a região onde houve mudança de pH dentro de uma determinada faixa, que é o que vai comandar a despassivação do aço. A técnica é muito simples, de baixo custo, não exige mão de obra especializada, é adequada para uso em campo e pode ser utilizada entre as pesquisas com fins comparativos (PAULETTI, 2010).

Kazmierczac (1995) alerta para alguns cuidados que devem ser tomados durante o processo de execução da fratura e mensuração da frente de carbonatação, ressaltando que a superfície não deve ser serrada, molhada ou apresentar excesso de poeira, pois estes fatores prejudicam a visualização e podem falsear os resultados. Recomenda-se a limpeza da fratura com pincel ou jato de ar comprimido e aspersão do indicador em um período não superior a um minuto após a fratura.

Lacerda (2016) realizou testes comparativos de medição de frente de carbonatação em corpos de prova serrados e rompidos. Os resultados obtidos em sua pesquisa indicaram não haver diferenças entre os procedimentos. Além disto o pesquisador mostra que corpos de prova molhados durante o corte com disco de serra, não alteram a leitura da carbonatação, quando os mesmos forem secos e limpos.

Pereira e Monteiro (2011) relatam que quando é colocado o indicador de pH, há alteração da cor do corpo de prova em um intervalo de tempo muito curto. A orientação é que a espessura incolor seja devidamente medida com uma precisão de milímetros. Se a linha de troca é ondulada, devem-se tomar pelo menos dez medidas em pontos diferentes e calcular a média aritmética e a profundidade máxima. Recomenda-se medir certas regiões críticas tais como cantos, esquinas, ao redor de agregados graúdos e outros pontos onde se esperam profundidades maiores de carbonatação.

Isaia (1999), após analisar o trabalho de diversos pesquisadores que compararam métodos de medição de profundidade de carbonatação, comenta que o emprego de indicadores para esse fim é um meio bastante prático, fácil e de baixo custo, embora apresente deficiências como a de subestimar a frente real de carbonatação e a dispersão razoável das leituras. O autor considera que os resultados do ensaio são válidos para efeito comparativo entre diversos traços de concreto de laboratório, embora para casos de obras acabadas com o intuito de avaliação da verdadeira frente de carbonatação deixa de ser fidedigno, devendo ser realizados ensaios complementares por outros métodos.

A RILEM (1988), sob a designação CPC-18, descreve o procedimento para o ensaio de medida de carbonatação por fenolftaleína. O indicador deve ser aspergido em uma região recém-fraturada, antes que a face exposta pela fratura venha a se carbonatar ao reagir com o CO₂ do ar. Após a secagem do indicador pode-se passar uma resina incolor, sem brilho, para fixação da cor. É recomendável que a medição da profundidade de carbonatação seja feita 24 horas após a aspersão do indicador, quando o limite entre as faces carbonatadas e não carbonatadas é mais evidente. A precisão deve ser de 0,5 mm, não sendo levados em conta valores de carbonatação inferiores. Os cantos de amostras prismáticas devem ser ignorados, uma vez que o CO₂ entra por dois lados. Em amostras com agregados muito grandes, a carbonatação deve apenas ser medida na pasta de cimento.

A norma ISO 1920-12 (2015) recomenda que, após o processo de carbonatação acelerada, os corpos de prova prismáticos sejam divididos ao meio, perpendicularmente às faces expostas, para medição da profundidade de carbonatação. A norma comenta que o corte com serra não é adequado. Ela enfatiza que a carbonatação é medida usando-se uma solução de fenolftaleína como indicador de pH, composto por 1 g de fenolftaleína em pó dissolvida em 70 ml de etanol

e 30 ml de água deionizada, pulverizada sobre a superfície limpa do concreto recém-separado. A profundidade da carbonatação é dada pela média da medição de 5 pontos em cada face, ou pela média de 20 pontos quando é medida em apenas uma face da amostra fatiada. A profundidade de carbonatação será determinada pela medida perpendicular à superfície exposta da amostra com uma precisão de 0,5 mm por ponto medido. Devem ser desconsiderados poros profundos e grandes agregados no cálculo médio da profundidade.

2.6 Medição da carbonatação por sonda indicadora de pH

Em trabalho realizado por Lacerda (2016), o pH do compósito cimentício foi medido utilizando um equipamento munido de um sensor como mostra a Figura 17, que tem a capacidade de fornecer o valor do pH quando inserido em uma solução, ou quando em contato com a superfície sólida e plana do material a ser estudado. Para a medição em superfície plana, o simples contato da sonda com o material cimentício já é o suficiente para se conseguir o valor do pH. É necessário apenas que a superfície esteja limpa e com uma lâmina de água destilada ou deionizada, para uma melhor condutividade entre o eletrodo e a face (PU *et al.* 2012).



Figura 17 – Medidor de pH de superfície
Fonte: LACERDA (2016), pág. 51.

A calibração, deve ser realizada com soluções de diferentes pHs, em pelo menos dois pontos, incluindo o ponto $\text{pH} = 7$ e outro ponto próximo ao pH do material a ser estudado, de modo a compensar um eventual desvio nos valores a serem medidos (LACERDA, 2016).

Campos *et al.* (2016) utilizaram a sonda indicadora de pH para medir a superfície externa e interna de compósitos de matriz cimentícia cilíndricos com diferentes relações a/c após permanência pré-estabelecida em câmara de carbonatação. As Figuras 18 e 19 indicam os valores de pH obtidos no decorrer do processo de carbonatação, sendo possível monitorar a perda de alcalinidade e o avanço da frente de carbonatação em faixas de pH não identificadas pelo uso da fenolftaleína.

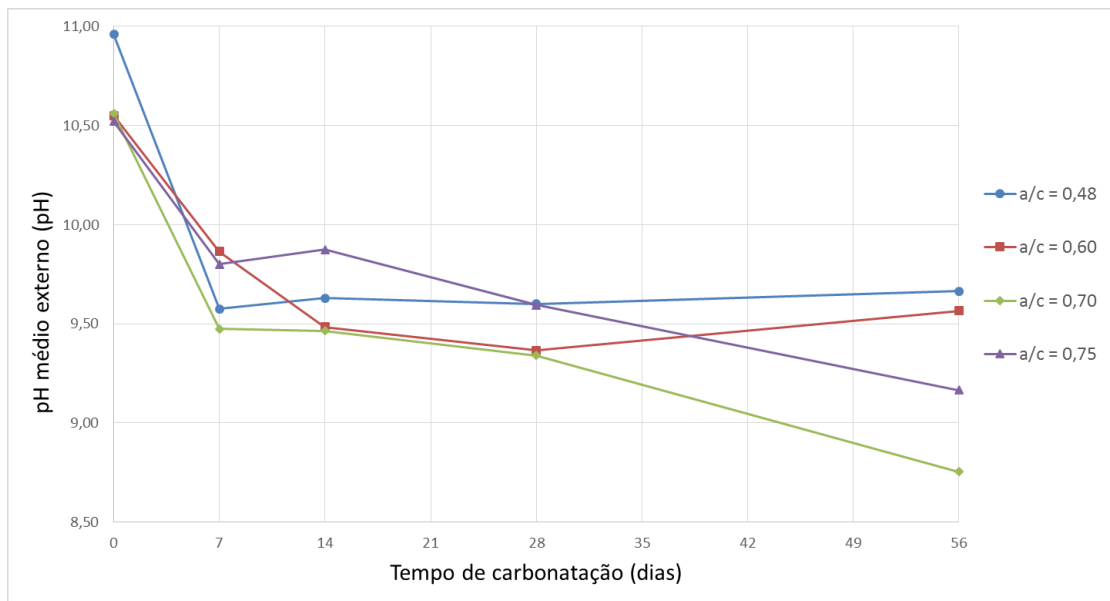


Figura 18 – pH externo dos corpos de prova carbonatados
Fonte: CAMPOS *et al.* (2016), pág. 10.

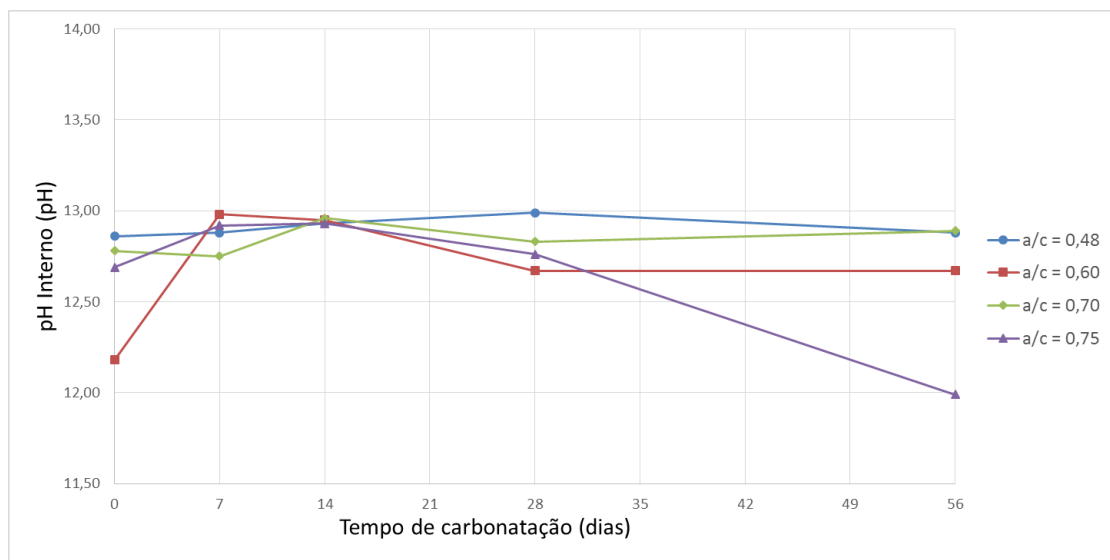


Figura 19 – pH interno dos corpos de prova carbonatados
Fonte: CAMPOS *et al.* (2016), pág. 10.

O item correspondente a 0 dia esboçado nas Figuras 18 e 19 representa o momento em que os corpos de prova são retirados da câmara úmida e levados para o ensaio de carbonatação acelerada.

2.7 Técnicas de ensaio para determinação da profundidade de carbonatação

A seguir, são apresentadas algumas técnicas de investigação aplicadas aos compósitos de matriz de cimento Portland que podem ser empregadas com o intuito de se caracterizar os materiais constituintes da mistura ou para se avaliar o avanço da frente de carbonatação.

2.7.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Segundo Maliska (2003), durante a fase de produção ou análise de materiais, quase sempre se torna necessário analisar a sua microestrutura. Esta análise micro estrutural é muito importante pois permite entender as correlações da microestrutura e prever as propriedades do material quando estas correlações são estabelecidas. Na microscopia eletrônica de varredura (MEV), os sinais de maior interesse para a formação da imagem são os elétrons secundários e os retroespalhados. A medida que o feixe de elétrons primários vai varrendo a amostra, estes sinais vão sofrendo modificações de acordo com as variações da superfície. Os elétrons secundários fornecem imagem de topografia da superfície da amostra e são os responsáveis pela obtenção das imagens de alta resolução, já os retroespalhados fornecem imagem característica de variação de composição. A elevada profundidade de foco (imagem com aparência tridimensional) e a possibilidade de combinar a análise microestrutural com a microanálise química são fatores que em muito contribuem para o amplo uso desta técnica.

A aplicação do método de microscopia eletrônica aos materiais à base de cimento consiste na obtenção de imagens de amostras com o microscópio eletrônico de varredura e posterior digitalização, binarização e tratamento (SATO, 1998).

Tasca (2012) relata que o microscópio eletrônico de varredura é utilizado quando se pretende observar amostras espessas, ou seja, não transparente a elétrons. Além disto, a MEV possibilita

a obtenção de informações químicas em áreas da ordem de microns. Os métodos de análise qualitativa e semi-quantitativa encontram-se disponíveis no sistema Espectrometria de Dispersão de Energia (EDS) e são usualmente utilizados, pois permitem, de forma rápida, a identificação da composição dos elementos presentes na amostra.

A microsonda eletrônica (MSE) é um acessório importantíssimo acoplado ao microscópio eletrônico de varredura, tendo como partes essenciais um cristal analisador e um detector, ambos móveis. Estes instrumentos, ditos de microanálise são usados para identificar e quantificar, na escala microscópica, os elementos químicos presentes na amostra.

Carneiro *et al.* (2013) utilizaram MEV para avaliar a eficiência da carbonatação indireta de basalto para aprisionamento de CO₂. As Figuras 20 e 21 mostram, respectivamente, MEV e EDS da amostra de basalto antes e após o processo de carbonatação.

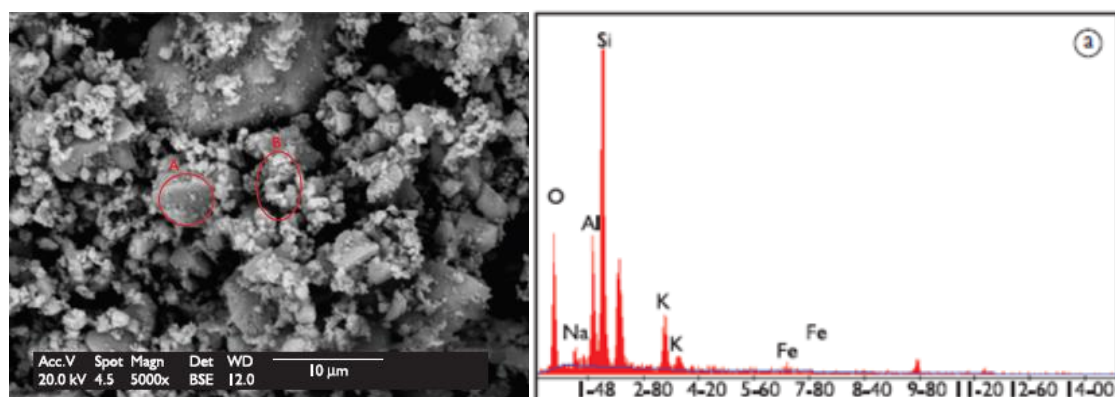


Figura 20 - MEV e EDS da amostra de basalto antes do processo de carbonatação
Fonte: CARNEIRO *et al.* (2013), pág. 47.

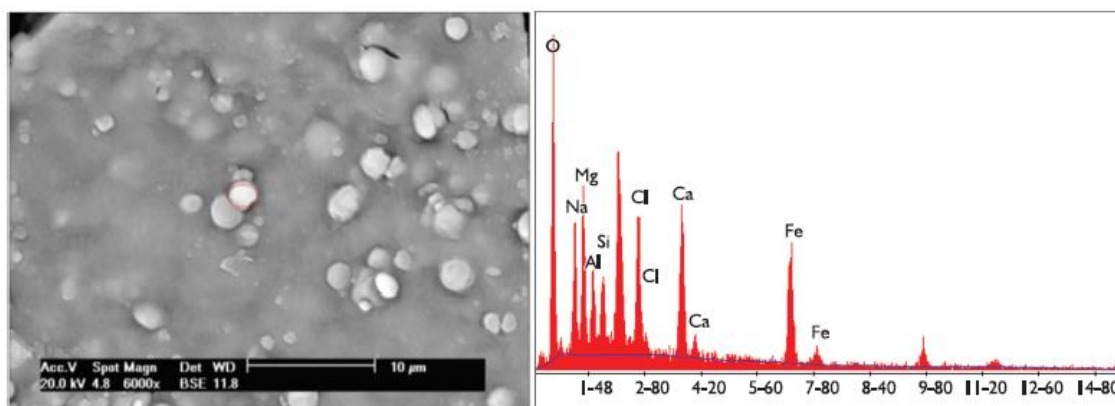


Figura 21 - MEV e EDS da amostra de basalto após o processo de carbonatação
Fonte: CARNEIRO *et al.* (2013), pág. 47.

Tasca (2012) fez uso de MEV para identificar a morfologia de compostos provenientes das reações de carbonatação e da hidratação do cimento, dando ênfase aos compostos como o CaCO_3 , o Ca(OH)_2 e o (C-S-H). A Figura 22 destaca a fotomicrografia de um poro do concreto de referência utilizado pelo pesquisador, indicando a presença de cristais de Ca(OH)_2 em reação com o CO_2 junto às microfissuras da amostra.

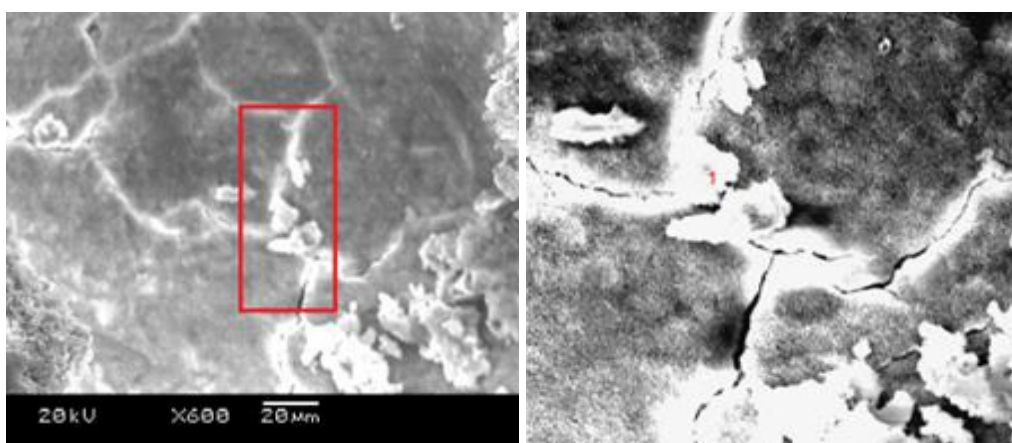


Figura 22 - Fotomicrografia da presença de Ca(OH)_2 nas fissuras do concreto
Fonte: TASCA (2012), pág. 147.

A Figura 23 apresenta a morfologia hexagonal da presença de Ca(OH)_2 disperso na microestrutura do compósito.

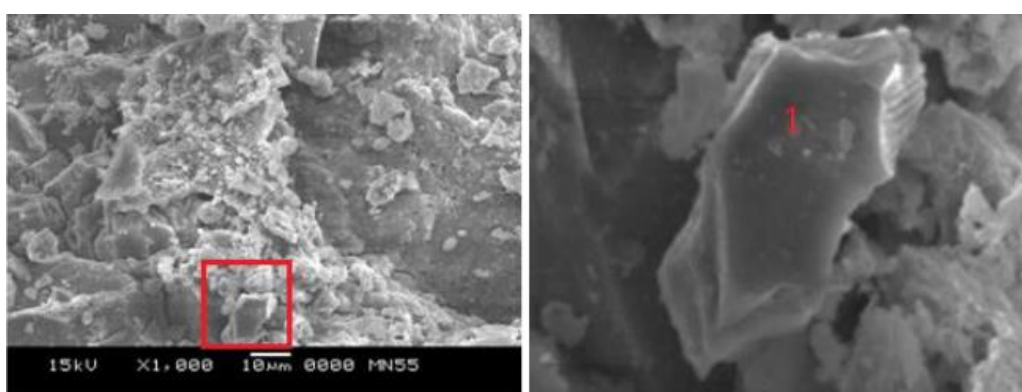


Figura 23 - Fotomicrografia do cristal de Ca(OH)_2 disperso no compósito
Fonte: TASCA (2012), pág. 149.

Em suas pesquisas, Mo e Panesar (2012) adotaram MEV para identificar hidróxido e carbonato de magnésio em torno de poros de compósitos cimentícios após o período de 56 dias de

carbonatação. A Figura 24 mostra uma das imagens obtidas, bem como os elementos presentes no espectro de dispersão de energia.

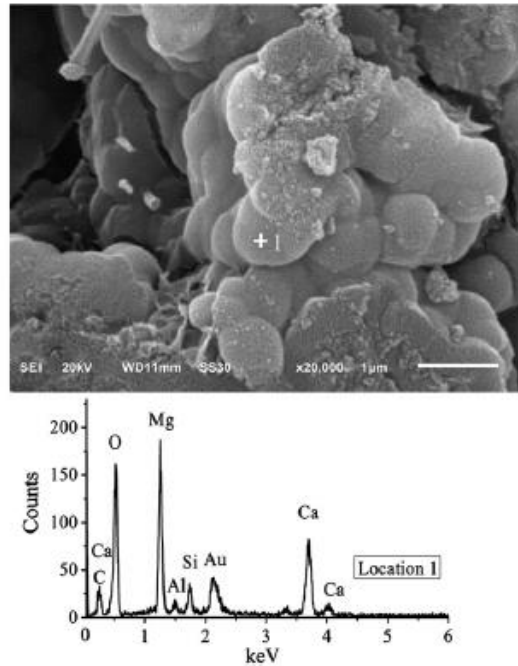


Figura 24 – Fotomicrografia de calcita de magnésio em torno dos poros da amostra após 56 dias de carbonatação
Fonte: MO *et al.* (2012), pág. 774.

Cui *et al.* (2015), utilizaram MEV em suas pesquisas para visualizar a mudança na microestrutura de concretos submetidos a diferentes percentuais de carbonatação em idades pré-estabelecidas, conforme visto na Figura 25.

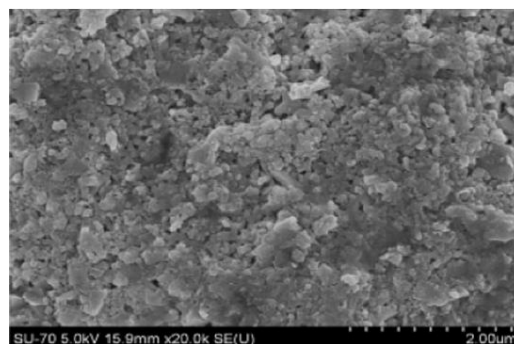


Figura 25 – MEV de um concreto exposto a uma taxa de carbonatação acelerada de 20% de CO₂ por 7 dias
Fonte: CUI *et al.* (2015), pág. 525.

Em suma, a técnica de MEV possibilita observar o grau de porosidade, a presença de fissuras, a densificação da matriz, a morfologia e a presença dos elementos presentes no material em estudo.

2.7.2 Difração de raios-X (DRX)

A difração de raios-X (DRX) é uma técnica utilizada em análises qualitativas de estruturas cristalinas. Quando um feixe de raios-X monocromáticos incide sobre um material cristalino ocorre o fenômeno da difração. Ao se incidir um feixe de raios-X sobre um cristal, onde os átomos estão regularmente espaçados (periodicidade do arranjo cristalino), cada átomo será uma fonte de emissão esférica de radiação. O comprimento de onda da radiação incidente deve ser da mesma ordem de grandeza do tamanho da partícula a ser analisada. A DRX pelos cristais resulta de um processo em que estes raios são espalhados pelos elétrons dos átomos, sem mudança de comprimento de onda. Um feixe difratado é produzido somente quando algumas condições geométricas são satisfeitas, expressas pela lei de Bragg conforme descreve a Equação 14.

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (\text{Equação 14})$$

Onde:

n = múltiplo inteiro do comprimento de onda

λ = comprimento de onda dos raios-X incidentes

d = espaçamento interplanar

θ = ângulo de difração

Os planos de difração e suas respectivas distâncias interplanares, bem como as densidades dos átomos (elétrons) ao longo de cada plano cristalino, são características específicas e únicas de cada substância cristalina, da mesma forma que o padrão difratométrico por ele gerado.

Um difratograma consiste em um registro da intensidade de raios difratados versus o dobro do ângulo de difração (2θ). Como o comprimento de onda da radiação-X é conhecido, é possível, através da lei de Bragg, determinar os valores dos espaçamentos interplanares para cada pico

ou banda de difração. Além disso, é possível obter resultados sobre a constituição de fases da amostra em estudo.

Rostami *et al.* (2012) utilizaram DRX para caracterizar as fases progressivas estruturais na superfície e no interior de compósitos cimentícios sujeitos a um processo de carbonatação acelerada, conforme ilustra a Figura 26.

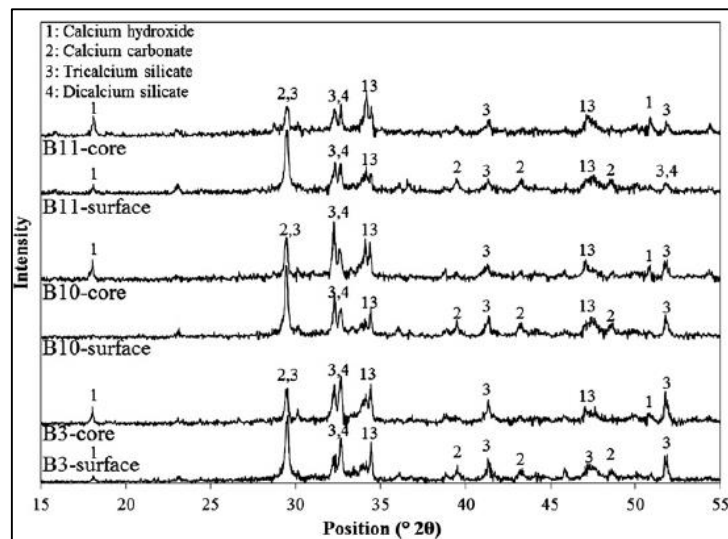


Figura 26 – Difratomogramas das áreas superficiais e internas de compósitos cimentícios carbonatados
Fonte: ROSTAMI *et al.* (2012), pág. 189.

Higuchi *et al.* (2014) utilizaram DRX para caracterizar amostras contendo aditivos expansivos durante um processo de carbonatação em alta temperatura. O ensaio indicou o percentual em massa dos principais elementos presentes no compósito, como mostra a Tabela 2.

Tabela 2 – Composição dos elementos presentes no compósito com aditivo

Composition of CSA.

Material	Composition of expansive additive (mass%)					
	f-CaO	Ye'elimite	CaSO ₄	C ₂ S	C ₄ AF	Insol
CSA	45.4	9.2	31.4	8.0	3.3	0.3

Fonte: HIGUCHI *et al.* (2014), pág. 12.

Mo e Panesar (2012) adotaram DRX para avaliar compósitos cimentícios contendo percentuais variados de adição de MgO após 7 e 56 dias de processo de carbonatação, como indicam as Figuras 27 e 28.

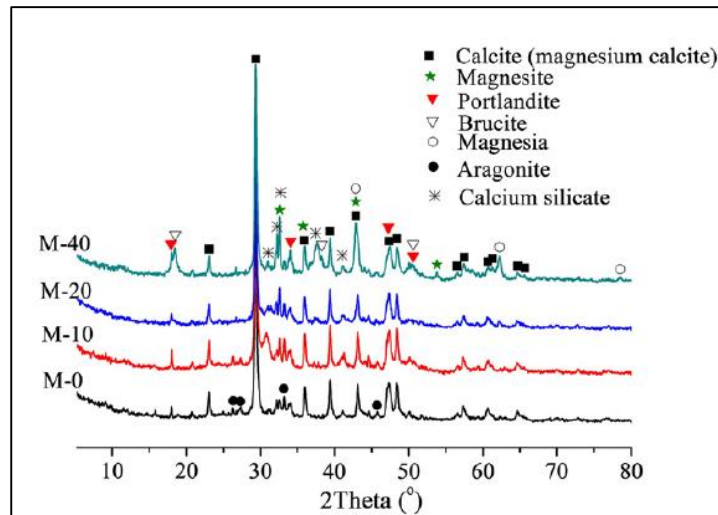


Figura 27 – Difratoogramas das amostras contendo de 0-40% de MgO após 7 dias de carbonatação
Fonte: MO e PANESAR (2012), pág. 771.

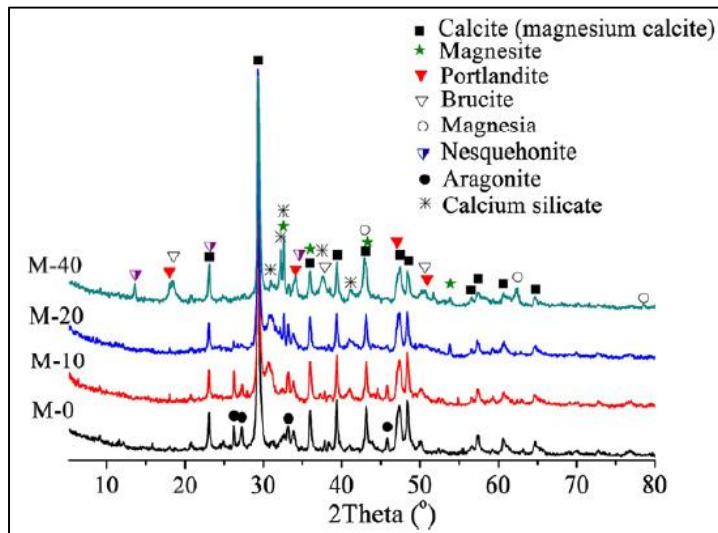


Figura 28 – Difratoogramas das amostras contendo de 0-40% de MgO após 56 dias de carbonatação
Fonte: MO e PANESAR (2012), pág. 771.

Auoy *et al.* (2015) valeram-se da técnica de DRX para avaliar e comparar as alterações de diferentes amostras carbonatadas com amostras não carbonatadas, como ilustra a Figura 29.

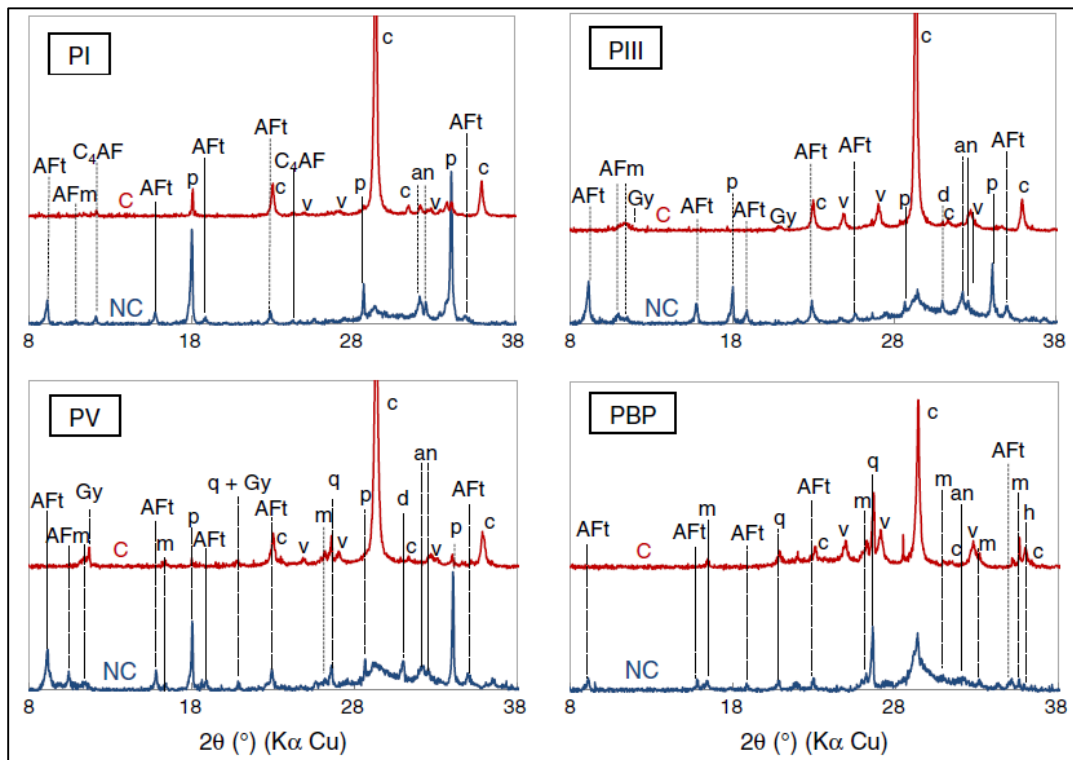


Figura 29 – Difractogramas de amostras carbonatadas e não carbonatadas
Fonte: AUROY *et al.* (2015), pág. 50.

2.7.3 Adsorção de nitrogênio (ASE)

O ensaio de adsorção de nitrogênio é empregado para medição da área superficial específica (ASE) dos materiais cimentícios. A ASE de um material é influenciada não somente pela distribuição granulométrica das partículas, mas também pela sua forma e rugosidade superficial, bem como pela distribuição de poros existentes (BRANDÃO, 2016).

Nos ensaios de adsorção de nitrogênio, também chamados de ensaios de condensação capilar, mede-se a massa do N₂ adsorvido, através de processos físico-químicos, em uma superfície sólida (adsorvente), a uma pressão de vapor de equilíbrio, pelo método volumétrico estático. Os dados são obtidos pela admissão e posterior remoção de uma quantidade conhecida de gás em um porta-amostra contendo o sólido adsorvente mantido a uma temperatura constante abaixo da temperatura crítica (são necessárias baixas temperaturas para uma boa adsorção do N₂ na superfície do material).

O ensaio de adsorção de nitrogênio geralmente é realizado controlando-se a temperatura da amostra e, por isto, as curvas obtidas são chamadas de isotermas de adsorção. O processo de adsorção/dessorção de um gás em uma amostra porosa gera um ciclo de histerese e a análise deste ciclo permite calcular o volume total e o tamanho médio dos poros (RIGO, 1998).

2.7.4 Granulometria a laser

A granulometria a laser é uma técnica de caracterização que mede as distribuições de tamanho das partículas de um material por medição da variação angular na intensidade da luz difundida à medida que um feixe de laser interage com as partículas dispersas da amostra. Na granulometria a laser, um feixe de comprimento λ fixo incide sobre cada partícula da amostra e é difratado e conduzido a um conjunto de lentes que o redireciona a um detector. Um computador acoplado analisa as diversas informações recebidas pelo detector, classificando os tamanhos das partículas. Os dados sobre a intensidade da dispersão angular são então analisados para calcular o tamanho das partículas responsáveis por criar o padrão de dispersão (BRANDÃO, 2016).

O princípio da granulometria a laser é que o ângulo de difração é inversamente proporcional ao tamanho da partícula. Ao atingir uma quantidade de partículas, a luz incidente sofre uma interação segundo quatro diferentes fenômenos (difração, refração, reflexão e absorção) formando um invólucro tridimensional de luz. O formato e o tamanho deste invólucro são afetados pelo índice de refração relativo da partícula no meio dispersante, pelo comprimento de onda da luz, e pelo tamanho e formato da partícula. Detectores estrategicamente posicionados medem a intensidade e o ângulo da luz espalhada. O sinal dos detectores é então convertido para a distribuição de tamanho de partícula por meio de softwares matemáticos. A Figura 30 ilustra o princípio de funcionamento de um instrumento de difração a laser.

2.8 – Aditivos químicos para compósitos cimentícios

Aditivos químicos são compostos solúveis em água utilizados em combinação com outros materiais para melhorar as propriedades dos compósitos cimentícios. O uso adequado destes

aditivos, melhoram o desempenho do concreto no estado endurecido, aumentando a sua vida útil (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2010; ASTM C 125).

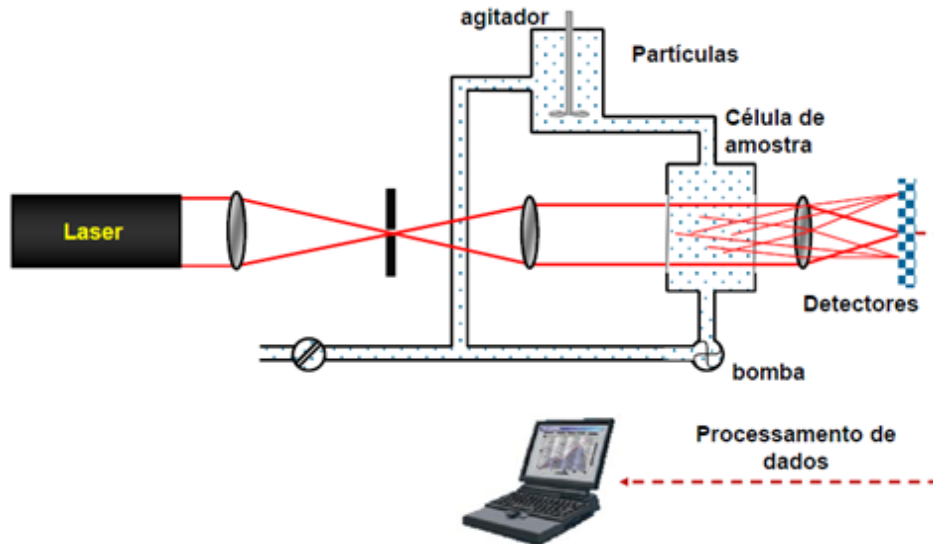


Figura 30 – Princípio de funcionamento de um instrumento de difração a laser
Fonte: BRANDÃO (2016), pág. 9.

A NBR 13529 (ABNT, 2013) define aditivo como o produto adicionado à argamassa em pequena quantidade, com a finalidade de melhorar uma ou mais propriedades, no estado fresco ou endurecido.

Conforme Neville (2012), aditivo é um produto químico adicionado aos compósitos de matriz cimentícia para obter modificações específicas, ou modificações das propriedades normais do concreto e argamassa, com o fim de reforçar ou melhorar certas características, facilitando seu preparo e utilização. Hastenpflug (2012) comenta que os aditivos químicos são utilizados para a correção, modificação ou otimização das propriedades físico-químicas de materiais cimentícios.

Com os aditivos, as propriedades de argamassas e concretos podem ser melhoradas na sua trabalhabilidade, tempo de pega, resistência e durabilidade, mas não compensam a baixa qualidade ou a dosagem incorreta dos materiais integrantes. Os problemas podem estar associados à incompatibilidade entre um determinado aditivo e o cimento ou de aditivos usados numa mesma mistura, sendo necessário estudos e ensaios de laboratório envolvendo esses materiais antes do uso em obras (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Nas diversas normas que regulamentam o emprego dos aditivos e das adições, existe um consenso: são substâncias empregadas para melhorar o desempenho do composto cimentício. A norma DD ENV 197-1 (1995) limita um teor máximo de 1,0%, em massa, em relação à massa de cimento para que um composto possa ser considerado aditivo. As normas americanas ASTM C219 (2014) e C125 (2016) definem o termo adições para materiais que são empregados em uma mistura sem limitação de teor (BEZERRA, 2006).

Os aditivos são normalmente classificados conforme sua finalidade e efeitos que provocam nas pastas de cimento.

A NBR 11768 (ABNT, 2011) classifica os aditivos de acordo com o tipo e sua finalidade: tipo P, plastificante ou redutor de água (mínimo 6% de redução de água); tipo A, acelerador do tempo de pega; tipo R, retardador do tempo de pega; tipo PR, plastificante e retardador do tempo de pega; tipo PA, plastificante e acelerador do tempo de pega; tipo SP, superplastificante (mínimo 12% de redução de água); tipo SPR, superplastificante retardador; tipo SPA, superplastificante acelerador e tipo IAR, incorporador de bolhas de ar.

Conforme o AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (2010) os principais aditivos químicos para o concreto são definidos da seguinte maneira:

- aditivos aceleradores de pega – Tem por finalidade reduzir o tempo de hidratação do cimento e promover um endurecimento acelerado do concreto.
- aditivos incorporadores de ar – Tem por finalidade criar um sistema de bolhas de ar nos vazios presentes no concreto.
- aditivos retardadores de pega – Tem por finalidade estender o tempo de hidratação do cimento e retardar a evolução da resistência do concreto.
- aditivos redutores de água – Tem por finalidade reduzir o teor de água presente no concreto em seu estado fresco.
- aditivos para concretos fluidos – Tem por finalidade aumentar e manter o teor de fluidez do concreto.

- aditivos para concretos em áreas de congelamento – Tem por finalidade manter as condições ideais de temperatura do concreto durante o período de cura.
- aditivos para aumento de resistência inicial do concreto – Tem por finalidade elevar a resistência à compressão do concreto nas primeiras idades.
- aditivos inibidores de corrosão – Tem por finalidade atenuar os mecanismos de corrosão nas estruturas de concreto armado.
- aditivos redutores de permeabilidade à pressão hidrostática (PRAH) – Tem por finalidade fechar os poros do concreto impedindo a penetração de água para o seu interior.

As dosagens dos aditivos nos compósitos cimentícios são feitas levando-se em consideração o tipo e as quantidades dos materiais presentes na mistura, as condições climáticas, a trabalhabilidade do material, a resistência e o tempo de pega.

Dentre os principais benefícios promovidos pelos aditivos em compósitos cimentícios no estado fresco cabe citar:

- o aumento da plasticidade da mistura;
- o retardo ou a aceleração do tempo de pega inicial;
- a redução da segregação dos materiais;
- a facilidade de aplicação no processo de bombeamento.

Dentre os principais benefícios promovidos pelos aditivos em compósitos cimentícios no estado endurecido cabe citar:

- a redução da taxa de calor no decorrer do processo de hidratação do cimento;

- o aumento da resistência à compressão nas primeiras idades;
- o aumento da resistência à tração e à flexão em todas as idades;
- o aumento da resistência ao congelamento e descongelamento;
- a redução da permeabilidade, inibindo processos corrosivos;
- a melhoria da resistência à abrasão e ao impacto;
- a redução da expansão causada pela reação álcali-agregado.

2.8.1 Aditivos redutores de permeabilidade por cristalização capilar (PRAC)

Existem vários tipos de aditivos de redução de permeabilidade disponíveis no mercado. Alguns deles são de natureza hidrofóbica devido à presença de cadeia longa, ácidos graxos e óleos vegetais, enquanto outros são classificados como modificadores de microestruturas que reduzem a permeabilidade através da cristalização em poros do concreto.

Os aditivos redutores de permeabilidade por cristalização capilar (PRAC) são compostos químicos ativos na forma de pó que reagem com a umidade do concreto fresco e com os subprodutos de hidratação do cimento, causando uma reação catalítica. Esta reação promove uma formação cristalina insolúvel nos poros, capilaridades e fissuras do concreto, tornando-o permanentemente selado contra a penetração da água e contra agentes agressivos em condições ambientais severas.

Lema *et al.* (2015) avaliaram o comportamento de PRAC em concretos com quatro diferentes traços e relação $a/c=0,50$. Eles mostram que concretos contendo PRAC em relação ao traço de referência apresentam um teor 24% menor de retração por secagem; um percentual de 30 a 40% maior de impermeabilidade; valores 10 vezes menores de absorção capilar do que o limite de exposição severa, para um cobrimento de 30 mm; um percentual de 95% de redução de taxa de percolação de água além de um aumento de 13% na resistência à compressão. A Figura 31

mostra imagens obtidas por MEV da microestrutura dos concretos avaliados. É possível observar nos concretos contendo aditivos, a partir da formação de cristais, um maior preenchimento dos vazios presentes na matriz cimentícia dos mesmos. Contudo, nos concretos de referência não se observam cristais ou produtos que não sejam os de cimento Portland.

Cabral *et al.* (2012) realizaram um experimento com CPs de concreto com e sem PRAC. Para cada tipo de concreto, metade dos seus CPs ficaram em cura submersa em água saturada com cal por 28 dias e a outra metade foi curada em dois ciclos alternados de imersão em água por 7 dias e secagem ao ar também por 7 dias. Foram realizados ensaios de resistência à compressão, penetração de água à baixa pressão, ciclos de umedecimento em solução de HCl por 2 dias e secagem ao ar por 5 dias. Os resultados indicaram que os PRAC não contribuíram para o aumento de resistência à compressão do concreto, entretanto, diminuíram em média 57% a profundidade de penetração máxima de água no ensaio de permeabilidade, independentemente do tipo de cura utilizado.

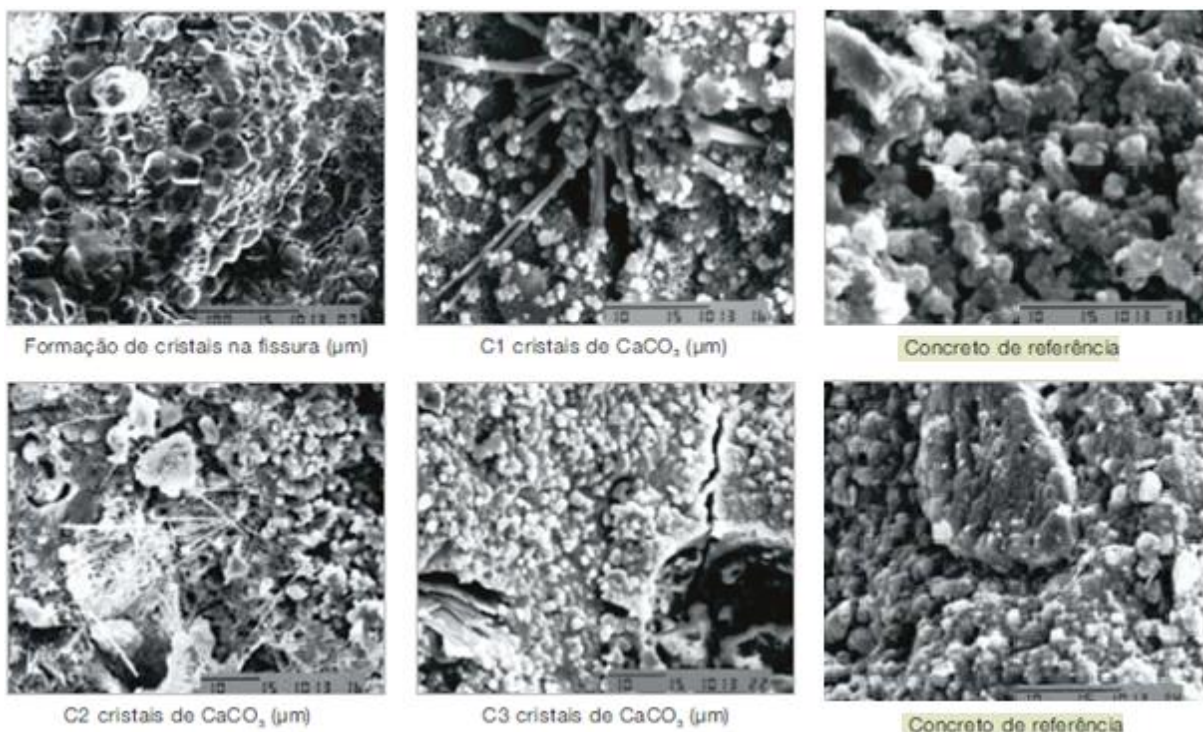


Figura 31 – Microestrutura dos concretos com e sem PRAC
Fonte: LEMA *et al.* (2015), pág. 101.

Os PRAC também podem ser utilizados em processos de tratamento químico cristalizante. Neste âmbito, os aditivos tem por objetivos impermeabilizar, proteger e aumentar a

durabilidade de novos concretos, bem como auxiliar na recuperação e reabilitação de estruturas de concreto existentes. Os ingredientes ativos do tratamento químico cristalizante desencadeiam um processo catalítico de formação de cristais em uma profundidade mínima de 50 mm na estrutura de concreto, de modo a garantir que não haja a penetração de água por capilaridade que suportam pressões hidrostáticas tanto positivas como negativas de até 0,7 MPa. A tecnologia do tratamento químico cristalizante está disponível em várias formas, podendo ser introduzidos em concretos pré-misturados ou preparados “in loco” durante a dosagem do concreto, aplicados por aspersão em concretos frescos de pisos e lajes e aplicações por pintura como revestimento de concretos existentes, inclusive concretos “verdes” com baixas idades. O sistema de tratamento químico cristalizante é complementado com argamassas para reparos e tamponamentos formulados para recuperar concretos com defeitos e danificados (TAKAGI *et al.* 2004).

A Figura 32 apresenta fotos de MEV de amostras de concreto seccionadas a 50 mm da superfície com e sem a aplicação de tratamento cristalizante. Em (a) é possível identificar alguns dos subprodutos de hidratação do cimento, bem como precipitações de Ca(OH)_2 . Já em (b) é evidente o início da formação de cristais.

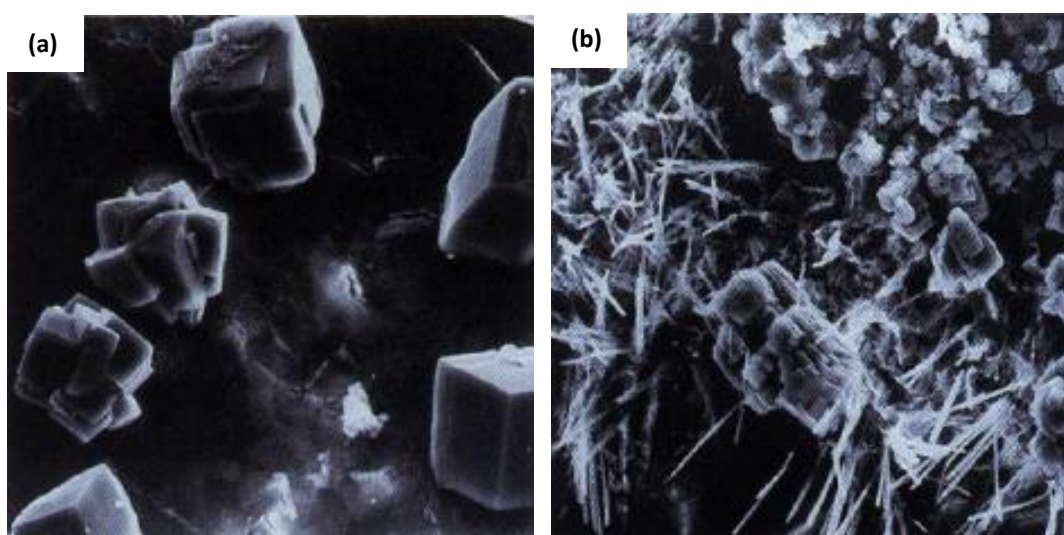


Figura 32 – Amostras de concreto seccionadas a 50 mm da superfície
(a) sem tratamento cristalizante (b) com tratamento cristalizante
Fonte: TAKAGI *et al.* (2004), pág. 3.

3

MATERIAIS E MÉTODOS

A descrição do programa experimental é realizada neste capítulo. Inicialmente, foi feita uma caracterização detalhada de todos os materiais necessários para a produção das argamassas definidas para estudo. Em seguida foi definida a dosagem de cada mistura, tomando como referência os procedimentos estabelecidos na NBR 7215 (ABNT, 1996) bem como as orientações dos fabricantes quanto ao teor de aditivo a ser utilizado. Além disto, foram abordadas as principais diretrizes sobre a moldagem, o adensamento, a cura e acondicionamento dos corpos de prova estabelecidos. Por fim foram detalhados os métodos de ensaio adotados para avaliação das amostras obtidas.

3.1 Materiais utilizados

As argamassas foram produzidas com cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI), água potável, aditivos redutores de permeabilidade por cristalização capilar e quatro frações granulométricas de areia: fina, média fina, média grossa e grossa.

3.1.1 Cimento

O CP V-ARI foi utilizado na fabricação dos CPs por conter o menor percentual de adições em relação aos demais cimentos disponíveis no mercado brasileiro. Conforme a NBR 5733 (ABNT, 1991), as adições permitidas no cimento CP V-ARI estão limitadas a um percentual máximo de 5% de material carbonático. Tal escolha, visa minimizar os efeitos destas na microestrutura do material.

A caracterização física e química do CP V-ARI e os limites estabelecidos na NBR 5733 (ABNT,

1991) estão descritos nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 3 – Propriedades físicas do CP V-ARI utilizado

Ensaio Realizados	NBR	Unidade	Cimento utilizado	Limites NBR 5733
Finura – Resíduo na peneira 75 µm (nº 200)	11579: 2013	%	≤6	≤ 6
Finura – Blaine: área específica	NM 76: 1998	cm ² /g	4767	≥ 3000
Início de Pega	NM 65: 2003	minuto	121	≥ 60
Fim de Pega	NM 65: 2003	minuto	176	≤ 600
Expansibilidade a quente	11582: 2012	mm	≤5	≤5
Resistência à compressão (1 dia)	7515: 2002	MPa	29,2	≥ 14
Resistência à compressão (3 dias)	7515: 2002	MPa	41,4	≥ 24
Resistência à compressão (7 dias)	7515: 2002	MPa	46,1	≥ 34
Resistência à compressão (28 dias)	7515: 2002	MPa	54,4	-

Fonte: Relatório de assessoria técnica, Lafarge Holcim, 2017. Amostra retirada do lote APL0F7E3PZ1.

Tabela 4 – Propriedades químicas do CP V-ARI utilizado

Ensaio realizado	NBR	Cimento utilizado (% da massa)	Limites NBR 5733
Óxido de cálcio (CaO)	14656: 2001	63,83	--
Óxido de silício (SiO ₂)	14656: 2001	19,19	--
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	14656: 2001	4,91	--
Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)	14656: 2001	3,03	--
Trióxido de enxofre (SO ₃)	14656: 2001	2,97	≤ 4,5
Óxido de potássio (K ₂ O)	14656: 2001	0,73	--
Óxido de magnésio (MgO)	14656: 2001	0,71	≤ 6,5
Anidrido carbônico (CO ₂)	NM 20: 2012	2,95	≤ 3,0
Perda ao fogo 1000 °C (PF)	NM 18: 2012	3,92	≤ 4,5
Resíduo insolúvel (RI)	NM 15: 2012	0,97	≤ 1,0

Fonte: Relatório de assessoria técnica, Lafarge Holcim, 2017. Amostra retirada do lote APL0F7E3PZ1.

Foi realizada uma análise granulométrica a laser do CP V-ARI, utilizando o equipamento CILAS, modelo 1064 Líquido. O histograma obtido a partir do ensaio pode ser visto na Figura 33.

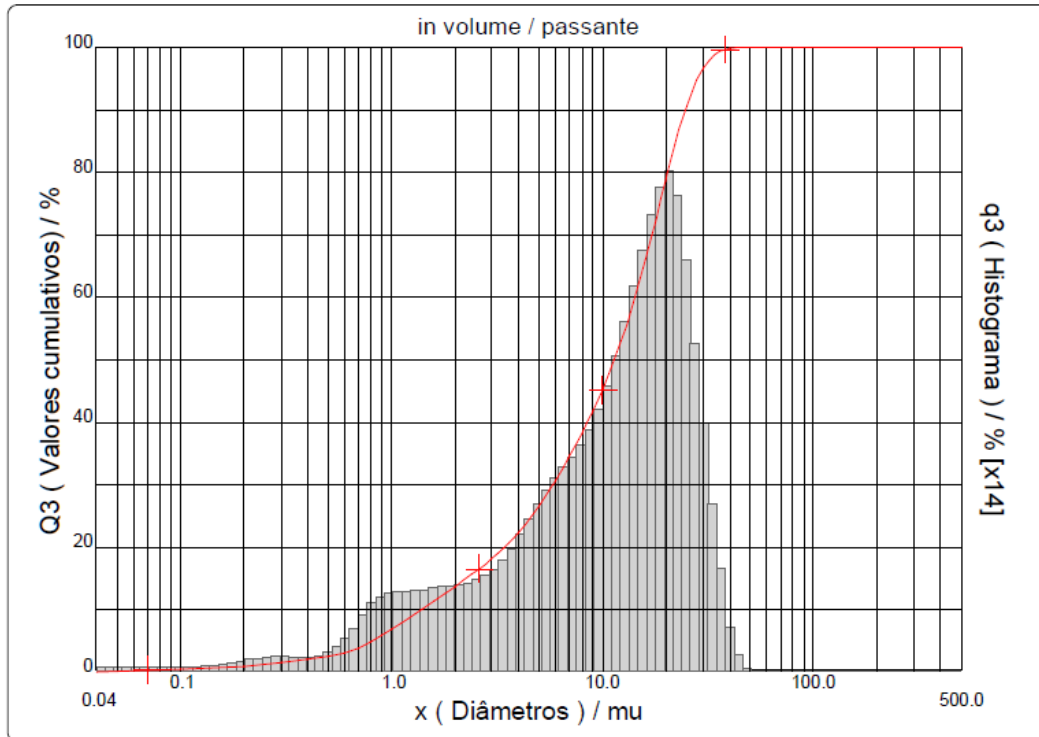


Figura 33 – CP V-ARI utilizado – Granulometria a laser ($d_{10\%} = 1,39 \mu\text{m}$; $d_{50\%} = 11,40 \mu\text{m}$; $d_{90\%} = 24,62 \mu\text{m}$)

A partir do histograma é possível observar que 50% do material passante tem dimensão superior a $11,40 \mu\text{m}$ e que apenas uma parcela menor que 10% do material tem dimensão menor que $1,39 \mu\text{m}$.

3.1.2 Areia

Adotou-se como referência as especificações estabelecidas na NBR 7215 (ABNT, 1996), utilizando-se para o preparo das argamassas a areia normalizada produzida e fornecida pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT).

A Tabela 5 apresenta as frações granulométricas da areia utilizada, conforme parâmetros descritos na NBR 7214 (ABNT, 2012), bem como a massa específica das mesmas.

Tabela 5 – Frações granulométricas da areia utilizada

Material retido entre as peneiras de abertura nominal	Peneira número #	Denominação	Massa específica (g/cm ³) NBR NM 52: 2009
2,4 mm e 1,2 mm	16	Grossa	2,618
1,2 mm e 0,6 mm	30	Média Grossa	2,632
0,6 mm e 0,3 mm	50	Media Fina	2,639
0,3 mm e 0,15 mm	100	Fina	2,646

Fonte: adaptado da NBR 7214 (ABNT, 2012).

3.1.3 Água

Utilizou-se água potável para o preparo das argamassas, fornecida pela Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA) a uma temperatura de (23 ± 2) °C, conforme especificado pela NBR 7215 (ABNT, 1996).

3.1.4 Aditivos

Foram utilizados dois aditivos redutores de permeabilidade por cristalização capilar (PRAC), fabricados por empresas distintas. Neste trabalho se fará referência a estes como Aditivo A e Aditivo B. A caracterização química-mineralógica e física dos mesmos é apresentada a seguir.

a) Composição química qualitativa

Realizou-se uma análise de fluorescência de raios-X em amostra pulverizada ($< 75 \mu\text{m}$), utilizando-se um espectrômetro Philips, modelo PW-2400. Os elementos, determinados qualitativamente, são apresentados a seguir.

Aditivo A:

Elementos presentes em maior quantidade: Ca, O.

Elementos presentes em quantidades médias: Si, S, Al.

Elementos presentes em menores quantidades: C, Fe, Mg, Na, Sr.

Elementos presentes em quantidades muito pequenas (traços): P, Cl, K, Mn, Ti, Zn.

Aditivo B:

Elementos presentes em maior quantidade: Ca, Si, O.

Elementos presentes em quantidades médias: S, Al, Mg.

Elementos presentes em menores quantidades: C, Fe, Na, K, Sr.

Elementos presentes em quantidades muito pequenas (traços): P, Cl, Zn, Zr, Mn, Ti, Cr, Cu.

b) Identificação qualitativa das fases cristalinas

Realizou-se uma análise de difração de raios-X em amostra pulverizada ($< 75 \mu\text{m}$), utilizando-se um difratômetro Philips, modelo PW 1830/40, no intuito de estimar a presença das fases cristalinas a partir da intensidade dos picos encontrados nos difratogramas obtidos. As Figuras 34 e 35 apresentam, respectivamente, os difratogramas obtidos por meio da análise dos aditivos A e B.

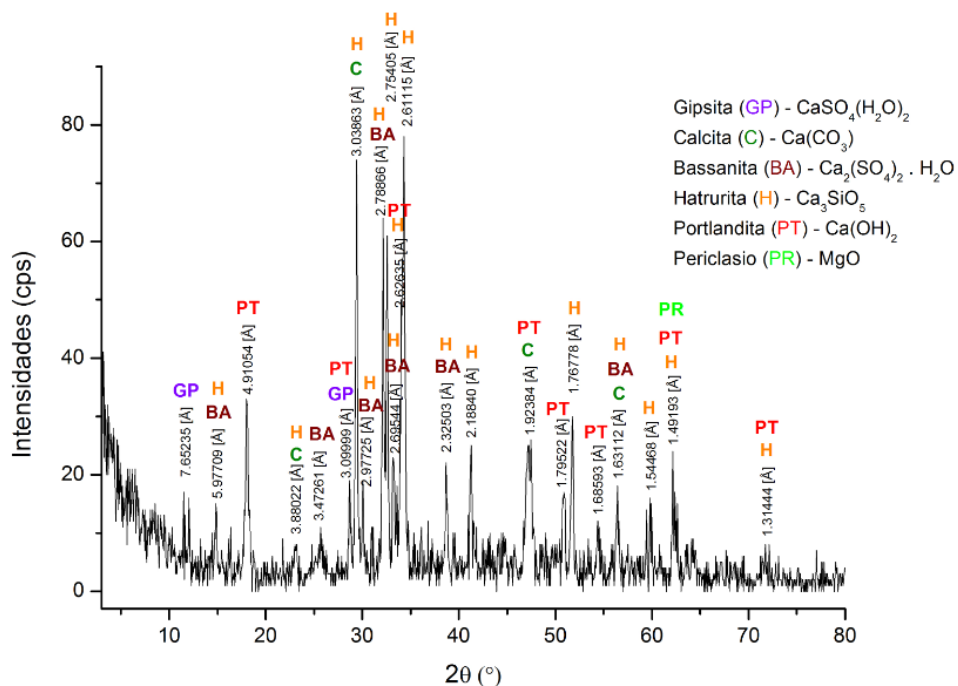


Figura 34 – Caracterização da fração do aditivo A pelo método do pó em amostra total passante na peneira #200 (abertura de $75 \mu\text{m}$)

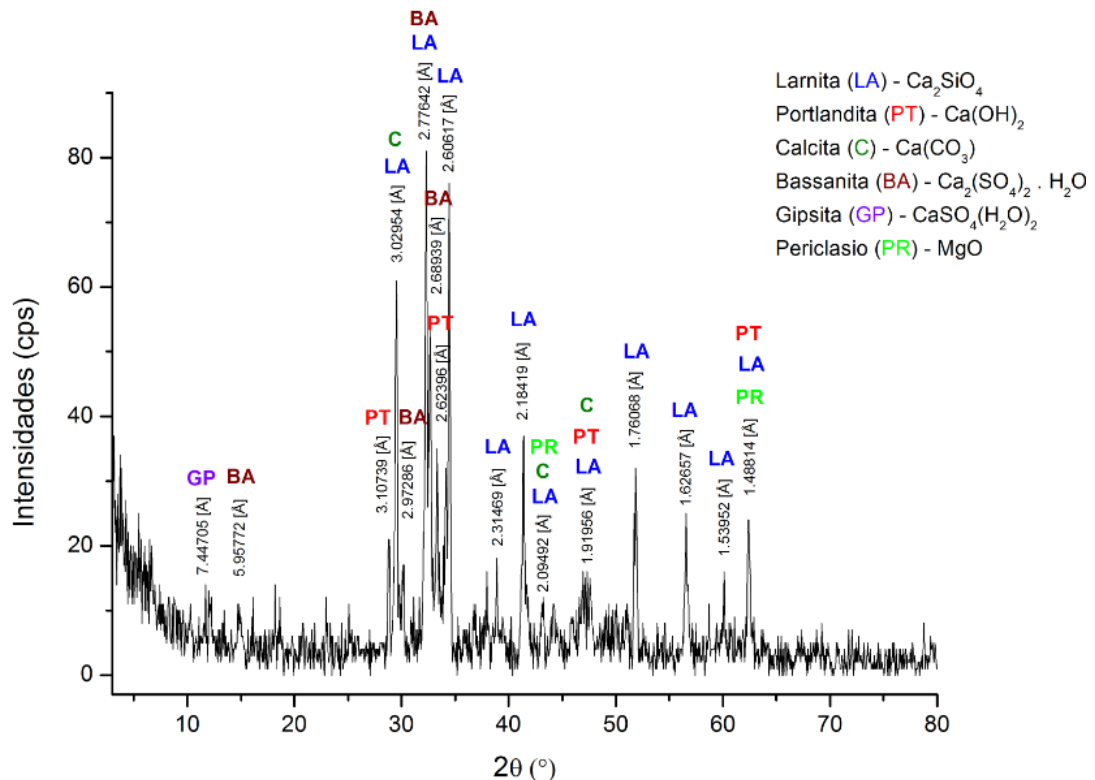


Figura 35 – Caracterização da fração do aditivo B pelo método do pó em amostra total passante na peneira #200 (abertura de 75 μm)

c) Área superficial específica

Realizou-se uma análise de ASE em amostra pulverizada (< 75 μm), utilizando um equipamento Quantachrome, modelo NovaWin, para determinar a área superficial específica dos aditivos em estudo. Os resultados apontaram uma área superficial específica de 1,795 m^2/g para o aditivo A e de 1,867 m^2/g para o aditivo B.

d) Dimensão granulométrica

Realizou-se uma análise granulométrica a laser dos aditivos A e B utilizando o equipamento CILAS, modelo 1064 Líquido. Os gráficos obtidos a partir do ensaio podem ser visualizados nas Figuras 36 e 37.

A partir dos gráficos é possível observar que 50% do material passante apresenta dimensão superior a 5,31 μm (aditivo A) e 6,08 μm (aditivo B). Além disto, apenas uma parcela menor que 10% do material tem dimensões menores que 0,83 μm (aditivo A) e 0,85 μm (aditivo B).

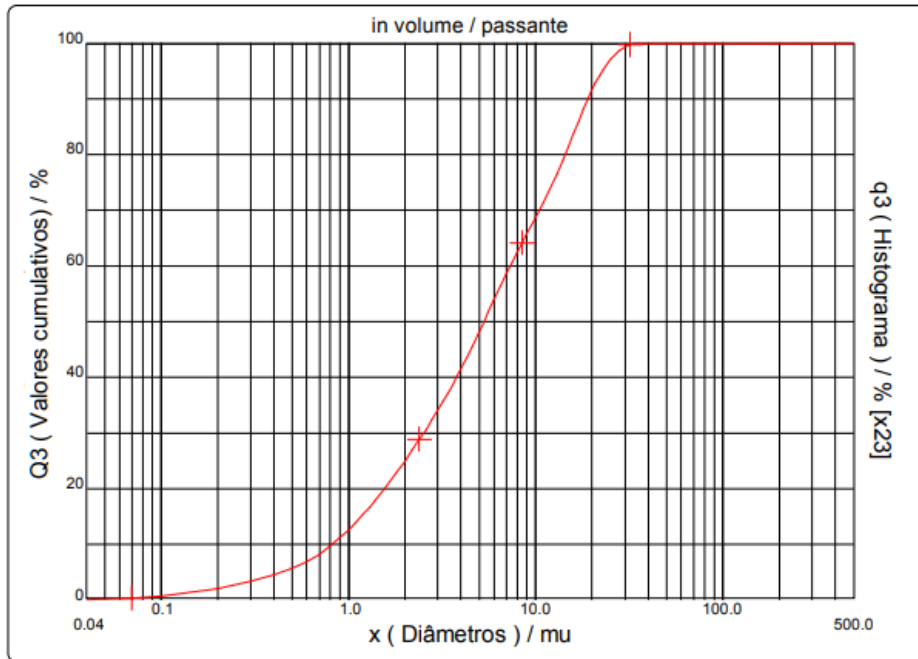


Figura 36 – Granulometria a laser do ADITIVO A ($d_{10\%} = 0,83 \mu\text{m}$; $d_{50\%} = 5,31 \mu\text{m}$; $d_{90\%} = 19,08 \mu\text{m}$)

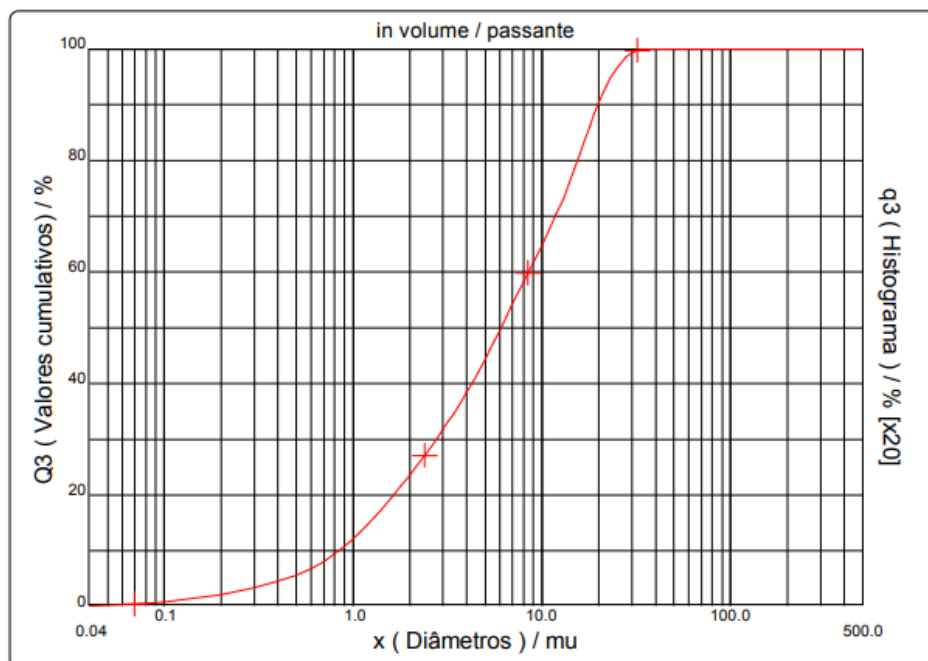


Figura 37 – Granulometria a laser do ADITIVO B ($d_{10\%} = 0,85 \mu\text{m}$; $d_{50\%} = 6,08 \mu\text{m}$; $d_{90\%} = 19,87 \mu\text{m}$)

3.2 Plano experimental

Para cumprimento dos objetivos propostos foi definido o seguinte plano experimental:

- moldagem e cura dos corpos de prova;

- caracterização mecânica dos CPs (5 x 10) cm cilíndricos por ensaio de compressão axial;
- monitoramento da carbonatação pela variação do pH nos CPs (5 x 10) cm cilíndricos e prismáticos, utilizando-se equipamento específico para este fim;
- medição do avanço da frente de carbonatação nos CPs (5x 10) cm cilíndricos e prismáticos conforme os padrões da norma ISO 1920-12 (2015);
- avaliação da microestrutura dos CPs (2 x 4) cm, após processo de carbonatação acelerada durante o período de 56 dias, por meio da técnica de microscopia eletrônica de varredura.

Foram elaborados para a realização dos ensaios propostos seis traços distintos. Os traços receberam as seguintes denominações: traço a/c 0,55 (Referência), traço a/c 0,55 (Aditivo A), traço a/c 0,55 (Aditivo B), traço a/c 0,65 (Referência), traço a/c 0,65 (Aditivo A), traço a/c 0,65 (Aditivo B). A escolha das relações água/cimento estabelecidas neste trabalho, levou em consideração as recomendações da NBR 6118 (ABNT, 2014) para as classes de agressividade ambiental I e III.

Os ensaios estabelecidos no programa experimental foram realizados nos seis traços apresentados, no intuito de se avaliar o efeito dos aditivos, em duas condições de dosagem, na resistência à compressão, no avanço da carbonatação e no arranjo da microestrutura das amostras. No estudo da medição de pH, foram utilizados CPs cilíndricos e prismáticos para comparar o efeito da variação da geometria na difusão do CO₂ e conseqüente avanço da frente de carbonatação.

A confecção dos CPs foi realizada em 4 etapas:

- 1ª Etapa: 54 CPs cilíndricos nas dimensões (5 x 10) cm foram moldados para serem utilizados nos ensaios de resistência à compressão axial, divididos em 6 traços e três idades de ruptura (TABELA 6);
- 2ª Etapa: 90 CPs prismáticos nas dimensões (5 x 10) cm foram moldados para serem utilizados nos ensaios de acompanhamento do avanço da frente de carbonatação pela variação do pH, divididos em seis traços e cinco idades de estudo (TABELA 7);

- 3ª Etapa: 90 CPs cilíndricos nas dimensões (5 x 10) cm foram moldados para serem utilizados nos ensaios de acompanhamento do avanço da frente de carbonatação pela variação do pH, divididos em seis traços e cinco idades de estudo (TABELA 8);
- 4ª Etapa: 6 CPs cilíndricos nas dimensões (2 x 4) cm foram moldados para serem destinados ao ensaio de microscopia eletrônica de varredura, divididos em seis traços e 1 idade de estudo (TABELA 9).

As Tabelas 6, 7, 8 e 9 descrevem as idades, tipos e números de CPs utilizados nos ensaios realizados no presente trabalho. A idade zero representa o instante em que os CPs são retirados da câmara de vácuo após 3 dias de secagem.

3.2.1 Dosagem da argamassa

Foram produzidos seis tipos de traços na proporção 1:3 (cimento/areia) utilizando os materiais especificados no item 3.1. Dois deles são considerados traços de referência estabelecidos por parâmetros baseados na NBR 7215 (ABNT, 1996). Nos demais traços, adicionou-se o respectivo aditivo redutor de permeabilidade por cristalização capilar a partir do percentual de cimento presente na mistura, conforme prescrição dos fabricantes. Os traços propostos no presente trabalho estão descritos nas Tabelas 10, 11, 12, 13, 14 e 15.

Tabela 6 – CPs cilíndricos para ensaio de resistência à compressão

Idade dos CPs (dias)	1ª Etapa					
	Resistência à compressão CPs cilíndricos (5 x 10) cm					
	Traço 0,55 (Referência)	Traço 0,55 (Aditivo A)	Traço 0,55 (Aditivo B)	Traço 0,65 (Referência)	Traço 0,65 (Aditivo A)	Traço 0,65 (Aditivo B)
3	3	3	3	3	3	3
7	3	3	3	3	3	3
28	3	3	3	3	3	3
Total CPs	9	9	9	9	9	9

Tabela 7 – CPs prismáticos para ensaio de carbonatação pela variação do pH

Tempo dos CPs (dias) na câmara de CO ₂	2ª Etapa					
	Leitura do pH e medição da profundidade de carbonatação CPs prismáticos (5 x 10) cm					
	Traço 0,55 (Referência)	Traço 0,55 (Aditivo A)	Traço 0,55 (Aditivo B)	Traço 0,65 (Referência)	Traço 0,65 (Aditivo A)	Traço 0,65 (Aditivo B)
0	3	3	3	3	3	3
28	3	3	3	3	3	3
56	3	3	3	3	3	3
70	3	3	3	3	3	3
98	3	3	3	3	3	3
Total CPs	15	15	15	15	15	15

Tabela 8 – CPs cilíndricos para ensaio de carbonatação pela variação do pH

Tempo dos CPs (dias) na câmara de CO ₂	3ª Etapa					
	Leitura do pH e medição da profundidade de carbonatação CPs cilíndricos (5 x 10) cm					
	Traço 0,55 (Referência)	Traço 0,55 (Aditivo A)	Traço 0,55 (Aditivo B)	Traço 0,65 (Referência)	Traço 0,65 (Aditivo A)	Traço 0,65 (Aditivo B)
0	3	3	3	3	3	3
28	3	3	3	3	3	3
56	3	3	3	3	3	3
70	3	3	3	3	3	3
98	3	3	3	3	3	3
Total CPs	15	15	15	15	15	15

Tabela 9 – CPs cilíndricos para ensaio de microscopia eletrônica de varredura

Tempo dos CPs (dias) na câmara	4ª Etapa					
	Microscopia eletrônica de varredura CPs cilíndricos (2 x 4) cm					
	Traço 0,55 (Referência)	Traço 0,55 (Aditivo A)	Traço 0,55 (Aditivo B)	Traço 0,65 (Referência)	Traço 0,65 (Aditivo A)	Traço 0,65 (Aditivo B)
56	1	1	1	1	1	1
Total CPs	1	1	1	1	1	1

Tabela 10 – Quantidade de materiais para o traço a/c 0,55 (Referência)

Material	Massa para a mistura (g)
Cimento Portland V-ARI	624,0 ± 0,4
Água (a/c = 0,55)	343,2 ± 0,2
Areia fração grossa	468,0 ± 0,3
Areia fração média grossa	468,0 ± 0,3
Areia fração média fina	468,0 ± 0,3
Areia fração fina	468,0 ± 0,3

Tabela 11 – Quantidade de materiais para o traço a/c 0,55 (Aditivo A)

Material	Massa para a mistura (g)
Cimento Portland V-ARI	624,0 ± 0,4
Água (a/c = 0,55)	343,2 ± 0,2
Areia fração grossa	468,0 ± 0,3
Areia fração média grossa	468,0 ± 0,3
Areia fração média fina	468,0 ± 0,3
Areia fração fina	468,0 ± 0,3
Aditivo A (1%)	6,24 ± 0,02

Tabela 12 – Quantidade de materiais para o traço a/c 0,55 (Aditivo B)

Material	Massa para a mistura (g)
Cimento Portland V-ARI	624,0 ± 0,4
Água (a/c = 0,55)	343,2 ± 0,2
Areia fração grossa	468,0 ± 0,3
Areia fração média grossa	468,0 ± 0,3
Areia fração média fina	468,0 ± 0,3
Areia fração fina	468,0 ± 0,3
Aditivo B (0,8%)	4,99 ± 0,02

Tabela 13 – Quantidade de materiais para o traço a/c 0,65 (Referência)

Material	Massa para a mistura (g)
Cimento Portland V-ARI	624,0 ± 0,4
Água (a/c = 0,65)	405,6 ± 0,2
Areia fração grossa	468,0 ± 0,3
Areia fração média grossa	468,0 ± 0,3
Areia fração média fina	468,0 ± 0,3
Areia fração fina	468,0 ± 0,3

Tabela 14 – Quantidade de materiais para o traço a/c 0,65 (Aditivo A)

Material	Massa para a mistura (g)
Cimento Portland V-ARI	624,0 ± 0,4
Água (a/c = 0,65)	405,6 ± 0,2
Areia fração grossa	468,0 ± 0,3
Areia fração média grossa	468,0 ± 0,3
Areia fração média fina	468,0 ± 0,3
Areia fração fina	468,0 ± 0,3
Aditivo A (1%)	6,24 ± 0,02

Tabela 15 – Quantidade de materiais para o traço a/c 0,65 (Aditivo B)

Material	Massa para a mistura (g)
Cimento Portland V-ARI	624,0 ± 0,4
Água (a/c = 0,65)	405,6 ± 0,2
Areia fração grossa	468,0 ± 0,3
Areia fração média grossa	468,0 ± 0,3
Areia fração média fina	468,0 ± 0,3
Areia fração fina	468,0 ± 0,3
Aditivo B (0,8%)	4,99 ± 0,02

3.2.2 Moldagem, adensamento, cura e secagem dos corpos de prova

Na preparação dos CPs foram utilizados moldes cilíndricos e prismáticos (5 x 10) cm, além de moldes cilíndricos desenvolvidos na dimensão (2 x 4) cm, como mostra a Figura 38. Ambos foram previamente limpos e preparados com óleo mineral para facilitar a etapa de desforma.

A moldagem dos CPs baseou-se nas recomendações descritas na NBR 7215 (ABNT, 1996), sendo realizada em ambiente com umidade relativa do ar superior a 50% e temperatura de (24 ± 4) °C. Nos traços contendo aditivos foi definida a seguinte ordem sequencial de inserção dos materiais para a realização da mistura: água, aditivo, cimento e areia. O adensamento dos CPs foi realizado mecanicamente utilizando mesa vibratória específica, conforme se observa na Figura 39.

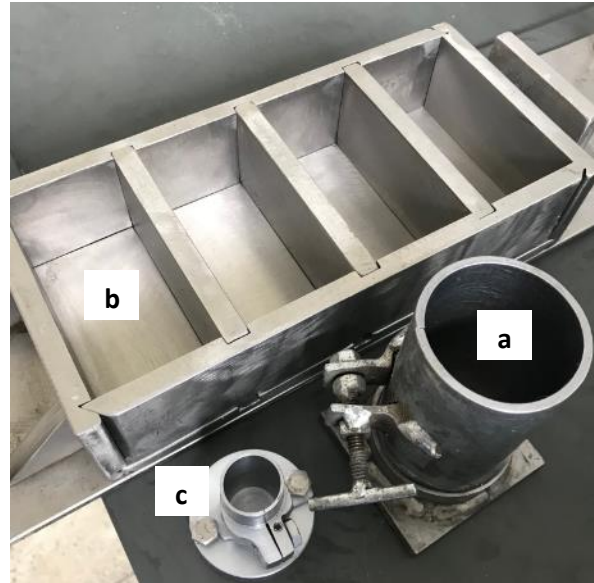


Figura 38 – Moldes para os CPs (a) cilíndricos (5 x 10) cm; (b) prismáticos (5 x 10) cm; (c) cilíndricos (2 x 4) cm



Figura 39 – Mesa vibratória para adensamento dos CPs

O procedimento de preenchimento dos moldes e tempo de vibração da mesa para os CPs cilíndricos e prismáticos (5 x 10) cm variou para cada tipo de traço, de acordo com as respectivas consistências adquiridas, sendo executados os seguintes passos:

Traços 0,55 (Referência), 0,55 (Aditivo A), 0,55 (Aditivo B)

- Preenchimento de 2/3 (dois terços) do molde (5 x 10) cm, com o auxílio de uma espátula para acomodar a argamassa no seu interior;

- Adensamento da primeira camada durante 15 segundos, com conseqüente abatimento no volume de argamassa;
- Preenchimento total do molde, excedendo o limite do topo;
- Adensamento da segunda camada durante 5 segundos e novo abatimento no volume de argamassa;
- Arrasamento e acabamento do topo com auxílio de uma espátula para os CPs cilíndricos e com uma régua para os CPs prismáticos.

Traços 0,65 (Referência), 0,65 (Aditivo A), 0,65 (Aditivo B)

- Preenchimento de 2/3 (dois terços) do molde (5 x 10) cm, com o auxílio de uma espátula para acomodar a argamassa no seu interior;
- Adensamento da primeira camada durante 7 segundos, com conseqüente abatimento no volume de argamassa;
- Preenchimento total do molde, excedendo o limite do topo;
- Adensamento da segunda camada durante 3 segundos e novo abatimento no volume de argamassa;
- Arrasamento e acabamento do topo com auxílio de uma espátula para os CPs cilíndricos e com uma régua para os CPs prismáticos.

O procedimento de preenchimento dos moldes e tempo de vibração da mesa para os CPs (2 x 4) cm cilíndricos variou para cada tipo de traço, de acordo com as respectivas consistências adquiridas, sendo executados os seguintes passos:

Traços 0,55 (Referência), 0,55 (Aditivo A), 0,55 (Aditivo B)

- Preenchimento de 2/3 (dois terços) do molde (5 x 10) cm, com o auxílio de uma espátula para acomodar a argamassa no seu interior;
- Adensamento da primeira camada durante 15 segundos, com pequeno abatimento no volume de argamassa;
- Encaixe no topo do CP de um extensor para complementação da argamassa;
- Preenchimento total do molde até a altura do extensor;
- Adensamento da segunda camada durante 5 segundos e novo abatimento no volume de argamassa;
- Retirada do extensor;
- Arrasamento e acabamento do topo com auxílio de uma espátula.

Traços 0,65 (Referência), 0,65 (Aditivo A), 0,65 (Aditivo B)

- Preenchimento de 2/3 (dois terços) do molde (5 x 10) cm, com o auxílio de uma espátula para acomodar a argamassa no seu interior;
- Adensamento da primeira camada durante 7 segundos, com pequeno abatimento no volume de argamassa;
- Encaixe no topo do CP de um extensor para complementação da argamassa;
- Preenchimento total do molde até a altura do extensor;
- Adensamento da segunda camada durante 3 segundos e novo abatimento no volume de argamassa;

- Retirada do extensor;
- Arrasamento e acabamento do topo com auxílio de uma espátula.

Após a etapa de moldagem, todos os CPs foram protegidos superficialmente por um vidro e mantidos em câmara úmida com temperatura controlada de (23 ± 2) °C e umidade relativa (UR) maior que 95% durante 24 horas. Encerrado este período, foram desmoldados e superficialmente enxutos com papel toalha. Em seguida, foram pesados com precisão de duas casas decimais e devidamente medidos por meio de um paquímetro digital. Foram adotados os seguintes critérios para a medição dos CPs cilíndricos (5 x 10) cm e (2 x 4) cm: duas medidas do diâmetro do seu topo, duas medidas do diâmetro de sua altura média, duas medidas do diâmetro de sua base e duas medidas de sua altura. Já na medição dos CPs prismáticos (5 x 10) cm foram adotados os seguintes critérios: duas medidas do comprimento de sua face superior, duas medidas do comprimento de sua face inferior, três medidas de largura de sua face superior, três medidas de largura de sua face inferior, três medidas de altura de sua primeira face lateral e três medidas de altura de sua segunda face lateral. Tais medidas contribuíram para a obtenção do volume de cada CP.

Findo o processo de medição, 54 CPs (5 x 10) cm cilíndricos destinados ao ensaio de resistência à compressão axial, foram submersos em um recipiente contendo 25 litros de água potável e 7,5 gramas de cal hidratada. O recipiente citado permaneceu dentro da câmara úmida até o momento das respectivas datas de rompimento dos CPs.

Todos os demais CPs designados aos ensaios de pH e MEV, foram submersos em um recipiente contendo 25 litros de água potável. O recipiente citado permaneceu dentro da câmara úmida durante 28 dias. Após este período, todos os CPs foram superficialmente enxutos com papel toalha. Em seguida, foram pesados com precisão de duas casas decimais e submetidos a um processo inicial de condicionamento em uma estufa à vácuo, marca THERMO SCIENTIFIC, modelo VT6025, estabilizada à temperatura de $(35 \pm 0,1)$ °C, acoplada a uma bomba de vácuo, durante 3 dias. Posteriormente, todos os CPs cilíndricos e prismáticos (5 x 10) cm passaram por um processo de medição de pH. Para os CPs cilíndricos, foi medido o pH do seu topo e de sua base; para os prismáticos, foi medido o pH de suas duas faces laterais, utilizando-se para tal, um equipamento específico. Findo o processo de medição de pH, os CPs cilíndricos e prismáticos (5 x 10) cm foram novamente destinados à câmara de vácuo e por lá

permaneceram por um período total de 2 dias. Transcorrido o prazo estabelecido, os CPs em questão foram novamente pesados e envoltos por um filme plástico, dando prosseguimento ao processo de acondicionamento. Esta etapa específica durou mais 2 dias. Finalmente, após o prazo estabelecido, todos os CPs foram desembalados do filme plástico. Os CPs cilíndricos (5 x 10) cm foram submetidos a nova aferição de pesagem e encaminhados para uma câmara de carbonatação. Já os CPs prismáticos (5 x 10) cm foram devidamente selados com parafina nas faces superior, inferior e laterais menores. Após a secagem da parafina, todos os CPs foram pesados e encaminhados para uma câmara de carbonatação.

Os CPs (2 x 4) cm cilíndricos designados para o ensaio de MEV permaneceram dentro da estufa à vácuo, estabilizada nas mesmas condições descritas anteriormente, durante 7 dias consecutivos. Em seguida, foram encaminhados para uma câmara de carbonatação.

3.3 Métodos de Ensaio

A seguir, são apresentados os procedimentos experimentais adotados e os respectivos equipamentos utilizados para a realização dos ensaios previstos no plano experimental.

3.3.1 Resistência à compressão

Aos 3, 7 e 28 dias de idade, 18 CPs cilíndricos nas dimensões (5 x 10) cm foram retirados da câmara úmida e submetidos ao ensaio mecânico de resistência à compressão axial: 3 CPs do traço 0,55 (Referência), 3 CPs do traço 0,55 (Aditivo A), 3 CPs do traço 0,55 (Aditivo B), 3 CPs do traço 0,65 (Referência); 3 CPs do traço 0,65 (Aditivo A) e 3 CPs do traço 0,65 (Aditivo B). Inicialmente, os CPs tiveram a superfície de seu topo e base retificados para garantir o nivelamento superficial dos mesmos. Em seguida, foram rompidos respeitando as idades especificadas, dentro dos limites de tolerância de tempo preconizados na NBR 5739 (ABNT, 2007).

O ensaio foi realizado em uma prensa da marca SOLOCAP/TECNOTEST, modelo 2TBQKG70, com capacidade de 200 tf, com sensores digitais devidamente calibrados e célula de carga adequada ao tamanho dos CPs (5 x 10) cm, conforme mostra a Figura 40. O

carregamento foi aplicado continuamente e sem choques, com a velocidade de $(0,25 \pm 0,15)$ MPa/s, conforme prescrição da NBR 5739 (ABNT, 2007).



Figura 40 – Prensa utilizada no ensaio de compressão axial dos CPs

3.3.2 Carbonatação

Todos os CPs (5 x 10) cm e (2 x 4) cm destinados aos ensaios de avaliação da alteração de pH em decorrência da carbonatação foram colocados em uma câmara, modelo *Thermo Scientific Steri-Cult CO₂*, ficando expostos a condições estáveis e controladas de umidade relativa do ar a (65 ± 5) %, temperatura a (27 ± 2) °C e concentração de dióxido de carbono a $(3,0 \pm 0,5)$ %, conforme recomendação da norma ISO 1920-12 (2015), até a data prevista para a realização dos ensaios. A Figura 41 mostra as condições de ensaio da câmara de carbonatação acelerada utilizada.



Figura 41 – Câmara de carbonatação acelerada

a) Preparo das amostras

Conforme indicado nas Tabelas 8 e 9, aos 28, 56, 70 e 98 dias de carbonatação, 18 CPs cilíndricos e 18 CPs prismáticos (três para cada tipo de traço), nas dimensões (5 x 10) cm, foram retirados da câmara de carbonatação para realização dos ensaios de medição de pH e avaliação do avanço da frente de carbonatação, por meio da aspersão de solução de fenolftaleína.

Para cada idade descrita o CP foi devidamente pesado. Nos CPs prismáticos, a medição do pH externo foi realizada em suas duas faces laterais não seladas. Já nos CPs cilíndricos a medição do pH externo foi realizada no seu topo e em seguida na sua base. Posteriormente os CPs foram serrados em uma máquina de corte apropriada valendo-se de procedimentos similares descritos na pesquisa realizada por Lacerda (2016). O CP prismático foi serrado ao meio, paralelo à sua face longitudinal, conforme mostra a Figura 42. Em seguida, foi realizada a medição do pH no centro de uma das faces internas do CP. A outra face interna do CP foi utilizada para medir a profundidade de carbonatação, utilizando uma solução de fenolftaleína.



Figura 42 – Corte do CP prismático

O CP cilíndrico foi serrado ao meio no sentido perpendicular à sua altura, conforme se observa na Figura 43. Após o corte, foi medido o pH no centro de uma das faces internas do CP e a profundidade de carbonatação na outra face interna, utilizando uma solução de fenolftaleína. A metade usada para medir o pH interno da amostra foi novamente serrada paralelamente à sua

altura, como indica a Figura 44. Após este processo, foi feita a medição da carbonatação na face resultante.

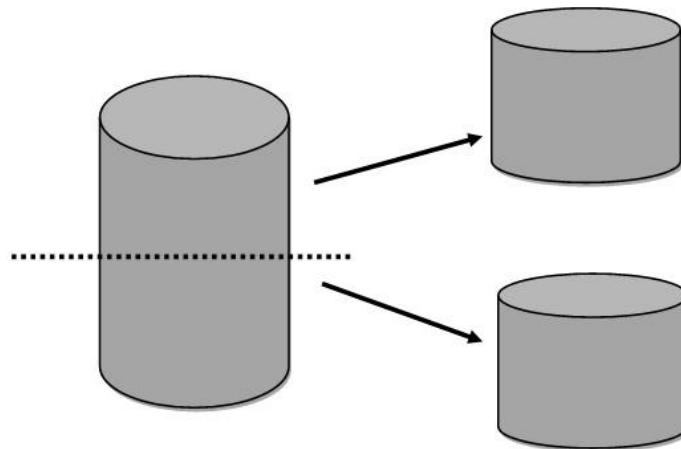


Figura 43 – 1ª etapa de corte do CP cilíndrico
Fonte: COTA (2016).

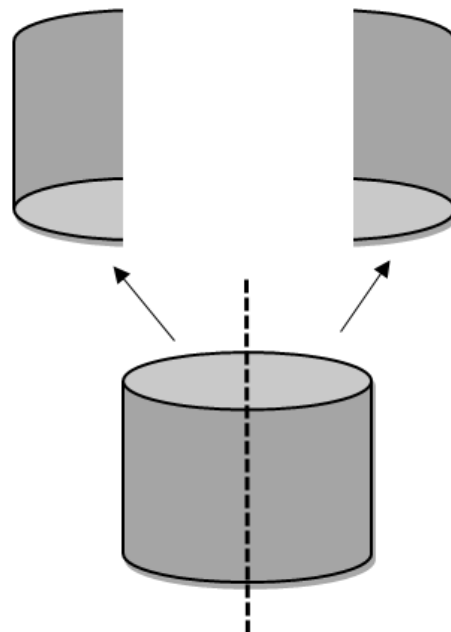


Figura 44 – 2ª etapa de corte do CP cilíndrico
Fonte: COTA (2016).

b) Medição de pH com sonda

A medição do pH foi realizada por meio do equipamento marca EXSTICK, modelo PH150-C, específico para medição quantitativa do pH (mede os íons de hidrogênio na solução) em superfícies de materiais cimentícios sólidos, semi-sólidos e líquidos. Este equipamento possui

um eletrodo de medição de pH combinado com uma sonda de compensação automática de temperatura de (0 até 90) °C, conforme recomenda a norma ASTM C 25 (2011).

O equipamento foi calibrado respectivamente em soluções padrão de pH iguais a 7, 4 e 10, nesta sequência, conforme instruções do fabricante, a cada quinze medições ou quando solicitado pelo aparelho. As superfícies destinadas à realização das medidas foram umedecidas com água deionizada, assim como a superfície da sonda.

Entre cada medição, a ponta da sonda foi limpa com jatos de água deionizada.

A Figura 45 mostra a medição do pH em CPs cilíndricos e prismáticos (5 x 10) cm. O pH da superfície externa e interna dos corpos de prova foi medido por um período de 5 minutos, para garantir a estabilização da leitura do pH no aparelho.

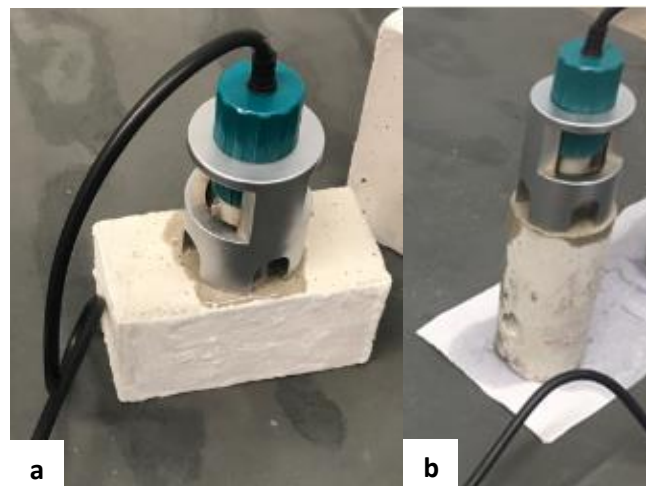


Figura 45 – Medição do pH em CPs (a) prismáticos e (b) cilíndricos

c) Medição de pH com indicador de fenolftaleína

De acordo com a norma ISO 1920-12 (2015), a solução de fenolftaleína utilizada como indicador de pH é composta por 1 g de fenolftaleína dissolvida em 70 ml de álcool etílico e 30 ml de água potável, sendo esta proporção de solução a utilizada nos ensaios.

Após o processo de corte, a metade dos CPs prismáticos (5 x 10) cm destinada à medição da frente de carbonatação, foi parcialmente seca por meio de um papel toalha. Em seguida, foi

aspergido uma solução de fenolftaleína em sua superfície. A Figura 46 ilustra a faixa incolor formada a partir da superfície, caracterizando a profundidade da argamassa carbonatada. Por outro lado, a faixa central de coloração vermelho-púrpura representa a região em que o pH está mais alto. A fenolftaleína apresenta sua faixa de viragem com pH entre 8,0 e 10,0. A região que permanece incolor, apresenta o pH abaixo da faixa de viragem e a região com coloração vermelho-púrpura apresenta o pH acima desta faixa.

A profundidade média da frente de carbonatação foi calculada, fazendo-se a média de oito medidas realizadas na superfície de uma das faces internas, com o auxílio de um paquímetro digital. Tais medidas foram realizadas a partir da face externa da seção, até o limite da borda da região de coloração vermelho-púrpura.

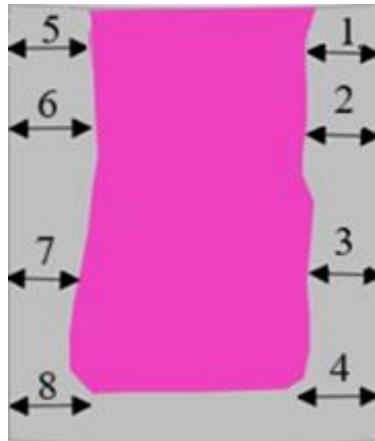


Figura 46 – Medição da profundidade de carbonatação em CP prismático

Após o processo de corte, a metade dos CPs cilíndricos (5 x 10) cm destinada à medição da frente de carbonatação, foi parcialmente seca por meio de um papel toalha. Em seguida, foi aspergido uma solução de fenolftaleína em sua superfície.

A metade do CP utilizada no ensaio de medição do pH interno, foi novamente serrada paralelamente à sua altura. Em seguida foi aplicada nova aspersão da solução de fenolftaleína para identificar a carbonatação interna. A profundidade média da frente de carbonatação foi calculada, fazendo-se a média de oito medidas realizadas na superfície do primeiro corte somado à oito medidas do segundo corte, obtidas com um paquímetro digital, conforme se observa na Figura 47. Tais medidas foram realizadas a partir da face externa da seção, até o limite da borda da região de coloração vermelho-púrpura.

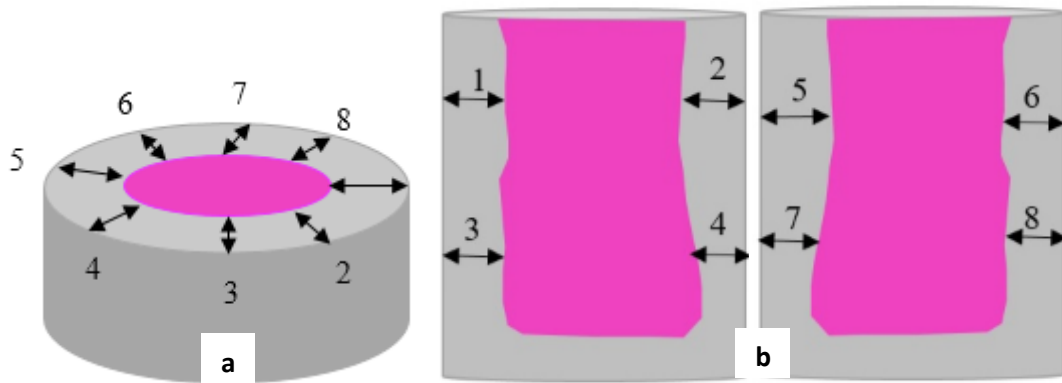


Figura 47 – Medição da profundidade de carbonatação em CP cilíndrico: (a) primeiro corte; (b) segundo corte

Os procedimentos de medição da carbonatação foram realizados seguindo os padrões do Committee European for Normalization (CEN), British Standard European Norm (BS EN) 14630:2006, que estabelece o procedimento de medida da profundidade de carbonatação com o uso da fenolftaleína.

3.3.3 MEV

Para os ensaios de microscopia eletrônica de varredura, foram utilizados os corpos de prova cilíndricos (2 x 4) cm carbonatados durante um período de 56 dias. O experimento foi realizado em um microscópio FIB (para análise de varredura), da marca QUANTA, modelo FEG 3D FEI, indicado na Figura 48. O equipamento em questão opera com tensão de aceleração de 20 kV, sendo capaz de gerar imagens da microestrutura da amostra da ordem de microns, bem como identificar os elementos químicos presentes na mesma por meio do sistema de espectrometria de dispersão de energia (EDS). A interação com o usuário é feita por meio de um teclado específico conectado a um visor LCD de informações e um computador que gerencia as informações obtidas.

Inicialmente, os CPs cilíndricos (2 x 4) cm foram serrados em um máquina de corte para atender as demandas dimensionais e as condições estabelecidas para leitura no microscópio. Tal dimensão pode ser observada na Figura 49. Em seguida as amostras foram devidamente secas em um dessecador durante um período de 24 horas. Posteriormente foram submetidas a um processo de metalização, para obtenção de uma superfície lisa de qualidade. Neste procedimento, os CPs foram fixados em um porta amostra de alumínio com tinta de grafite e

uma deposição aproximada de 20 nm de carbono. Por fim, foram novamente encaminhados ao dessecador, permanecendo por lá até o momento do ensaio.



Figura 48 – Microscópio eletrônico de varredura utilizado no experimento



Figura 49 – Dimensão das amostras para leitura no microscópio

No momento do ensaio, a amostra referente a cada traço indicado na Tabela 14 foi inserida na câmara do microscópio em ângulo de 0° conforme mostra a Figura 50. As imagens foram feitas a uma distância de trabalho de aproximadamente 10 mm na borda e no centro do material em ampliações de 100, 250, 500, 1.000, 2.500, 5.000, 10.000, 15.000 e 25.000 vezes. Todas as leituras em EDS foram feitas a partir de imagem ampliada a 2500 vezes.

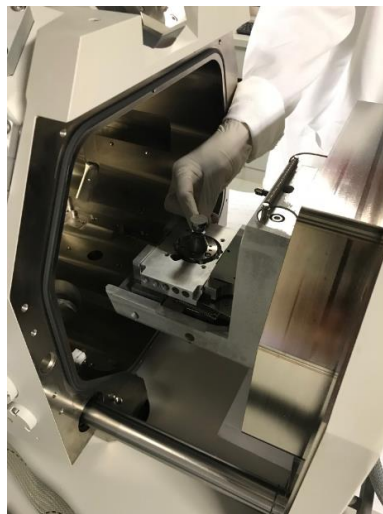


Figura 50 – Colocação da amostra na câmara do microscópio

3.4 Desvios ou Incertezas

Para validar os dados numéricos obtidos a partir dos ensaios realizados, adotou-se para cada valor apresentado nas tabelas, erros médios absolutos.

O erro de uma medida indica a maior diferença esperada entre o valor mais provável e o valor medido. O erro médio absoluto das medidas é a média dos módulos das diferenças algébricas entre as medidas e a média aritmética. Este deve conter somente um algarismo significativo.

O número de algarismos significativos está relacionado com a precisão de uma medida. Tais valores correspondem aos algarismos corretos e um algarismo duvidoso ou incerto, que ainda possui significado.

4

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos a partir dos ensaios descritos no capítulo 3, bem como suas análises. Tais valores foram calculados por meio da técnica do erro absoluto e estão acompanhados pelas suas respectivas incertezas, de forma a mostrar qual o desvio máximo esperado em relação ao valor mais provável da medida (média aritmética).

São comparados os valores de resistência mecânica à compressão, em três idades, para os seis traços estudados. O monitoramento do pH e o avanço da carbonatação foram analisados utilizando CPs cilíndricos e prismáticos, produzidos com e sem aditivo redutor de permeabilidade por cristalização capilar (PRAC).

Os parâmetros morfológicos da microestrutura dos corpos de prova cilíndricos (2 x 4) cm, foram avaliados a partir da técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV) para a idade de 56 dias de carbonatação acelerada.

4.1 Resistência à compressão

Ensaio de resistência à compressão axial foram realizados com a finalidade de comparar as resistências das argamassas de referência, produzidas com duas diferentes relações a/c, com as dos traços produzidos com a incorporação de dois diferentes aditivos redutores de permeabilidade.

Os resultados obtidos para a resistência à compressão axial, nas idades de 3, 7 e 28 dias, são apresentados na Tabela 16. Os valores representam a média calculada a partir do rompimento de 3 CPs cilíndricos (5 x 10) cm.

Tabela 16 – Resistência média à compressão dos CPs cilíndricos (5 x 10) cm

Traço	Resistência média à compressão (MPa)		
	3 dias	7 dias	28 dias
a/c = 0,55 (Referência)	30,0 ± 0,8	36,1 ± 0,6	45,5 ± 0,7
a/c = 0,55 (Aditivo A)	30,0 ± 0,6	37 ± 1	45,0 ± 0,2
a/c = 0,55 (Aditivo B)	30,5 ± 0,7	36,0 ± 0,6	44,0 ± 0,8
a/c = 0,65 (Referência)	21,7 ± 0,3	28 ± 1	36 ± 2
a/c = 0,65 (Aditivo A)	22,4 ± 0,3	27,8 ± 0,4	35,1 ± 0,9
a/c = 0,65 (Aditivo B)	22 ± 1	27 ± 2	33,5 ± 0,3

Apesar de se constatar ganhos de resistência à compressão axial em todas as idades ensaiadas, as maiores taxas de crescimento podem ser observadas entre as idades de 3 e 7 dias. Tal fato se mostra coerente com as características do cimento de alta resistência inicial (CP V) utilizado na produção dos CPs. Nota-se também uma redução de aproximadamente 30% na resistência dos CPs do traço produzido com uma relação a/c igual a 0,65, quando comparados com os produzidos com uma relação a/c de 0,55. Tal comportamento é causado pela elevação do percentual de vazios produzidos na matriz cimentícia, provocado pelo aumento da proporção de água utilizada.

Os resultados obtidos não indicam que o uso dos aditivos redutores de permeabilidade tenha produzido ganhos de resistência à compressão significativos em nenhuma das idades ensaiadas. Aos 28 dias observa-se, inclusive, que os CPs produzidos com a incorporação do Aditivo B geraram a resistência média mais baixa. Ao contrário do que se esperava, os resultados levam a crer que a formação cristalina resultante da ação do aditivo no preenchimento dos poros, fissuras e capilaridades presentes no material, não desencadeou um efeito capaz de gerar ganhos de resistência à compressão axial. Os traços contendo o aditivo A, aos 28 dias, apresentaram valores de resistência à compressão um pouco superiores aos dos traços contendo o aditivo B, mas, ainda assim, inferiores aos dos traços de referência.

As resistências médias à compressão axial em função da idade de ruptura, exibidas na Tabela 16, são apresentadas em forma gráfica nas Figuras 51 e 52, com o intuito de facilitar a visualização da evolução destas.

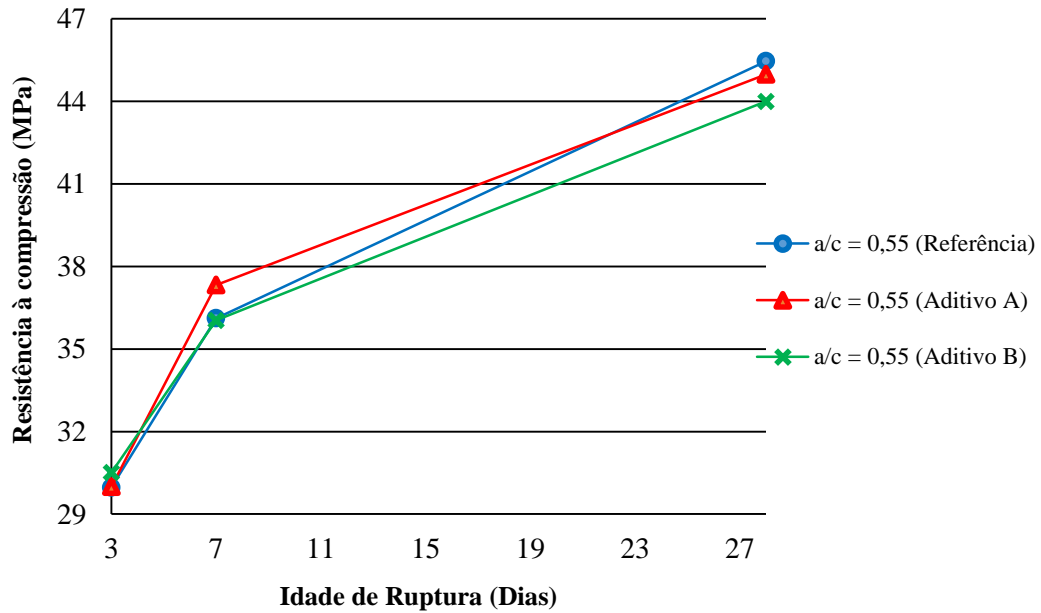


Figura 51 – Resistência média à compressão dos traços com relação a/c = 0,55 aos 3, 7 e 28 dias

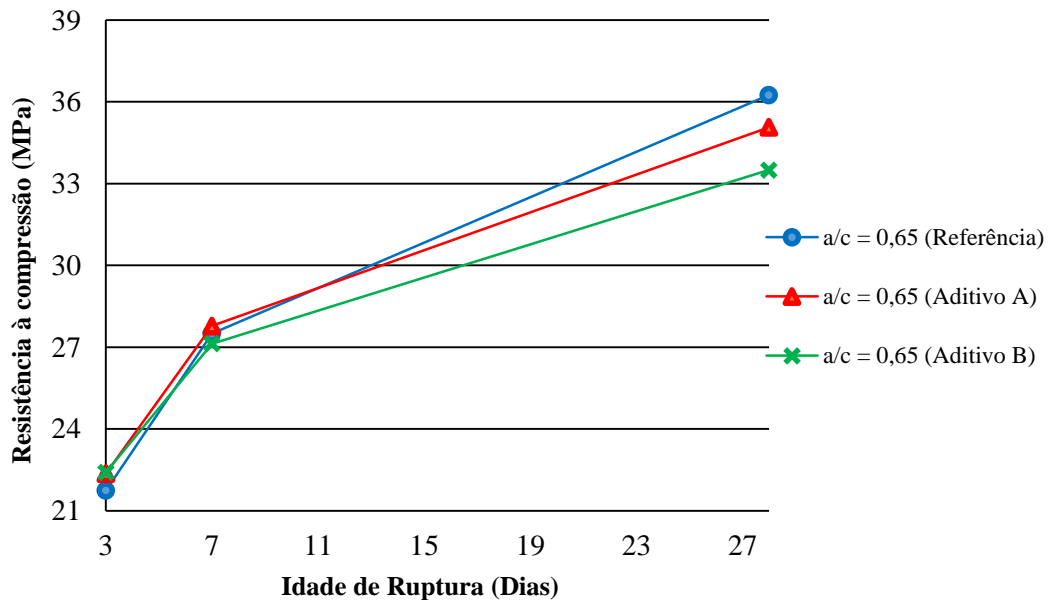


Figura 52 – Resistência média à compressão dos traços com relação a/c = 0,65 aos 3, 7 e 28 dias

4.2 Acompanhamento da variação do pH

Neste tópico são apresentados os resultados dos ensaios realizados com o objetivo de se acompanhar os efeitos produzidos na alcalinidade dos compósitos cimentícios decorrentes da ação do CO₂.

4.2.1 Determinação do pH após o condicionamento

As Tabelas 17 e 18 exibem o pH médio de cada um dos lotes, compostos por três CPs cilíndricos de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, produzidos no intuito de monitorar o potencial hidrogeniônico, nas idades correspondentes a 0, 28, 56, 70 e 98 dias do ensaio de carbonatação acelerada, para as relações a/c iguais a 0,55 e 0,65.

As medidas de pH utilizadas para o cálculo das médias foram feitas imediatamente após o término da primeira etapa do condicionamento, tendo sido realizadas no centro da superfície do topo e da base dos CPs, antes que fossem levados à câmara de carbonatação. Não foram observadas diferenças entre as leituras realizadas no topo e na base que justificassem a apresentação dos resultados em separado.

Tabela 17 - pH médio dos lotes dos CPs cilíndricos (5 x 10) cm com relação a/c = 0,55 após a primeira etapa do condicionamento

Lote (CPs cilíndricos)	pH a/c = 0,55 (Referência)	pH a/c = 0,55 (Aditivo A)	pH a/c = 0,55 (Aditivo B)
1	12,95 ± 0,03	13,29 ± 0,09	13,13 ± 0,04
2	12,94 ± 0,04	13,3 ± 0,1	13,0 ± 0,1
3	12,89 ± 0,08	13,11 ± 0,06	13,04 ± 0,03
4	12,71 ± 0,07	13,09 ± 0,07	12,94 ± 0,06
5	12,89 ± 0,07	13,05 ± 0,07	13,1 ± 0,1

Tabela 18 - pH médio dos lotes dos CPs cilíndricos (5 x 10) cm com relação a/c = 0,65 após a primeira etapa do condicionamento

Lote (CPs cilíndricos)	pH a/c = 0,65 (Referência)	pH a/c = 0,65 (Aditivo A)	pH a/c = 0,65 (Aditivo B)
1	12,61 ± 0,02	12,95 ± 0,04	12,94 ± 0,05
2	12,4 ± 0,1	12,80 ± 0,06	12,71 ± 0,04
3	12,39 ± 0,06	12,70 ± 0,05	12,65 ± 0,08
4	12,39 ± 0,09	12,71 ± 0,07	12,66 ± 0,03
5	12,43 ± 0,05	12,93 ± 0,09	12,92 ± 0,07

A Tabela 19 apresenta a média global do pH dos CPs cilíndricos, produzidos para cada um dos seis traços ensaiados, após a primeira etapa do condicionamento.

Tabela 19 - Média global do pH dos traços produzidos em CPs cilíndricos (5 x 10) cm, após a primeira etapa do condicionamento

Traço	pH inicial médio
a/c = 0,55 (Referência)	12,88 ± 0,06
a/c = 0,55 (Aditivo A)	13,2 ± 0,1
a/c = 0,55 (Aditivo B)	13,04 ± 0,04
a/c = 0,65 (Referência)	12,44 ± 0,06
a/c = 0,65 (Aditivo A)	12,8 ± 0,1
a/c = 0,65 (Aditivo B)	12,8 ± 0,1

Verifica-se que todos os traços ensaiados apresentaram boa alcalinidade, indicando valores ligeiramente superiores para os produzidos com o uso dos aditivos. Os resultados sugerem que a ação destes pode ter produzido uma pequena densificação em sua matriz cimentícia, acarretando uma porosidade mais baixa próxima à superfície dos CPs, reduzindo o contato das soluções alcalinas presentes nos poros dos compósitos com gases de efeito ácido, durante seu curto período de exposição ao ar. Nota-se também, que os traços produzidos com uma relação a/c de 0,65 apresentaram uma menor alcalinidade que os traços com relação a/c de 0,55. De

forma análoga, atribui-se esta diferença à menor estrutura de vazios presente nos traços com a relação água/cimento mais baixa.

As Tabelas 20 e 21 exibem o pH médio de cada um dos lotes, compostos por três CPs prismáticos com 5 cm de aresta da base e 10 cm de comprimento, produzidos no intuito de monitorar o potencial hidrogeniônico, nas idades correspondentes a 0, 28, 56, 70 e 98 dias do ensaio de carbonatação acelerada, para as relações a/c iguais a 0,55 e 0,65.

A Tabela 22 apresenta a média global do pH dos CPs prismáticos, produzidos para cada um dos seis traços ensaiados, após a primeira etapa do condicionamento.

Tabela 20 - pH médio dos lotes dos CPs prismáticos (5 x 10) cm com relação a/c = 0,55 após a primeira etapa do condicionamento

Lote (CPs prismáticos)	pH a/c = 0,55 (Referência)	pH a/c = 0,55 (Aditivo A)	pH a/c = 0,55 (Aditivo B)
1	13,19 ± 0,02	13,42 ± 0,09	13,25 ± 0,06
2	13,02 ± 0,07	13,49 ± 0,07	13,24 ± 0,03
3	13,14 ± 0,06	13,56 ± 0,06	13,25 ± 0,07
4	13,18 ± 0,03	13,59 ± 0,09	13,21 ± 0,09
5	13,21 ± 0,02	13,41 ± 0,10	13,35 ± 0,07

Tabela 21 - pH médio dos lotes dos CPs prismáticos (5 x 10) cm com relação a/c = 0,65 após a primeira etapa do condicionamento

Lote (CPs prismáticos)	pH a/c = 0,65 (Referência)	pH a/c = 0,65 (Aditivo A)	pH a/c = 0,65 (Aditivo B)
1	12,94 ± 0,06	12,96 ± 0,03	12,96 ± 0,03
2	12,88 ± 0,05	12,99 ± 0,04	12,78 ± 0,08
3	12,66 ± 0,09	13,0 ± 0,1	12,82 ± 0,07
4	12,75 ± 0,04	13,13 ± 0,03	12,72 ± 0,03
5	12,64 ± 0,03	13,06 ± 0,03	12,94 ± 0,02

Tabela 22 – Média global do pH dos traços produzidos em CPs prismáticos (5 x 10) cm, após a primeira etapa do condicionamento

Traço	pH inicial médio
a/c = 0,55 (Referência)	13,15 ± 0,05
a/c = 0,55 (Aditivo A)	13,49 ± 0,06
a/c = 0,55 (Aditivo B)	13,26 ± 0,04
a/c = 0,65 (Referência)	12,8 ± 0,1
a/c = 0,65 (Aditivo A)	13,03 ± 0,05
a/c = 0,65 (Aditivo B)	12,84 ± 0,08

Os resultados indicam que todos os CPs prismáticos apresentaram alcalinidade superficial ligeiramente superior às encontradas nos CPs cilíndricos, após a primeira etapa do condicionamento. Não é possível se fazer nenhuma afirmação quanto a melhoria da alcalinidade dos traços em virtude do uso dos aditivos redutores de permeabilidade, pois as variações observadas foram ínfimas.

Nota-se novamente que os traços produzidos com uma relação a/c de 0,65 apresentaram uma menor alcalinidade que os traços com relação a/c de 0,55. Atribui-se esta diferença a menor estrutura de vazios presente nos traços com menor relação água/cimento.

Uma análise geral dos resultados apresentados até o presente momento, indica que a porosidade aberta dos compósitos, ou seja, seus vazios interconectados que surgem a partir de sua superfície, demonstra ter influência nos potenciais hidrogeniônicos obtidos. Tal constatação se deve ao fato de que, independentemente da geometria do corpo de prova utilizado, os menores valores encontrados para o pH pertencem aos traços com a relação água/cimento de 0,65 que, sabidamente, produzirá o maior percentual de vazios desta natureza. Os dados gerados nesta etapa inicial do trabalho, entretanto, ainda não permitem mensurar possíveis melhorias no desempenho dos traços em decorrência da utilização dos aditivos redutores de permeabilidade.

4.2.2 Acompanhamento do pH ao longo do ensaio de carbonatação acelerada

Neste tópico, são apresentados e comparados os valores médios obtidos para o pH externo, dos CPs cilíndricos e prismáticos, para os diferentes tipos de traços analisados, nas idades correspondentes a 0, 28, 56, 70 e 98 dias do ensaio de carbonatação acelerada.

No caso particular dos CPs cilíndricos, constatou-se uma diferença entre as leituras de pH realizadas na superfície de seu topo e sua base. Os valores encontrados para os CPs com relação a/c de 0,55, são apresentados na Tabela 23 e na Figura 53.

Tabela 23 - pH externo médio do topo e da base dos CPs cilíndricos com relação a/c = 0,55, obtido por meio do ensaio de carbonatação acelerada

Tempo Câmara de CO ₂ (Dias)	pH a/c = 0,55 (Referência)	pH a/c = 0,55 (Aditivo A)	pH a/c = 0,55 (Aditivo B)	pH a/c = 0,55 (Referência)	pH a/c = 0,55 (Aditivo A)	pH a/c = 0,55 (Aditivo B)
	CP Cilíndrico Topo	CP Cilíndrico Topo	CP Cilíndrico Topo	CP Cilíndrico Base	CP Cilíndrico Base	CP Cilíndrico Base
0	12,0 ± 0,1	12,78 ± 0,08	12,83 ± 0,01	13,21 ± 0,08	13,01 ± 0,06	12,99 ± 0,03
28	8,65 ± 0,05	9,95 ± 0,06	9,34 ± 0,08	10,6 ± 0,1	10,50 ± 0,04	10,2 ± 0,1
56	8,45 ± 0,04	8,65 ± 0,06	8,48 ± 0,07	9,94 ± 0,02	10,32 ± 0,04	10,1 ± 0,1
70	8,43 ± 0,09	8,7 ± 0,1	8,48 ± 0,03	9,75 ± 0,08	9,60 ± 0,04	9,8 ± 0,1
98	8,41 ± 0,04	8,41 ± 0,03	8,53 ± 0,04	9,05 ± 0,04	9,49 ± 0,04	9,03 ± 0,04

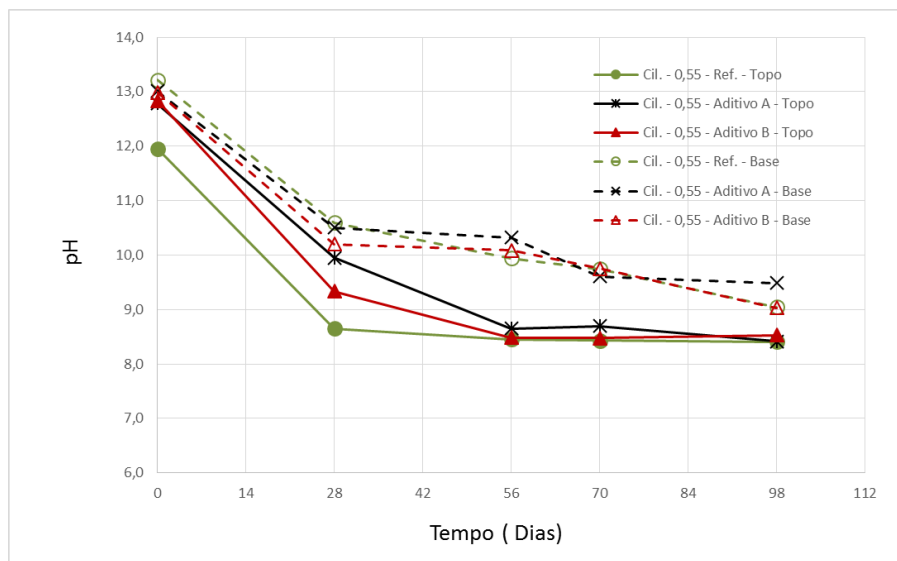


Figura 53 - pH externo médio do topo e da base dos CPs cilíndricos com relação a/c = 0,55, obtido por meio do ensaio de carbonatação acelerada

Os valores encontrados para os CPs com relação a/c de 0,65 são apresentados na Tabela 24 e na Figura 54.

Tabela 24 - pH externo médio do topo e da base dos CPs cilíndricos com relação a/c = 0,65, obtido por meio do ensaio de carbonatação acelerada

Tempo Câmara de CO ₂ (Dias)	pH	pH	pH	pH	pH	pH
	a/c = 0,65 (Referência)	a/c = 0,65 (Aditivo A)	a/c = 0,65 (Aditivo B)	a/c = 0,65 (Referência)	a/c = 0,65 (Aditivo A)	a/c = 0,65 (Aditivo B)
	CP Cilíndrico Topo	CP Cilíndrico Topo	CP Cilíndrico Topo	CP Cilíndrico Base	CP Cilíndrico Base	CP Cilíndrico Base
0	12,03 ± 0,02	12,33 ± 0,05	12,5 ± 0,2	13,05 ± 0,03	12,8 ± 0,1	12,90 ± 0,04
28	8,64 ± 0,04	9,0 ± 0,1	8,95 ± 0,04	9,89 ± 0,03	10,56 ± 0,03	10,26 ± 0,05
56	8,62 ± 0,04	8,73 ± 0,06	8,69 ± 0,08	9,73 ± 0,06	10,01 ± 0,07	9,7 ± 0,1
70	8,36 ± 0,04	8,44 ± 0,06	8,50 ± 0,06	9,68 ± 0,04	9,69 ± 0,08	9,55 ± 0,07
98	8,20 ± 0,02	8,31 ± 0,03	8,26 ± 0,03	9,20 ± 0,03	9,48 ± 0,03	9,26 ± 0,03

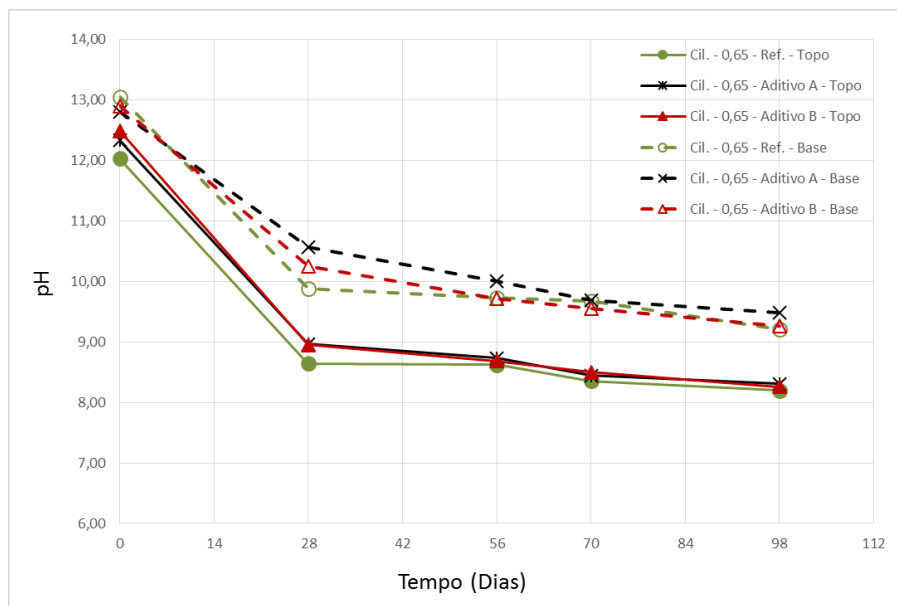


Figura 54 - pH externo médio do topo e da base dos CPs cilíndricos com relação a/c = 0,65, obtido por meio do ensaio de carbonatação acelerada

Para ambas as relações a/c, nota-se uma grande variação do pH medido no topo e na base dos CPs cilíndricos. Neste estudo optou-se por fazer uma análise comparativa com os CPs prismáticos, utilizando-se a média das leituras do topo e da base das amostras apresentadas nas Tabelas 23 e 24. Os resultados indicam, entretanto, que ao se trabalhar com CPs cilíndricos, têm-se que levar em consideração esta variação. No caso dos CPs prismáticos, os valores

encontrados para as duas faces analisadas, apresentaram resultados com pequena variação de leitura, não justificando realizar qualquer distinção entre as mesmas.

As Tabelas 25 e 26 exibem as médias das leituras dos pHs externos, realizadas no centro da superfície do topo e da base de 3 CPs cilíndricos, e no ponto central de duas faces laterais paralelas de 3 CPs prismáticos, ensaiados após permanência em períodos pré-estabelecidos na câmara de carbonatação.

Tabela 25 - pH externo médio dos CPs cilíndricos e prismáticos com relação $a/c = 0,55$, obtido por meio do ensaio de carbonatação acelerada

Tempo Câmara de CO ₂ (Dias)	pH externo $a/c = 0,55$ (Referência)	pH externo $a/c = 0,55$ (Aditivo A)	pH externo $a/c = 0,55$ (Aditivo B)	pH externo $a/c = 0,55$ (Referência)	pH externo $a/c = 0,55$ (Aditivo A)	pH externo $a/c = 0,55$ (Aditivo B)
	CP Cilíndrico	CP Cilíndrico	CP Cilíndrico	CP Prismático	CP Prismático	CP Prismático
0	12,6 ± 0,1	12,90 ± 0,06	12,91 ± 0,02	13,0 ± 0,1	13,3 ± 0,1	13,17 ± 0,03
28	9,63 ± 0,07	10,23 ± 0,04	9,8 ± 0,1	10,58 ± 0,08	11,8 ± 0,1	11,50 ± 0,08
56	9,20 ± 0,02	9,49 ± 0,04	9,3 ± 0,1	9,5 ± 0,1	11,70 ± 0,09	11,46 ± 0,04
70	9,09 ± 0,08	9,15 ± 0,08	9,12 ± 0,08	9,37 ± 0,08	11,5 ± 0,1	11,40 ± 0,04
98	8,73 ± 0,04	8,95 ± 0,03	8,78 ± 0,04	9,2 ± 0,1	10,67 ± 0,09	10,24 ± 0,01

Tabela 26 - pH externo médio dos CPs cilíndricos e prismáticos com relação $a/c = 0,65$, obtido por meio do ensaio de carbonatação acelerada

Tempo Câmara de CO ₂ (Dias)	pH externo $a/c = 0,65$ (Referência)	pH externo $a/c = 0,65$ (Aditivo A)	pH externo $a/c = 0,65$ (Aditivo B)	pH externo $a/c = 0,65$ (Referência)	pH externo $a/c = 0,65$ (Aditivo A)	pH externo $a/c = 0,65$ (Aditivo B)
	CP Cilíndrico	CP Cilíndrico	CP Cilíndrico	CP Prismático	CP Prismático	CP Prismático
0	12,54 ± 0,02	12,56 ± 0,08	12,70 ± 0,09	12,76 ± 0,08	12,95 ± 0,03	12,95 ± 0,05
28	9,27 ± 0,03	9,76 ± 0,07	9,61 ± 0,04	10,51 ± 0,02	11,7 ± 0,1	11,41 ± 0,09
56	9,18 ± 0,04	9,37 ± 0,06	9,20 ± 0,09	9,54 ± 0,03	11,33 ± 0,03	11,10 ± 0,09
70	9,02 ± 0,04	9,07 ± 0,06	9,02 ± 0,07	9,39 ± 0,04	11,20 ± 0,06	10,8 ± 0,1
98	8,70 ± 0,02	8,90 ± 0,02	8,76 ± 0,03	8,91 ± 0,05	9,44 ± 0,07	9,21 ± 0,09

Os gráficos das Figuras 55 e 56, obtidos com os dados apresentados nas Tabelas 25 e 26, auxiliam na visualização do comportamento do pH externo dos CPs cilíndricos e prismáticos de cada traço em estudo.

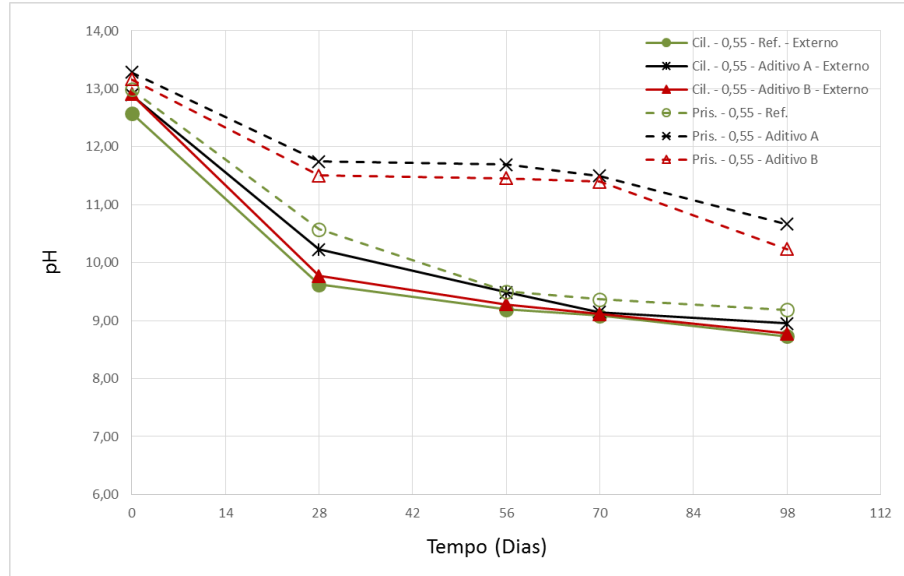


Figura 55 - pH externo médio dos CPs cilíndricos e prismáticos com relação $a/c = 0,55$, obtido por meio do ensaio de carbonatação acelerada

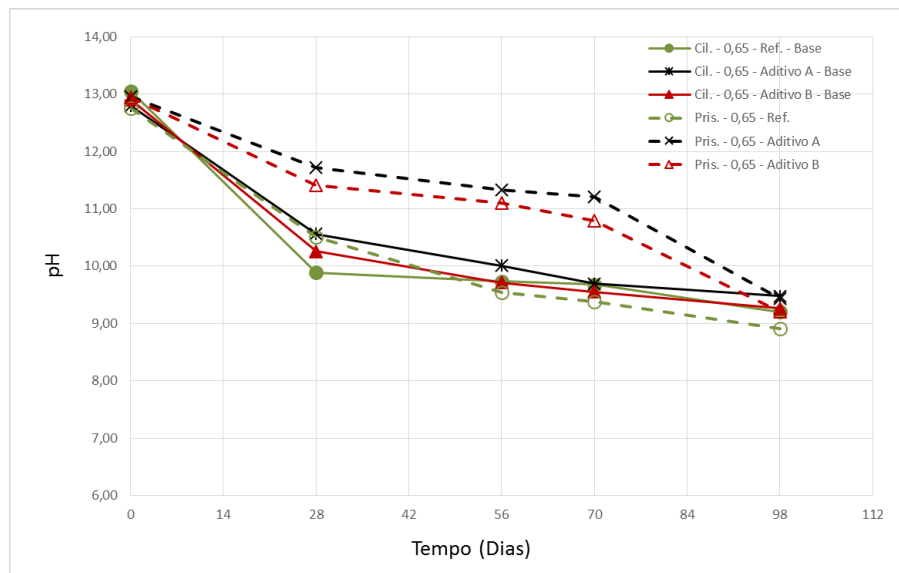


Figura 56 - pH externo médio dos CPs cilíndricos e prismáticos com relação $a/c = 0,65$, obtido por meio do ensaio de carbonatação acelerada

Nota-se uma grande diferença nos resultados obtidos em função da geometria e do preparo dos corpos de prova ensaiados. Os CPs prismáticos tiveram quatro de suas faces seladas com parafina, permitindo que o CO_2 atuasse apenas em duas de suas faces paralelas, ambas com 5 cm de altura e 10 cm de comprimento. Nesta situação, observa-se claramente uma menor perda de alcalinidade dos traços produzidos com o uso dos aditivos redutores de permeabilidade, quando comparados com os respectivos traços de referência. Tal comportamento é verificado em todos os traços, independentemente da relação a/c utilizada.

Os corpos de prova cilíndricos, com 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, não tiveram nenhuma de suas faces seladas, e foram posicionados na câmara de carbonatação apoiados em uma de suas bases circulares, no caso, a base correspondente ao fundo da forma que serviu de molde para sua fabricação. As taxas de perda de alcalinidade para todos os traços ensaiados foram muito semelhantes e quase não foram observados benefícios decorrentes do uso dos aditivos, uma vez que os valores de pH se mantiveram muito próximos ao longo do ensaio. As diferenças se mostraram ainda menores nas idades mais avançadas.

De um modo geral, observa-se que as maiores taxas de perda de alcalinidade ocorrem ao longo dos primeiros 28 dias de ensaio, independentemente do traço analisado. Os menores valores de pH, como já era esperado, continuaram pertencendo ao traço com relação a/c de 0,65. Observa-se também, que os traços produzidos com o Aditivo A apresentaram o melhor desempenho.

Uma constatação interessante, feita com base nos resultados obtidos, é a de que pesquisas realizadas com corpos de provas e procedimentos de preparo distintos, tais como os apresentados neste estudo, podem levar a conclusões bastante divergentes. Destaca-se que ambos os métodos aqui apresentados são largamente encontrados em trabalhos publicados em periódicos científicos qualificados.

As Tabelas 27 e 28 exibem as médias das leituras dos pHs internos, realizadas no ponto central da seção de corte transversal de 3 CPs cilíndricos e no ponto central da seção de corte longitudinal de 3 CPs prismáticos, ensaiados após permanência em períodos pré-estabelecidos na câmara de carbonatação.

Observa-se que os valores do pH interno de todos os traços em estudo, nos períodos de carbonatação acelerada analisados, se mantiveram acima de 12,5, demonstrando que a alcalinidade da região mais central dos CPs foi pouco afetada pela ação do CO₂.

Constata-se que a variação dos valores do pH interno, nos diversos traços, sofreu maior influência da relação água/cimento utilizada do que dos demais fatores, seguida do efeito provocado pelo uso de aditivos. Como as medidas foram realizadas na parte mais interna dos CPs, se observa uma menor influência da geometria nos valores obtidos.

Tabela 27 - pH interno médio dos CPs cilíndricos e prismáticos com relação a/c = 0,55, obtido por meio do ensaio de carbonatação acelerada

Tempo Câmara de CO ₂ (Dias)	pH interno a/c = 0,55 (Referência)	pH interno a/c = 0,55 (Aditivo A)	pH interno a/c = 0,55 (Aditivo B)	pH interno a/c = 0,55 (Referência)	pH interno a/c = 0,55 (Aditivo A)	pH interno a/c = 0,55 (Aditivo B)
	CP Cilíndrico	CP Cilíndrico	CP Cilíndrico	CP Prismático	CP Prismático	CP Prismático
0	13,1 ± 0,1	13,1 ± 0,1	13,09 ± 0,03	13,19 ± 0,08	13,45 ± 0,05	13,11 ± 0,08
28	12,95 ± 0,02	13,04 ± 0,02	13,02 ± 0,01	12,98 ± 0,07	13,10 ± 0,03	13,09 ± 0,02
56	12,88 ± 0,02	12,92 ± 0,03	12,89 ± 0,03	12,92 ± 0,03	13,00 ± 0,03	12,98 ± 0,03
70	12,82 ± 0,02	12,85 ± 0,06	12,83 ± 0,04	12,84 ± 0,04	12,95 ± 0,05	12,94 ± 0,08
98	12,60 ± 0,03	12,65 ± 0,06	12,64 ± 0,07	12,7 ± 0,1	12,88 ± 0,03	12,82 ± 0,06

Tabela 28 - pH interno médio dos CPs cilíndricos e prismáticos com relação a/c = 0,65, obtido por meio do ensaio de carbonatação acelerada

Tempo Câmara de CO ₂ (Dias)	pH interno a/c = 0,65 (Referência)	pH interno a/c = 0,65 (Aditivo A)	pH interno a/c = 0,65 (Aditivo B)	pH interno a/c = 0,65 (Referência)	pH interno a/c = 0,65 (Aditivo A)	pH interno a/c = 0,65 (Aditivo B)
	CP Cilíndrico	CP Cilíndrico	CP Cilíndrico	CP Prismático	CP Prismático	CP Prismático
0	12,91 ± 0,04	12,92 ± 0,03	12,87 ± 0,02	12,95 ± 0,07	12,97 ± 0,05	12,95 ± 0,07
28	12,77 ± 0,04	12,87 ± 0,09	12,78 ± 0,04	12,81 ± 0,03	12,92 ± 0,06	12,82 ± 0,05
56	12,57 ± 0,09	12,68 ± 0,04	12,67 ± 0,10	12,58 ± 0,05	12,87 ± 0,04	12,76 ± 0,04
70	12,22 ± 0,08	12,56 ± 0,04	12,54 ± 0,04	12,26 ± 0,05	12,7 ± 0,1	12,70 ± 0,02
98	12,07 ± 0,02	12,28 ± 0,05	12,22 ± 0,03	12,2 ± 0,1	12,64 ± 0,06	12,53 ± 0,08

Os aditivos, provavelmente, foram responsáveis pela formação de cristais nos poros, capilaridades e fissuras dos compósitos cimentícios, decorrente das reações dos mesmos com os subprodutos de hidratação do cimento, dificultando a penetração do CO₂, e contribuindo para a queda na taxa de perda de alcalinidade dos corpos de prova submetidos ao ensaio de carbonatação acelerada. Observa-se seu efeito com maior clareza nos CPs prismáticos, apesar de também ser possível observá-lo nos CPs cilíndricos.

Os gráficos das Figuras 57 e 58, obtidos com os dados apresentados nas Tabelas 27 e 28, auxiliam na visualização do comportamento do pH interno dos CPs cilíndricos e prismáticos de cada traço em estudo.

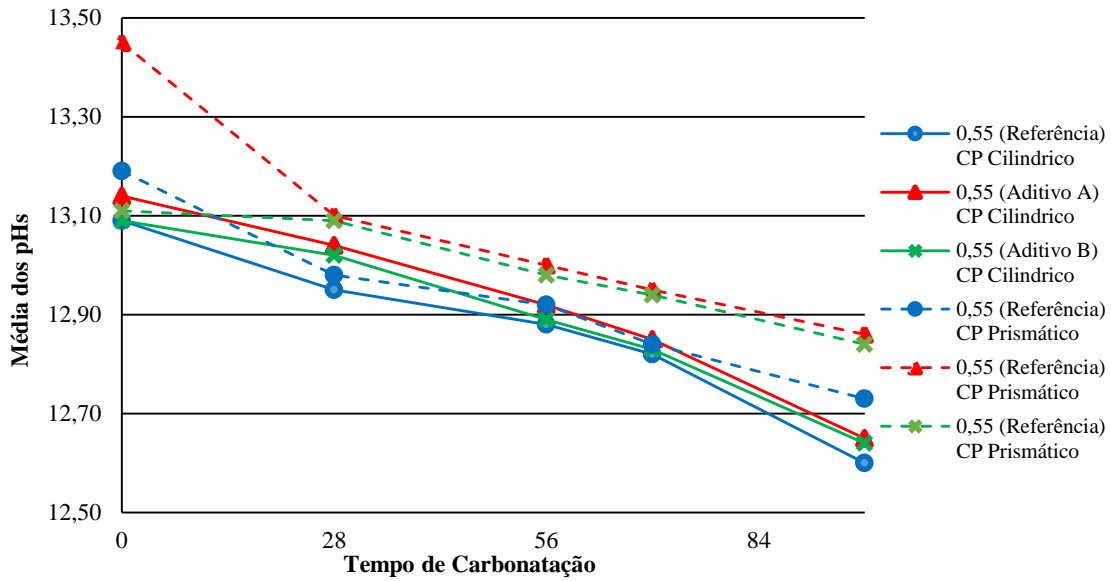


Figura 57 - pH interno médio dos CPs cilíndricos e prismáticos com relação $a/c = 0,55$, obtido por meio do ensaio de carbonatação acelerada

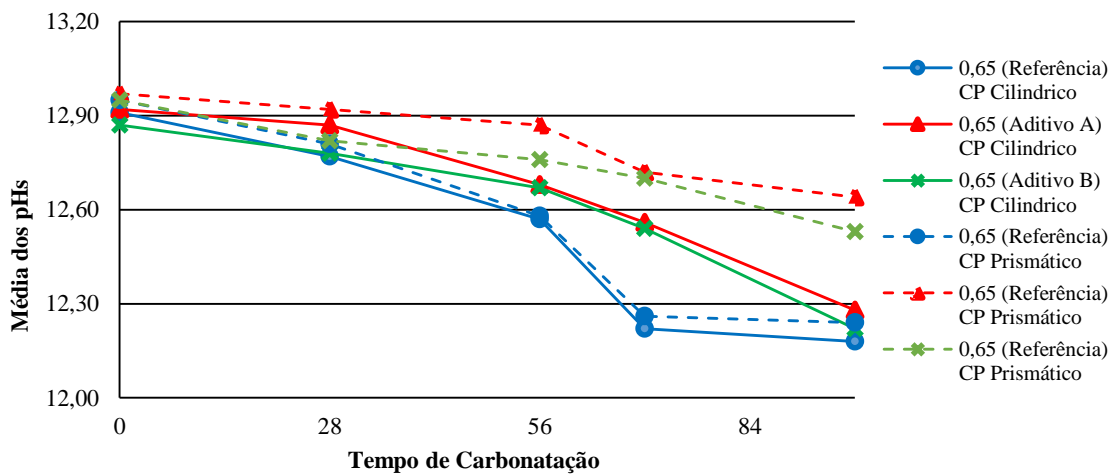


Figura 58 - pH interno médio dos CPs cilíndricos e prismáticos com relação $a/c = 0,65$, obtido por meio do ensaio de carbonatação acelerada

4.3 Acompanhamento do avanço da frente de carbonatação

A medição da profundidade da frente de carbonatação foi feita por meio da utilização de um paquímetro digital, com precisão de $\pm 0,05$ mm, após a aspersão de fenolftaleína. Este indicador demarcou, ao longo das idades, as regiões cujo pH se encontrava abaixo de 9,5 (valor aproximado), destacando as faixas aqui denominadas como frentes de carbonatação.

A Figura 59 mostra, por meio de imagens, o avanço da frente de carbonatação nos CPs cilíndricos, após 0, 28, 56, 70 e 98 dias de exposição à atmosfera rica em CO₂ da câmara de carbonatação.

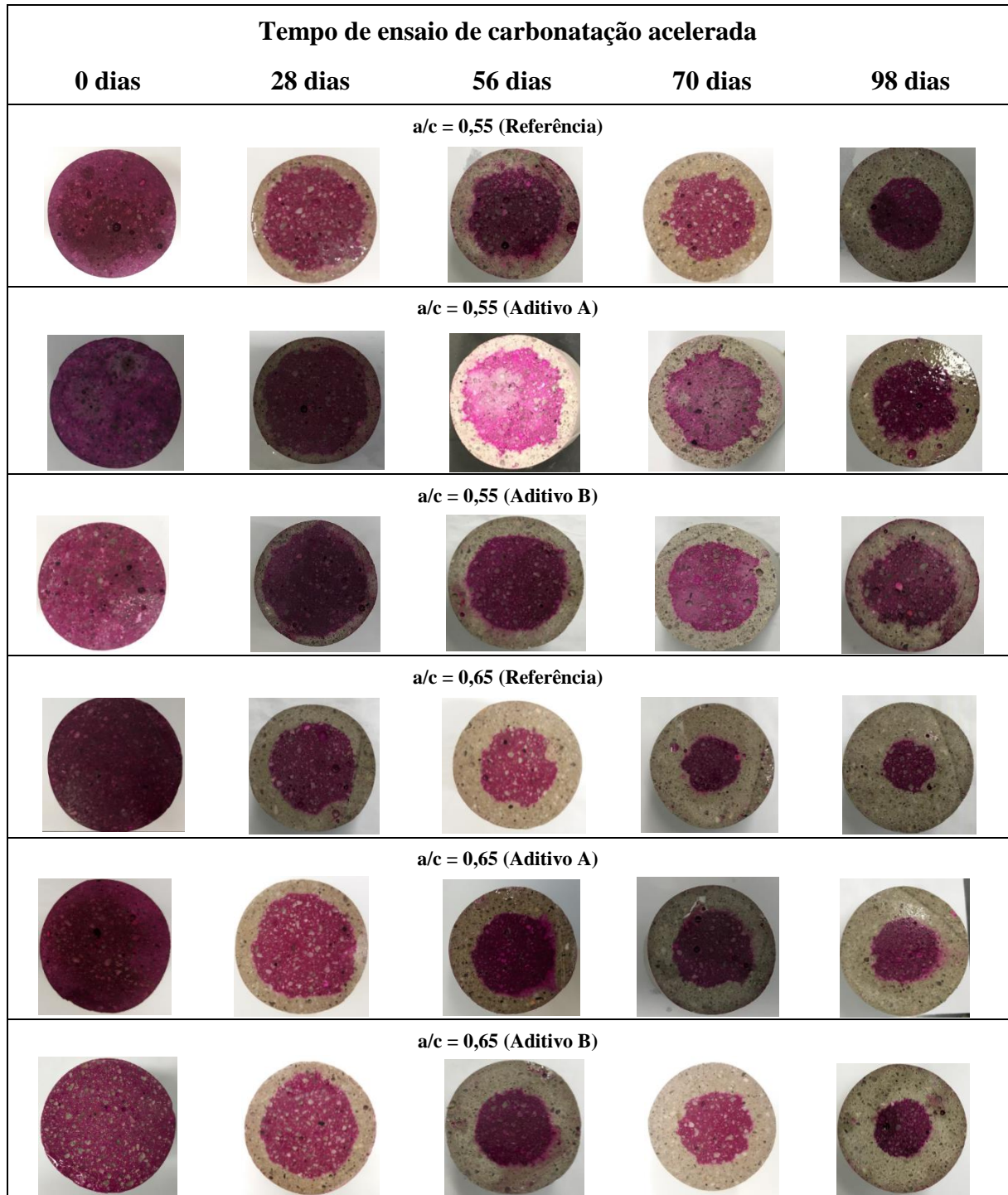


Figura 59 - Avanço da frente de carbonatação em CPs cilíndricos (5 x 10) cm aferido com indicador de fenolftaleína em períodos pré-estabelecidos

A utilização da sonda para medição do pH se mostrou de grande utilidade para acompanhar sua variação nas faixas de alcalinidade onde a solução de fenolftaleína não seria capaz de identificar sua redução, dando uma falsa impressão de que o fenômeno da carbonatação não estaria sendo desencadeado. Por outro lado, esta técnica não permite identificar o limite do que se convencionou chamar de frente de carbonatação que, no caso do emprego da solução de fenolftaleína, destaca a área onde o pH se encontra abaixo de sua faixa de viragem, usualmente em torno de 9,5.

Os valores médios da profundidade de carbonatação medidos nos CPs cilíndricos são apresentados na Tabela 29.

Tabela 29 - Profundidade de carbonatação medida nos CPs cilíndricos (5 x 10) cm após aplicação de solução de fenolftaleína

Tempo em Câmara de CO ₂ (Dias)	Profundidade a/c = 0,55 (Referência) (mm)	Profundidade a/c = 0,55 (Aditivo A) (mm)	Profundidade a/c = 0,55 (Aditivo B) (mm)	Profundidade a/c = 0,65 (Referência) (mm)	Profundidade a/c = 0,65 (Aditivo A) (mm)	Profundidade a/c = 0,65 (Aditivo B) (mm)
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
28	4,7 ± 0,4	4,1 ± 0,4	4,3 ± 0,4	7,0 ± 0,4	5,8 ± 0,7	6,7 ± 0,5
56	6,2 ± 0,4	5,7 ± 0,4	6,0 ± 0,4	8,6 ± 0,4	7,7 ± 0,5	8,5 ± 0,7
70	7,8 ± 0,5	6,6 ± 0,7	7,8 ± 0,4	11,6 ± 0,6	10,6 ± 0,4	11,1 ± 0,5
98	9,1 ± 0,7	7,8 ± 0,5	8,6 ± 0,6	14,8 ± 0,6	12,0 ± 0,6	12,0 ± 1,5

A partir dos valores apresentados na Tabela 29, e tomando-se como base a Equação 10 (seção 2.2), desenvolvida a partir da segunda Lei de Fick, foi possível determinar o valor da constante k , para cada um dos traços analisados. Os valores obtidos são mostrados na Tabela 30. A referida equação é transcrita novamente, para proporcionar uma facilidade de leitura.

$$e_c = k\sqrt{t} \quad (\text{Equação 10})$$

Onde:

e_c = espessura carbonatada (mm);

t = tempo (dias);

k = constante que depende da difusividade efetiva do CO₂ através do concreto.

Tabela 30 - Constante de difusibilidade dos traços ensaiados com CPs cilíndricos

Traço	k	Varição de k (%)	Modelo Matemático	r ²
0,55 (Referência)	0,90280	-	$e_c = 0,90280 \times \sqrt{t}$	0,99195
0,55 (Aditivo A)	0,78291	< 15%	$e_c = 0,78291 \times \sqrt{t}$	0,99962
0,55 (Aditivo B)	0,86653	< 4%	$e_c = 0,86653 \times \sqrt{t}$	0,98750
0,65 (Referência)	1,37326	-	$e_c = 1,37326 \times \sqrt{t}$	0,96450
0,65 (Aditivo A)	1,17543	< 17%	$e_c = 1,17543 \times \sqrt{t}$	0,97619
0,65 (Aditivo B)	1,23382	< 11%	$e_c = 1,23382 \times \sqrt{t}$	0,98605

A Figura 60 apresenta os gráficos das funções ajustadas, bem como os pontos obtidos pela medição do avanço da frente de carbonatação para os traços analisados a partir de CPs cilíndricos.

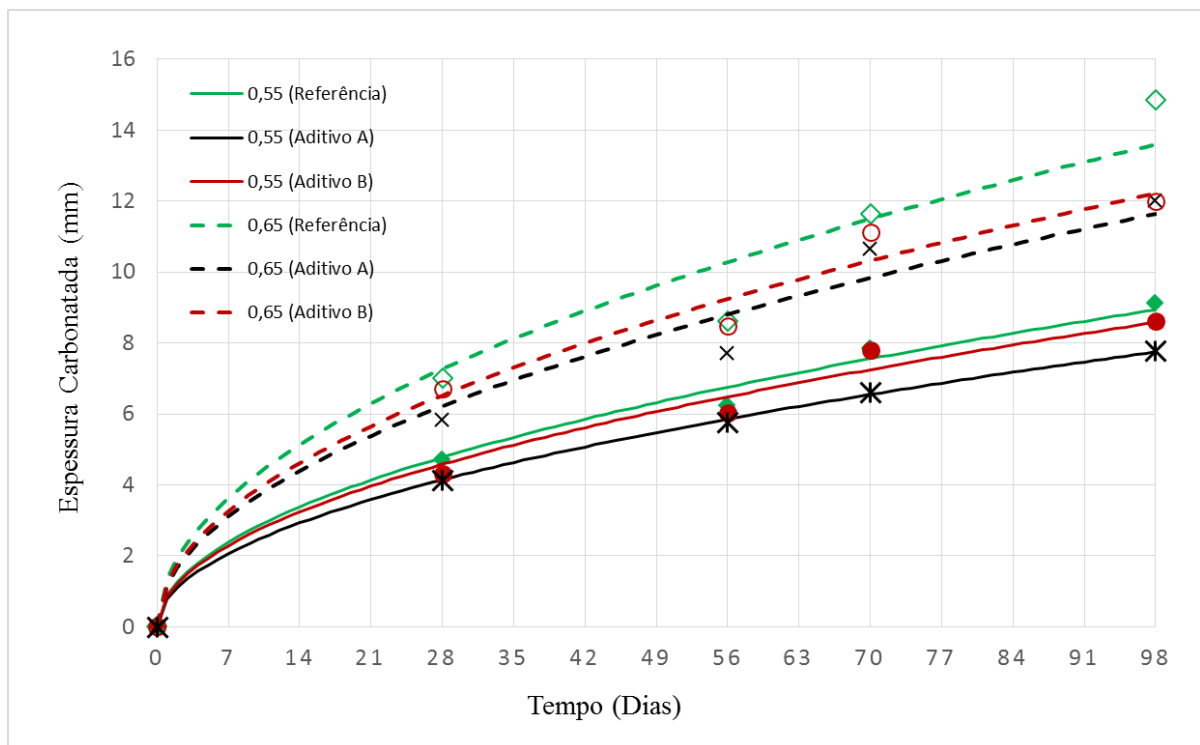


Figura 60 - Curvas ajustadas para predição do avanço da frente de carbonatação em CPs cilíndricos submetidos a ensaio de carbonatação acelerada

Nota-se a grande melhoria de desempenho do compósito cimentício, quanto ao avanço da frente de carbonatação, produzida pela redução da relação água/cimento utilizada. Nos CPs cilíndricos, quase não se observou o efeito dos aditivos na variação do pH, já nas medidas da

espessura carbonatada é possível se identificar com clareza a contribuição dos mesmos. As menores espessuras carbonatadas foram identificadas nos traços produzidos com o Aditivo A.

A Figura 61 mostra, por meio de imagens, o avanço da frente de carbonatação nos CPs prismáticos, após 0, 28, 56, 70 e 98 dias de exposição à atmosfera rica em CO₂ da câmara de carbonatação.

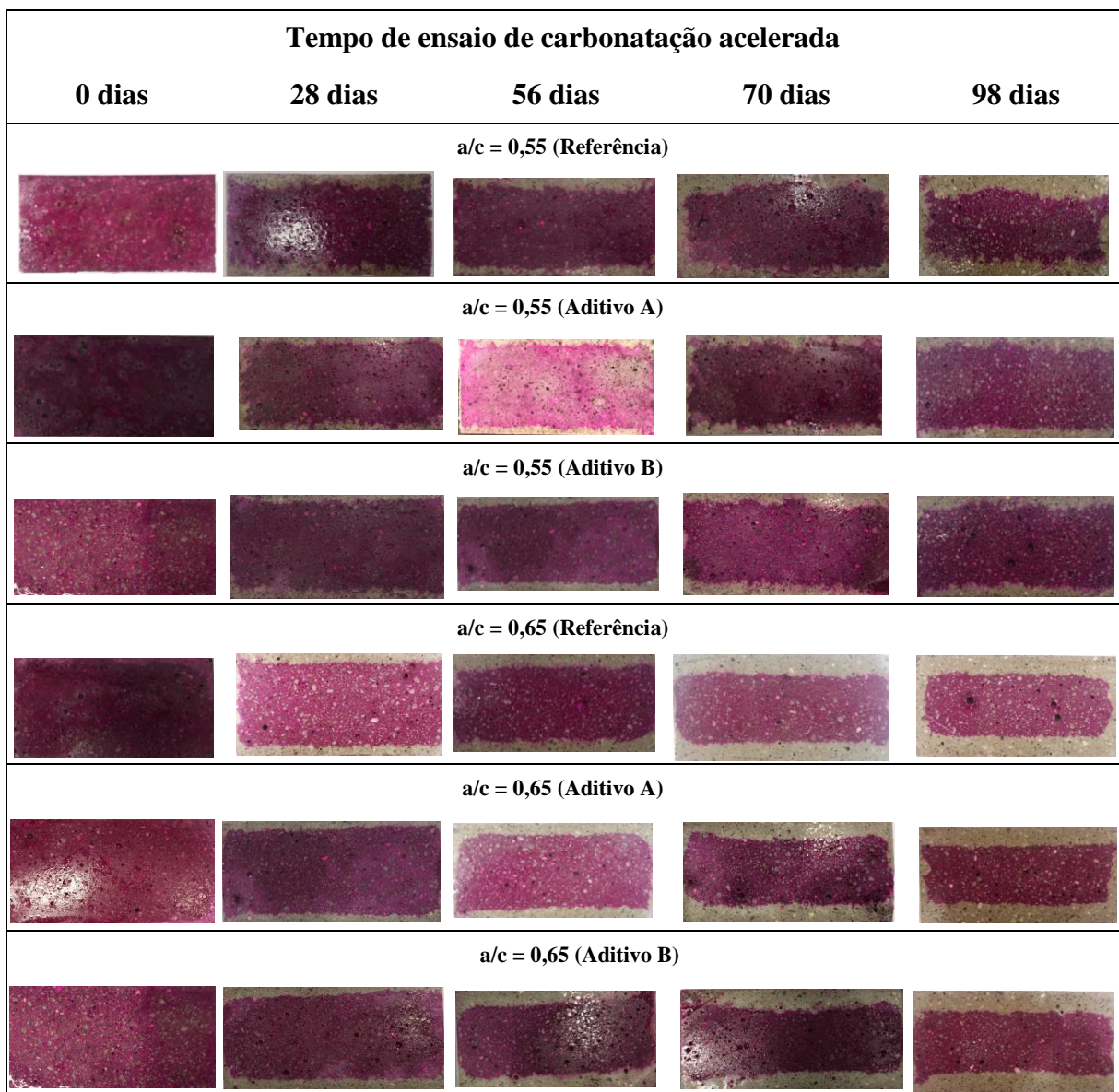


Figura 61 - Avanço da frente de carbonatação em CPs prismáticos (5 x 10) cm aferido com indicador de fenolftaleína em períodos pré-estabelecidos

Os valores médios da profundidade de carbonatação medidos nos CPs prismáticos são apresentados na Tabela 31.

Tabela 31 - Profundidade de carbonatação medida nos CPs prismáticos (5 x 10) cm após aplicação de solução de fenolftaleína

Tempo Câmara de CO ₂ (Dias)	Profundidade a/c = 0,55 (Referência) (mm)	Profundidade a/c = 0,55 (Aditivo A) (mm)	Profundidade a/c = 0,55 (Aditivo B) (mm)	Profundidade a/c = 0,65 (Referência) (mm)	Profundidade a/c = 0,65 (Aditivo A) (mm)	Profundidade a/c = 0,65 (Aditivo B) (mm)
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
28	4,6 ± 0,6	3,4 ± 0,3	3,9 ± 0,3	5,6 ± 0,3	4,2 ± 0,3	5,3 ± 0,3
56	5,8 ± 0,9	5,0 ± 0,4	5,4 ± 0,4	7,0 ± 0,5	6,7 ± 0,4	6,9 ± 0,3
70	6,9 ± 0,7	5,1 ± 0,5	5,4 ± 0,4	9,9 ± 0,5	8,0 ± 0,4	9,2 ± 0,4
98	8,1 ± 1,1	5,8 ± 0,9	5,8 ± 0,9	10,1 ± 0,2	9,7 ± 0,4	10,0 ± 0,2

A partir dos valores apresentados na Tabela 31, utilizou-se novamente a Equação 10 (seção 2.2), para se determinar o valor da constante k, para cada uma das sequências de dados relativas aos traços analisados a partir dos CPs prismáticos. Os valores obtidos são mostrados na Tabela 32.

Tabela 32 - Constante de difusibilidade dos traços ensaiados com CPs prismáticos

Traço	k	Variação de k (%)	Modelo Matemático	r ²
0,55 (Referência)	0,80839	-	$e_c = 0,80839 \times \sqrt{t}$	0,99555
0,55 (Aditivo A)	0,61768	< 31%	$e_c = 0,61768 \times \sqrt{t}$	0,98824
0,55 (Aditivo B)	0,65299	< 24%	$e_c = 0,65299 \times \sqrt{t}$	0,95891
0,65 (Referência)	1,05119	-	$e_c = 1,05119 \times \sqrt{t}$	0,96941
0,65 (Aditivo A)	0,93786	< 12%	$e_c = 0,93786 \times \sqrt{t}$	0,98486
0,65 (Aditivo B)	1,01263	< 4%	$e_c = 1,012630 \times \sqrt{t}$	0,98527

Nota-se, que o modelo matemático utilizado, forneceu um bom ajuste para todos os casos aqui analisados, se observado os valores obtidos para r².

A Figura 62 apresenta os gráficos das funções ajustadas bem como os pontos obtidos pela medição do avanço da frente de carbonatação para os traços analisados a partir de CPs prismáticos.

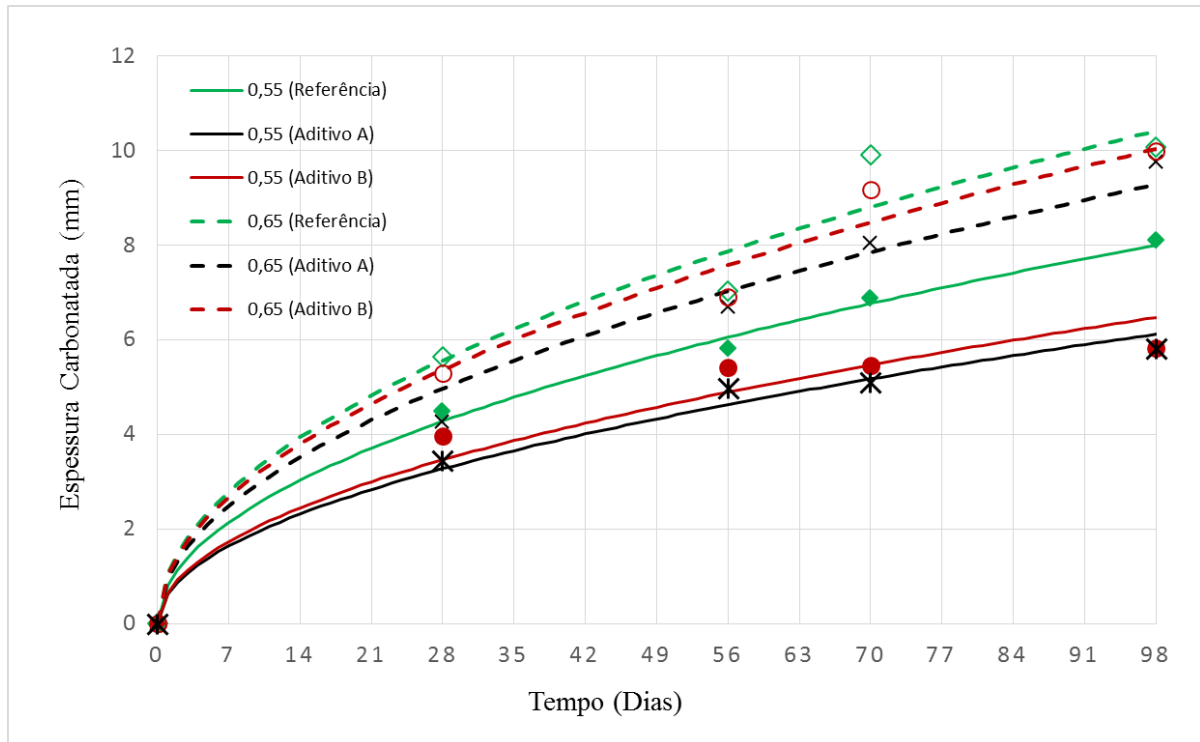


Figura 62 - Curvas ajustadas para predição do avanço da frente de carbonatação em CPs prismáticos submetidos a ensaio de carbonatação acelerada

Apesar do avanço da frente de carbonatação nos CPs prismáticos ser menor do que a encontrada nos CPs cilíndricos, os demais efeitos observados se repetem. Novamente as menores espessuras carbonatadas foram identificadas nos traços produzidos com o Aditivo A.

As Figuras 63 e 64 apresentam um comparativo entre as curvas ajustadas para os traços produzidos com CPs cilíndricos e prismáticos, para as relações a/c de 0,55 e 0,65, respectivamente.

Em ambos os casos se verifica com clareza o efeito da geometria dos corpos de prova no avanço da frente de carbonatação. No traço com a/c de 0,55, o efeito do uso e do tipo de aditivo se mostra mais evidente nos CPs prismáticos. Já no traço com a/c de 0,65, o maior efeito é constatado nos CPs cilíndricos. Novamente, pode-se chegar a conclusões distintas, dependendo do método experimental adotado. Um ponto de consenso é encontrado nas espessuras carbonatadas, que se mostram sempre menores nos CPs prismáticos.

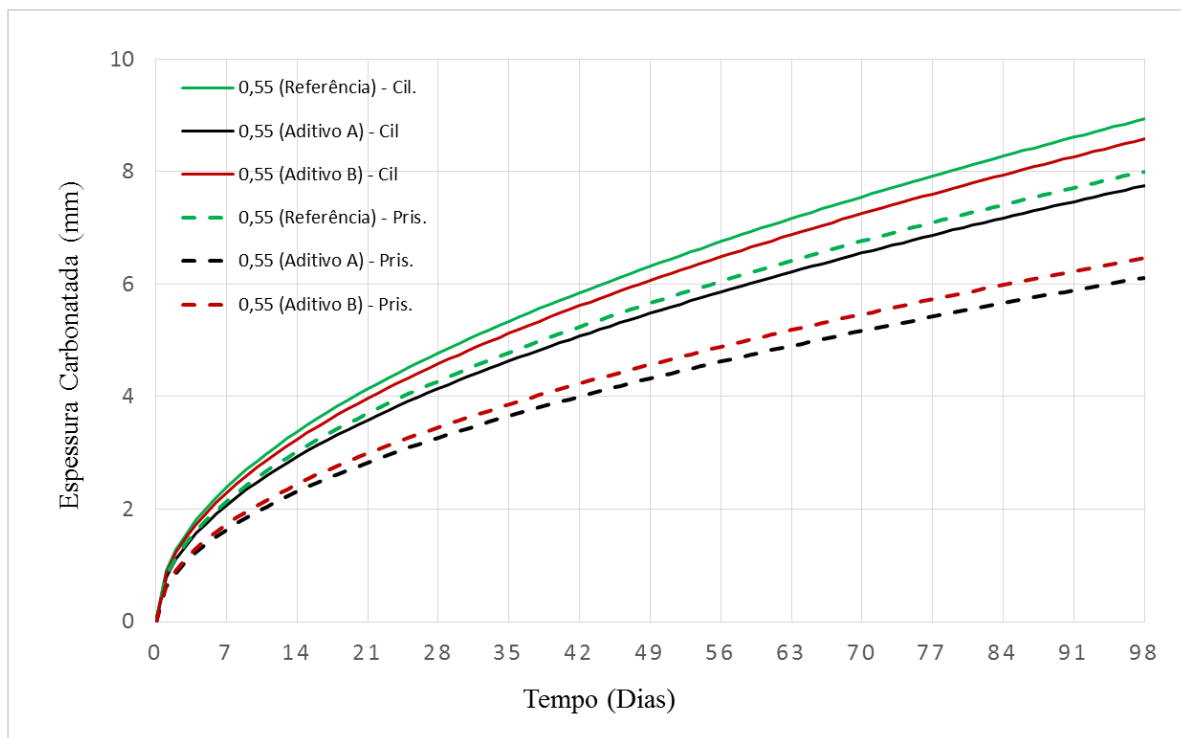


Figura 63 - Comparativo entre as curvas ajustadas para predição do avanço da frente de carbonatação, dos CPs prismáticos e cilíndricos, produzidos com relação $a/c = 0,55$

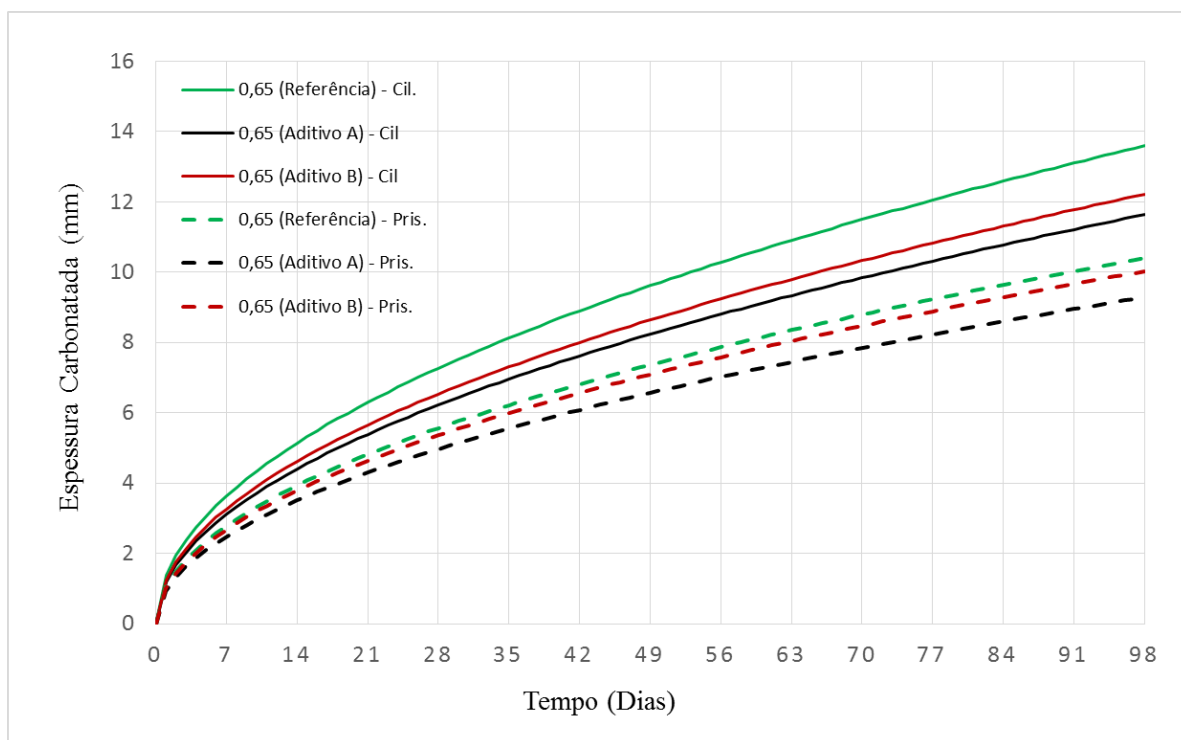


Figura 64 - Comparativo entre as curvas ajustadas para predição do avanço da frente de carbonatação, dos CPs prismáticos e cilíndricos, produzidos com relação $a/c = 0,65$

Verifica-se, pelos resultados obtidos, que a profundidade de carbonatação nos compósitos cimentícios em estudo aumentou proporcionalmente à raiz quadrada do tempo de exposição dos mesmos ao ensaio de carbonatação acelerada. O indicador de fenoltaleína demarcou ao longo do tempo as regiões cujo pH se encontrava abaixo de 9,5 (valor aproximado), destacando as faixas aqui denominadas como frentes de carbonatação.

Cabe ressaltar que o que foi medido é apenas a região em que o pH do material cimentício foi reduzido para níveis capazes de serem detectados por este indicador de pH, e não a presença das reações do ácido carbônico (H_2CO_3) com os álcalis da argamassa.

4.4 Avaliação da microestrutura dos CPs por meio de MEV

Na Figura 65, são apresentadas imagens ampliadas 2.500 vezes, de uma seção próxima a borda das amostras, geradas a partir da leitura do microscópio eletrônico de varredura, para os traços $a/c = 0,55$ (Referência), $a/c = 0,55$ (Aditivo A), $a/c = 0,55$ (Aditivo B), $a/c = 0,65$ (Referência), $a/c = 0,65$ (Aditivo A), $a/c = 0,65$ (Aditivo B), após ensaio de 56 dias de carbonatação acelerada.

Na Figura 66, são apresentadas imagens ampliadas 2.500 vezes, de uma seção no centro das amostras, geradas a partir da leitura do microscópio eletrônico de varredura, para os traços $a/c = 0,55$ (Referência), $a/c = 0,55$ (Aditivo A), $a/c = 0,55$ (Aditivo B), $a/c = 0,65$ (Referência), $a/c = 0,65$ (Aditivo A), $a/c = 0,65$ (Aditivo B), após ensaio de 56 dias de carbonatação acelerada.

Verifica-se de uma maneira geral, que as imagens das seções de borda e centro não apresentaram variações microestruturais significativas.

Nota-se que a matriz cimentícia apresentou-se menos densa nos traços de referência do que naqueles produzidas com o uso dos aditivos. Tal constatação é mais evidente na amostra com relação água/cimento de 0,65.

É possível identificar, em diversas imagens, a presença de microfissuras. Estas podem, entretanto, ter sido geradas, total ou parcialmente, durante o processo de preparação das amostras.

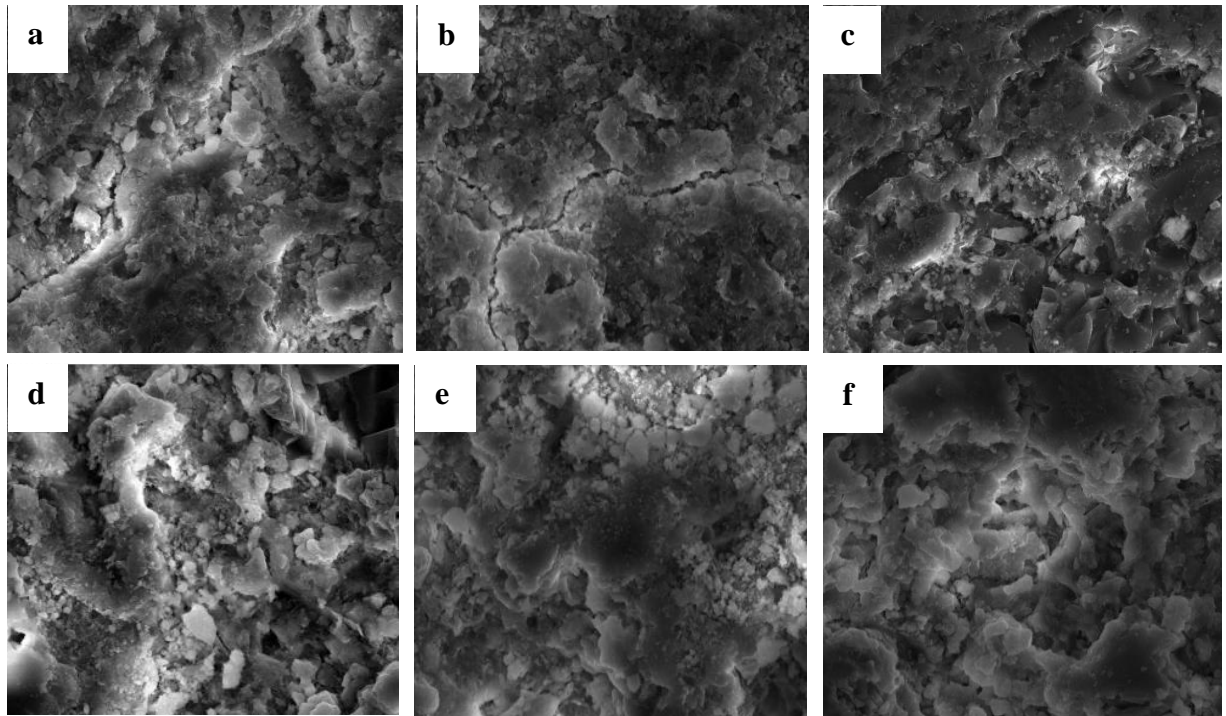


Figura 65 - Imagens geradas por MEV dos traços: (a) 0,55 Referência, (b) 0,55 Aditivo A, (c) 0,55 Aditivo B, (d) 0,65 Referência, (e) 0,65 Aditivo A, (f) 0,65 Aditivo B de seção próxima a borda das amostras após período de carbonatação acelerada de 56 dias

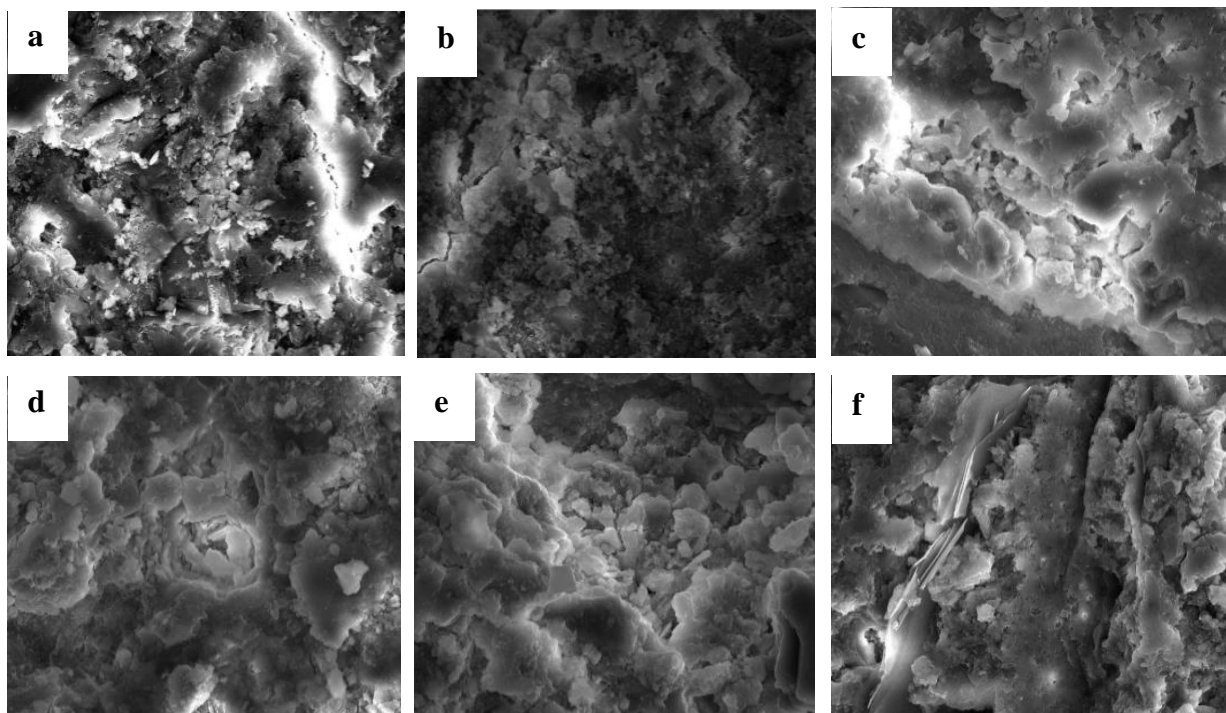


Figura 66 - Imagens geradas por MEV dos traços: (a) 0,55 Referência, (b) 0,55 Aditivo A, (c) 0,55 Aditivo B, (d) 0,65 Referência, (e) 0,65 Aditivo A, (f) 0,65 Aditivo B de seção no centro das amostras após período de carbonatação acelerada de 56 dias

Neste trabalho, não foi possível detectar e identificar por meio das imagens obtidas nenhuma formação específica resultante do processo de carbonatação acelerada ou mesmo do efeito de

cristalização capilar promovido pelos aditivos redutores de permeabilidade, nos vazios presentes na matriz dos compósitos cimentícios.

5

CONCLUSÕES

Foi verificado que, no ensaio de resistência à compressão, os traços de referência apresentaram aos 28 dias uma resistência média um pouco mais elevada, comparado aos traços contendo aditivos, para ambas as relações água/cimento definidas. Este comportamento demonstra que o efeito cristalizante desencadeado pelo PRAC não promoveu ao longo das idades ganhos de resistência mecânica superiores aos normais. Como era esperado, as maiores taxas de crescimento de resistência ocorreram nas idades de 3 e 7 dias em razão do comportamento do cimento utilizado nas misturas. Foi possível evidenciar a partir dos dados obtidos uma queda aproximada de 30% de resistência dos compósitos cimentícios dosados a uma relação igual a 0,65 em comparação com os de relação igual a 0,55. Tal fato demonstra o maior percentual de vazios presentes na matriz cimentícia dos traços em questão advindos do aumento da água adicionada na produção dos mesmos.

O uso do equipamento pHmetro para leitura do pH em superfícies de compósitos de matriz cimentícia permitiu um monitoramento eficiente da variação do potencial hidrogeniônico induzida pela carbonatação, indicando que as regiões próximas à superfície externa dos corpos de prova sofreram redução de alcalinidade antes mesmo de serem detectadas pelo ensaio utilizando a solução de fenolftaleína. Por outro lado, esta técnica não permite identificar o limite da região denominada como frente de carbonatação, que, no caso do emprego da solução de fenolftaleína, destaca a área onde o pH se encontra abaixo de sua faixa de viragem (aproximadamente menor que 9,5).

A boa alcalinidade evidenciada em todos os traços na idade “0” demonstra a efetividade do processo bem controlado de cura e do condicionamento adotado para todos os CPs. Os traços contendo aditivos produzidos em CPs cilíndricos apresentaram valores de pH ligeiramente superiores em relação aos de referência. Esta constatação sugere que o PRAC tenha promovido uma pequena densificação na matriz cimentícia neste período inicial, reduzindo o teor de

porosidade próxima à superfície dos CPs. Para os CPs prismáticos, não foi possível se fazer nenhuma afirmação quanto a melhoria da alcalinidade em razão do uso de PRAC, uma vez que as variações observadas foram ínfimas, muito embora tenham apresentado alcalinidade ligeiramente superior às obtidas nos CPs cilíndricos. Independentemente da geometria, todos os traços com relação a/c de 0,65 apresentaram menor alcalinidade que os traços com relação de 0,55.

Os resultados de pH externo obtidos no decorrer do processo de carbonatação acelerada apresentaram variação, em função da relação água/cimento, da adoção e tipo de PRAC utilizado na mistura e da geometria dos CPs. A menor redução de alcalinidade, entre os seis traços ocorreu para o de $a/c = 0,55$ produzido com o Aditivo A em fôrma prismática. Tal constatação indica que, a menor densificação superficial e o maior índice interno de vazios dos CPs dos demais traços, induzida pelas dosagens propostas para as misturas, associada a maior difusão do CO_2 em virtude da geometria proposta para o CP, produziu compósitos cimentícios mais permeáveis e porosos. Constatou-se que as taxas de perda de alcalinidade nos CPs cilíndricos foram muito semelhantes e quase não foram observados benefícios decorrentes do uso de PRAC.

O comportamento do pH externo ao longo do ensaio de carbonatação acelerada, independentemente do traço analisado, demonstrou que as maiores taxas de perda de alcalinidade ocorreram ao longo dos primeiros 28 dias de ensaio. Os menores valores obtidos, como já era esperado, pertenceram ao traço com relação a/c igual a 0,65. Verificou-se que pesquisas realizadas com CPs e procedimentos de preparos distintos, podem levar a conclusões divergentes, embora ambos os métodos sejam largamente utilizados em outras pesquisas.

Todos os traços, no período de carbonatação acelerada, apresentaram valores de pH interno acima de 12,5, o que demonstra a boa alcalinidade da região mais central dos CPs, pouco afetada pelo ação do CO_2 . Evidenciou-se que a variação dos mesmos, sofreu maior influência da relação água/cimento utilizada do que dos demais fatores, seguida do efeito provocado pelo uso dos aditivos, estes últimos, observados com clareza sobretudo nos CPs prismáticos.

O resultado das medições da carbonatação com a solução de fenolftaleína, mostraram que o aumento da profundidade carbonatada foi diretamente proporcional ao período de exposição dos CPs dentro da câmara, com valores sempre maiores ao longo das idades.

Foi possível notar a grande melhoria de desempenho do compósito cimentício, quanto ao avanço da frente de carbonatação, produzida pela redução da relação água/cimento. As menores espessuras carbonatadas foram identificadas nos traços produzidos com o aditivo A. Tal constatação indica a presença menos acentuada de poros, capilaridades e fissuras na matriz interna dos compósitos cimentícios, facilitando a penetração de CO₂ e, por conseguinte, propiciando taxas de carbonatação menores.

Verificou-se com nitidez o efeito da geometria dos CPs no avanço da frente de carbonatação. No traço com a/c de 0,55, o efeito do uso e do tipo de aditivo se mostra mais evidente nos CPs prismáticos. Já no traço com a/c de 0,65, o maior efeito é constatado nos CPs cilíndricos, o que propicia conclusões distintas, dependendo do método experimental adotado. Por outro lado, ficou claro que as menores espessuras carbonatadas ocorrem sempre nos CPs prismáticos.

É importante salientar que, ambos os métodos não são capazes de indicar a razão pela qual ocorreu a perda da alcalinidade, seja esta por carbonatação ou por outras causas, como exposição a ácidos, por exemplo. Assim, nos casos de investigação onde o fator causador da redução do pH não é conhecido, são necessárias análises laboratoriais para avaliação do risco ácido que o concreto está sujeito (CEN, 2006).

A microestrutura dos seis traços analisados apresentou algumas particularidades específicas. A matriz cimentícia apresentou-se menos densa nos traços de referência do que naqueles produzidos com o uso dos aditivos. Tal fato, se mostrou mais evidente nos compósitos de relação água/cimento iguais a 0,65.

As imagens obtidas por MEV nas duas posições estipuladas para cada cada traço, próxima a borda e no centro das amostras, não apresentaram diferenças microestruturais significativas.

As imagens apresentadas para análise microestrutural dos traços utilizados neste estudo, não permitiu a visualização de formações advindas do processo de carbonatação ou mesmo do efeito de cristalização capilar promovido pelos aditivos redutores de permeabilidade, nos vazios presentes na matriz dos compósitos cimentícios.

6

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 52: *Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente*. Rio de Janeiro, 2009.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5733: *Cimento Portland de Alta Resistência Inicial*. Rio de Janeiro, 1991.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738: *Moldagem e cura de corpos de prova – Procedimento*. Rio de Janeiro, 2015.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: *Concreto – Ensaio de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro, 2007.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7214: *Areia normal para ensaio de cimento - Especificação*. Rio de Janeiro, 2012.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215: (Incorpora a Errata nº 1 de 1997): *Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão*. Rio de Janeiro, 1996.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: *Projeto de Estruturas de Concreto Armado – Procedimento*. Rio de Janeiro, 2014.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 11768: *Aditivos químicos para concreto de cimento Portland - Requisitos*. Rio de Janeiro, 2011.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 13529: *Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Terminologia*. Rio de Janeiro, 2013.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14724: *Informação e Documentação – Trabalhos Acadêmicos – Apresentação*. Rio de Janeiro, 2011.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 52: *Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente*. Rio de Janeiro, 2009.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5733: *Cimento Portland de Alta Resistência Inicial*. Rio de Janeiro, 1991.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738: *Moldagem e cura de corpos de prova – Procedimento*. Rio de Janeiro, 2015.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: *Concreto – Ensaio de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro, 2007.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7214: *Areia normal para ensaio de cimento - Especificação*. Rio de Janeiro, 2012.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215: (Incorpora a Errata nº 1 de 1997): *Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão*. Rio de Janeiro, 1996.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: *Projeto de Estruturas de Concreto Armado – Procedimento*. Rio de Janeiro, 2014.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 11768: *Aditivos químicos para concreto de cimento Portland - Requisitos*. Rio de Janeiro, 2011.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 13529: *Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Terminologia*. Rio de Janeiro, 2013.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14724: *Informação e Documentação – Trabalhos Acadêmicos – Apresentação*. Rio de Janeiro, 2011.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15575: *Desempenho*. Rio de Janeiro, 2012.

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

ADORNA, D. D. L. *Carbonatação acelerada em concreto com adição de cinzas de lodo de estação de tratamento de água*. (Dissertação de Mestrado) 139 p.; Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2016.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 212.3R-10. *Report on Chemical Admixtures for Concrete*. 2010, 65p.

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

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. *Manual of Concrete Practice*. Part 1 – 1991. Materials and General Properties of Concrete, Committee 222. Detroit, Michigan, 1991, 11p.

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

ARANHA, N.; OLIVEIRA Jr. J.M.; ANDREO FILHO, N.; CHAUD, M.V.; GONÇALVES, M.M.; LIMA Jr., J.R. *Projeto e Construção de um Picnômetro a ar para caracterização de insumos e produtos farmacêuticos*. Química nova, v. 1.33, nº 6, 1384-1388, 2010.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. C 25: *Standard Test Methods for Chemical Analysis of Limestone, Quicklime, and Hydrated Lime*. PA, 2011, 38 p.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. C 125: *Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates*. PA, 2016.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. C 219: *Standard Terminology Relating to Hydraulic Cement*. PA, 2014.

AUROY, M.; POYET, S.; BESCOP, P. L.; TORRENTI, J.; CHARPENTIER, T.; MOSKURA, M.; BOURBON, X. *Impact of carbonation on unsaturated water transport properties of cement-based materials*. Cement and Concrete Research, v.74, p. 44-58, 2015.

BAHADOR, S.; JONG, H. C. *Effect of preconditioning of concrete under accelerated test*. Our World in Concrete and Structure, p.127-134, Singapore, 2006.

BAKKER, R.F.M. *Corrosion of Steel in Concrete*. Report of Technical Committee 60CSC RILEM. London: Chapman & Hall Ltda, 1988, p.22-55.

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

BAUER, F. L. A. *Materiais de Construção*. Ed. Livros Técnicos e Científicos Ltda, 5ª ed., V.1, 951 p., 1995.

BERNARDES, E. E. *Estudo da estrutura de poros de um compósito de matriz cimentícia por meio da microtomografia de raios X*. (Dissertação de Mestrado) 126 p.; Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

BERNAL, S. et al. *Natural carbonation of aged alkali-activated slag concretes*. Materials and Structures, v. 47, p. 693-707, 2014.

BEZERRA, U. T. *Compósitos Portland-Biopolímero para Cimentação de Poços de Petróleo*. (Tese de Doutorado) 278 p.; Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2006.

BOUNY, V. B.; CAPRA, B.; LAURENS, S. *A durabilidade das armaduras e do concreto de cobertura*. In: OLLIVIER, J. P.; VICHOT, A. *Durabilidade do Concreto: Bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente*. 615p.; Tradução OSWALDO CASCUDO e HELENA CARASEK. 1ª edição. São Paulo: IBRACON, 2014.

BRANDÃO, P.R.G. *Métodos de Instrumentação e Análise – Notas de aula*. Curso de pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e Minas, UFMG, Belo Horizonte, 2016.

CABRAL, A. E. B.; TORRES, J. R.; OURIVES, C. N. *Avaliação do uso de aditivo para impermeabilização por cristalização no concreto*. 9 p.; Maceió: IBRACON, Outubro, 2012.

CARNEIRO, P.; DULLIUS, J.; LIGABUE, R.; MACHADO, C.; KETZER, J.M; EINLOFT, S. *Carbonatação do Basalto e seu potencial uso no armazenamento de CO₂*. *Tecnol. Metal. Mater. Miner.*, São Paulo, v.10, n.1, p. 43-49, Janeiro-Março, 2013.

CAMPOS, C.A; LACERDA, E.; COTA, A.R; MAGALHAES, A.G. *Acompanhamento da variação do potencial hidrogeniônico decorrente da carbonatação de compósitos cimentícios produzidos com diferentes relações água/cimento*. 16 p.; Belo Horizonte: IBRACON, 2016.

CASCUDO, O. *O controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas*. Universidade Federal de Goiânia. Co-edição. São Paulo: Pini, 1997.

CASCUDO, O; CARASEK, H. *Ação da carbonatação no concreto*. In: ISAIA, G. C. (Ed.). *Concreto: Ciência e Tecnologia*. IBRACON, 2011.

CEN – COMMITTEE EUROPEAN NORM: *Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Test methods - Determination of carbonation depth in hardened concrete by the phenolphthalein method* (EN 14630:2006). Brussels, Belgium, 2006.

CHANG, J; FANG, Y. *Quantitative analysis of accelerated carbonation products of the synthetic calcium silicate hydrate (C-S-H) by QXRD and TG/MS*. *Journal of thermal analysis and calorimetry*, v. 119, p. 57-62, 2015.

CHEN, J.; KOU, C.; POON, C. *Hydration and properties of nano-TiO₂ blended cement composites*. *Cement & Concrete Composites*, v.34, p.642-649, 2012.

CNUDDÉ, V.; BOONE, M. N. *High-resolution X-ray computed tomography in geosciences: A review of the current technology and applications*. *Earth-Science Review*, p. 1-17, 2013.

COTA, A. *Influência do fator água/cimento no avanço da frente da carbonatação em compósitos cimentícios*. (Trabalho de Conclusão de Curso) 82 p.; Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2016.

CUI, H.; TANG, W.; LIU, W.; DONG, Z.; XING, F. *Experimental study on effects of CO₂ concentrations on concrete carbonation and diffusion mechanisms*. *Construction and Building Materials*, v.93, p.522-527, 2015.

DAL MOLIN, D. C. C. *Técnicas experimentais para o estudo da microestrutura*. In: ISAIA, G. C. (Ed.). *Materiais de construção civil e princípios de ciência dos materiais*. IBRACON, 2007.

DAL MOLIN, D. C. C. *Adições minerais*. In: ISAIA, G. C. (Ed.). *Concreto: ciência e tecnologia*. IBRACON, 2011.

EUROPEAN CEMENT STANDARDS. DD ENV 197-1. *Common cements*. 1995.

FIGUEIREDO, E.P. *Efeitos da carbonatação e de cloretos no concreto*, *Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações*. São Paulo: IBRACON, Cap. 27, p. 829 – 855, V. 2, ed. Geraldo C. Isaia, 2005.

FIGUEIREDO, E. P.; MEIRA, G. R. *Corrosão das armaduras das estruturas de concreto*. México: Boletim técnico ALCONPAT Internacional, v. 6, 2013.

GLASSER, F.P.; MATSCHEI. *Interactions between Portland cement and carbon dioxide*. 12th International Congress on the Chemistry of Cement. Anais. Montreal, 2007.

GRUYAERT, E; VAN DEN HEEDE, P; DE BELIE; N. *Carbonation of slag concrete: Effect of the cement replacement level and curing on the carbonation coefficient – Effect of carbonation on the pore structure*. *Cement & Concrete Composites*, v. 35, p. 39-48, 2013.

GUIA DE BOAS PRÁTICAS EM SUSTENTABILIDADE NA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO. Câmara Brasileira da Indústria da Construção; Serviço Social da Indústria; Nova Lima: Fundação Dom Cabral, 2012.

GUIA ORIENTATIVO PARA ATENDIMENTO À NORMA ABNT NBR 15575/2013: Desempenho de Edificações Habitacionais. Brasília, 2013.

HASTENPFLUG, D. *Emprego de aditivos em pastas de cimento para poços de hidrocarbonetos e injeção de CO₂: Influência na resistência à degradação por ataque ácido*. (Tese de Doutorado) 271 p.; Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

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

HEWLETT, P. C. *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, 5th edition, ed. Elsevier, Oxford, p. 324-334, 1998.

HIGUCHI, T; EGUCHI, M.; MORIOKA, M.; SAKAI, E. *Hydration and properties of expansive additive treated high temperature carbonation*. Cement and Concrete Research, v.64, p.11-16, 2014.

HOUST, Y. F.; WITTMANN, F. H. *Depth profiles of carbonates formed during natural carbonation*. Cement and Concrete Research, v. 32, n. 12, p. 1923-1930, 2002.

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

IONASHIRO, M. *Fundamentos da Termogravimetria*. 96 p. Giz Editorial. Araraquara, São Paulo, 2004.

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

ISAIA, G. C.; FURQUIM, P. R. V.; GASTALDINI, A. L. *Análise estatística de variáveis influentes na microestrutura e durabilidade de concretos com adições minerais*. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

ISHIDA, T.; MAEKAMA, K. *Modeling of pH profile in pore water based on mass transport and chemical equilibrium theory*. In: JSCE, 2000, Tokyo. Proceedings...Tokyo (Translation from Proceedings of JSCE, n. 648/V-47, May 2000). Disponível em: <<http://concrete.t.u-tokyo.ac.jp/en/demos/ducom/dutheory.html>>. Acesso em: Junho de 2017.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION: *Testing of concrete - Part 12: Determination of the carbonation resistance of concrete - accelerated carbonation method*. ISO 1920-12, First edition. Geneva, Switzerland, 2015.

JÚNIOR, L.A.M. *Carbonatação Natural de Protótipos de Concreto com Cinza de Casca de Arroz*. (Dissertação de Mestrado) 124 p.; Universidade Federal de Santa Maria, RS, 2010.

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

KOBUKU, M., NAGATAKI, S. *Carbonation of concrete with fly ash and corrosion of reinforcement in 20 years test*. In: MALHOTRA, V. M (ed.). International Conference on fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete, 3rd, Trondheim, 1989. Proceedings. Detroit: American Concrete Institute, 1989, 2 v., v. 1, p. 315-329 (SP-114).

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

KOLIO, A.; HONKANEN, M.; LAHDENSIVU, J.; VIPPOLA, M.; PENTTI, M. *Corrosion products of carbonation induced corrosion in existing reinforced concrete facades*. Cement and Concrete Research, v.78, p.200-207, 2015.

LACERDA, E. D. *Contribuição ao estudo do efeito do uso de aditivos incorporadores de ar no avanço da frente de carbonatação em compósitos de matriz cimentícia*. (Dissertação de Mestrado) 138 p.; Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

LEEMANN, A; KAUFMANN, J; NYGAARD, P.; LOSER, R. *Relation between carbonation resistance, mix design and exposure of mortar and concrete*. Cement & Concrete Composites. v. 62, p. 33-43, 2015.

LEMA, D.; MORAES, E. F. S.; OURIVES, C. N. *Durabilidade das estruturas pela impermeabilização por cristalização integral do concreto*. Concreto & Construções. Ed. 77, São Paulo, 2015.

LESTI, M.; TIEMEYER, C.; PLANK, J. *CO₂ stability of Portland cement based well cementing systems for use on carbon capture & storage (CCS) wells*. Cement and Concrete Research, 2013, v. 45, p. 45-54.

LI, G; YINGSHU, Y; JIANMIN, D.; YONGSHENG, J. *Determination of the apparent activation energy of concrete carbonation*. Journal of Wuhan University of Technology-Mater. v. 28, n. 5, p. 944-949, 2013.

LIMA, I.; APPOLONI, C. R.; OLIVEIRA, L. F.; LOPES, R. T. *Caracterização de Materiais Porosos Através da Microtomografia Computadorizada 3D*. ARC. Revista Brasileira de Arqueometria Restauração Conservação. Edição Especial. Nº 1. Março 2006. AERPA Editora. Resumo do III Simpósio de Técnicas Avançadas em Conservação de Bens Culturais, Olinda, 2006.

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.

LYDZBA, D.; RAJCZAKOWSKA, M.; STEFANIUK, D. *Identification of the Carbonation Zone in Concrete Using X-Ray Microtomography*. Studia Geotechnica et Mechanica, Vol. XXXVI, Nº. 1, 2014.

MAGALHÃES, A. G. *Caracterização e análise macro e microestrutural de concretos fabricados com cimentos contendo escórias de alto-forno*. (Tese de Doutorado) 238 p.; Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

MALISKA, A.M. *Apostila Microscopia Eletrônica de Varredura* – Universidade Federal de Santa Catarina – Departamento de Engenharia Mecânica – LABMAT, 2003.

MARTIN, J. F. M. Aditivos para Concreto. In: ISAIA, G. C. *CONCRETO. Ensino, Pesquisa e Realizações*. São Paulo, Instituto Brasileiro do Concreto IBRACON, vol. 1, 2005.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais*. 3ª ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MO, L.; PANESAR, D. K. *Effects of accelerated carbonation on the microstructure of Portland cement pastes containing reactive MgO*. Cement and Concrete Research, v. 42, p. 769-777, 2012.

MOHAMMED, M. K.; DAWSON, A. R.; THOM, N. H. *Production, microstructure and hydration of sustainable self-compacting concrete with different types of filler*. Construction and Building Materials, v. 49, p. 84-92, 2013.

MONTEIRO, E. C. B. *Estudo da capacidade de proteção de alguns tipos de cimentos nacionais, em relação à corrosão de armaduras sob a ação conjunta de CO₂ e íons cloretos*. (Dissertação de Mestrado) 138 p.; Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 1996.

MORAES, R. D. C. *Efeitos físico e pozolânico das adições minerais sobre a resistência mecânica do concreto*. (Dissertação de Mestrado) 165 p.; Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2001.

MORANDEAU, A.; THIÉRY, M.; DANGLA, P. *Investigation of the carbonation mechanism of CH and C-S-H in terms of kinetics, microstructure changes and moisture properties*. Cement and Concrete Research, v. 56, p. 153-170, 2014.

MOURA, M.J.; FIGUEIREDO, M.M., *Aplicação das Técnicas de Picnometria de Gás e de Porosimetria de Mercúrio à Caracterização da Madeira de E.globulus – Silva Lusitana* 10(2): 207-216, 2002. EFN, Lisboa. Portugal.

NEPOMUCENO, A. A. *Mecanismo de transporte de fluidos no concreto*. In: ISAIA, G. C. (Ed.). *Concreto: ensino, pesquisa e realizações*. IBRACON, 2005.

NEVILLE, A. M. *Propriedades do Concreto*. Tradução: Salvador E. Giammusso. 2ª edição. Revisão atual, São Paulo: Pini, 1997, 838 p.

NEVILLE, A. M. *Properties of Concrete*. 5th edition. Pearson Education Limited, Harlow, England, 2012. 872 p.

NUNES; D. G. *Carbonatação acelerada em concretos compostos com cinza de casca de arroz de diferentes teores de carbono grafítico*. (Dissertação de Mestrado) 149 p.; Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

PAPADAKIS, V. G.; VAYENAS, C. G.; FARDIS, M.N. *A reaction engineering approach to the problem of concrete carbonation*. AIChE Journal, v.35, n. 10, p.1639-1650, 1989.

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

PAPADAKIS, V. G. *Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress*. Cement and Concrete Research, v. 30, n. 2, p.291-299, Feb 2000.

PARROT, L. J. *A review of carbonation in reinforced concrete*. 40 p. London: Cement and Concrete Association, Building Research Station, 1987.

PAULETTI, C. *Análise comparativa de procedimentos para ensaios acelerados de carbonatação*. (Dissertação de mestrado) 176 p.; UFRGS, Porto Alegre, 2004.

PAULETTI, C. *Carbonatação acelerada: estado da arte das pesquisas no Brasil*. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 7, n. 4, p. 7-20, 2006.

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

PAULON, V. A. *A micro-estrutura do concreto convencional*. Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações. São Paulo: IBRACON, Cap. 19, p.582 – 604, ed. Geraldo C. Isaia, 2005.

PAULON, V; KIRCHHEIM, A. P. *Nanoestrutura e microestrutura do concreto endurecido*. In: ISAIA, G. C. (Ed.). Concreto: ciência e tecnologia. IBRACON, 2011.

PEREIRA, V. C. O.; MONTEIRO, E. C. B. *Avaliação da Capacidade de Proteção de Adições Mineraias em Relação à Corrosão de Armaduras devido à Carbonatação*. Revista Construindo, volume 3, 60 p.; Belo Horizonte, 2011.

POSSAN, E. *Contribuição ao estudo da carbonatação do concreto com adição de sílica ativa em ambiente natural e acelerado*. (Dissertação de Mestrado) 146 p.; 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*. (Tese de Doutorado) 263 p.; Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2010.

PU, Q.; JIANG, L.; XU, J.; XU, Y.; ZHANG, Y. Evolution of pH and chemical composition of pore solution in carbonated concrete. *Construction and Building Materials*, 2012: v.28, p.519–524.

RABEHI, M; MEZGHICHE, B; GUETTALA. S. *Correlation between initial absorption of the cover concrete, the compressive strength and carbonation depth*. Construction and Building Materials, v.45, p. 123-129, 2013.

RAISDORFER, J. W. *Influência da adição ou substituição de adições mineraias ao cimento Portland: efeitos na carbonatação, absorção capilar e resistividade de concretos*. (Dissertação de Mestrado) 151 p.; Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

RIBEIRO, D.V. *Corrosão em estruturas de concreto armado*. Elsevier Editora LTDA, 1ª edição, Rio de Janeiro: 2014.

RIGO DA SILVA, C. A. *Desenvolvimento e Aplicação de uma Metodologia para Caracterização e Análise Estrutural de Concretos de Cimento Portland*. (Tese de Doutorado) 410 p.; Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Minas – Escola de Engenharia da UFMG. Belo Horizonte, Brasil, 1998.

RILEM CPC-18: *Measurement of hardened concrete carbonation depth*. Materials and Structures, (s. n.), p. 453-455, 1988.

RILEM TC 116-PCD: *Permeability of concrete as a criterion of its durability: tests for gas permeability of concrete*. Materials and Structures, v. 32, p. 174-179, April, 1999.

ROSTAMI, V.; SHAO, Y.; BOYD, A.J.; HE, Z. *Microstructure of cement paste subject to early carbonation curing*. Cement and Concrete Research, v.42, p.186-193, January, 2012.

ROY, S.K.; BENG, P.K.; NORTHWOOD, D.O. *The carbonation of concrete structures in the tropical environment of Singapore and a comparison with published data for temperate climates*. Magazine of Concrete Research, 1996.

SAETTA A. V.; VITALIANI, R. V. *Investigation and numerical modeling of carbonation process in reinforced concrete Structures. Part I: Theoretical formulation*. Cement and Concrete Research, v. 34, n.4, p. 571-579, April, 2004.

SAEKI, T.; OHGA, H.; NAGATAKI, S. *Mechanism of carbonation and prediction of carbonation process of concrete*. Concrete Library of J.S.C.E., 12 (414): 23-26, 1971 *apud* SIMAS, M. S. L. *Sistemas de protecção do betão face à carbonatação*. (Dissertação de Mestrado) 81p.; Universidade Técnica de Lisboa, 2007.

SATO, N.M.N. *Análise da porosidade e de propriedades de transporte de massa em concretos*. (Tese de Doutorado) 163 p.; Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

SILVA, P. F. A. *Durabilidade das estruturas de concreto aparente em atmosfera urbana*. 152 p.; São Paulo: PINI, 1995.

SILVA, V. M. *Ação da carbonatação em vigas de concreto armado em serviço, construídas em escala natural e reduzida*. (Tese de Doutorado) 306 p.; Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

SIMAS, M. S. L. *Sistemas de protecção do betão face à carbonatação*. (Dissertação de Mestrado) 81 p.; Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2007.

SKOOG, A.D.; HOLLER, F.J.; NIEMAN, T.A. *Princípios de Análise Instrumental*. 5ª ed. Porto Alegre, 2002.

STEIN, R. T. *Características de pastas de cimento Portland com adição de cinza de lodo de ETA*. (Dissertação de Mestrado) 158 p.; Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

STROEVEN, P; HU, J; KOLEVA D. A. *Concrete porosimetry: aspects of feasibility, reliability and economy*. Cement & concrete composites, v. 32, p. 291-299, 2010.

TAKAGI, E.M.; JÚNIOR, W. A.; OLIVEIRA, F. S. *Tratamento químico cristalizante para impermeabilização e proteção de estruturas de concreto armado*. São Paulo: IBRACON, 2004.

TASCA, M. *Estudo da carbonatação natural de concretos com pozolanas: monitoramento em longo prazo e análise da microestrutura*. (Dissertação de Mestrado) 179 p.; Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2012.

THIERY, M.; DANGLA, P.; VILLAIN, G.; PLATRET, G.A. *A prediction model for concrete carbonation based on coupled CO₂ – H₂O-ions transfers and chemical reactions*. TT1-58. Lyon, 2005.

TUUTTI, K. *Corrosion steel in concrete*. 469 p.; Swedish Cementer and Concrete, Stockholm, 1982.

VAGHETTI, M. A. O. *Efeitos da cinza volante com cinza de casca de arroz ou sílica ativa sobre a carbonatação do concreto com cimento Portland*. (Dissertação de Mestrado) 113 p.; Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1999.

VENQUIARUTO, S. D. *A influência da finura e do teor de adições minerais na carbonatação do concreto*. (Dissertação de Mestrado) 135 p.; Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2002.

VERBECK, G. J.; FOSTER, C. W. *Long-Time of Cement Performance in Concrete: The Heats of Hydration of the Cements*. ASTM. Califórnia, vol. 50, 1950 *apud* VENUAT, A. M.; ALEXANDRE, J. *De la carbonatation du béton*. Publication du CERILH. Revue des Materiaux de Construction, 1968, França. Publication n° 640, 30 p. 1969.

ZENG, Q.; LI, K.; FEN-CHONG, T.; DANGLA, P. *Pore structure characterization of cement pastes blended with high-volume fly-ash*. Cement and concrete research, v. 42, p. 194-204, 2012.

WOLF, J.; DAL MOLIN, D.C.C. *Carbonatação de argamassas e concretos*. In: Simpósio sobre Patologia Das Edificações: Prevenção e recuperação. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1989.

7

APÊNDICE A

Para monitorar a perda e equilibrar a umidade dos CPs utilizados para os traços no estudo de carbonatação antes de inseri-los na câmara de CO₂, foram realizadas medições geométricas após o processo de desforma e pesagens ao longo do processo de condicionamento.

As Tabelas 33 e 34 apresentam, respectivamente, as dimensões geométricas médias e o volume obtido de cada CP cilíndrico (5 x 10) cm utilizado na pesquisa nas dosagens 0,55 e 0,65.

As Tabelas 35 e 36 apresentam, respectivamente, as dimensões geométricas médias e o volume obtido de cada CP prismático (5 x 10) cm utilizado na pesquisa nas dosagens 0,55 e 0,65.

As Tabelas 37 e 38 expressam, respectivamente, as massas obtidas de cada CP cilíndrico (5 x 10) cm, findo os processos de cura submersa em água e de condicionamento, nas dosagens 0,55 e 0,65. A última coluna de ambas as Tabelas, apresenta o percentual de perda de massa de cada CP, obtido ao longo do período dos processos mencionados.

As Tabelas 39 e 40 expressam, respectivamente, as massas obtidas de cada CP prismático (5 x 10) cm, findo os processos de cura submersa em água e de condicionamento, nas dosagens 0,55 e 0,65. A última coluna de ambas as Tabelas, apresenta o percentual de perda de massa de cada CP, obtido ao longo do período dos processos mencionados.

A Tabelas 41 e 42 apresentam, respectivamente, a média e o percentual de redução das massas por traço dos CPs cilíndricos e prismáticos (5 x 10) cm.

Tabela 33 – Dimensões geométricas médias e volume dos CPs cilíndricos (5 x 10) cm na dosagem 0,55 aferidas após o processo de desforma

Traço	CP	Diâmetro Médio (cm)	Altura Média (cm)	Volume (cm³)
0,55 (Referência)	01	4,99 ± 0,05	10,02 ± 0,05	196,2 ± 0,5
0,55 (Referência)	02	4,96 ± 0,05	10,01 ± 0,05	193,6 ± 0,5
0,55 (Referência)	03	4,97 ± 0,05	10,14 ± 0,05	196,8 ± 0,5
0,55 (Referência)	04	5,00 ± 0,05	10,02 ± 0,05	196,6 ± 0,5
0,55 (Referência)	05	4,98 ± 0,05	10,04 ± 0,05	195,4 ± 0,5
0,55 (Referência)	06	4,98 ± 0,05	10,02 ± 0,05	194,8 ± 0,5
0,55 (Referência)	07	4,97 ± 0,05	10,04 ± 0,05	195,1 ± 0,5
0,55 (Referência)	08	4,96 ± 0,05	10,01 ± 0,05	193,2 ± 0,5
0,55 (Referência)	09	4,98 ± 0,05	10,04 ± 0,05	195,6 ± 0,5
0,55 (Referência)	10	4,98 ± 0,05	10,03 ± 0,05	195,8 ± 0,5
0,55 (Referência)	11	4,99 ± 0,05	10,01 ± 0,05	195,5 ± 0,5
0,55 (Referência)	12	4,98 ± 0,05	10,06 ± 0,05	194,9 ± 0,5
0,55 (Referência)	13	4,97 ± 0,05	10,01 ± 0,05	194,6 ± 0,5
0,55 (Referência)	14	4,99 ± 0,05	10,02 ± 0,05	195,7 ± 0,5
0,55 (Referência)	15	4,98 ± 0,05	10,01 ± 0,05	195,2 ± 0,5
0,55 (Aditivo A)	16	4,96 ± 0,05	10,02 ± 0,05	193,9 ± 0,5
0,55 (Aditivo A)	17	4,98 ± 0,05	9,98 ± 0,05	194,3 ± 0,5
0,55 (Aditivo A)	18	4,99 ± 0,05	9,98 ± 0,05	195,6 ± 0,5
0,55 (Aditivo A)	19	5,01 ± 0,05	10,00 ± 0,05	197,0 ± 0,5
0,55 (Aditivo A)	20	4,98 ± 0,05	10,04 ± 0,05	195,8 ± 0,5
0,55 (Aditivo A)	21	5,01 ± 0,05	10,06 ± 0,05	198,4 ± 0,5
0,55 (Aditivo A)	22	5,01 ± 0,05	10,08 ± 0,05	198,8 ± 0,5
0,55 (Aditivo A)	23	4,99 ± 0,05	10,00 ± 0,05	195,8 ± 0,5
0,55 (Aditivo A)	24	5,00 ± 0,05	10,06 ± 0,05	197,6 ± 0,5
0,55 (Aditivo A)	25	4,99 ± 0,05	9,96 ± 0,05	194,4 ± 0,5
0,55 (Aditivo A)	26	5,02 ± 0,05	10,07 ± 0,05	199,2 ± 0,5
0,55 (Aditivo A)	27	4,99 ± 0,05	9,92 ± 0,05	193,9 ± 0,5
0,55 (Aditivo A)	28	4,97 ± 0,05	10,05 ± 0,05	195,1 ± 0,5
0,55 (Aditivo A)	29	4,98 ± 0,05	10,07 ± 0,05	196,1 ± 0,5
0,55 (Aditivo A)	30	4,97 ± 0,05	10,05 ± 0,05	194,8 ± 0,5
0,55 (Aditivo B)	31	4,98 ± 0,05	10,04 ± 0,05	195,7 ± 0,5
0,55 (Aditivo B)	32	4,98 ± 0,05	10,06 ± 0,05	195,7 ± 0,5
0,55 (Aditivo B)	33	5,01 ± 0,05	9,92 ± 0,05	195,6 ± 0,5
0,55 (Aditivo B)	34	4,98 ± 0,05	10,01 ± 0,05	194,6 ± 0,5
0,55 (Aditivo B)	35	5,00 ± 0,05	10,08 ± 0,05	198,0 ± 0,5
0,55 (Aditivo B)	36	4,98 ± 0,05	9,97 ± 0,05	193,9 ± 0,5
0,55 (Aditivo B)	37	5,00 ± 0,05	10,03 ± 0,05	196,6 ± 0,5
0,55 (Aditivo B)	38	5,00 ± 0,05	9,96 ± 0,05	195,4 ± 0,5
0,55 (Aditivo B)	39	4,97 ± 0,05	9,98 ± 0,05	193,7 ± 0,5
0,55 (Aditivo B)	40	5,00 ± 0,05	10,05 ± 0,05	197,4 ± 0,5
0,55 (Aditivo B)	41	5,00 ± 0,05	9,94 ± 0,05	194,9 ± 0,5
0,55 (Aditivo B)	42	4,99 ± 0,05	10,01 ± 0,05	196,1 ± 0,5
0,55 (Aditivo B)	43	4,99 ± 0,05	9,99 ± 0,05	195,6 ± 0,5
0,55 (Aditivo B)	44	4,98 ± 0,05	10,01 ± 0,05	195,0 ± 0,5
0,55 (Aditivo B)	45	5,01 ± 0,05	10,01 ± 0,05	197,5 ± 0,5

Tabela 34 – Dimensões geométricas médias e volume dos CPs cilíndricos (5 x 10) cm na dosagem 0,65 aferidas após o processo de desforma

Traço	CP	Diâmetro Médio (cm)	Altura Média (cm)	Volume (cm³)
0,65 (Referência)	01	4,97 ± 0,05	9,98 ± 0,05	193,8 ± 0,5
0,65 (Referência)	02	4,99 ± 0,05	9,92 ± 0,05	193,9 ± 0,5
0,65 (Referência)	03	4,96 ± 0,05	9,95 ± 0,05	192,5 ± 0,5
0,65 (Referência)	04	4,97 ± 0,05	9,88 ± 0,05	191,9 ± 0,5
0,65 (Referência)	05	4,98 ± 0,05	9,87 ± 0,05	192,1 ± 0,5
0,65 (Referência)	06	4,97 ± 0,05	9,84 ± 0,05	191,0 ± 0,5
0,65 (Referência)	07	4,98 ± 0,05	9,71 ± 0,05	188,9 ± 0,5
0,65 (Referência)	08	4,98 ± 0,05	9,99 ± 0,05	194,7 ± 0,5
0,65 (Referência)	09	4,98 ± 0,05	9,84 ± 0,05	191,7 ± 0,5
0,65 (Referência)	10	4,97 ± 0,05	9,86 ± 0,05	191,6 ± 0,5
0,65 (Referência)	11	4,98 ± 0,05	9,84 ± 0,05	191,5 ± 0,5
0,65 (Referência)	12	4,99 ± 0,05	9,95 ± 0,05	194,4 ± 0,5
0,65 (Referência)	13	4,98 ± 0,05	9,92 ± 0,05	193,5 ± 0,5
0,65 (Referência)	14	4,98 ± 0,05	9,86 ± 0,05	191,9 ± 0,5
0,65 (Referência)	15	4,98 ± 0,05	9,96 ± 0,05	194,0 ± 0,5
0,65 (Aditivo A)	16	4,99 ± 0,05	9,97 ± 0,05	195,0 ± 0,5
0,65 (Aditivo A)	17	4,96 ± 0,05	9,95 ± 0,05	191,9 ± 0,5
0,65 (Aditivo A)	18	4,99 ± 0,05	9,98 ± 0,05	195,3 ± 0,5
0,65 (Aditivo A)	19	4,98 ± 0,05	9,94 ± 0,05	193,8 ± 0,5
0,65 (Aditivo A)	20	4,99 ± 0,05	9,99 ± 0,05	195,4 ± 0,5
0,65 (Aditivo A)	21	5,00 ± 0,05	9,97 ± 0,05	196,1 ± 0,5
0,65 (Aditivo A)	22	4,99 ± 0,05	9,85 ± 0,05	193,0 ± 0,5
0,65 (Aditivo A)	23	4,99 ± 0,05	9,98 ± 0,05	195,6 ± 0,5
0,65 (Aditivo A)	24	4,96 ± 0,05	9,97 ± 0,05	192,6 ± 0,5
0,65 (Aditivo A)	25	4,97 ± 0,05	9,99 ± 0,05	193,9 ± 0,5
0,65 (Aditivo A)	26	4,98 ± 0,05	9,91 ± 0,05	193,1 ± 0,5
0,65 (Aditivo A)	27	4,96 ± 0,05	10,09 ± 0,05	194,8 ± 0,5
0,65 (Aditivo A)	28	4,99 ± 0,05	10,01 ± 0,05	195,9 ± 0,5
0,65 (Aditivo A)	29	5,00 ± 0,05	9,94 ± 0,05	194,9 ± 0,5
0,65 (Aditivo A)	30	4,99 ± 0,05	9,99 ± 0,05	195,0 ± 0,5
0,65 (Aditivo B)	31	4,96 ± 0,05	9,89 ± 0,05	191,0 ± 0,5
0,65 (Aditivo B)	32	4,98 ± 0,05	9,94 ± 0,05	193,6 ± 0,5
0,65 (Aditivo B)	33	4,99 ± 0,05	9,95 ± 0,05	194,3 ± 0,5
0,65 (Aditivo B)	34	4,99 ± 0,05	9,98 ± 0,05	195,4 ± 0,5
0,65 (Aditivo B)	35	4,97 ± 0,05	9,93 ± 0,05	192,5 ± 0,5
0,65 (Aditivo B)	36	4,97 ± 0,05	9,99 ± 0,05	194,2 ± 0,5
0,65 (Aditivo B)	37	5,01 ± 0,05	9,99 ± 0,05	197,0 ± 0,5
0,65 (Aditivo B)	38	4,95 ± 0,05	10,09 ± 0,05	194,3 ± 0,5
0,65 (Aditivo B)	39	4,99 ± 0,05	10,02 ± 0,05	195,6 ± 0,5
0,65 (Aditivo B)	40	5,00 ± 0,05	9,94 ± 0,05	195,1 ± 0,5
0,65 (Aditivo B)	41	4,98 ± 0,05	9,86 ± 0,05	192,3 ± 0,5
0,65 (Aditivo B)	42	4,97 ± 0,05	9,95 ± 0,05	192,7 ± 0,5
0,65 (Aditivo B)	43	4,98 ± 0,05	9,94 ± 0,05	194,1 ± 0,5
0,65 (Aditivo B)	44	4,99 ± 0,05	9,88 ± 0,05	193,1 ± 0,5
0,65 (Aditivo B)	45	4,99 ± 0,05	9,99 ± 0,05	195,0 ± 0,5

Tabela 35 – Dimensões geométricas médias e volume dos CPs prismáticos (5 x 10) cm na dosagem 0,55 aferidas após o processo de desforma

Traço	CP	Comp. Médio (cm)	Larg. Média (cm)	Altura Média (cm)	Volume (cm³)
0,55 (Referência)	01	10,05 ± 0,05	5,05 ± 0,05	5,01 ± 0,05	253,9 ± 3,4
0,55 (Referência)	02	10,05 ± 0,05	5,02 ± 0,05	5,06 ± 0,05	255,2 ± 1,7
0,55 (Referência)	03	10,06 ± 0,05	5,02 ± 0,05	5,01 ± 0,05	252,8 ± 2,9
0,55 (Referência)	04	10,06 ± 0,05	5,01 ± 0,05	5,04 ± 0,05	253,7 ± 2,3
0,55 (Referência)	05	10,05 ± 0,05	5,04 ± 0,05	4,98 ± 0,05	252,1 ± 1,4
0,55 (Referência)	06	10,07 ± 0,05	5,02 ± 0,05	5,00 ± 0,07	253,0 ± 4,1
0,55 (Referência)	07	10,07 ± 0,05	5,00 ± 0,05	5,00 ± 0,05	252,0 ± 2,7
0,55 (Referência)	08	10,07 ± 0,05	5,01 ± 0,05	4,96 ± 0,05	250,5 ± 2,4
0,55 (Referência)	09	10,03 ± 0,05	5,02 ± 0,05	5,03 ± 0,05	252,8 ± 1,4
0,55 (Referência)	10	10,08 ± 0,05	5,02 ± 0,05	5,05 ± 0,05	255,6 ± 2,4
0,55 (Referência)	11	10,10 ± 0,05	5,02 ± 0,05	5,06 ± 0,05	256,6 ± 3,2
0,55 (Referência)	12	10,11 ± 0,05	4,99 ± 0,05	5,10 ± 0,05	257,7 ± 2,3
0,55 (Referência)	13	10,04 ± 0,05	5,03 ± 0,05	5,05 ± 0,05	254,7 ± 1,8
0,55 (Referência)	14	10,06 ± 0,05	5,02 ± 0,05	5,08 ± 0,05	256,6 ± 1,6
0,55 (Referência)	15	10,06 ± 0,05	5,02 ± 0,05	5,08 ± 0,05	256,5 ± 3,0
0,55 (Aditivo A)	16	10,06 ± 0,05	5,04 ± 0,05	5,06 ± 0,05	256,3 ± 2,6
0,55 (Aditivo A)	17	10,06 ± 0,05	5,04 ± 0,05	5,08 ± 0,05	257,6 ± 2,4
0,55 (Aditivo A)	18	10,06 ± 0,05	5,01 ± 0,05	5,01 ± 0,05	252,6 ± 1,7
0,55 (Aditivo A)	19	10,04 ± 0,05	5,00 ± 0,05	5,06 ± 0,05	254,0 ± 0,4
0,55 (Aditivo A)	20	10,07 ± 0,05	5,04 ± 0,05	5,09 ± 0,05	258,1 ± 1,9
0,55 (Aditivo A)	21	10,08 ± 0,05	5,02 ± 0,05	5,02 ± 0,05	253,8 ± 2,0
0,55 (Aditivo A)	22	10,08 ± 0,05	5,01 ± 0,05	5,05 ± 0,05	255,3 ± 2,1
0,55 (Aditivo A)	23	10,08 ± 0,05	5,02 ± 0,05	5,02 ± 0,05	254,1 ± 3,3
0,55 (Aditivo A)	24	10,05 ± 0,05	5,01 ± 0,05	5,07 ± 0,05	255,1 ± 2,2
0,55 (Aditivo A)	25	10,07 ± 0,05	5,03 ± 0,05	5,06 ± 0,05	256,4 ± 1,9
0,55 (Aditivo A)	26	10,09 ± 0,05	5,03 ± 0,05	5,08 ± 0,05	257,5 ± 2,4
0,55 (Aditivo A)	27	10,11 ± 0,05	4,98 ± 0,05	5,08 ± 0,05	256,0 ± 1,6
0,55 (Aditivo A)	28	10,07 ± 0,05	5,01 ± 0,05	5,07 ± 0,05	255,3 ± 1,2
0,55 (Aditivo A)	29	10,07 ± 0,05	5,03 ± 0,05	5,06 ± 0,05	256,6 ± 2,2
0,55 (Aditivo A)	30	10,07 ± 0,05	5,01 ± 0,05	5,07 ± 0,05	256,0 ± 2,2
0,55 (Aditivo B)	31	10,06 ± 0,05	5,05 ± 0,05	4,98 ± 0,05	253,3 ± 2,1
0,55 (Aditivo B)	32	10,07 ± 0,05	5,02 ± 0,05	4,94 ± 0,05	250,0 ± 2,9
0,55 (Aditivo B)	33	10,06 ± 0,05	5,02 ± 0,05	4,91 ± 0,05	247,9 ± 1,4
0,55 (Aditivo B)	34	10,06 ± 0,05	4,99 ± 0,05	5,00 ± 0,05	250,6 ± 2,2
0,55 (Aditivo B)	35	10,03 ± 0,05	5,02 ± 0,05	5,04 ± 0,05	253,8 ± 3,6
0,55 (Aditivo B)	36	10,06 ± 0,05	5,01 ± 0,05	5,06 ± 0,05	255,3 ± 3,0
0,55 (Aditivo B)	37	10,07 ± 0,05	5,03 ± 0,05	5,00 ± 0,05	253,2 ± 2,1
0,55 (Aditivo B)	38	10,08 ± 0,05	4,98 ± 0,05	4,99 ± 0,05	250,6 ± 3,0
0,55 (Aditivo B)	39	10,05 ± 0,05	4,99 ± 0,05	5,01 ± 0,05	251,4 ± 1,6
0,55 (Aditivo B)	40	10,06 ± 0,05	5,01 ± 0,05	5,02 ± 0,05	252,9 ± 1,5
0,55 (Aditivo B)	41	10,05 ± 0,05	5,04 ± 0,05	4,96 ± 0,05	251,1 ± 1,8
0,55 (Aditivo B)	42	10,05 ± 0,05	5,05 ± 0,05	4,96 ± 0,05	251,7 ± 1,3
0,55 (Aditivo B)	43	10,03 ± 0,05	5,03 ± 0,05	5,15 ± 0,05	260,0 ± 3,8
0,55 (Aditivo B)	44	10,05 ± 0,05	5,02 ± 0,05	5,15 ± 0,05	260,2 ± 3,6
0,55 (Aditivo B)	45	10,06 ± 0,05	4,98 ± 0,05	5,12 ± 0,05	256,5 ± 2,8

Tabela 36 – Dimensões geométricas médias e volume dos CPs prismáticos (5 x 10) cm na dosagem 0,65 aferidas após o processo de desforma

Traço	CP	Comp. Médio (cm)	Larg. Média (cm)	Altura Média (cm)	Volume (cm ³)
0,65 (Referência)	01	10,06 ± 0,05	5,05 ± 0,05	4,91 ± 0,05	249,3 ± 2,7
0,65 (Referência)	02	10,06 ± 0,05	5,03 ± 0,05	5,02 ± 0,05	254,0 ± 2,6
0,65 (Referência)	03	10,07 ± 0,05	5,02 ± 0,05	5,05 ± 0,05	255,1 ± 2,9
0,65 (Referência)	04	10,07 ± 0,05	5,01 ± 0,05	5,03 ± 0,08	254,0 ± 5,1
0,65 (Referência)	05	10,04 ± 0,05	4,98 ± 0,05	4,96 ± 0,05	247,7 ± 1,9
0,65 (Referência)	06	10,05 ± 0,05	5,02 ± 0,05	4,90 ± 0,05	247,3 ± 2,2
0,65 (Referência)	07	10,06 ± 0,05	5,03 ± 0,05	4,86 ± 0,05	245,7 ± 1,7
0,65 (Referência)	08	10,07 ± 0,05	5,04 ± 0,05	4,91 ± 0,06	249,1 ± 4,2
0,65 (Referência)	09	10,02 ± 0,05	5,02 ± 0,05	5,07 ± 0,06	254,7 ± 3,8
0,65 (Referência)	10	10,08 ± 0,05	5,02 ± 0,05	5,06 ± 0,05	256,2 ± 3,6
0,65 (Referência)	11	10,09 ± 0,05	4,97 ± 0,05	5,04 ± 0,06	252,7 ± 3,7
0,65 (Referência)	12	10,08 ± 0,05	5,03 ± 0,05	5,07 ± 0,05	256,7 ± 2,5
0,65 (Referência)	13	10,05 ± 0,05	5,01 ± 0,05	5,09 ± 0,05	256,4 ± 2,2
0,65 (Referência)	14	10,05 ± 0,05	5,03 ± 0,05	5,07 ± 0,05	256,2 ± 1,2
0,65 (Referência)	15	10,06 ± 0,05	4,98 ± 0,05	5,06 ± 0,05	253,7 ± 2,4
0,65 (Aditivo A)	16	10,04 ± 0,05	5,04 ± 0,05	5,00 ± 0,09	253,4 ± 5,5
0,65 (Aditivo A)	17	10,04 ± 0,05	5,02 ± 0,05	5,04 ± 0,05	253,9 ± 2,6
0,65 (Aditivo A)	18	10,06 ± 0,05	5,01 ± 0,05	5,01 ± 0,05	253,5 ± 2,7
0,65 (Aditivo A)	19	10,07 ± 0,05	5,01 ± 0,05	5,01 ± 0,05	256,4 ± 3,6
0,65 (Aditivo A)	20	10,04 ± 0,05	5,03 ± 0,05	5,03 ± 0,05	250,3 ± 2,3
0,65 (Aditivo A)	21	10,09 ± 0,05	5,03 ± 0,05	5,03 ± 0,05	252,8 ± 2,7
0,65 (Aditivo A)	22	10,06 ± 0,05	5,01 ± 0,05	5,01 ± 0,05	251,8 ± 1,2
0,65 (Aditivo A)	23	10,06 ± 0,05	5,02 ± 0,05	5,02 ± 0,05	254,5 ± 1,5
0,65 (Aditivo A)	24	10,03 ± 0,05	5,01 ± 0,05	5,01 ± 0,05	255,0 ± 1,5
0,65 (Aditivo A)	25	10,05 ± 0,05	5,02 ± 0,05	5,02 ± 0,09	250,2 ± 4,5
0,65 (Aditivo A)	26	10,07 ± 0,05	5,02 ± 0,05	5,02 ± 0,08	248,4 ± 5,4
0,65 (Aditivo A)	27	10,06 ± 0,05	4,97 ± 0,05	4,97 ± 0,05	251,3 ± 1,7
0,65 (Aditivo A)	28	10,06 ± 0,05	4,93 ± 0,05	5,05 ± 0,05	250,4 ± 2,0
0,65 (Aditivo A)	29	10,06 ± 0,05	5,00 ± 0,05	5,06 ± 0,05	254,6 ± 2,0
0,65 (Aditivo A)	30	10,07 ± 0,05	5,00 ± 0,05	5,06 ± 0,05	254,7 ± 1,0
0,65 (Aditivo B)	31	10,08 ± 0,05	5,05 ± 0,05	4,97 ± 0,05	252,8 ± 3,1
0,65 (Aditivo B)	32	10,09 ± 0,05	5,01 ± 0,05	4,90 ± 0,07	248,0 ± 3,6
0,65 (Aditivo B)	33	10,08 ± 0,05	5,04 ± 0,05	4,89 ± 0,06	248,6 ± 3,3
0,65 (Aditivo B)	34	10,06 ± 0,05	4,99 ± 0,05	4,92 ± 0,07	246,8 ± 4,1
0,65 (Aditivo B)	35	10,06 ± 0,05	4,99 ± 0,05	5,04 ± 0,07	252,6 ± 4,4
0,65 (Aditivo B)	36	10,06 ± 0,05	5,01 ± 0,05	5,04 ± 0,05	254,2 ± 1,4
0,65 (Aditivo B)	37	10,04 ± 0,05	5,02 ± 0,05	5,03 ± 0,05	253,8 ± 1,4
0,65 (Aditivo B)	38	10,05 ± 0,05	5,05 ± 0,05	5,02 ± 0,05	254,9 ± 1,3
0,65 (Aditivo B)	39	10,04 ± 0,05	5,02 ± 0,05	5,00 ± 0,10	252,1 ± 6,7
0,65 (Aditivo B)	40	10,06 ± 0,05	5,02 ± 0,05	5,06 ± 0,05	255,4 ± 1,9
0,65 (Aditivo B)	41	10,07 ± 0,05	5,03 ± 0,05	5,00 ± 0,06	253,3 ± 4,0
0,65 (Aditivo B)	42	10,09 ± 0,05	5,00 ± 0,05	4,96 ± 0,05	250,2 ± 3,4
0,65 (Aditivo B)	43	10,07 ± 0,05	5,00 ± 0,05	5,05 ± 0,05	254,1 ± 1,6
0,65 (Aditivo B)	44	10,03 ± 0,05	4,95 ± 0,05	5,07 ± 0,05	251,6 ± 1,9
0,65 (Aditivo B)	45	10,05 ± 0,05	4,97 ± 0,05	5,06 ± 0,05	253,0 ± 2,3

Tabela 37 – Massa dos CPs cilíndricos (5 x 10) cm na dosagem 0,55 pós períodos de cura e condicionamento

Traço	CP	Massa Pós Cura (g)	Massa Pós Pre- condicion. (g)	Redução de massa (%)
0,55 (Referência)	01	431,07 ± 0,01	423,36 ± 0,01	1,8
0,55 (Referência)	02	427,11 ± 0,01	416,49 ± 0,01	2,5
0,55 (Referência)	03	434,63 ± 0,01	425,53 ± 0,01	2,1
0,55 (Referência)	04	430,43 ± 0,01	421,53 ± 0,01	2,1
0,55 (Referência)	05	429,64 ± 0,01	420,77 ± 0,01	2,1
0,55 (Referência)	06	429,62 ± 0,01	420,97 ± 0,01	2,0
0,55 (Referência)	07	427,33 ± 0,01	418,18 ± 0,01	2,2
0,55 (Referência)	08	429,37 ± 0,01	420,52 ± 0,01	2,1
0,55 (Referência)	09	426,41 ± 0,01	417,78 ± 0,01	2,1
0,55 (Referência)	10	430,88 ± 0,01	421,67 ± 0,01	2,2
0,55 (Referência)	11	428,40 ± 0,01	418,92 ± 0,01	2,3
0,55 (Referência)	12	429,56 ± 0,01	421,14 ± 0,01	2,0
0,55 (Referência)	13	430,87 ± 0,01	422,71 ± 0,01	1,9
0,55 (Referência)	14	426,68 ± 0,01	418,37 ± 0,01	2,0
0,55 (Referência)	15	428,46 ± 0,01	420,11 ± 0,01	2,0
0,55 (Aditivo A)	16	432,09 ± 0,01	425,91 ± 0,01	1,4
0,55 (Aditivo A)	17	428,18 ± 0,01	422,14 ± 0,01	1,4
0,55 (Aditivo A)	18	430,98 ± 0,01	424,05 ± 0,01	1,6
0,55 (Aditivo A)	19	432,51 ± 0,01	425,09 ± 0,01	1,7
0,55 (Aditivo A)	20	432,65 ± 0,01	425,69 ± 0,01	1,6
0,55 (Aditivo A)	21	435,81 ± 0,01	429,05 ± 0,01	1,6
0,55 (Aditivo A)	22	431,39 ± 0,01	424,39 ± 0,01	1,6
0,55 (Aditivo A)	23	434,13 ± 0,01	426,84 ± 0,01	1,7
0,55 (Aditivo A)	24	434,74 ± 0,01	427,18 ± 0,01	1,8
0,55 (Aditivo A)	25	428,23 ± 0,01	419,75 ± 0,01	2,0
0,55 (Aditivo A)	26	432,06 ± 0,01	424,03 ± 0,01	1,9
0,55 (Aditivo A)	27	429,61 ± 0,01	421,18 ± 0,01	2,0
0,55 (Aditivo A)	28	432,36 ± 0,01	423,14 ± 0,01	2,2
0,55 (Aditivo A)	29	435,01 ± 0,01	426,62 ± 0,01	2,0
0,55 (Aditivo A)	30	431,30 ± 0,01	421,32 ± 0,01	2,3
0,55 (Aditivo B)	31	429,24 ± 0,01	422,31 ± 0,01	1,6
0,55 (Aditivo B)	32	430,41 ± 0,01	422,96 ± 0,01	1,8
0,55 (Aditivo B)	33	424,84 ± 0,01	416,14 ± 0,01	2,1
0,55 (Aditivo B)	34	427,03 ± 0,01	419,09 ± 0,01	1,9
0,55 (Aditivo B)	35	428,04 ± 0,01	419,47 ± 0,01	2,0
0,55 (Aditivo B)	36	425,55 ± 0,01	417,62 ± 0,01	1,9
0,55 (Aditivo B)	37	429,03 ± 0,01	420,95 ± 0,01	1,9
0,55 (Aditivo B)	38	426,73 ± 0,01	418,05 ± 0,01	2,1
0,55 (Aditivo B)	39	426,92 ± 0,01	418,13 ± 0,01	2,1
0,55 (Aditivo B)	40	429,75 ± 0,01	421,79 ± 0,01	1,9
0,55 (Aditivo B)	41	426,65 ± 0,01	418,81 ± 0,01	1,9
0,55 (Aditivo B)	42	428,43 ± 0,01	420,70 ± 0,01	1,8
0,55 (Aditivo B)	43	430,34 ± 0,01	422,36 ± 0,01	1,9
0,55 (Aditivo B)	44	429,08 ± 0,01	421,09 ± 0,01	1,9
0,55 (Aditivo B)	45	431,55 ± 0,01	423,90 ± 0,01	1,8

Tabela 38 – Massa dos CPs cilíndricos (5 x 10) cm na dosagem 0,65 pós períodos de cura e condicionamento

Traço	CP	Massa Pós Cura (g)	Massa Pós Pre-condicion. (g)	Redução de massa (%)
0,65 (Referência)	01	429,24 ± 0,01	418,45 ± 0,01	2,6
0,65 (Referência)	02	426,59 ± 0,01	418,38 ± 0,01	2,0
0,65 (Referência)	03	428,20 ± 0,01	419,26 ± 0,01	2,1
0,65 (Referência)	04	426,20 ± 0,01	415,41 ± 0,01	2,6
0,65 (Referência)	05	423,02 ± 0,01	414,18 ± 0,01	2,1
0,65 (Referência)	06	420,01 ± 0,01	410,93 ± 0,01	2,2
0,65 (Referência)	07	420,53 ± 0,01	412,63 ± 0,01	1,9
0,65 (Referência)	08	428,70 ± 0,01	419,02 ± 0,01	2,3
0,65 (Referência)	09	425,39 ± 0,01	416,71 ± 0,01	2,1
0,65 (Referência)	10	421,96 ± 0,01	413,35 ± 0,01	2,1
0,65 (Referência)	11	418,42 ± 0,01	408,09 ± 0,01	2,5
0,65 (Referência)	12	425,84 ± 0,01	415,51 ± 0,01	2,5
0,65 (Referência)	13	425,57 ± 0,01	413,87 ± 0,01	2,8
0,65 (Referência)	14	423,91 ± 0,01	413,36 ± 0,01	2,5
0,65 (Referência)	15	427,56 ± 0,01	416,29 ± 0,01	2,7
0,65 (Aditivo A)	16	425,79 ± 0,01	414,22 ± 0,01	2,8
0,65 (Aditivo A)	17	423,81 ± 0,01	414,45 ± 0,01	2,3
0,65 (Aditivo A)	18	426,92 ± 0,01	418,04 ± 0,01	2,1
0,65 (Aditivo A)	19	422,51 ± 0,01	412,11 ± 0,01	2,5
0,65 (Aditivo A)	20	423,42 ± 0,01	412,98 ± 0,01	2,5
0,65 (Aditivo A)	21	423,63 ± 0,01	414,00 ± 0,01	2,3
0,65 (Aditivo A)	22	423,06 ± 0,01	412,65 ± 0,01	2,5
0,65 (Aditivo A)	23	428,89 ± 0,01	418,73 ± 0,01	2,4
0,65 (Aditivo A)	24	428,25 ± 0,01	417,62 ± 0,01	2,5
0,65 (Aditivo A)	25	425,16 ± 0,01	415,46 ± 0,01	2,3
0,65 (Aditivo A)	26	422,33 ± 0,01	412,27 ± 0,01	2,5
0,65 (Aditivo A)	27	430,31 ± 0,01	419,89 ± 0,01	2,5
0,65 (Aditivo A)	28	424,80 ± 0,01	414,26 ± 0,01	2,2
0,65 (Aditivo A)	29	428,56 ± 0,01	419,47 ± 0,01	2,2
0,65 (Aditivo A)	30	428,53 ± 0,01	419,36 ± 0,01	2,2
0,65 (Aditivo B)	31	424,44 ± 0,01	412,44 ± 0,01	2,2
0,65 (Aditivo B)	32	420,27 ± 0,01	408,04 ± 0,01	2,9
0,65 (Aditivo B)	33	424,27 ± 0,01	411,70 ± 0,01	3,0
0,65 (Aditivo B)	34	422,15 ± 0,01	410,29 ± 0,01	3,1
0,65 (Aditivo B)	35	419,24 ± 0,01	407,40 ± 0,01	2,9
0,65 (Aditivo B)	36	425,17 ± 0,01	413,91 ± 0,01	2,9
0,65 (Aditivo B)	37	420,78 ± 0,01	410,10 ± 0,01	2,7
0,65 (Aditivo B)	38	428,54 ± 0,01	418,49 ± 0,01	2,3
0,65 (Aditivo B)	39	424,52 ± 0,01	416,17 ± 0,01	2,4
0,65 (Aditivo B)	40	425,96 ± 0,01	417,19 ± 0,01	2,0
0,65 (Aditivo B)	41	420,72 ± 0,01	411,87 ± 0,01	2,1
0,65 (Aditivo B)	42	423,08 ± 0,01	410,85 ± 0,01	2,1
0,65 (Aditivo B)	43	422,45 ± 0,01	410,82 ± 0,01	3,0
0,65 (Aditivo B)	44	424,28 ± 0,01	414,67 ± 0,01	2,8
0,65 (Aditivo B)	45	426,25 ± 0,01	417,62 ± 0,01	2,3

Tabela 39 – Massa dos CPs prismáticos (5 x 10) cm na dosagem 0,55 pós períodos de cura e condicionamento

Traço	CP	Massa Pós Cura (g)	Massa Pós Pre-condicion. (g)	Redução de massa (%)
0,55 (Referência)	01	555,60 ± 0,01	546,98 ± 0,01	1,6
0,55 (Referência)	02	556,77 ± 0,01	548,20 ± 0,01	1,6
0,55 (Referência)	03	552,96 ± 0,01	544,40 ± 0,01	1,6
0,55 (Referência)	04	550,96 ± 0,01	542,44 ± 0,01	1,6
0,55 (Referência)	05	548,12 ± 0,01	539,45 ± 0,01	1,6
0,55 (Referência)	06	551,46 ± 0,01	544,07 ± 0,01	1,4
0,55 (Referência)	07	551,39 ± 0,01	543,35 ± 0,01	1,5
0,55 (Referência)	08	547,31 ± 0,01	539,52 ± 0,01	1,4
0,55 (Referência)	09	551,19 ± 0,01	542,15 ± 0,01	1,7
0,55 (Referência)	10	554,29 ± 0,01	545,59 ± 0,01	1,6
0,55 (Referência)	11	558,10 ± 0,01	549,52 ± 0,01	1,6
0,55 (Referência)	12	560,00 ± 0,01	551,80 ± 0,01	1,5
0,55 (Referência)	13	557,98 ± 0,01	546,85 ± 0,01	2,0
0,55 (Referência)	14	560,12 ± 0,01	547,80 ± 0,01	2,2
0,55 (Referência)	15	558,48 ± 0,01	546,20 ± 0,01	2,2
0,55 (Aditivo A)	16	564,72 ± 0,01	557,37 ± 0,01	1,3
0,55 (Aditivo A)	17	566,79 ± 0,01	559,06 ± 0,01	1,4
0,55 (Aditivo A)	18	555,98 ± 0,01	547,73 ± 0,01	1,5
0,55 (Aditivo A)	19	557,38 ± 0,01	549,83 ± 0,01	1,4
0,55 (Aditivo A)	20	566,31 ± 0,01	558,22 ± 0,01	1,4
0,55 (Aditivo A)	21	557,09 ± 0,01	548,43 ± 0,01	1,6
0,55 (Aditivo A)	22	561,44 ± 0,01	552,87 ± 0,01	1,6
0,55 (Aditivo A)	23	557,10 ± 0,01	548,45 ± 0,01	1,6
0,55 (Aditivo A)	24	560,28 ± 0,01	552,37 ± 0,01	1,4
0,55 (Aditivo A)	25	565,17 ± 0,01	556,95 ± 0,01	1,5
0,55 (Aditivo A)	26	565,48 ± 0,01	557,22 ± 0,01	1,5
0,55 (Aditivo A)	27	560,25 ± 0,01	551,57 ± 0,01	1,6
0,55 (Aditivo A)	28	556,61 ± 0,01	545,19 ± 0,01	2,1
0,55 (Aditivo A)	29	560,10 ± 0,01	548,26 ± 0,01	2,2
0,55 (Aditivo A)	30	558,29 ± 0,01	546,45 ± 0,01	2,2
0,55 (Aditivo B)	31	550,79 ± 0,01	539,73 ± 0,01	2,2
0,55 (Aditivo B)	32	543,21 ± 0,01	533,90 ± 0,01	2,9
0,55 (Aditivo B)	33	538,37 ± 0,01	529,31 ± 0,01	3,0
0,55 (Aditivo B)	34	547,34 ± 0,01	538,36 ± 0,01	3,1
0,55 (Aditivo B)	35	552,95 ± 0,01	543,52 ± 0,01	2,9
0,55 (Aditivo B)	36	555,16 ± 0,01	544,80 ± 0,01	2,9
0,55 (Aditivo B)	37	550,19 ± 0,01	540,38 ± 0,01	2,7
0,55 (Aditivo B)	38	545,48 ± 0,01	535,38 ± 0,01	2,3
0,55 (Aditivo B)	39	551,23 ± 0,01	542,69 ± 0,01	2,4
0,55 (Aditivo B)	40	551,23 ± 0,01	540,83 ± 0,01	2,0
0,55 (Aditivo B)	41	548,76 ± 0,01	537,88 ± 0,01	2,1
0,55 (Aditivo B)	42	551,56 ± 0,01	542,46 ± 0,01	2,1
0,55 (Aditivo B)	43	568,76 ± 0,01	555,44 ± 0,01	3,0
0,55 (Aditivo B)	44	570,86 ± 0,01	559,15 ± 0,01	2,8
0,55 (Aditivo B)	45	562,82 ± 0,01	551,82 ± 0,01	2,3

Tabela 40 – Massa dos CPs prismáticos (5 x 10) cm na dosagem 0,65 pós períodos de cura e condicionamento

Traço	CP	Massa Pós Cura (g)	Massa Pós Pre-condicion. (g)	Redução de massa (%)
0,65 (Referência)	01	547,77 ± 0,01	533,78 ± 0,01	2,6
0,65 (Referência)	02	552,89 ± 0,01	537,22 ± 0,01	2,9
0,65 (Referência)	03	556,45 ± 0,01	542,43 ± 0,01	2,6
0,65 (Referência)	04	554,41 ± 0,01	541,12 ± 0,01	2,5
0,65 (Referência)	05	546,21 ± 0,01	531,19 ± 0,01	2,8
0,65 (Referência)	06	545,41 ± 0,01	531,15 ± 0,01	2,7
0,65 (Referência)	07	541,59 ± 0,01	528,34 ± 0,01	2,5
0,65 (Referência)	08	542,88 ± 0,01	532,67 ± 0,01	1,9
0,65 (Referência)	09	555,42 ± 0,01	543,41 ± 0,01	2,2
0,65 (Referência)	10	560,91 ± 0,01	547,29 ± 0,01	2,5
0,65 (Referência)	11	558,10 ± 0,01	539,44 ± 0,01	3,5
0,65 (Referência)	12	558,03 ± 0,01	547,37 ± 0,01	1,9
0,65 (Referência)	13	554,85 ± 0,01	546,21 ± 0,01	1,6
0,65 (Referência)	14	549,43 ± 0,01	539,36 ± 0,01	1,9
0,65 (Referência)	15	546,51 ± 0,01	534,92 ± 0,01	2,2
0,65 (Aditivo A)	16	560,29 ± 0,01	548,94 ± 0,01	2,1
0,65 (Aditivo A)	17	557,33 ± 0,01	546,11 ± 0,01	2,1
0,65 (Aditivo A)	18	560,42 ± 0,01	548,81 ± 0,01	2,1
0,65 (Aditivo A)	19	560,80 ± 0,01	549,02 ± 0,01	2,1
0,65 (Aditivo A)	20	543,88 ± 0,01	533,12 ± 0,01	2,0
0,65 (Aditivo A)	21	552,92 ± 0,01	542,91 ± 0,01	1,8
0,65 (Aditivo A)	22	551,18 ± 0,01	541,05 ± 0,01	1,9
0,65 (Aditivo A)	23	558,51 ± 0,01	546,52 ± 0,01	2,2
0,65 (Aditivo A)	24	559,56 ± 0,01	545,34 ± 0,01	2,6
0,65 (Aditivo A)	25	546,35 ± 0,01	535,67 ± 0,01	2,0
0,65 (Aditivo A)	26	542,71 ± 0,01	528,96 ± 0,01	2,6
0,65 (Aditivo A)	27	554,38 ± 0,01	544,14 ± 0,01	1,9
0,65 (Aditivo A)	28	539,07 ± 0,01	527,90 ± 0,01	2,1
0,65 (Aditivo A)	29	538,41 ± 0,01	528,23 ± 0,01	1,9
0,65 (Aditivo A)	30	537,77 ± 0,01	528,41 ± 0,01	1,8
0,65 (Aditivo B)	31	549,72 ± 0,01	540,76 ± 0,01	1,7
0,65 (Aditivo B)	32	537,91 ± 0,01	527,78 ± 0,01	1,9
0,65 (Aditivo B)	33	536,45 ± 0,01	525,01 ± 0,01	2,2
0,65 (Aditivo B)	34	531,03 ± 0,01	520,05 ± 0,01	2,1
0,65 (Aditivo B)	35	544,87 ± 0,01	535,34 ± 0,01	1,8
0,65 (Aditivo B)	36	548,27 ± 0,01	535,85 ± 0,01	2,3
0,65 (Aditivo B)	37	551,49 ± 0,01	538,62 ± 0,01	2,4
0,65 (Aditivo B)	38	551,28 ± 0,01	537,38 ± 0,01	2,6
0,65 (Aditivo B)	39	550,21 ± 0,01	539,87 ± 0,01	1,9
0,65 (Aditivo B)	40	549,78 ± 0,01	538,86 ± 0,01	2,0
0,65 (Aditivo B)	41	547,09 ± 0,01	535,18 ± 0,01	2,2
0,65 (Aditivo B)	42	537,14 ± 0,01	523,84 ± 0,01	2,5
0,65 (Aditivo B)	43	543,37 ± 0,01	531,07 ± 0,01	2,3
0,65 (Aditivo B)	44	542,39 ± 0,01	530,68 ± 0,01	2,2
0,65 (Aditivo B)	45	547,03 ± 0,01	536,09 ± 0,01	2,0

Tabela 41 – Média das massas dos CPs cilíndricos (5 x 10) cm pós períodos de cura e condicionamento

Traço	Massa Pós Cura (g)	Massa Pós Pre-condicion. (g)	Redução de Massa (%)
0,55 (Referência)	429,36 ± 0,01	420,54 ± 0,01	2,1
0,55 (Aditivo A)	432,07 ± 0,01	424,42 ± 0,01	1,8
0,55 (Aditivo B)	428,24 ± 0,01	420,22 ± 0,01	1,9
0,65 (Referência)	424,74 ± 0,01	415,03 ± 0,01	2,3
0,65 (Aditivo A)	425,73 ± 0,01	415,70 ± 0,01	2,4
0,65 (Aditivo B)	423,63 ± 0,01	412,89 ± 0,01	2,6

Tabela 42 – Média das massas dos CPs prismáticos (5 x 10) cm pós períodos de cura e condicionamento

Traço	Massa Pós Cura (g)	Massa Pós Pre-condicion. (g)	Redução de Massa (%)
0,55 (Referência)	554,31 ± 0,01	545,22 ± 0,01	1,7
0,55 (Aditivo A)	560,87 ± 0,01	552,90 ± 0,01	1,6
0,55 (Aditivo B)	552,58 ± 0,01	542,38 ± 0,01	1,9
0,65 (Referência)	551,39 ± 0,01	538,39 ± 0,01	2,4
0,65 (Aditivo A)	550,90 ± 0,01	539,67 ± 0,01	2,1
0,65 (Aditivo B)	544,53 ± 0,01	533,09 ± 0,01	2,1