Campus de São Carlos

CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA
CARBONATAÇÃO EM CONCRETOS E
ARGAMASSAS EXECUTADOS COM E SEM
ADIÇÃO DE SÍLICA ATIVA

VALDIRENE MARIA SILVA

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ÁREA INTERUNIDADES EM
"CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS"**

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
INSTITUTO DE FÍSICA DE SÃO CARLOS
INSTITUTO DE QUÍMICA DE SÃO CARLOS

CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA CARBONATAÇÃO EM
CONCRETOS E ARGAMASSAS EXECUTADOS COM E SEM ADIÇÃO
DE SÍLICA ATIVA

VALDIRENE MARIA SILVA

Dissertação apresentada à Área de Interunidades em Ciências e Engenharia de Materiais, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador:
Prof. Dr. Jefferson B. L. Libório

DEDALUS - Acervo - EESC

31100036975

São Carlos
2002

Class.	TESE - EESC
Cott.	5467
Tombo	0122/02
Sysno	1247468

Ficha catalográfica preparada pela Seção de
Tratamento da Informação do Serviço de Biblioteca -
EESC/USP

S586c Silva, Valdirene Maria
Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas executados com e sem adição de sílica ativa / Valdirene Maria Silva. -- São Carlos, 2002.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo, 2002.
Área : Ciência e Engenharia de Materiais.
Orientador: Prof. Dr. Jefferson B. L. Liborio.

1. Carbonatação. 2. Concreto. 3. Argamassa.
4. Deterioração. 5. Patologia. 6. Sílica ativa. 7. Concreto de alto desempenho. 8. Argamassa de alto desempenho. 9. Construção civil. I. Título.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Ciência e Engenharia de Materiais

Caixa Postal 369 – CEP 13560-970 - São Carlos-SP – Brasil

Tel: (0xx16) 2739589/ Fax: (0xx16) 2739777

e-mail: wladerez@ifsc.usp.br

MEMBROS DA COMISSÃO JULGADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE VALDIRENE MARIA SILVA, APRESENTADA À ÁREA INTERUNIDADES CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS, UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, EM 08-05-2002.

COMISSÃO JULGADORA:

Prof. Dr. JEFFERSON BENEDICTO LIBARDI LIBORIO (Orientador e Presidente)

Prof. Dr. DIRCEU SPINELLI – EESC-USP

Prof. Dr. WESLEY JORGE FREIRE – UNICAMP

Aos meus pais e a Deus,
por estarem sempre presentes em minha vida.

Fez-se real, um sonho discreto,
De, na vida, tudo ser concreto.
No calor da hidratação,
Completei minha formação.

Com cimento e agregado fiz uma sólida união
Através de uma alcalina reação.
Longe do sol que me causa retração,
Revelei minha vida nesta divina construção.

Buscando qualidade,
Aumentei minha resistência e durabilidade.
Com o poder do engenho,
Melhorei cada vez mais meu desempenho.

Valdirene Maria Silva

AGRADECIMENTOS

A Deus, por tudo que me proporcionou.

Aos meus pais, simplesmente por existirem.

Em especial ao Prof. Dr. Jefferson B. L. Liborio, por proporcionar-me a oportunidade de crescer profissionalmente, transmitindo-me um pouco do seu vasto e variado conhecimento.

Aos meus familiares que sempre acreditaram em mim.

Ao Eng. Jeselay Hemetério Cordeiro dos Reis, pelo apoio incondicional.

A Enga. Darcília Ruani Jordão, pela amizade, convivência e compreensão.

A todos os amigos do laboratório LAMABC, pelas ajudas, companheirismo, descontração e principalmente pela amizade e em especial ao Eng. George Akira Oda.

A todos os colegas que contribuíram de forma direta ou indireta na realização desse trabalho, em especial a Enga. Alessandra Lorenzette de Castro, a Enga. Vanessa Silveira Silva e a Arquiteta Paula Sardeiro.

A Prof^ª. Dr^ª. Regina Helena Porto Francisco, pelas considerações e companheirismo.

A Prof^ª. Ângela Cristina Pregolato Giampetro, pelo profissionalismo.

Ao Programa de Pós-Graduação Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais, por possibilitar-me a realização desta pesquisa.

Ao Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos, EESC – USP.

Ao Departamento de Arquitetura e Urbanismo da Escola de Engenharia de São Carlos, EESC – USP.

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela bolsa de estudo concebida.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS	iv
LISTA SIMBOLOS	v
LISTA DE ABREVIATURAS	vi
RESUMO	vii
ABSTRACT	viii
1. INTRODUÇÃO	1
2. PROPRIEDADES DOS MATERIAIS CONSTITUINTES DO CONCRETO	5
2.1 – CIMENTO PORTLAND	6
2.2 - AGREGADOS	14
2.3 - ÁGUA	16
2.4 - ADITIVOS	17
2.5 - SÍLICA ATIVA	19
3 – FENÔMENO DA CARBONATAÇÃO	24
3.1 - ESTRUTURA POROSA DO CONCRETO	26
3.2 - ASPECTOS FÍSICOS	31
3.3 - ASPECTOS QUÍMICOS	33
3.4 - FORMAÇÕES MINERALÓGICAS	37
3.5 - O PERFIL DO pH	38
3.6 - FATORES QUE INFLUENCIAM NA PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO	39
3.6.1 - Idade do concreto	40
3.6.2 - O efeito da concentração do dióxido de carbono	43
3.6.3 - Umidade relativa do ar	44
3.6.4 – Incidência de chuva	45
3.6.5 - Fissuras	46
3.6.6 - Efeito do conteúdo, tipo, e qualidade do cimento	47
3.6.7 - Influência da cura	49
3.6.8 - Efeito da geometria do elemento estrutural	51
3.6.9 - Efeito da relação água/cimento	51
3.6.10 - Medidas da profundidade de carbonatação	53
4 - CORROSÃO DAS ARMADURAS	55
4.1 – CORROSÃO DA ARMADURA PRESENTE NO CONCRETO	56
4.2 – PASSIVAÇÃO	59
5 - INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL	63
5.1 – CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS	64
5.1.1 - Cimento Portland	64
5.1.2 - Agregado miúdo	65
5.1.3 - Agregado graúdo	67
5.1.4 - Composição entre agregados graúdo e miúdo	68
5.1.5 - Aditivo	70
5.1.6 - Sílica ativa	70
5.2 - COMPOSIÇÃO DOS TRAÇOS	71
5.3 – MOLDAGEM DOS CORPOS-DE-PROVA	73
5.4 - CURA EM CÂMARA ÚMIDA	73

5.5 - CÂMARA DE CARBONATAÇÃO ACELERADA	74
5.6 – DETERMINAÇÃO DA PROFUNDIDADE CARBONATADA	75
5.7 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL	76
5.8 – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL	76
6 - RESULTADOS E ANÁLISES	77
6.1. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL E PROFUNDIDADE CARBONATADA.	77
6.1.1. ARGAMASSA	77
6.1.1.1. Influência do tipo de cimento	81
6.1.1.2. Influência da sílica ativa	84
6.1.1.3. Influência do ambiente de exposição	86
6.1.2. CONCRETO	87
6.1.2.1. Influência do tipo de cimento	90
6.1.2.2. Influência da sílica ativa	93
6.1.2.3. Influência do ambiente de exposição	95
6.2. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL E PROFUNDIDADE CARBONATADA.	96
6.3. PROFUNDIDADE CARBONATADA	101
6.4. AJUSTE DO MODELO TEÓRICO EXPERIMENTAL DO PROCESSO DE CARBONATAÇÃO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE EXPOSIÇÃO.	107
6.5. CORRELAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS MACROESTRUTURAIS E AS AVALIAÇÕES MICROESTRUTURAIS REALIZADAS PELO GRUPO LMABC-SET-USP.	112
6.5.1. Microestrutura da pasta de cimento	112
6.5.2. Hidratação e cura	116
7 – CONCLUSÕES	118
ANEXO A	122
ANEXO B	139
ANEXO C	148
ANEXO D	151
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	164

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1	- Influência dos materiais no fenômeno de carbonatação.	6
FIGURA 2.2	- Representação esquemática das mudanças que ocorrem no sistema C_3S -água ($a/c < 1,0$).	10
FIGURA 2.3	- Curva calorimétrica da hidratação do C_3A na presença de gesso.	12
FIGURA 2.4	- Imagem das partículas de sílica ativa.	19
FIGURA 2.5	- Resultado de porosidade obtido por intrusão de mercúrio para amostras de pastas com e sem sílica ativa.	23
FIGURA 3.1	- Frente de carbonatação	25
FIGURA 3.2	- Vista do $CaCO_3$, em telhas de fibrocimento.	25
FIGURA 3.3	- Quantidade e significado dos tipos de vazios presentes na pasta de cimento Portland.	27
FIGURA 3.4	- Profundidade carbonatada x idade, para corpos-de-prova curados por 28 dias.	30
FIGURA 3.5	- Ilustração da difusão do CO_2 na pasta de cimento.	33
FIGURA 3.6	- Mecanismo de reação química.	36
FIGURA 3.7	- Modelo simplificado da carbonatação do concreto.	39
FIGURA 3.8	- Resultados dos ensaios de curta duração e de longa duração para diferentes tipos de concreto.	44
FIGURA 3.9	- Grau de carbonatação do concreto em função da umidade relativa.	45
FIGURA 3.10	- Influência da adição de cinza volante na profundidade carbonatada.	48
FIGURA 3.11	- Camada carbonatada x relação água/cimento.	52
FIGURA 3.12	- A influência da relação água/aglomerante no coeficiente de carbonatação do concreto.	52
FIGURA 3.13	- Medidas das profundidades de carbonatação.	53
FIGURA 4.1	- Pilha ou célula de corrosão eletroquímica.	57
FIGURA 4.2	- Diagrama simplificado de Pourbaix.	60
FIGURA 4.3	- Modelo de vida útil proposta por TUUTTI.	61
FIGURA 5.1	- Composição granulométrica do agregado miúdo.	66
FIGURA 5.2	- Composição granulométrica do agregado graúdo.	68
FIGURA 5.3	- Representação gráfica dos índices de vazios	69
FIGURA 5.4	- Câmara de carbonatação acelerada.	74
FIGURA 5.5	- Seção longitudinal do corpo-de-prova cilíndrico e, régua comparadora LNEC.	75
FIGURA 6.1	- Resultados de resistência à compressão x idade para os corpos-de-prova de argamassa, curados em câmara úmida e expostos à carbonatação (CP V ARI RS, com adição de SA).	79
FIGURA 6.2	- Resultados de resistência à compressão x idade para os corpos-de-prova de argamassa, curados em câmara úmida e expostos à carbonatação (CP V ARI Plus, com adição de SA).	79

FIGURA 6.3	- Resultados de resistência à compressão x idade para os corpos-de-prova de argamassa, curados em câmara úmida e expostos à carbonatação (CP V ARI RS e sem adição de SA).	80
FIGURA 6.4	- Resultados de resistência à compressão x idade para os corpos-de-prova de argamassa, curados em câmara úmida e expostos à carbonatação (CP V ARI Plus e sem adição de SA).	80
FIGURA 6.5	- Desempenho mecânico de argamassa.	81
FIGURA 6.6	- Desempenho mecânico de argamassa.	82
FIGURA 6.7	- Profundidades de carbonatação em argamassas.	83
FIGURA 6.8	- Desempenho mecânico de argamassas.	84
FIGURA 6.9	- Profundidades de carbonatação em argamassas.	85
FIGURA 6.10	- Desempenho mecânico de argamassa.	86
FIGURA 6.11	- Desempenho mecânico de argamassa.	86
FIGURA 6.12	- Resultados de resistência à compressão x idade para os corpos-de-prova de concreto, curados em câmara úmida e expostos à carbonatação (CP V ARI RS e com adição de SA).	88
FIGURA 6.13	- Resultados de resistência à compressão x idade para os corpos-de-prova de concreto, curados em câmara úmida e expostos à carbonatação (CP V ARI Plus e com adição de SA).	88
FIGURA 6.14	- Resultados de resistência à compressão x idade para os corpos-de-prova de concreto, curados em câmara úmida e expostos à carbonatação (CP V ARI RS e sem adição de SA).	89
FIGURA 6.15	- Resultados de resistência à compressão x idade para os corpos-de-prova de concreto, curados em câmara úmida e expostos à carbonatação (CP V ARI Plus e sem adição de SA).	89
FIGURA 6.16	- Desempenho mecânico de concreto.	90
FIGURA 6.17	- Desempenho mecânico de concreto.	91
FIGURA 6.18	- Profundidades de carbonatação em concreto.	92
FIGURA 6.19	- Desempenho mecânico de concreto.	93
FIGURA 6.20	- Profundidades de carbonatação em concreto.	94
FIGURA 6.21	- Desempenho mecânico de concreto.	95
FIGURA 6.22	- Desempenho mecânico de concreto.	95
FIGURA 6.23	- Resistência à tração na compressão diametral da composição Plus_A_CS.	98
FIGURA 6.24	- Resistência à tração na compressão diametral da composição RS_A_CS.	98
FIGURA 6.25	- Resistência à tração na compressão diametral da composição Plus_A_SS.	99
FIGURA 6.26	- Resistência à tração na compressão diametral da composição RS_A_SS	99
FIGURA 6.27	- Resistência à tração na compressão diametral da composição RS_B_CS	100

FIGURA 6.28	- Resistência à tração na compressão diametral da composição Plus_B_CS.	100
FIGURA 6.29	- Resistência à tração na compressão diametral da composição RS_B_SS.	101
FIGURA 6.30	- Resistência à tração na compressão diametral da composição Pus_B_SS.	101
FIGURA 6.31	- Profundidade carbonatada x idade para argamassas expostas à carbonatação acelerada (CP V ARI RS, com adição de SA).	102
FIGURA 6.32	- Profundidade carbonatada x idade para argamassas expostas à carbonatação acelerada (CP V ARI RS, sem adição de SA).	103
FIGURA 6.33	- Profundidade carbonatada x idade para argamassas expostas à carbonatação acelerada (CP V ARI Plus, com adição de SA).	103
FIGURA 6.34	- Profundidade carbonatada x idade para argamassas expostas à carbonatação acelerada (CP V ARI Plus, sem adição de SA).	104
FIGURA 6.35	- Profundidade carbonatada x idade para concretos expostos à carbonatação acelerada (CP V ARI RS, com adição de SA).	105
FIGURA 6.36	- Profundidade carbonatada x idade para concretos expostos à carbonatação acelerada (CP V ARI RS, sem adição de SA).	106
FIGURA 6.37	- Profundidade carbonatada x idade para concretos expostos à carbonatação acelerada (CP V ARI Plus, com adição de SA).	106
FIGURA 6.38	- Profundidade carbonatada x idade para concretos expostos à carbonatação acelerada (CP V ARI Plus, sem adição de SA).	107
FIGURA 6.39	- Coeficiente de carbonatação x consumo de cimento para argamassa (CP V ARI RS, com e sem adição de SA).	110
FIGURA 6.40	- Coeficiente de carbonatação x consumo de cimento para argamassa (CP V ARI Plus, com e sem adição de SA).	110
FIGURA 6.41	- Coeficiente de carbonatação x consumo de cimento para concreto (CP V ARI RS, com e sem adição de SA).	110
FIGURA 6.42	- Coeficiente de carbonatação x consumo de cimento para concreto (CP V ARI Plus, com e sem adição de SA).	111
FIGURA 6.43	- Microscopia eletrônica de varredura (MEV) da pasta de cimento.	113
FIGURA 6.44	- Fotografia da ocorrência do C-S-H no interior de um poro.	114
FIGURA 6.45	- Altura do pico de CH em DRX (18,3° 2 θ).	115
FIGURA 6.46	- Volume de poros obtidos por PIM para composições com CP V ARI, a/c = 0,45.	115
FIGURA 6.47	- Hidratação da pasta de cimento Potland com e sem adições nas idades de 1 e 28 dias, sob cura em câmara úmida.	117

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1	- Compostos do cimento Portland.	8
TABELA 3.1	- Relação a/c versus %SA versus grau de hidratação necessário para se conseguir a descontinuidade dos poros.	28
TABELA 3.2	- Valores do coeficiente de carbonatação e do coeficiente de difusão.	30
TABELA 3.3	- Resultados de carbonatação, sendo $x_0(\text{mm})$ e $k(\text{mm/semana}^{0,5})$	50
TABELA 4.1	- Potencial padrão de oxi-redução para 25°C e 1atm.	61
TABELA 5.1	- Composição dos cimentos utilizados na pesquisa.	65
TABELA 5.2	- Tempo de pega para pasta de cimento sem uso de superplastificante.	65
TABELA 5.3	- Resultados da composição granulométrica do agregado miúdo.	66
TABELA 5.4	- Resultados da caracterização do agregado miúdo.	67
TABELA 5.5	- Resultados da composição granulométrica do agregado graúdo.	67
TABELA 5.6	- Resultados da caracterização do agregado graúdo.	68
TABELA 5.7	- Resultados do ensaio de composição ideal entre agregados graúdos e miúdos.	69
TABELA 5.8	- Características da sílica ativa.	71
TABELA 5.9	- Análise química da sílica ativa.	71
TABELA 5.10	- Composições dos traços de argamassas estudadas.	72
TABELA 5.11	- Composições dos traços de concretos analisados nesse trabalho.	73
TABELA 6.1	- Eficiência da sílica no ganho de resistência.	85
TABELA 6.2	- Eficiência da sílica no ganho de resistência.	94
TABELA 6.3	- Valores ajustados e coeficientes obtidos.	109

LISTA DE SIMBOLOS

ρ	- Massa unitária
ρ_s	- Massa específica real
A	- Área da seção pela qual o fluxo acontece
C	- Consumo de cimento (kg/m^3)
C_0	- Concentração de CO_2 (%)
D	- Coeficiente de difusão;
dc/dx	- Gradiente de concentração
dp/dx	- Gradiente de pressão
e	- Índice de vazios
K	- Coeficiente de carbonatação
k	- Índice de consistência
K'	- Coeficiente de permeabilidade
Q	- Taxa de transferência do material
R^2	- Coeficiente de correlação
r_c	- Coeficiente que depende do tipo de cimento
r_{UR}	- Coeficiente que depende do grau de hidratação
t	- Tempo de exposição ao CO_2
t_0	- Tempo de início da carbonatação
W	- Consumo de água (kg/m^3)
w	- Largura da fissura
x	- Profundidade carbonatada
x_0	- Profundidade de carbonatação inicial
y	- Profundidade de penetração da frente de carbonização abaixo de uma fissura

LISTA DE ABREVIATURAS

a/agl	- Relação água/aglomerante
ABNT	- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS
AFt	- Etringita
C ₂ S	- Silicato Dicálcico ou Belita
C ₃ A	- Aluminato Tricálcico
C ₃ S	- Silicato Tricálcico ou Alita
C ₄ AF	- Ferroaluminato Tetracálcico
CaO	- Óxido de cálcio
Ca(OH) ₂	- Hidróxido de cálcio ou portlandita
CaCO ₃	- Carbonato de cálcio ou calcita
CH	- Hidróxido de cálcio
C-S-H	- Silicato de cálcio hidratado
CO ₂	- Dióxido de carbono
CP	- Cimento Portland
CP V ARI Plus	- Cimento Portland de alta resistência inicial
CP V ARI RS	- Cimento Portland de alta resistência inicial e resistente a sulfatos
DRX	- Difração de raio-X
f _c	- Resistência à compressão axial simples
f _t	- Resistência à tração por compressão diametral
KOH	- Hidróxido de potássio
NaOH	- Hidróxido de sódio
PIM	- Porosimetria por intrusão de mercúrio
Plus_B_CS	- Concreto executado com CP V ARI Plus e adição de sílica ativa
Plus_B_SS	- Concreto executado com CP V ARI Plus e sem adição de sílica ativa.
Plus_A_CS	- Argamassa executada com CP V ARI Plus e adição de sílica ativa.
Plus_A_SS	- Argamassa executada com CP V ARI Plus e sem adição de sílica ativa.
RS_A_CS	- Argamassa executada com CP V ARI RS e adição de sílica ativa
RS_A_SS	- Argamassa executada com CP V ARI RS e sem adição de sílica ativa.
RS_B_CS	- Concreto executado com CP V ARI RS e adição de sílica ativa.
RS_B_SS	- Concreto executado com CP V ARI RS e sem adição de sílica ativa
SA	- Sílica ativa
SP	- Superplastificante
UR	- Umidade relativa
A	- Argamassa
B	- Concreto

RESUMO

SILVA, V.M. (2002). *Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas executados com e sem adição de sílica ativa*. São Carlos, 2002.

O presente estudo refere-se a uma das deteriorações mais freqüentes nas estruturas de concreto armado: a ação da carbonatação. Para essa verificação construiu-se uma câmara de carbonatação acelerada, que foi calibrada, com a finalidade de estudar o processo de carbonatação em corpos-de-prova executados em concreto e argamassa com cimentos CP V ARI Plus e CP V ARI RS com e sem adição de sílica ativa, curados em câmara úmida por sete dias e posteriormente expostos à atmosfera agressiva de gás carbônico por 7, 14, 28, 63 e 91 dias. Também foram executados corpos-de-prova semelhantes (controle), os quais foram deixados em câmara úmida pelos mesmos períodos. Esses corpos-de-prova foram ensaiados à compressão axial e à compressão diametral para determinação da resistência à compressão, tração e medida da profundidade de carbonatação. A partir destes resultados é ajustado um modelo teórico experimental para previsão da profundidade de carbonatação em função do tempo. Observa-se que para todas as composições estudadas a profundidade de carbonatação é pequena. Analisa-se também, a influência da carbonatação no ganho de resistência mecânica das argamassas e dos concretos, e o efeito da adição de sílica ativa e do tipo de cimento no fenômeno de carbonatação. Finalizando, é apresentada uma justificativa dos resultados com base no banco de dados existente no LMABC-SET-EESC-USP.

Palavras-chave: carbonatação, concreto, argamassa, deterioração, patologia, sílica ativa, concreto de alto desempenho, argamassa de alto desempenho, construção civil.

ABSTRACT

SILVA, V.M. (2002), *Contribution to the carbonation study in concretes and mortars manufactured with and without the addition of silica fume*. São Carlos, 2002.

The present study refers to one of the most frequent deterioration in reinforced concrete structure: the action of carbonation. For this, an accelerated carbonation chamber was built and gauged in order to study the carbonation process in concrete and mortar specimens with CP V ARI Plus and CP V ARI RS cements, with and without silica fume addition. The specimens were cured in a humidity chamber for seven days and exposed to aggressive atmosphere of carbonic gas for 7, 14, 28, 63 and 91 days. Similar specimens of control were also manufactured and left in humidity chamber during the same periods. These specimens were tested an axial compression and splitting tensile strength to determine the compression and tensile strength and the carbonation depth. From all the obtained results an experimental theoretical model was forecasted to determine the depth carbonation in function of time. It is observed that all the depths carbonation measured is small. The carbonation influence on mechanical resistance gain of the mortar and concrete, as well as the effect addition of both of silica fume and cement type on the phenomenon of carbonation is also analyzed. Finally, it is presented a justification of results based on the existent database at LMABC-SET-EESC-USP.

KEY WORDS: carbonation, concrete, mortar, deterioration, silica fume, high performance concrete, high performance mortar, pathology, civil building.

1. INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil, nos últimos tempos, tem buscado otimizar a utilização dos materiais com o menor custo e maior durabilidade. A garantia da execução de concretos duráveis tem recebido grande parte dos investimentos feitos por programas de controle de qualidade em todo o País. Hoje, a preocupação com a durabilidade das estruturas de concreto tem sido a marca constante de todos os grandes empreendimentos. A maior parte dos problemas patológicos em edificações de concreto deve-se à ação de agentes agressivos presentes no meio ambiente.

Vários fatores influenciam no mecanismo de deterioração e, conseqüentemente, na durabilidade das estruturas de concreto. Dentre eles, destaca-se a presença de CO_2 na atmosfera, responsável pelo início do processo de deterioração, causando a redução no valor do pH e despassivação da armadura, facilitando o início do processo corrosivo.

As primeiras pesquisas a respeito do efeito da carbonatação na durabilidade de estruturas de concreto foram publicadas durante a primeira metade do século 20. Nos anos 60 e 70, essas pesquisas tomaram grande impulso devido a problemas patológicos identificados em estruturas de concreto aparente construídas após a segunda guerra mundial. Há que se considerar que naquela época os concretos eram concebidos de maneira muito distinta da atual (em muitos casos os concretos eram mais porosos). A maior parte destes problemas consistia na carbonatação dos

elementos estruturais que provocava despassivação das armaduras comprometendo sua segurança. Nos anos 80 houve um aprofundamento no conhecimento a respeito da microestrutura do concreto a fim de se obter composições que fornecessem um concreto resistente e durável. Descobriu-se também, que os problemas patológicos do concreto ocorriam principalmente em obras litorâneas e centros urbanos. Nos anos 90, iniciou-se a difusão da cultura de que o desempenho do concreto não é avaliado apenas pela sua resistência, mas fundamentalmente pela sua durabilidade e também pelo fato de que nem todo concreto de alta resistência seja o mais durável (LIBORIO & MELO, 1999¹ e MELO, 2000).

Atualmente, grande parte das pesquisas sobre durabilidade está direcionada para compreensão do fenômeno da carbonatação e suas variáveis intervenientes como: cura, composição e adensamento do concreto, tipo de cimento, adições, fator água/cimento e porosidade.

Este trabalho tem como objetivo investigar o efeito da carbonatação em concretos e argamassas. Os concretos foram elaborados com agregados graúdos de origem basáltica com diâmetro $D_{\text{máx}} \leq 9,5$ mm e agregados miúdos de origem quartizosa, já as argamassas foram elaboradas com agregados miúdos, também, de origem quartizosa. Foi avaliada a influência da exposição dos corpos-de-prova em câmara de carbonatação acelerada por 7, 14, 28, 63 e 91 dias, através da medida do valor da profundidade de carbonatação e da resistência mecânica de corpos-de-prova de concreto e argamassa de 50 mm de diâmetro x 100 mm de altura, elaborados com Cimento Portland CP V ARI Plus e CP V ARI RS com e sem adição de sílica ativa. Foram moldados corpos-de-prova de referência que foram mantidos em câmara

¹ LIBORIO, J.B.L. & MELO, A.B. (1999) – Processo Fapesp 96-00357-9 – *Pesquisa não divulgada.*

úmida e ensaiados simultaneamente àqueles que se encontravam na câmara de carbonatação.

Procedeu-se um estudo de dosagem especificamente para avaliação da profundidade de carbonatação, a partir dos traços 1:2,5; 1:3,0 e 1:3,5, para argamassas e concretos (concretos com agregados de $D_{\text{máx}} < 9,5$ mm, com proporções 1:m, semelhantes os já avaliados por Liborio, J.B.L. e Melo, A.B. em pesquisa sobre a cura acelerada (vapor) sob pressão atmosférica, desde 1992, cujos resultados fazem parte do Banco de Dados do LMABC-SET-EESC-USP).

Os traços 1:1,1:1,4; 1:1,35:1,65 e 1:1,57:1,93 para concretos, foram definidos a partir de composições ideais entre agregados graúdo e miúdo, através de massa unitária no estado compacto seco.

Os corpos-de-prova foram ensaiados à compressão axial e tração na compressão diametral, definindo as resistências à compressão e à tração, respectivamente. A profundidade de carbonatação foi medida, nos corpos-de-prova ensaiados à compressão diametral, através da aspersão de solução ácido/base, composta por 1% de fenolftaleína, 70% de álcool etílico e 29% de água destilada.

Este trabalho divide-se em sete capítulos incluindo esta introdução.

No capítulo dois são apresentados conceitos básicos sobre as propriedades mais importantes dos materiais utilizados na execução dos concretos e argamassas.

No capítulo três é feita uma revisão bibliográfica sobre a carbonatação nos concretos e seus efeitos, destacando-se a influência de variáveis, tais como: umidade relativa, relação água/cimento, tipo de cimento, idade, dentre outros.

No capítulo quatro mostra-se a relação entre o processo de carbonatação e a corrosão. Discute-se o mecanismo de corrosão da armadura identificando as condições ideais para sua ocorrência.

O capítulo cinco consiste na descrição do estudo experimental realizado nesta pesquisa, envolvendo os procedimentos e os materiais utilizados.

O capítulo seis apresenta a análise e a discussão dos resultados obtidos no estudo experimental. Procura-se identificar os fatores que mais condicionam a execução de concretos duráveis.

No capítulo sete são expostas as conclusões finais sobre os tópicos abordados nessa pesquisa, com ênfase na influência do ambiente agressivo desencadeando o avanço da frente de carbonatação e contribuindo no ganho de resistência mecânica do material. Destaca-se também a influência da adição de sílica ativa, do tipo de cimento, da relação água/cimento e da composição dos agregados no desempenho de concretos e argamassas. Finalmente, são feitas sugestões para possíveis pesquisas complementares.

2. PROPRIEDADES DOS MATERIAIS CONSTITUINTES DO CONCRETO

A durabilidade dos concretos e argamassas está diretamente relacionada à qualidade dos materiais utilizados em suas composições. Fenômenos como a carbonatação são fortemente influenciados pelo tipo de cimento, composição dos agregados, água de amassamento, aditivos e adições (Figura 2.1).

Para se obter concretos resistentes, duráveis e, portanto, menos susceptíveis à carbonatação, é necessária a seleção cuidadosa dos materiais, cujas suas propriedades e suas possíveis influências na carbonatação são descritas neste capítulo.

FIGURA 2.1 – Influência dos materiais no fenômeno de carbonatação.

2.1 – CIMENTO PORTLAND

Define-se cimento Portland como um aglomerante hidráulico produzido pela moagem do clínquer obtido através da calcinação e clinquerização da mistura de calcário e argila. A qualidade final desse aglomerante depende da matéria-prima

utilizada, das adições posteriores à calcinação e do grau de finura atingido na moagem.

Uma mistura de duas fases de silicatos bem cristalinos, C_3S e C_2S , e uma fase intersticial composta de C_3A e C_4AF e algumas impurezas, formam o clínquer do cimento Portland.

Segundo AITCIN (2000), a adição de Al_2O_3 e do Fe_2O_3 reduz a temperatura de calcinação das matérias-primas durante sua transformação em clínquer, criando duas fases (aluminato e ferroaluminato) que se fundem para formação do C_3S , permitindo ainda que os íons Ca^{++} difundam-se mais rápido transformando o C_2S previamente formado em C_3S .

Ainda segundo o autor, após a calcinação é feito um resfriamento brusco, até cerca de $150^{\circ}C$, necessário para que os cristais dos compostos formados permaneçam de forma desordenada e, portanto, reativos com a água. O resfriamento rápido solidifica as diferentes fases nas suas formas à alta temperatura, não permitindo que elas sigam sua natural transformação de fase, que teria ocorrido sob o resfriamento lento.

Na moagem do clínquer, adiciona-se um teor de gesso para controlar o tempo de pega do cimento. Na ausência dessa adição, o clínquer puro sofre uma pega instantânea que provoca um endurecimento irreversível da mistura.

Os cimentos Portland são especificados por sua composição química, tipo de adições e propriedades físicas. Estas propriedades são: finura, expansibilidade, tempo de pega, falsa pega, resistência à compressão, calor de hidratação, perda ao fogo e massa específica.

Segundo MEHTA & MONTEIRO (1994), na formação do clínquer os compostos presentes no sistema e as impurezas (Mg, Na, K e S, por exemplo)

possuem capacidade de entrar em soluções sólidas, podendo, inclusive, alterar suas estruturas cristalinas. Os principais constituintes do cimento estão relacionados na Tabela 2.1.

TABELA 2.1 – Compostos do cimento Portland.

Nome do composto	Composição em óxidos	Abreviação
Silicato tricálcico	$3\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C_3S
Silicato dicálcio	$2\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C_2S
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Ferroaluminato tetracálcico	$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

Os silicatos C_3S e $\beta\text{-C}_2\text{S}$, em suas formas impuras, são conhecidas como alita e belita respectivamente. Esses silicatos na forma impura contêm pequenas quantidades de íons Mg, Al, K, Na e S.

Os aluminatos cálcicos, C_3A e C_4AF , também contêm em sua estrutura cristalina impurezas. Segundo MELO (2000), estas estruturas são complexas, caracterizadas por grandes vazios estruturais e responsáveis pela elevada reatividade dos compostos aluminatos.

A hidratação do cimento Portland ocorre quando se iniciam as reações químicas complexas, as quais são resultantes da adição da água ao cimento anidro. Essas reações são complexas porque as fases C_3S , C_2S , C_3A e C_4AF estão misturadas. No entanto, nos estudos existentes, considera-se a hidratação dos compostos isoladamente, diminuindo a complexidade das reações.

A velocidade de hidratação para cada composto do clínquer é diferente, sendo que sua reatividade possui aproximadamente a seguinte ordem: $\text{C}_3\text{A} > \text{C}_3\text{S} > \text{C}_4\text{AF} > \text{C}_2\text{S}$.

As fases silicato do cimento Portland, quando em contato com a água, formam o silicato de cálcio hidratado e o hidróxido de cálcio. MELO (2000), através de cálculos estequiométricos, afirma que a hidratação do C_3S produziria 61% de C-S-

H e 39% de CH, enquanto que a hidratação do β -C₂S produziria 82% de C-S-H e 18% de CH.

A Figura 2.2 mostra o comportamento da hidratação referente ao C₃S, através de calorimetria, análise de fase líquida e formação de produtos hidratados, sendo definidos cinco estágios de hidratação (JAWED et al., 1983, apud SILVA², 2000).

Estágio I – Reação inicial. É quando o C₃S começa a reagir após 15 segundos em contato com a água. Essa reação é rápida, ocorrendo uma elevada liberação de calor, que tende a diminuir à medida que o C-S-H tipo “m” (m = metaestável) precipita. Ao redor do grão de C₃S forma-se uma camada (*outer shell*) de produto hidratado quase impermeável, impedindo o prosseguimento da dissolução e reduzindo sensivelmente a velocidade da reação.

Estágio II – Período de indução. Nesse estágio a liberação de calor é baixa e tem duração aproximada de 2 horas, após o contato com a água. A camada de C-S-H (m) não é completamente impermeável, portanto o C₃S subjacente continua dissolvendo-se. É nesse estágio que as argamassas e concretos permanecem no estado plástico e tem-se o início da pega. O final desse estágio é caracterizado por um aumento na velocidade de hidratação com maior desprendimento de calor e tem-se também a cristalização do CH e a formação de um novo produto hidratado, o C-S-H tipo “e” (e = estável).

Estágio III – Período de aceleração. Esse estágio tem duração de 4 a 8 horas, é caracterizado pelo aumento na produção de materiais hidratados e por uma elevação na taxa de desprendimento de calor a qual atinge seu valor máximo no final do período. Esse aumento de calor está ligado à velocidade de crescimento dos cristais

² JAWED, J.; SKALNY, J.; YOUNG, J.F. (1983). **Hydration of portland cement**. In: Structure and Performance of Cements, edited by: Barbes, P., London.

de CH e à dissolução do C_3S . No final desse estágio ocorre o fim da pega, iniciando-se a fase de endurecimento.

Estágio IV – Período de desaceleração. A velocidade de reação diminui bastante, e esse período tem duração de 12 a 24 horas e é caracterizada pela queda na taxa de desprendimento de calor, pois o C-S-H (e) impede a continuidade da hidratação pelo mecanismo de dissolução-precipitação, passando a um novo processo que é o de difusão iônica, através da camada de C-S-H (e).

Estágio V – Período de reação lenta e contínua (difusão). Esse estágio é caracterizado por reações lentas e com velocidades cada vez menores pelo processo de difusão iônica, sendo a taxa de desenvolvimento de calor muito baixa.

FIGURA 2.2 – Representação esquemática das mudanças que ocorrem no sistema C_3S -água ($a/c < 1,0$) (JAWED et al., 1983, apud SILVA¹, 2000).

Segue agora a descrição da hidratação da fase intersticial feita por JAWED et al. (1983), apud MELO¹ (2000). Dentre os compostos constituintes dessa fase, sabe-

se que o C_3A é o mais reativo com a água e, portanto, possui maior influência nas reações de hidratação.

A Figura 2.3 apresenta o comportamento da curva calorimétrica da hidratação do C_3A na presença de sulfato de cálcio adicionado como controlador de pega. O primeiro pico ocorre entre 10 e 15 minutos, e é devido à formação da etringita (Aft), Equação (2.1), ao redor das partículas de C_3A , sendo responsável pela redução da velocidade de reação. Nesse pico a velocidade de reação é alta; portanto, devido às dificuldades na realização dos ensaios, só é registrada no gráfico a etapa descendente da curva de liberação de calor.

O segundo pico ocorre quando a fase líquida torna-se deficiente de íons SO_4^{2-} , e Ca^{2+} , resultado do consumo total de gipsita; a camada de etringita rompe-se e o C_3A disponível reage com a etringita transformando-se em monossulfoaluminato de cálcio hidratado (Afm). Finalmente o C_3A remanescente reage com a água, formando compostos hidratados (Equações 2.2, 2.3 e 2.4).

O cimento, quando hidratado, resulta na formação de CH e C-S-H, entre outros. As proporções resultantes de cada um desses compostos, quando reagem com gás carbônico, formam o carbonato de cálcio.

FIGURA 2.3 - Curva calorimétrica da hidratação do C_3A na presença de gesso
JAWED; SKALNY; YOUNG (1983) apud MELO¹ (2000).

O hidróxido de cálcio CH, também chamado de portlandita, está sempre sendo formado nas primeiras idades devido ao processo de hidratação do cimento. De acordo com TAYLOR (1990), os átomos de cálcio são octaedros e os átomos de oxigênio são tetraedros; então, sob condições ideais de cristalização, o hidróxido de cálcio tem a forma de placas hexagonais. Comparando-o ao C-S-H, MEHTA & MONTEIRO (1994) afirmam que o potencial de contribuição do hidróxido de cálcio para a resistência é limitado devido às forças de Van der Waals, consequência de uma área específica consideravelmente menor. Além disso, a presença de uma quantidade considerável de hidróxido de cálcio no cimento Portland hidratado tem um efeito desfavorável sobre a resistência química às soluções ácidas, por ser a solubilidade do hidróxido de cálcio maior do que a do C-S-H.

Segundo MINDESS (1983), apud SILVA³ (2000), o hidróxido de cálcio é o segundo composto mais comum na pasta de cimento hidratado, ocupando cerca de

³ MINDESS, S. (1983). **Mechanical performance of cementitious systems**. In: Structure and performance of cement. pp. 319-364.

20% do volume de sólidos e tem uma estrutura cristalina bem definida de grandes cristais hexagonais, o que lhe confere baixa área específica e, conseqüentemente, baixa resistência mecânica.

Para JOHNSTONE & GLASSER, apud NUNES⁴ (1999), o efeito da carbonatação pode variar com o tamanho dos cristais de CH presentes na pasta de cimento; portanto, cristais menores em regiões menos cristalinas do hidróxido de cálcio são mais reativas do que as regiões mais regulares e com cristais maiores.

O silicato de cálcio hidratado (C-S-H) representa cerca de 50% a 60% do volume de sólidos da pasta hidratada, o que atribui maior responsabilidade ao C-S-H no desempenho do concreto.

A carbonatação é um fenômeno intimamente ligado às propriedades do cimento. Essa influência nem sempre pode ser quantificada; no entanto, algumas conclusões podem ser relatadas, como por exemplo, cimentos cuja estrutura inicial da pasta endurecida se forma lentamente, produzem um gel mais denso, e, conseqüentemente, um material com maior resistência e menos susceptível ao efeito da carbonatação.

Cimentos como o CP V ARI Plus e CP V ARI RS, que são obtidos a partir de dosagens diferenciadas de clínquer e também por uma moagem mais fina do cimento, adquirem maior resistência inicial; no entanto, o CP V ARI RS, devido à adição de escória de alto forno, em substituição do clínquer, resulta numa maior profundidade de carbonatação, necessitando de uma boa cura e maior cobrimento de armadura. Com relação ao CP V ARI Plus não se percebe nenhuma influência direta na carbonatação.

⁴ JOHNSTONE. J.R. & GLASSER F.P. (1992). **Carbonation of Portlandite single crystals and Portlandite in Cement paste.** In: 9th International Congress on the Chemistry of Cement, New Delhi.

O estudo da carbonatação através de ensaios acelerados deve ser criterioso porque, com altas concentrações de CO_2 , a carbonatação do CH é seguida pela carbonatação do C-S-H. Além disso, durante o ensaio acelerado, grande parte da hidratação do cimento ainda não aconteceu, facilitando a difusão do gás carbônico.

2.2 - AGREGADOS

A escolha adequada dos agregados é de fundamental importância para a preparação do concreto; portanto, é necessário conhecer macroscopicamente a forma do agregado e sua estrutura superficial, visando melhorar a aderência entre o agregado e a pasta de cimento.

Segundo SCRIVENER (1989), apud SILVA⁵ (2000), a influência dos agregados no concreto começa no momento da mistura. Sua granulometria, forma e textura, definirão a compacidade e o consumo de água para uma respectiva trabalhabilidade. Com o avanço da hidratação, outras propriedades são importantes, tais como, porosidade, permeabilidade, resistência à tração, estrutura cristalina, coeficiente de expansibilidade térmica, dureza e composição química.

A característica dos agregados está diretamente ligada à sua formação mineralógica. Os agregados miúdos podem ser extraídos em leito de rio, em solo de alteração ou ser produzido por moagem artificial. Os agregados graúdos raramente são encontrados em forma natural, sendo a maioria deles obtidos por britagem.

MEHTA & MONTEIRO (1994) relatam que o agregado é responsável pela massa unitária, módulo de elasticidade, resistência à tração e à compressão do

⁵ SCRIVINER, K.L. (1989). **The microstructure of concrete**. The American Ceramic Society. Materials Science of Concrete. pp. 127-162.

concreto. Essas propriedades dependem das características físicas do agregado, tais como, densidade, resistência, volume, tamanho e distribuição de poros.

A seleção dos agregados deve ser feita cuidadosamente porque, à medida que o valor da resistência à compressão aumenta, os agregados podem tornar-se o elo fraco, onde a ruptura será iniciada sob uma alta tensão.

Durante os últimos quarenta anos, reações químicas danosas foram observadas entre agregados e cimentos Portland. Um gel de silicato alcalino tende a absorver água e então expande, causando tensões internas, podendo fissurar o concreto. Essa reação expansiva é conhecida como reação álcali-agregado e pode ser evitada se o cimento Portland não contiver mais que 0,6% de Na_2O equivalente. A carbonatação reduz o efeito da reação álcali-agregado devido à formação de uma camada impermeável de carbonato de cálcio ao redor do agregado.

A relação entre o tipo de agregado e o processo de carbonatação não é direta; no entanto, algumas características dos agregados condicionam várias propriedades dos concretos, tais como porosidade, massa específica e absorção de água. Um aumento na porosidade provoca uma difusão de gás, facilitando o avanço da frente de carbonatação; já em concretos densos, ou seja, com massa específica alta, esta difusão é menor e, com relação à capacidade de absorção de água, a carbonatação pode tanto ser desfavorecida pelo aumento da umidade impedindo a difusão do gás, quanto ser facilitada se a umidade absorvida for suficiente apenas para realização das reações internas.

Além disso, deve-se considerar também a distribuição das partículas dos materiais granulares entre várias dimensões; esse efeito reduz o volume de vazios e, conseqüentemente, a difusividade do gás carbônico no interior do concreto.

2.3 - ÁGUA

A água é um ingrediente fundamental para o concreto, possui uma função química que consiste em produzir as reações de hidratação e outra função física que consiste em estabelecer uma determinada característica reológica do concreto para sua manipulação.

A água é classificada com base no grau de dificuldade de sua remoção, podendo ser encontrada no concreto como água capilar, adsorvida, interlamelar ou quimicamente combinada.

A água capilar é dividida em água livre e água retida. A água livre é aquela que se encontra nos vazios grandes, com diâmetro maior que $0,05\mu\text{m}$ e é perdida facilmente quando a umidade relativa cai abaixo de 100%, porque está fora da ação das forças superficiais da fase sólida. Já a água retida por tensão capilar é encontrada em pequenos capilares de $0,005\mu\text{m}$ a $0,05\mu\text{m}$, e sua remoção causa a retração do sistema.

A água adsorvida está próxima à superfície do sólido e fica retida pelas forças superficiais das partículas de gel, podendo ser perdida quando a umidade relativa estiver em torno de 30%. A perda dessa água causa a retração por secagem.

A água interlamelar, também conhecida como água de gel, está associada à estrutura do silicato de cálcio hidratado, sendo ligada por pontes de hidrogênio. Essa água é perdida somente se a umidade relativa estiver abaixo de 11%, e quando isso ocorre a estrutura do C-S-H retrai consideravelmente.

Já a água quimicamente combinada, também conhecida como água de cristalização, é a que está presente como parte definida na estrutura dos compostos hidratados de cimento, e só pode ser perdida por aquecimento.

Segundo AITCIN (2000), as partículas de cimento, quando em contato com a água, possuem uma forte tendência em flocular. Uma mistura está floculada quando as partículas de cimento aprisionam uma certa quantidade de água dentro dos flocos e essa água fica indisponível para lubrificar a mistura. Assim, para melhorar a hidratação é necessário adicionar aditivos químicos capazes de reduzir a tendência natural à floculação. Outra vantagem da utilização de aditivos é a redução da quantidade de água da mistura.

A ordem de colocação de materiais em um misturador pode reduzir, ou melhorar sensivelmente esse efeito (LIBORIO, 1996).

O fenômeno da carbonatação está diretamente relacionado à presença de água no interior da massa de concreto. Quando esta água ocorre sob a forma de água livre, a carbonatação é dificultada devido à saturação dos poros impedir a difusão do gás carbônico. Enquanto que a água adsorvida é responsável pela transformação do gás carbônico em ácido carbônico o qual dá início ao processo de carbonatação.

2.4 - ADITIVOS

O aditivo pode ser definido como um produto químico que é adicionado à mistura de concreto em teores não maiores que 5% em relação à massa de cimento. Sua utilização acarreta várias modificações nas propriedades físicas e químicas dos concretos ou argamassas, tais como: menor floculação, menor segregação e melhor trabalhabilidade.

NEVILLE (1997) diz que o motivo do grande crescimento do uso dos aditivos é a capacidade de proporcionar ao concreto consideráveis melhorias físicas e econômicas. Embora esse produto não seja barato, ele não representa um custo

adicional porque reduz o custo do trabalho necessário para o adensamento, possibilita redução do teor de cimento e melhora a durabilidade do concreto.

Segundo MELO (2000), dentre as finalidades para as quais os aditivos são empregados destacam-se: o aumento na trabalhabilidade, com o mesmo consumo de água; a redução do consumo de água mantendo a mesma trabalhabilidade e conseqüentemente maiores resistências mecânicas; a redução do consumo de água e do cimento na mesma proporção, mantendo a mesma trabalhabilidade e as mesmas resistências; o aumento na resistência inicial e a redução na segregação do concreto.

Ainda segundo o autor, os aditivos também provocam algumas modificações nas propriedades dos concretos e argamassas no estado endurecido como: o aumento da durabilidade frente à ação físico-química; o controle da expansão causada pela reação álcali/agregado; a redução do coeficiente de permeabilidade; a redução da taxa de evolução do calor de hidratação durante o período inicial de endurecimento; o aumento da resistência mecânica inicial; redução da segregação, o aumento da aderência entre o concreto velho e o concreto novo; além de dificultar a propagação da carbonatação e inibir a corrosão do aço no interior do concreto.

O aditivo superplastificante (tipo - SP), o qual foi utilizado nesta pesquisa, modifica as propriedades reológicas das pastas de argamassa e concreto, e no estado fresco têm a função de reduzir a quantidade de água de amassamento.

Segundo AITCIN (2000), a utilização do superplastificante reduz o efeito da floculação, uma vez que, adsorvido pelas partículas de cimento, confere uma carga negativa, reduzindo consideravelmente a tensão superficial da água circundante e aumentando a fluidez do sistema. Vale ressaltar que o superplastificante não altera a estrutura da pasta de cimento hidratado, apenas melhora a distribuição das partículas de cimento.

Devido à redução na floculação das partículas de cimento, ocorre uma melhor hidratação da pasta, conferindo ao sistema melhor resistência e impermeabilidade, conseqüentemente, menores profundidades carbonatadas.

2.5 - SÍLICA ATIVA

A sílica ativa é um material cimentício que advém da fabricação de silício metálico, ligas ferro-silício e de outras ligas de silício.

Fisicamente, as partículas de sílica ativa são esféricas (Figura 2.4), com diâmetro variando de $0,1\mu\text{m}$ até $1\mu\text{m}$ ou $2\mu\text{m}$, de tal forma que a esfera média de sílica ativa é 100 vezes menor do que a média das partículas de cimento.

FIGURA 2.4 - Imagem das partículas de sílica ativa: a) figura esquemática

(www.microsilica.com.br); b) microscópio eletrônico de varredura - partículas naturalmente aglomeradas e c) microscópio eletrônico de transmissão - partículas individuais dispersas (AITCIN, 2000).

Quanto à pozolanicidade, a sílica ativa pode ser um material de alta, média e até baixa atividade pozolânica; essa característica está diretamente ligada à natureza do material e ao processo de produção utilizado.

A reação pozolânica ocorre quando a sílica ativa reage com o CH , formando o silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Durante esta reação, nem todo o hidróxido de

cálcio é consumido; a parte remanescente tende a formar cristais menores se comparados àqueles presentes na pasta de cimento puro. A sílica ativa também funciona como agente defloculante, dispersando os grãos de cimento.

METHA e AITCIN (1990) observaram que a utilização de pozolanas e cimento Portland promove a segmentação dos canais de percolação da água da pasta de cimento, reduzindo a exsudação e segregação e produzindo inúmeros locais de nucleação por precipitação dos produtos de hidratação, tornando a distribuição de finos mais homogênea na pasta.

A adição de sílica ativa diminui a disponibilidade de CH no concreto e afeta a morfologia dos seus cristais. Isto é importante no desenvolvimento da resistência do concreto, desde que a ausência da zona de transição, comprimindo os cristais de CH, contribua na formação de uma melhor ligação pasta-agregado.

PAPADAKIS (1999) realizou uma investigação experimental para avaliar a influência da sílica ativa no concreto e constatou que a adição, por substituição do volume de cimento Portland e agregado, aumenta a resistência mecânica do material. Além disso, DUVAL & KADRI (1998) verificaram que a adição de até 10% de sílica ativa em substituição de cimento Portland, não só aumenta a resistência mecânica do material, como ainda mantém sua trabalhabilidade. Percebe-se também que a resistência à compressão aumenta com o aumento da quantidade de sílica ativa; no entanto, essa resistência depende muito mais da diminuição do fator água/cimento do que da substituição do cimento por sílica ativa.

Considerando a velocidade das reações devido à adição de sílica ativa, pode-se dizer que a maior parte do CH liberado inicialmente pela hidratação do cimento é imediatamente consumida pela reação pozolânica. Uma parte pode até permanecer na matriz como cristais muito finos. Tem sido demonstrado que o CH na solução é

necessário para a dissolução das partículas de sílica ativa, que agem como pontos de nucleação. A subsequente transformação das partículas de sílica ativa dissolvidas em um gel rico de sílica e em seqüência formando C-S-H, não permite o crescimento livre de grandes cristais de CH em qualquer estágio da hidratação.

Um estudo teórico e experimental da zona de interface no concreto, realizado por BENTZ et al. (1992), verificou que a adição de sílica ativa resultou em uma melhor homogeneidade de C-S-H na mistura, uma diminuição significativa da porosidade e, conseqüentemente, uma diminuição do coeficiente de difusividade e permeabilidade.

De maneira geral, a adição de sílica ativa modifica as propriedades da pasta de cimento. RAO (1998), estudando a influência da adição de sílica ativa na proporção de 0 a 30% em substituição ao cimento, verificou que na expansão e retração por secagem:

- a) o efeito da sílica ativa na retração por secagem é significante nas pequenas idades;
- b) o efeito da reação pozolânica em idades avançadas é insignificante, porque essas reações são completadas em pequenas idades;
- c) quanto maior a quantidade de sílica ativa adicionada, maior a retração por secagem devido à adição de sílica ativa aumentar a quantidade de silicato de cálcio hidratado o qual é o fator mais importante na retração por secagem;
- d) a adição de sílica ativa reduz a expansão.

ZELIC et al. (2000) pesquisaram as propriedades das argamassas confeccionadas com cimento Portland, pedra calcária e sílica ativa, e observaram que:

- a) a adição de pedra calcária aumenta consideravelmente a porosidade total das argamassas;
- b) para adição de sílica ativa nas proporções de 0, 2, 5, 8, 11 e 15% em substituição do cimento, nota-se que, para a adição de sílica ativa em até 8%, tem-se um decréscimo na porosidade, enquanto que para adições maiores que 8% observa-se um aumento;
- c) para argamassas com 8% de sílica ativa, tem-se uma elevada resistência à compressão, baixa porosidade e descontinuidade da estrutura porosa;
- d) o decréscimo do conteúdo de CH devido à reação pozolânica é visível apenas nas amostras com mais de 8% de sílica ativa. Para 15% de substituição, aproximadamente todo o CH é consumido durante um período de 120 dias.

MELO (2000) e SILVA et al. (2000) observaram que a adição de sílica ativa melhora a qualidade da matriz e refina a estrutura porosa do concreto melhorando assim suas propriedades mecânicas e durabilidade (Figura 2.5).

FIGURA 2.5 - Resultado de porosidade obtido por intrusão de mercúrio para amostras de pastas de cimento CP V ARI RS, com e sem sílica ativa e fator $a/agl = 0,5\text{kg/kg}$ (SILVA et al., 2000).

Segundo MELO (2000), a microestrutura de pastas de cimento contendo sílica ativa, em comparação à pasta de cimento Portland sem adições, indica que a sílica ativa é efetiva na redução do tamanho e continuidade dos poros; dessa forma, a combinação de cimento Portland com sílica ativa resulta em uma matriz mais densa e de baixa porosidade.

Assim, a adição de sílica ativa deveria provocar uma carbonatação mais lenta devido à menor permeabilidade; no entanto, observa-se que a reação pozolânica reduz a quantidade de CH, provocando maiores profundidades carbonatadas (BIER, apud NEVILLE⁶, 1997).

De um modo geral, esse comportamento se verifica para outros tipos de adições. De acordo com XUEQUAN et al. (1999), a profundidade de carbonatação de concretos executados com adições de escória de alto forno e cinza volante, é quase duas vezes maior que a profundidade de carbonatação obtida em concretos sem adição; isto se deve à redução da alcalinidade causada pela diminuição da quantidade de cimento na mistura.

⁶ BIER, Th. A. (1987). **Influence of type of cement and curing on carbonation progress and pore structure of hydrated cement paste**, Materials Research Society Symposium.

3. FENÔMENO DA CARBONATAÇÃO

Ao misturar-se cimento Portland e água desencadeiam-se reações químicas de hidratação dos compostos anidros do cimento, originando os cristais hidratados. Esses cristais são estáveis, mas, quando o meio ambiente é agressivo, são transformados.

Quando uma estrutura de concreto está exposta à ação do gás carbônico (CO_2) pode ocorrer o fenômeno da carbonatação. O termo carbonatação é utilizado para descrever o efeito do dióxido de carbono, usualmente da atmosfera, em argamassas e concretos estruturais. Outro termo utilizado para descrever o processo de carbonatação é a neutralização.

O gás carbônico na presença da umidade nos poros e em contato com a superfície do concreto, forma uma “frente de carbonatação” com a formação inicial do ácido carbônico. Vale ressaltar que é o ácido carbônico quem provoca a neutralização do concreto, pois o CO_2 gasoso não é reativo.

A água, representada pela umidade relativa, é importante no mecanismo de reação, porque não ocorrerá carbonatação em altos e baixos níveis de umidade relativa.

A penetração do CO_2 na estrutura de concreto é lenta; no entanto, sua reação desencadeia uma série de alterações nas propriedades físico-químicas, como por exemplo, a variação da porosidade da pasta e, conseqüentemente, o aumento da

resistência mecânica da estrutura. Na Figura 3.1 tem-se uma representação esquemática da frente de carbonatação.

FIGURA 3.1 - Frente de carbonatação (RICHARDSON, 1988).

A carbonatação avança do exterior para o interior do concreto reduzindo o valor do pH de aproximadamente 12 para 8,3 na região carbonatada.

O hidróxido de cálcio é o maior responsável pela carbonatação. Sua reação com o gás carbônico, e na presença de umidade, produz o carbonato de cálcio (Equação 3.1).

FIGURA 3.2 – Vista do CaCO_3 , em telhas de fibrocimento (LIBORIO, 2001).

FERNANDEZ PARIS (1973) ressalta que a carbonatação atuando na superfície do concreto pode modificar suas características, tais como: resistência mecânica, porosidade, permeabilidade, durabilidade frente a agentes salinos e, indiretamente, a proteção das armaduras em concreto armado e protendido. O incremento de resistência mecânica pode ser observado em alguns casos devido ao volume do produto da carbonatação ser maior do que o composto hidratado de origem, o que torna a estrutura mais compacta.

O concreto armado ou protendido neutralizado pode apresentar baixa durabilidade, porque o processo de carbonatação reduz o pH da água dos poros da pasta de cimento acarretando a despassivação do aço, podendo trazer as armaduras aos limites de corrosão. A carbonatação pode ser um fator para iniciar a corrosão, mas a carbonatação e a corrosão não estão inexoravelmente ligadas, uma vez que a umidade relativa que mais favorece a carbonatação está em torno de 60% e a que mais favorece a corrosão excede 80%.

3.1. ESTRUTURA POROSA DO CONCRETO

O concreto é constituído de um sólido compacto e denso, porém poroso. A rede de poros é um entremeado de canais e capilares, nem sempre com comunicação entre si, mas que permite um certo grau de difusão aos líquidos e aos gases.

A porosidade de uma pasta de cimento endurecida é proveniente da relação água/cimento, vibração, cura e da composição química do cimento. A existência desses poros afeta as propriedades físicas e mecânicas do concreto, tais como: resistência à compressão, flexão, tenacidade, módulo de elasticidade, retração e fluência, difusão e permeabilidade.

O concreto no estado endurecido apresenta três tipos de vazios. O menor desses são os poros de gel; os seguintes são os poros capilares que são formados pelo espaço originalmente ocupado pela água de amassamento e o terceiro tipo são as bolhas de ar que são formadas durante o adensamento. Seus tamanhos característicos são visto na Figura 3.3.

FIGURA 3.3 – Quantidade e significado dos tipos de vazios presentes na pasta de cimento Portland, MELO (2000).

A alta porosidade é um dos principais fatores de deterioração do concreto quando em meio ambiente agressivo, porque o transporte de substâncias agressivas está diretamente relacionado com a quantidade e as características dos poros. É através dos poros que agentes agressivos penetram no concreto provocando

alterações físicas e químicas, mudando as condições de estabilidade da matriz do concreto.

BENTZ et al. (1992), estudando a continuidade da porosidade capilar para várias condições de hidratação da pasta de C_3S com várias relações água/cimento, de 0,35 até 0,70, mostraram que inicialmente os poros são inteiramente interligados.

BENTZ & GARBOCZI (1992) apresentaram uma correlação entre a relação água/aglomerantes e teores de sílica ativa (SA) (0% a 30%) e o grau de hidratação necessário para que ocorra uma descontinuidade dos poros, conforme Tabela 3.1.

TABELA 3.1 - Relação a/c versus %SA versus grau de hidratação necessário para se conseguir a descontinuidade dos poros (BENTZ & GARBOCZI, 1992).

Relação	Quantidade de sílica ativa (%)									
A/C	0	2,5	5	7,5	10	12,5	15	20	25	30
0,225	0,31	0,27	0,23	0,22	0,22	0,22	0,21	0,20	0,20	0,19
0,250	0,36	0,32	0,27	0,26	0,26	0,25	0,25	0,24	0,24	0,23
0,275	0,41	0,37	0,32	0,30	0,29	0,29	0,29	0,28	0,27	0,26
0,300	0,46	0,42	0,37	0,33	0,33	0,32	0,32	0,32	0,31	0,30
0,325	0,51	0,47	0,42	0,37	0,37	0,36	0,36	0,35	0,35	0,34
0,350	0,56	0,52	0,47	0,42	0,41	0,40	0,40	0,39	0,38	0,38
0,375	0,61	0,57	0,52	0,47	0,44	0,44	0,44	0,43	0,42	0,41
0,400	0,66	0,62	0,57	0,52	0,48	0,47	0,47	0,47	0,46	0,45
0,425	0,71	0,67	0,62	0,57	0,53	0,51	0,51	0,50	0,50	0,49
0,450	0,76	0,72	0,67	0,62	0,58	0,55	0,55	0,54	0,53	0,53
0,475	0,81	0,77	0,72	0,67	0,63	0,59	0,59	0,58	0,57	0,56
0,500	0,86	0,82	0,77	0,72	0,68	0,63	0,62	0,62	0,61	0,60
0,525	0,91	0,87	0,82	0,77	0,73	0,68	0,66	0,65	0,65	0,64
0,550	0,96	0,92	0,87	0,82	0,78	0,73	0,70	0,69	0,68	0,68
0,600	--	--	0,97	0,92	0,88	0,83	0,78	0,76	0,76	0,75
0,650	--	--	--	--	0,98	0,93	0,88	0,84	0,83	0,82
0,700	--	--	--	--	--	--	0,98	0,91	0,91	0,90

SMOLCZYK, apud RICHARDSON⁷ (1988), diz que o diâmetro do poro necessário para que ocorra o fluxo de gás carbônico deve ser maior que 3×10^{-8} mm,

⁷ SMOLCZYK, H.G. (1976). **Physical and Chemical phenomena of carbonation**, proceedings, RILEM international Symposium on Carbonation of Concrete, C&CA, Fulmer Grange.

enquanto que, para a Comissão de Carbonatação apud RICHARDSON⁸ (1988), esse diâmetro deve ser no mínimo de 2×10^{-6} mm; já PAROTTE, apud RICHARDSON⁹ (1988) usou um valor de 5×10^{-6} mm.

NGALA & PAGE (1997) observaram que o efeito da estrutura do poro na carbonatação e nas propriedades de difusão de uma pasta de cimento hidratado depende do aglomerante utilizado; no entanto, CLAISSE et al. (1999) verificaram que, de maneira geral, a carbonatação reduz a permeabilidade e a porosidade.

SURYAVANSHI & SWAMY (1997) verificaram que, em concretos, a atmosfera agressiva de gás carbônico e penetração de cloretos provocam uma modificação da estrutura porosa original.

MASSAZZA (1987) afirma que a ação do gás carbônico em bons concretos é praticamente inexistente, enquanto que para os concretos porosos e armados com barras de aço foram encontradas sérias deteriorações na armadura; portanto, vale ressaltar que os concretos de boa qualidade apresentam baixos valores de profundidade carbonatada, como pode ser observado na Figura 3.4 (HO & LEWIS, 1987).

ROY et al. (1996), CASTRO et al. (2000) e HAQUE & KHAIAT (1997), observando edifícios costeiros, concluíram que a profundidade de carbonatação diminui com o aumento da resistência à compressão do concreto.

⁸ Commission Carbonation (1972). **Compte rendu de la premiere reunion**, Paris, 29 Mars 1971 [Report of the first meeting, Paris, 29 march 1971] *Materiaux et Constructions* Vol.5 N°.25.

⁹ PARROTT, L.J. (1987). **A review of carbonation in reinforced concrete**, Cement Concrete Association/ Building Research Establishment.

FIGURA 3.4 - Profundidade carbonatada x idade, para corpos-de-prova curados por 28 dias (HO e LEWIS, 1987).

SANJUÁN & OLMO (2001) apresentam alguns valores característicos do coeficiente de carbonatação (K) e do coeficiente de difusão (D) para concreto pobre, médio e rico (Tabela 3.2).

TABELA 3.2 – Valores do coeficiente de carbonatação e do coeficiente de difusão, SANJUÁN & OLMO (2001).

Qualidade do Concreto	K (mm/ano ^{0,5})	D (m ² /s)
Pobre	> 10	$> 5 \times 10^{-7}$
Médio	$5 - 10$	$5 \times 10^{-7} - 5 \times 10^{-8}$
Rico	< 5	$< 5 \times 10^{-8}$

TSIVILIS et al. (2000), estudando as propriedades e o comportamento do cimento contendo 20% de pedra calcária em concretos e argamassas, verificaram que a durabilidade do concreto é melhorada, pois se observa uma redução na porosidade da argamassa, um decréscimo na profundidade carbonatada e, conseqüentemente, uma ótima proteção contra a corrosão das armaduras.

Segundo BIJEN (1996), os concretos executados com escória e cinza volante são mais resistentes a ataques químicos do que concretos sem adições, devido à redução da taxa de penetração de íons cloreto no concreto.

OZYILDIRIM (1994), avaliando a resistência e a permeabilidade de várias combinações de adição, por substituição de cimento por sílica ativa e escória em concretos com relação água/aglomerante de 0,4 e 0,45, observou que, quando se utilizam adições de escória e sílica ativa, obtém-se concretos com baixa permeabilidade.

3.2. ASPECTOS FÍSICOS

O ingresso do gás carbônico, em concentrações normais atmosféricas (com variação de 0,03% a 1,0% em volume), na estrutura de poros do concreto, é causado por uma diferença de concentração e é denominado de difusão. Essa difusão realiza-se por meio de poros capilares interconectados (rede capilar) e microfissuras ou bolhas de ar. Determinados agregados são porosos e podem também fazer parte do sistema de transporte (RICHARDSON, 1988).

Segundo o CEB 152 (1983), a difusão é o processo pelo qual um líquido ou um gás percola num substrato devido à diferença de concentração, resultando na migração de uma zona de maior concentração para uma de menor concentração.

HELENE (1993) afirma que a penetração do gás carbônico no concreto dá-se preponderantemente pela difusão e que os mecanismos de absorção capilar e migração de íons não se aplicam ao caso.

HOBBS (1999) e SAROTT et al. (1992) verificaram que o fator água/cimento interfere significativamente na porosidade, e, conseqüentemente, no coeficiente de difusão.

O tratamento teórico do fenômeno de carbonatação admite que o coeficiente de penetração de gás carbônico pode ser modelado pela Primeira Lei de Fick, (Equação 3.2).

$$Q = -D \cdot A \cdot \frac{dc}{dx} \quad (3.2)$$

onde: Q = taxa de transferência do material;

D = coeficiente de difusão;

A = área da seção pela qual o fluxo acontece;

dc/dx = gradiente de concentração;

c = concentração da substância difundida;

x = distância que o gás difunde.

No caso do concreto, a determinação do coeficiente de difusão (Lei de Fick) é dificultada devido à grande variação no diâmetro dos poros e no comprimento da trajetória do gás em seu interior, de forma que a abordagem mais simplista correlaciona-o com o coeficiente de permeabilidade definido na lei de Darcy (Equação 3.3).

$$Q = -K' \cdot A \cdot \frac{dp}{dx} \quad (3.3)$$

onde: Q = taxa de transferência do material;

K' = coeficiente de permeabilidade;

A = área da seção pela qual o fluxo acontece;

dp/dx = gradiente de pressão;

p = pressão

x = distância que o gás difunde.

Inicialmente o CO₂ não difunde ao interior do concreto, porque a tendência é de combinar, ainda na superfície, com o Na, KOH (álcalis) e Ca(OH)₂, reduzindo

assim o valor do pH. Posteriormente, a tendência é de o CO_2 penetrar mais profundamente no concreto, por meio da difusão, dando continuidade ao processo de carbonatação. Vale ressaltar que o avanço da frente de carbonatação está diretamente relacionado com a facilidade que o CO_2 encontra para difundir-se. Na Figura 3.5 está esquematizado a difusão do CO_2 nos poros presentes na pasta de cimento endurecida.

FIGURA 3.5 - Ilustração da difusão do CO_2 na pasta de cimento (CEB 152, 1983).

3.3. ASPECTOS QUÍMICOS

Inicialmente há a difusão do gás carbônico para o interior do elemento cimentício, que na presença de umidade desencadeia a dissolução do CO_2 formando o ácido carbônico que é reativo. Esse ácido reage com os álcalis presentes na solução, reduzindo o valor do pH e, por consequência, dissociando os cristais de hidróxidos de cálcio. Portanto tem-se o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e o CO_2 dissolvidos; conseqüentemente, ocorre a precipitação do carbonato de cálcio em suas variedades vaterita, aragonita ou calcita, dependendo dos fatores externos que intervêm durante sua formação.

Para MASSAZZA (1987), o gás carbônico reage inicialmente com os álcalis e hidróxido de cálcio presentes na solução, preenchendo os poros da pasta de cimento e eventualmente formando a calcita.

Nas Equações (3.4) a (3.8) estão descritas, de forma simplificada, as reações responsáveis pela carbonatação através do hidróxido de cálcio. Inicialmente é necessário que o CO_2 difunda-se através dos poros do concreto em direção à região de menor concentração e dissolva-se na solução intersticial dos poros - Equações (3.4), (3.5) e (3.6) - ocorrendo a reação com os álcalis presentes na solução, que é responsável pela redução do valor do pH (KOBAYASHI e UNO, 1989). MONTEIRO e NEPOMUCENO (1997) indicaram através da Equação (3.7) que os cristais de Ca(OH)_2 se dissolvem na fase aquosa do concreto. Através da Equação (3.8) nota-se o desencadeamento da reação do Ca(OH)_2 com o CO_2 , ambos dissolvidos nos poros, originando o carbonato de cálcio e reduzindo o volume de poros.

PAPADAKIS et al. (1992) verificaram que a taxa de carbonatação depende, não só da concentração do hidróxido de cálcio, mas também do silicato de cálcio hidratado que contém CaO .

KOBAYASHI et al. (1994), REARDON et al. (1989) e MOLLAH et al. (1993), estudaram a carbonatação do silicato de cálcio hidratado e observaram a dissociação da fase C-S-H e a formação de CaCO_3 , mais sílica e água. Está representado na Equação (3.9) a formação do C-S-H e, na Equação (3.10), os produtos formados devido à carbonatação desse silicato. Quanto à formação do C-S-H, NISHIKAWA & SUZUKI (1994) verificaram que pode ser analisado quantitativamente através de métodos analíticos.

Segundo RICHARDSON (1988), tanto o hidróxido de cálcio quanto o silicato hidratado de cálcio, na presença do gás carbônico, originam o carbonato de cálcio CaCO_3 que, na presença do CO_2 e água, forma o bicarbonato $[\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2]$, Equação(3.11) à Equação(3.15).

Ainda segundo o autor, alguma quantidade de bicarbonato é lavada do concreto, mas uma parte penetra e combina-se com hidróxido de cálcio, formando o carbonato de cálcio (Equação 3.16).

A Figura 3.6 mostra a liberação e a reação do bicarbonato, podendo ser observado que a camada carbonatada estender-se-á ao interior da superfície.

FIGURA 3.6 - Mecanismo de reação químico (RICHARDSON, 1988).

A Equação (3.17) é um resumo das reações de carbonatação, sendo incluído a fase do bicarbonato de cálcio.

Do ponto de vista físico-químico verifica-se uma ação de neutralização e a formação de compostos cristalinos mais estáveis. A carbonatação muda a estrutura dos compostos hidratados, mas não prejudica a resistência mecânica do concreto e sim a favorece. De acordo com FERNANDEZ PARIS (1973), os cristais de CaCO_3 depositam-se a uma determinada distância da posição inicial do Ca(OH)_2 cristalino, preenchendo os vazios. Esse fato explica, em parte, o aumento da compactidade da pasta carbonatada. Tem-se também o aumento do volume na ordem de 11% quando desencadeia a reação abaixo, porque o volume molecular da portlandita é 33,2 e o da calcita é 36,9 (Equação 3.18).

NGALA & PAGE (1997) também concluem que a resistência da pasta carbonatada aumenta com o avanço da carbonatação devido ao preenchimento dos poros com CaCO_3 .

3.4. FORMAÇÕES MINERALÓGICAS

O carbonato de cálcio pode ser encontrado de três formas mineralógicas: calcita, aragonita e vaterita. A vaterita apresenta-se na forma de cristais fibrosos e esféricos na sua forma cristalina, enquanto que a aragonita e a calcita são minerais bem definidos e estáveis e apresentam-se na forma ortorrômbica e romboédrica respectivamente.

FERNANDEZ PARIS (1973) descreve que, no princípio da carbonatação do CH, devido à característica básica da pasta, a vaterita se precipitará junto com uma pequena quantidade de aragonita devido à possível presença de sulfatos e sais de bário, estrôncio e magnésio, e na ausência destes sais deve-se precipitar calcita. O carbonato de cálcio precipitado na forma de vaterita ou aragonita com o decorrer do tempo e, devido à presença de dissoluções de CaCO_3 , serão transformadas em calcita.

ALCOCEL et al. (2000), estudando a carbonatação em argamassas, verificou que prevalece a formação da calcita, e a formação da aragonita e da vaterita depende da temperatura e das condições de tratamento.

Segundo JANOTKA et al. (1996), o processo de cristalização do carbonato procede primeiramente pela aragonita e posteriormente pela calcita.

Segundo RICHARDSON (1988), na carbonatação algumas vateritas são formadas primeiro, mas são convertidas gradualmente em calcita mais estável. Uma

possível explicação para isto poderia ser o grau variado de hidratação da pasta de cimento.

O autor também afirma que a carbonatação do C_3S hidratado produz calcita e, do não-hidratado, produz vaterita de forma que o nível de vaterita diminuirá se a hidratação do cimento não for interrompida. A vaterita é formada primeiro e, devido a reações sucessivas, é transformada em aragonita e finalmente em calcita com uma cristalização inferior.

NUNES (1998) também afirma que a carbonatação do C_3S na forma anidro, tende a formar cristais de vaterita e, quando hidratado, seus produtos reagem formando calcita.

Em conclusão, o composto que produz maior quantidade de hidróxido de cálcio é o C_3S hidratado, originando, freqüentemente, a calcita que é a forma mineralógica mais encontrada no concreto carbonatado.

3.5. O PERFIL DO pH

A água dos poros do concreto não carbonatado tem um pH em torno de 12 devido ao hidróxido de cálcio dissolvido e aos álcalis solúveis dos agregados. O ingresso e reação do gás carbônico causam a diminuição do pH, para aproximadamente 8,3 quando o concreto está completamente carbonatado. A Figura 3.7 mostra o aspecto químico do fenômeno de carbonatação, incluindo um perfil de pH para a distância do concreto carbonatado e não carbonatado.

PAPADAKIS et al. (1991) desenvolveram um modelo matemático para a previsão da evolução da carbonatação com o tempo, sendo o valor do pH e da

profundidade carbonatada determinados a partir da quantidade de hidróxido de cálcio.

FIGURA 3.7 - Modelo simplificado da carbonatação do concreto (CEB 148, 1982).

3.6. FATORES QUE INFLUENCIAM NA PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO

Ao analisar os efeitos prejudiciais da carbonatação, quando for o caso, nos elementos cimentícios, é importante estudar os fatores que influenciam esse fenômeno.

3.6.1. Idade do concreto

Quando é necessário fazer um prognóstico de uma estrutura de concreto é importante estimar a profundidade carbonatada com o tempo; portanto, várias teorias foram desenvolvidas para tentar descrever a relação entre profundidade de carbonatação e idade do concreto.

A maioria dessas teorias se aplica em determinados tipos de concretos. No caso, por exemplo da argamassa armada, LIBORIO (1990) demonstrou que peças com idade de 25 anos (vigas-telhas) apresentavam apenas 2 mm de carbonatação. Aquelas peças foram realizadas com traços em massa de 1:2 e relação a/c = 0,37. Isso demonstra o enunciado de HELENE (1986), com respeito ao cobrimento de proteção da armadura, que, “para diferentes concretos, há diferentes níveis de proteção”.

Segundo VERBECK, apud FERNANDEZ PARIS¹⁰ (1973), uma relação não linear freqüentemente usada é a proposição de que a profundidade de carbonatação é proporcional à raiz quadrada do tempo de exposição (Equação 3.19).

$$x = K \cdot \sqrt{t} \quad (3.19)$$

onde: K = coeficiente de carbonatação que depende do material e do ambiente (mm/ano^{0.5});

x = profundidade carbonatada (mm);

t = tempo de exposição (ano).

n = 2

¹⁰ VERBECK G.J. (1958). **Carbonation of hydrated portland cement**. American Society Testing Material - Special Technical Publication, pp. 17-36.

SMOLCZYK, apud NUNES¹¹ (1998), propõe que a carbonatação em função do tempo seja obtida pela Equação (3.20).

$$x = K \cdot \sqrt[n]{t - t_0} \quad (3.20)$$

onde: x = profundidade carbonatada (mm);

K = coeficiente de carbonatação (mm/ano^{0.5}) ;

t = tempo de exposição (ano).

t₀ = período de retardamento

n = parâmetro que depende do tipo de cimento, geralmente próximo de 1,7 para cimentos Portland e de 2,0 para cimentos com escória.

MASSAZZA (1987) diz que o valor de n refere-se à umidade relativa do ambiente de exposição, sendo, geralmente, 2 para ambiente seco, e maior que 2 para ambiente com umidade crescente.

HO & LEWIS (1987) adaptaram a equação (3.19) para casos onde ocorra uma carbonatação inicial (Equação 2.21).

$$x = x_0 + K \cdot \sqrt{t} \quad (3.21)$$

onde: x₀ = Profundidade de carbonatação inicial

Segundo NILSSON (1996), o coeficiente de carbonatação pode ser obtido a partir da concentração de CO₂ e da quantidade de material carbonatado (Equação 3.22)

$$K = \sqrt{2 \cdot D_{CO_2} \cdot \frac{C_{CO_2}}{C_{Ca}}} \quad (3.22)$$

onde: K – coeficiente de carbonatação;

D_{CO2} – coeficiente de difusão;

¹¹ SMOLCZYK, H.G. (1969). In: **The V. International Symposium on the Chemistry of Cement**, Tokyo, Proceedings.

C_{CO_2} – concentração de CO_2 ;

C_{Ca} – quantidade de material carbonatado.

PAPADAKIS (2000) também desenvolveu uma expressão empírica para a determinação do coeficiente de carbonatação, quando na presença de adições (Equação 3.23)

$$K = \sqrt{\frac{2 \cdot D_{e, CO_2} \cdot (CO_2 / 100)}{0,33 \cdot CH + 0,214 \cdot CSH}} \quad (3.23)$$

onde: K – coeficiente de carbonatação;

D_{e, CO_2} – coeficiente de difusão;

CO_2 – quantidade de gás carbônico no ar (%);

CH – quantidade de hidróxido de cálcio;

CSH – quantidade de silicato de cálcio hidratado.

JIANG et al. (2000) desenvolveram um modelo matemático para previsão do processo de carbonatação em concreto com adição de cinza volante. As profundidades de carbonatação previstas pelo modelo foram comparadas com resultados experimentais (Equação 3.24).

$$x = 839(1 - UR)^{1,1} \sqrt{\frac{\frac{W}{r_c C} - 0,34}{r_{HD} r_c C} \cdot C_0 \cdot \sqrt{t}} \quad (3.24)$$

onde: UR = umidade relativa;

W = consumo de água (kg/m^3);

C = consumo de cimento (kg/m^3);

C_0 = concentração de CO_2 (%);

r_c = coeficiente que depende do tipo de cimento;

r_{HD} = coeficiente que depende do grau de hidratação;

t = tempo de exposição (dias).

3.6.2. O efeito da concentração do dióxido de carbono

O fenômeno da carbonatação é natural, podendo ocorrer em ambientes de baixa concentração de CO_2 . O teor de CO_2 em um ambiente rural é cerca de 0,03% em volume, ambientes marítimos 0,03%, lugares fechados de 0,05% a 0,1%, laboratório não ventilado 0,1%, em grandes cidades e regiões industrializadas é esperado de 0,3% a 1,0%, em garagens e viadutos 0,2% e em um silo de grão 1,0% dentre outros.

A velocidade de carbonatação aumenta consideravelmente com o aumento de concentração de CO_2 presente no meio ambiente em contato com a superfície do concreto.

ROY et al. (1999), estudando a durabilidade do concreto e verificando a carbonatação e o desgaste, observaram que a taxa de carbonatação, K ($\text{mm}/\text{anos}^{0,5}$) medida em ensaio acelerado de carbonatação (6 vol%), é consideravelmente alta, quando comparada com as condições atmosféricas normais (0,03 - 0,06 vol%).

Segundo RICHARDSON (1988), em concentrações normais de gás carbônico, cada metro cúbico de ar contém uma quantia de gás carbônico que tem potencial para reagir com o concreto a uma profundidade de aproximadamente 0,02 mm por metro quadrado da superfície de concreto. Na prática, a taxa será determinada pelas características de difusão do concreto e a fração do gás carbônico disponível para reagir.

Os ensaios de laboratório são efetuados em curtos intervalos de tempo; sendo assim, a correspondente concentração de CO_2 nessa micro-região, em contato com o corpo-de-prova, é maior. Existe uma certa preocupação (FIGUEIREDO, 1994 e REARDON et al., 1989) com a correlação entre os ensaios realizados em curtos

períodos de tempo e com os ensaios naturais de longos intervalos de tempo. Devido a essa preocupação existente no meio acadêmico, (HO & LEWIS 1987) desenvolveram uma pesquisa e encontraram um gradiente de aproximação entre os resultados obtidos com 5 anos de estocagem em laboratório e os resultados obtidos após uma semana em uma atmosfera com 4% de dióxido de carbono (Figura 3.8).

FIGURA 3.8 - Resultados dos ensaios de curta duração e de longa duração para diferentes tipos de concreto (HO & LEWIS, 1987).

3.6.3. Umidade relativa do ar

Os poros existentes no concreto podem conter diferentes concentrações de água devido à variação da umidade relativa do ar.

Em ambientes com umidade relativa baixa, a água disponível é insuficiente para iniciar o processo de carbonatação. Como não existe água nos poros, o gás carbônico penetra até a região interna do concreto sem iniciar as reações que dão origem à carbonatação.

Com umidade relativa crescente, é observado um aumento ininterrupto no grau de carbonatação até um limite máximo alcançado com aproximadamente 60% de umidade relativa. A partir desse valor o grau de carbonatação começa a diminuir,

devido à saturação dos poros, impedindo a difusão do gás carbônico. Esses efeitos são ilustrados na Figura 3.9.

FIGURA 3.9 - Grau de carbonatação do concreto em função da umidade relativa (LIBORIO, 1999).

ROY et al. (1999) observaram, através de um estudo experimental de carbonatação acelerada, que a profundidade carbonatada é máxima quando atinge umidades relativas entre 52% e 75%.

ELFVING et al. (1996) monitoraram a formação do CaCO_3 e Ca(OH)_2 , e observaram que a água é uma condição necessária para a ocorrência da carbonatação.

3.6.4. Incidência de chuva

Quando uma estrutura de concreto está exposta à incidência de chuvas, a frente de carbonatação é impedida de difundir porque os poros ficam saturados. Já no período de estiagem, o gás carbônico penetra nos poros desencadeando o processo de carbonatação.

OKOCHI et al. (2000) observaram em amostras de argamassas que a carbonatação é mais intensa nas amostras protegidas da chuva do que as expostas.

As faces da estrutura exposta às chuvas apresentam profundidade de carbonatação menor que as faces protegidas, porque as faces expostas estão sujeitas a carbonatação apenas no período de estiagem e as faces protegidas estão sujeitas durante todo o período do ano.

3.6.5. Fissuras

O comportamento do gás carbônico em uma fissura é diferente do comportamento do mesmo em contato com a superfície do concreto exposto à atmosfera. A difusão do gás carbônico, na superfície da peça de concreto, é ilimitada, enquanto que a difusão do CO_2 em uma fissura será limitada pela sua dimensão e pela taxa de penetração do gás.

O coeficiente de difusão do CO_2 na fissura dependerá da umidade relativa que pode variar com o tempo e ao longo da profundidade da fissura, e também do transporte de pó e sujeiras para dentro da fissura através do vento e da chuva.

Considerando a fissura no contexto de durabilidade, RICHARDSON (1988) afirma que um parâmetro importante é a taxa à qual o gás carbônico penetra abaixo da fissura, porque o CO_2 se difunde em duas superfícies de concreto e assim a intensidade do ataque pode ser reduzida mais adiante.

Uma importante expressão teórica foi estudada por SCHIESSL (1984) para o cálculo da profundidade de penetração da frente de carbonatação em uma fissura (Equação 3.25):

$$y = D \cdot \sqrt{w \cdot t} \quad (3.25)$$

onde: y = profundidade de penetração da frente de carbonatação abaixo de uma fissura;

D = um parâmetro dependente do coeficiente de difusão do CO_2 efetivo da fissura;

w = largura da fissura;

t = tempo de exposição.

O fator D , para concreto fissurado em ambiente externo, é muito baixo e isto provavelmente deve-se ao acúmulo de umidade e partículas do meio ambiente na fissura.

Segundo NUNES (1998), a presença de fissuras no concreto facilita a entrada do gás carbônico permitindo uma rápida penetração.

CASTEL et al. (1999), estudando o comportamento de uma viga carregada frente à ação da carbonatação, verificou que o surgimento de fissuras, devido ao carregamento mecânico, aumenta a difusão de agentes agressivos.

Portanto, dependendo das condições da fissura (e da qualidade do material), sua existência pode acelerar ou retardar o processo de carbonatação dependendo da localização e condições ambientais em que esta se encontra.

3.6.6. Efeito do conteúdo, tipo, e qualidade do cimento

Vários são os fatores que influenciam a velocidade de propagação da carbonatação e, dentre estes, se pode citar a composição química do clínquer, o efeito de suas adições e o consumo de cimento.

A composição química do clínquer está associada ao desenvolvimento de diferentes tipos de poros, afetado pelo crescimento diferenciado dos cristais dos diferentes compostos hidratados do clínquer original.

HOBBS (1988), MALAMI et al. (1994) e HO & LEWIS (1987) verificaram que os compostos confeccionados com cimento Portland e adições, apresentam profundidade carbonatada maior, quando comparados com compostos sem adições. HO & LEWIS (1987) constataram que a adição de cinza volante ao concreto aumenta consideravelmente a profundidade carbonatada (Figura 3.10).

FIGURA 3.10 - Influência da adição de cinza volante na profundidade carbonatada (HO & LEWIS, 1987).

ABREU & DALMOLIN (1997) observaram que é possível empregar altos teores de pozolanas em concretos de elevado desempenho, com obtenção de uma boa durabilidade, vida útil de 100 anos e com profundidade carbonatada igual ou inferior a 30 mm.

ISAIA et al. (1998), estudando misturas binárias e ternárias de cimento Portland de alta resistência inicial com cinza volante, cinza de casca de arroz e sílica ativa, observou que é possível obter-se concretos duráveis devido ao bom desempenho dessas adições.

O aumento da quantidade de cimento por metro cúbico de concreto associado à redução da relação água/cimento reduz consideravelmente a profundidade de carbonatação. As justificativas para a redução da profundidade carbonatada é o

aumento da concentração de álcalis, que é proporcional ao conteúdo de cimento e à diminuição da permeabilidade devido ao aumento do conteúdo de cimento.

Segundo RICHARDSON (1988), um concreto com conteúdo de cimento de 500 kg/m^3 irá demorar três vezes mais para carbonatar do que uma mistura com 200 kg/m^3 com mesma permeabilidade.

BARRA & VAZQUEZ (1997) verificaram que a taxa de carbonatação é maior para concretos executados com agregados reciclados, quando comparada com a taxa obtida em concretos executados com agregados convencionais, para um consumo de cimento maior que 400 kg/m^3 , enquanto que, para um consumo inferior a 300 kg/m^3 , essa diferença na taxa de carbonatação não existe.

3.6.7. Influência da cura

O termo “cura” é a denominação dada aos procedimentos a que se recorre para promover a hidratação do cimento e consiste em controlar a temperatura, a saída e entrada de umidade para o concreto.

O objetivo da cura é manter o concreto saturado, ou o mais próximo possível da saturação, até que os espaços da pasta fresca de cimento, inicialmente preenchida com água, tenham sido preenchidos pelos produtos da hidratação.

Quanto maior o tempo de cura, maior o grau de hidratação do cimento, menor a porosidade e a permeabilidade e, por conseguinte, menor a carbonatação.

Conforme se observou na Tabela 3.1, apenas para relações água/cimento muito reduzidas os poros serão descontínuos em pequenas idades.

HO & LEWIS (1987), em suas pesquisas, verificaram que a variação da taxa de carbonatação para diferentes concretos é grande quando curados durante um

período de um a sete dias, mas permanece praticamente inalterada quando curados por mais de 7 dias, como está indicado na Tabela 3.3.

TABELA 3.3 - Resultados de carbonatação, sendo a profundidade carbonatada - x_0 (mm) e, K (mm/semana^{0,5}) (HO & LEWIS, 1987).

Tempo de Cura (dias)		f_{c28} (MPa)			
		47	38	29	23
1	x_0	3,5	3,5	4,0	4,0
	K	5,7	7,1	8,8	9,4
7	x_0	1,0	1,5	2,0	2,5
	K	1,6	4,0	5,5	7,6
28	x_0	0,5	1,0	1,5	1,5
	K	1,1	3,8	5,5	7,3
91	x_0	0	0,5	1,5	1,0
	K	1,2	3,9	5,3	7,4
365	x_0	0	0,5	1,0	2,0
	K	1,0	3,9	5,4	6,9

MASSAZZA (1987) afirma que o alto grau de hidratação do cimento impede a penetração de substâncias agressivas no concreto porque o gel hidratado preenche os espaços originalmente ocupados pela água, reduzindo a comunicação entre os capilares.

Quando o concreto não é curado, fica mais poroso que o estimado e, conseqüentemente, a profundidade de carbonatação é maior comparada ao mesmo concreto submetido à cura. RICHARDSON (1988) relata que pode haver um decréscimo de 50% na profundidade de carbonatação quando as argamassas são curadas por 28 dias.

PARROTT (1996), estudando o efeito da cura na carbonatação e na corrosão do concreto armado, concluiu que a média da profundidade carbonatada, após 18 meses de cura, foi 64% menor, quando comparada com períodos de cura de 6 meses. Observou também que a profundidade de carbonatação foi mais sensível ao tipo de cimento do que ao tempo de cura.

A cura é importante mas, a execução de concretos de boa qualidade é imprescindível, pois se o concreto é, por natureza, fraco, o simples fato de curar não é suficiente para evitar o surgimento de poros e conseqüentemente a propagação da carbonatação.

3.6.8. Efeito da geometria do elemento estrutural

O tamanho físico e as características geométricas do elemento estrutural são importantes no caso de vigas e pilares, pois estão sujeitos à carbonatação por duas ou mais faces. O efeito da carbonatação em elementos de seção pequena, e pobres em cimento, pode reduzir vários anos da vida útil da estrutura.

A profundidade de carbonatação é mais alta em seções esbeltas, considerando igual composição de concreto, porque estes são mais sensíveis às mudanças atmosféricas, de temperatura e umidade relativa.

3.6.9. Efeito da relação água/cimento

A relação água/cimento está diretamente relacionada com o tamanho e a continuidade dos poros presentes no concreto, afetando assim suas propriedades físicas e mecânicas.

DHIR et al. (1989), MONTEIRO & NEPOMUCENO (1997) e VEIGA et al. (1998), verificaram que a relação água/cimento é um dos principais fatores que influenciam na qualidade final do concreto em termos de resistência à carbonatação.

Quanto maior a relação água/cimento, maior será a porosidade, a permeabilidade e a profundidade carbonatada do concreto. A Figura 3.11 mostra a profundidade carbonatada para uma variação na relação água cimento.

FIGURA 3.11 – Camada carbonatada x relação água/cimento (LIBORIO, 1999).

A profundidade de carbonatação decresce com o decréscimo da relação água/cimento, especialmente para taxas abaixo de 0,6, porque os poros capilares contínuos não estão mais conectados entre si.

Segundo HO & LEWIS (1987), a relação de água/cimento de uma mistura geralmente é considerada como um dos parâmetros mais importantes para a qualidade final do concreto (Figura 3.12).

FIGURA 3.12 - A influência da relação água/aglomerante no coeficiente de carbonatação do concreto (HO & LEWIS, 1987).

3.6.10. Medidas da profundidade de carbonatação

As medições de profundidade carbonatada podem ser realizadas através de difração de raios-X, análise térmica diferencial, termogravimetria, microscopia eletrônica de varredura e indicadores ácido/base.

Segundo CURTIL et al. (1992), a fenolftaleína é um excelente indicador de pH.

Devido sua facilidade, eficiência e ao baixo custo de realização desse ensaio através do indicador de pH ácido/base, esse procedimento é utilizado com mais frequência. É recomendado pela RILEM, apud RICHARDSON¹² (1988), a utilização de uma solução com: 1% de fenolftaleína, em 70% de álcool etílico e 29% de água destilada. Essa solução deve ser borrifada, na forma de névoa, na superfície dos corpos-de-prova ou estruturas inspecionadas.

A indicação da região não carbonatada é obtida quando se observa uma coloração cor vermelho carmim, enquanto que a carbonatada permanece incolor. A espessura da região incolor (carbonatada) pode ser obtida utilizando-se qualquer instrumento de medida linear com boa precisão (Figura 3.13).

FIGURA 3.13 - Medidas das profundidades de carbonatação.

¹² RILEM Concrete Permanent Committee CPC-18, (1984). **Measurement of hardened concrete carbonation depth**, *Materiaux et Constructions*, vol.17, n° 102.

Como pode ser observado na Figura 3.13, a frente de carbonatação não é uniforme; portanto, durante a realização das medidas da espessura carbonatada é necessário que se faça uma média entre as leituras, incluindo profundidade carbonatada mínima, máxima e normal.

4. CORROSÃO DAS ARMADURAS

É comum se deparar com a execução de concreto com baixa qualidade em obras, o qual compromete o desempenho desse material reduzindo consideravelmente sua vida útil devido ao surgimento de deteriorações. A corrosão das armaduras de concreto armado é uma das deteriorações mais frequentes. Seu surgimento e progresso dependem de alguns fatores como a qualidade do concreto, umidade, temperatura e a existência de agentes agressivos como gás carbônico, sulfatos, cloretos e outros sais que podem afetar consideravelmente a velocidade de deterioração.

O concreto em sua condição normal possui alcalinidade suficiente para manter o pH do sistema próximo a 12,5 e essa alcalinidade é devido aos íons de Na^+ , K^+ , Ca^{+2} e OH^- . A presença desses compostos alcalinos é responsável pela estabilidade do filme passivante que protege a armadura presente nas estruturas de concreto.

Segundo FIGUEIREDO (1994), a hidratação do cimento Portland forma uma fase aquosa de elevado valor de pH e, de acordo com CASCUDO (1997), em idades avançadas o concreto continua propiciando um meio alcalino, sendo nesse caso essa fase líquida composta principalmente por hidróxido de sódio (NaOH) e hidróxido de potássio (KOH) originários dos álcalis do cimento. Essa elevada alcalinidade é responsável pela formação de uma camada de óxido sub microscópica, passivante,

compacta e aderente de $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ sobre a superfície da armadura, protegendo-a da corrosão.

De acordo com NUNES (1998), esse filme protetor é estável para uma determinada faixa de pH e protege a armadura por um período indefinido, mesmo estando o concreto exposto a umidades elevadas, desde que as características químicas e físicas do concreto não sejam alteradas.

A alcalinidade do concreto pode ser reduzida pelo efeito da carbonatação, pois o ácido carbônico presente no concreto reage com os álcalis presentes na solução dos poros, reduzindo o valor do pH, como foi mencionado no capítulo 3. Também é possível que ocorra a redução da alcalinidade pela adição de sílica ativa e por determinadas adições no cimento Portland, como a escória de alto-forno, que reduzem a quantidade de hidróxido de sódio. Esta redução também se dá através da lixiviação do hidróxido de cálcio. Esses fatores são responsáveis pela despassivação da armadura presente no concreto e, em condições ideais, iniciam a corrosão.

4.1. CORROSÃO DA ARMADURA PRESENTE NO CONCRETO

A corrosão pode ser classificada em química e eletroquímica, sendo a corrosão química também conhecida por corrosão seca ou oxidação e ocorre devido a uma reação gás-metal formando uma película de óxidos, enquanto que a corrosão eletroquímica ocorre em meio aquoso, formando uma pilha ou célula de corrosão Figura 4.1.

Esse tipo de corrosão suscita o movimento de elétrons ao longo de trechos da armadura e o movimento iônico através do eletrólito (HELENE, 1986).

FIGURA 4.1 - Pilha ou célula de corrosão eletroquímica – Fonte: HELENE (1986)

A corrosão do aço no concreto é um processo eletroquímico em um meio aquoso. Os potenciais eletroquímicos para formar as células de corrosão podem ser gerados de duas formas:

- quando dois metais diferentes estão embutidos no concreto, tais como barras de aço comum e barras de aço zincada;
- quando há diferenças na concentração de íons dissolvidos na vizinhança do aço, tais como álcalis, cloretos e oxigênio;
- aerações diferenciadas;
- adensamentos heterogêneos, etc.

A corrosão da armadura ocorre à temperatura ambiente e na presença de água, sendo responsáveis por esta corrosão as seguintes reações anódica e catódica:

Reação de oxidação, anódica ou reação de corrosão propriamente dita (Equação 4.1).

Reação de redução ou catódica, com o H^+ proveniente da dissociação da água (Equação 4.2).

Reação de redução ou catódica. O O_2 é o oxigênio do ar dissolvido na água (Equação 4.3).

Vale ressaltar que em meios ácidos os íons de hidrogênio são reduzidos, enquanto que em meios alcalinos ou neutros a redução do oxigênio dissolvido na água é mais freqüente.

Para que a corrosão eletroquímica ocorra são necessárias as seguintes premissas: existir um eletrólito (advindo da UR interna ao concreto, umidade externa, etc), existir um condutor (barras de aço da armadura), ocorrer uma diferença de potencial (porosidade interconectada variável, por exemplo) e oxigênio. Também podem existir fatores aceleradores (íons Cl^- livres, por exemplo).

Na corrosão eletroquímica, Figura 4.1, os elétrons livres presentes na região anódica migram através da barra de aço para a região catódica, onde reagem com alguma substância presente no eletrólito de forma a produzir uma reação catódica. Os íons ferro, dissolvidos na solução porosa, migram em direção ao cátodo enquanto os íons hidroxila migram em direção ao ânodo, ambos reagem e precipitam conforme a Equação (4.4).

A corrosão é acompanhada por um aumento considerável no volume do metal original, sendo essa a causa principal da expansão e fissuração do concreto na posição da armadura. Esse aumento de volume foi encontrado até oito vezes o

volume inicial do metal, o que origina fortes tensões de tração no concreto (HELENE, 1986 e LIBORIO, 1990).

4.2. PASSIVAÇÃO

A passivação de uma armadura é entendida como a resistência à corrosão que é proporcionada por uma película fina de um filme de óxido estável e aderente na superfície da armadura.

De acordo com HELENE (1993), o termo passivação foi empregado pela primeira vez em 1836 por um pesquisador alemão chamado Schonbein, e, em 1918, esse termo foi utilizado pela primeira vez para explicar a proteção das armaduras pelo concreto e somente na década de 60 é que o tema foi retomado através do diagrama de equilíbrio termodinâmico de Pourbaix.

O diagrama de Pourbaix, Figura 4.2, relaciona o valor do potencial padrão - E° (V) e o valor do pH para temperatura de 25°C e pressão de 1atm, indicando as regiões em que o metal encontra-se na zona de passivação ou onde pode ocorrer a corrosão.

O diagrama de Pourbaix define áreas distintas onde situações diferentes ocorrem, relacionando o valor do potencial padrão com o valor do pH para os quais existem ou não a possibilidade de corrosão.

FIGURA 4.2 - Diagrama simplificado de Pourbaix para o sistema água-ferro a 25°C e 1atm. POURBAIX, apud NUNES¹³ (1998), com algumas modificações.

Como pode ser observada no diagrama de Pourbaix, a região de imunidade é termodinamicamente desfavorável à ocorrência da corrosão; na região de passivação os óxidos e hidróxidos de ferro são estáveis; nas zonas de corrosão tem-se a combinação de pHs e potenciais que propiciam uma situação de corrosão.

Somente o oxigênio dissolvido na água é capaz de sofrer redução quando à temperatura ambiente. O gás oxigênio presente na atmosfera não é capaz de se reduzir.

Assim, no concreto, em que o pH das soluções aquosas presentes nos poros é superior a 12, a corrosão ocorrerá somente na presença de gás oxigênio dissolvido na água. Quando por alguma razão o pH desta solução diminuir, o hidrogênio começa a participar do processo corrosivo; nestas condições, a corrosão ocorrerá mesmo na ausência de oxigênio dissolvido na água. Porém, as velocidades de corrosão serão desprezíveis.

¹³ POURBAIX, M. (1974). **Applications of electrochemistry in the corrosion science practice.** Corrosion Science, Vol. 14, pp. 25-82.

Com a finalidade de estabelecer uma idéia de valores dos potenciais de eletrodo padrão - E° , alguns valores são mostrados na Tabela 4.1 (CASCUDO, 1997).

TABELA 4.1 - Potencial padrão de oxi-redução para 25°C e 1atm (CASCUDO, 1997).

Reação	Potencial Padrão (E°)
$\text{Fe} \leftrightarrow \text{Fe}^{+2} + 2\text{e}^-$	-0,447
$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \leftrightarrow \text{H}_2$	0
$\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \leftrightarrow 4(\text{OH})^-$	0,401

De acordo com CASCUDO (1997), CEB 152 (1983) e HELENE (1993), o mecanismo de corrosão é subdividido em processo de iniciação e propagação. A iniciação corresponde ao período de tempo que vai desde a execução da estrutura até a ação dos agentes agressivos em atravessar o cobrimento do concreto e despassar a armadura. A propagação consiste no desenvolvimento da corrosão até que se alcance um grau inaceitável do processo (Figura 4.3).

FIGURA 4.3 – Modelo de vida útil proposta por TUUTTI, apud ISAIA¹⁴ (1995).

Como pode ser observada na Figura 4.3, a corrosão, na fase de iniciação, é quase imperceptível e não provoca danos à estrutura, enquanto que na fase de propagação ocorre um acúmulo progressivo da corrosão, provocando a deterioração da estrutura.

¹⁴ TUUTTI, K. (1982). *Corrosion of steel in concrete*, Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research Institute.

A continuidade da propagação da corrosão transforma o aço metálico em ferrugem acarretando um aumento considerável no volume, causando uma expansão e fissuração do concreto. Essa expansão pode ser acentuada de tal forma que possa acarretar o destacamento de pedaços de concreto, comprometendo a vida útil da estrutura.

Segundo HELENE (1993), a vida útil de projeto corresponde ao período de tempo que vai desde a execução da estrutura até a penetração de agentes agressivos e despassivação da armadura. Vida útil de serviço ou utilização corresponde ao período de tempo que vai até o momento em que aparecem manchas na superfície do concreto, ou ocorre fissuração do concreto de cobrimento ou quando há o destacamento do concreto de cobrimento. Vida útil total é o período de tempo que vai até a ruptura e colapso parcial ou total da estrutura.

RAUPACH & SCHIESSL (1997) utilizaram um sistema para monitorar a corrosão da armadura de concreto armado quando exposto à penetração de cloreto e gás carbônico. Esse sistema mostra não somente se a armadura vai ou não corroer, mas também quando iniciará sua corrosão.

Como desfecho, tem-se que o efeito da carbonatação pode afetar diretamente a vida útil total da estrutura, pois despassiva o aço favorecendo o início da corrosão e, com a continuidade dessa patologia, pode ocorrer o destacamento de pedaços de concreto e até mesmo provocar o colapso da estrutura.

5. INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL

O presente trabalho de pesquisa é parte integrante de projeto mais amplo, coordenado pelo Professor Jefferson B. L. Liborio, que trata do estudo de concretos e argamassas estruturais, que se iniciou em 1990. Desde então, foram realizados doutorados, mestrados e iniciações científicas sobre o assunto. Assim, a idealização desse projeto pressupõe o estudo de materiais seguindo as mesmas dosagens, tanto para argamassa quanto para concretos. Como suporte, dentre outros trabalhos que foram desenvolvidos, existe um banco de dados, com várias análises realizadas em condições macro e microestruturais¹⁵. Também, com relação aos conhecimentos

¹⁵ FAGURY, S. C. (2002). **Concretos e pastas de elevado desempenho: contribuição aos estudos dos reparos estruturais e ligações entre concreto novo e velho, com tratamento da zona de interface**, Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais – EESC-IFSC-IQSC-USP. São Carlos, Dissertação de Mestrado.

SILVA, I. J. (2000). **Contribuição ao estudo dos concretos de elevado desempenho: propriedades mecânicas, durabilidade microestrutura**, Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais. EESC-IFSC-IQSC-USP. São Carlos, Tese de Doutorado.

MARELLI, L. M. (2000). **Estudo de alternativa construtiva para reatores anaeróbios tipo UASB, utilizados no tratamento de esgoto doméstico**, Departamento de Arquitetura e Urbanismo. EESC. São Carlos, Dissertação de Mestrado.

MELO, A.B. (2000). **Influência da cura térmica (vapor) sob pressão atmosférica no desenvolvimento da microestrutura dos concretos estruturais de cimento Portland**, Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais. EESC-IFSC-IQSC-USP. São Carlos, Tese de Doutorado.

GARCIA, C.C. (1999). **Avaliação das incidências patológicas em edificações na região de São Carlos/SP**. Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais, EESC-IFSC-IQSC-USP, São Carlos, Dissertação de Mestrado.

MASSONI, R.F.A.P. (1996). **Fôrmas estruturais de argamassa e concreto para elementos de concreto armado**, Departamento de Arquitetura e Urbanismo, EESC-USP, São Carlos, Dissertação de Mestrado.

adquiridos e com relação ao subsistema argamassa de revestimento, outros trabalhos foram concluídos.

Esses trabalhos deram origem ao projeto temático, processo 98-08112-0, coordenado pelo Prof. Dr. J.B.L. Liborio.

5.1. CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS

5.1.1. Cimento Portland

Nesta pesquisa foram usados dois tipos de cimento Portland, CP V ARI RS e CP V ARI Plus, e suas características estão presentes nas Tabelas 5.1 e 5.2. A escolha desses dois cimentos está relacionada aos seguintes fatores: resistência à sulfatos e ganho de resistência inicial elevada. Deste modo, estes cimentos estão sendo usados em grande escala na indústria de pré-moldados de concreto por permitirem maior rotatividade de formas e maior produtividade de elementos. Além disso, por serem menos susceptíveis a ambientes agressivos, possibilitam a adoção de menores cobrimentos.

MELO, A.B. (1996). **Estudo da cura térmica (vapor) sob pressão atmosférica na produção de elementos pré-moldados**, Departamento de Arquitetura e Urbanismo, EESC-USP, São Carlos, Dissertação de Mestrado.

AFONSO, L. (1995). **Contribuição ao estudo das propriedades de concretos estruturais com cimentos portland submetidos a cura a vapor sob pressão atmosférica**, Departamento de Arquitetura e Urbanismo, EESC-USP, São Carlos, Dissertação de Mestrado.

TABELA 5.1 – Composição dos cimentos utilizados na pesquisa, fonte: Grupo Holcim Brasil S/A.

Proporções (% massa de cimento)	CP V ARI RS	CP V ARI Plus
Clínquer	65,0	90,6
Escória	27,3	--
Gesso	4,4	6,0
Calcário	3,4	3,4
Perda ao fogo	2,68	2,68
Resíduo Insolúvel	0,48	0,39
SiO ₂	22,61	19,58
Al ₂ O ₃	6,66	4,96
Fe ₂ O ₃	2,68	3,14
CaO	58,82	64,65
MgO	2,17	0,54
SO ₃	2,63	2,87
Na ₂ O	0,05	0,06
K ₂ O	0,65	0,75
Módulo de Sílica	2,42	2,42
Módulo de Alumina	2,49	1,58
Fator de Saturação de Cal	68,0	88,7
Composição Potencial (%)		
C ₃ S	43,5	56,7
C ₂ S	9,0	11,7
C ₃ A	6,2	8,1
C ₄ AF	7,2	9,5
Finura Blaine (cm ² /g)	4720	4650

TABELA 5.2 – Tempo de pega para pasta de cimento sem uso de superplastificante.

Cimentos	CP V ARI RS	CP V ARI Plus
Temperatura °C	26	25
Água/cimento	0,30	0,29
Início de pega (min)	140	116
Fim de pega (min)	200	256

5.1.2. Agregado miúdo

Utilizou-se areia quartizosa advinda do rio Mogi - Guaçu SP, cujos ensaios de caracterização foram os seguintes: determinação da composição granulométrica NBR – 7217/1982, determinação da massa específica por meio do frasco Chapman NBR – 9776/1987, determinação da massa unitária do agregado em estado solto NBR –

7251/1982 e determinação do teor de argila em torrões nos agregados NBR – 7218/1982.

A composição granulométrica da areia é apresentada na Tabela 5.3 e representada na Figura 5.1. Foram executados dois ensaios de granulometria para garantir sua confiabilidade. A partir da curva granulométrica obtida com a média entre os dois ensaios, caracterizou-se o material como areia fina de acordo com a NBR - 7217/1982.

TABELA 5.3 - Resultados da composição granulométrica do agregado miúdo.

Peneira (mm)	Mat. Retido 1º ensaio(g)	Mat. Retido 2º ensaio (g)	Média % retida (%)	% Retida acum. (%)
9,5	0,0	0,0	0	0
6,30	1,8	8,7	1	1
4,80	2,9	4,1	0	1
2,40	21,7	26,0	2	3
1,20	88,5	89,4	9	12
0,60	267,2	250,0	26	38
0,30	401,8	394,8	40	78
0,15	191,0	197,6	19	98
Fundo	22,1	26,4	2	100
Soma	997,0	997,0	100	331

FIGURA 5.1 - Composição granulométrica do agregado miúdo.

Na Tabela 5.4 estão apresentados os resultados dos demais tipos de ensaios do agregado miúdo.

TABELA 5.4 - Resultados da caracterização do agregado miúdo.

Caracterização da areia	
Massa específica	2,62 kg/dm ³
Torrões de argila	0,685%
Massa unitária	1,55 kg/dm ³
Diâmetro máximo característico	2,4 mm
Módulo de finura	2,30

5.1.3. Agregado graúdo

Utilizou-se uma pedra britada de origem basáltica cujos ensaios de caracterização foram: a determinação da composição granulométrica NBR – 7217/1982, determinação da massa específica por meio do frasco Chapman NBR – 9776/1987 e determinação da massa unitária do agregado em estado solto NBR – 7251/1982.

Na Tabela 5.5 está apresentado a composição granulométrica da brita e a Figura 5.2 indica a distribuição dos diâmetros dos agregados. Foram realizados dois ensaios de granulometria para garantir sua confiabilidade. O material foi classificado como brita 0 de acordo com a NBR - 7217/1982.

TABELA 5.5 - Resultados da composição granulométrica do agregado graúdo.

Peneira (mm)	Mat. Retido 1º ensaio (g)	Mat. Retido 2º ensaio (g)	Média % retida (%)	% Retida acum. (%)
9,5	0,0	0,0	0	0
6,3	102,1	121,2	11	11
4,8	598,3	579,2	59	70
2,4	279,2	281,5	28	98
1,2	16,2	13,2	1	100
0,6	1,30	1,20	0	100
0,3	0,60	0,40	0	100
0,15	0,40	0,10	0	100
Fundo	2,7	2,2	0	100
Soma	1000,8	999,0	100	---

FIGURA 5.2 - Composição granulométrica do agregado graúdo.

Na Tabela 5.6 estão apresentados os resultados dos demais tipos de ensaios dos agregados graúdos.

TABELA 5.6 - Resultados da caracterização do agregado graúdo.

Caracterização da brita 0	
Massa Específica	2,90 kg/dm ³
Massa Unitária	1,35 kg/dm ³
Diâmetro Máximo do Agregado	9,5 mm
Módulo de finura	5,67

5.1.4. Composição entre agregados graúdo e miúdo

Com o objetivo de diminuir o consumo de cimento e determinar o menor índice de vazios do concreto, realizou-se uma análise de composição "ideal" entre pedrisco e areia, através da massa unitária no estado compactado seco (Tabela 5.7).

O ensaio foi realizado compactando-se 3 camadas com 25 golpes em um recipiente metálico com volume de 3 dm³.

O índice de vazio é definido através da massa unitária e massa específica dos agregados, e é calculado de acordo com a Equação (5.1).

$$e = \frac{\rho_s}{\rho} - 1 \quad (5.1)$$

onde: e = índice de vazios;

ρ_s = massa específica real;

ρ = massa unitária.

O melhor resultado obtido com esse ensaio foi a composição com 55% de agregado graúdo e 45% de agregado miúdo, o qual apresentou o menor índice de vazios. Na Tabela 5.7 e Figura 5.3 são apresentados os valores calculados do índice de vazios, utilizando a massa unitária e a massa específica da composição dos agregados.

TABELA 5.7 - Resultados do ensaio de composição ideal entre agregados graúdos e miúdos.

Composição brita/areia (%)	Massa Total 1 (kg)	Massa Total 2 (kg)	Massa Unitária kg/dm ³	Massa Específica kg/dm ³	Índice de Vazios
100/0	4,60	4,58	1,53	2,90	0,89
95/5	4,73	4,68	1,57	2,89	0,84
90/10	4,90	4,93	1,64	2,87	0,75
85/15	5,02	5,03	1,67	2,86	0,71
80/20	5,21	5,24	1,74	2,84	0,63
75/25	5,40	5,37	1,79	2,83	0,58
70/30	5,52	5,52	1,84	2,82	0,53
65/35	5,64	5,62	1,88	2,80	0,49
60/40	5,68	5,74	1,90	2,79	0,47
55/45	5,76	5,78	1,92	2,77	0,44
50/50	5,72	5,73	1,91	2,76	0,45
45/55	5,65	5,69	1,89	2,75	0,46

FIGURA 5.3 – Representação gráfica dos índices de vazios.

Esse estudo de composição ideal tem como objetivo principal propiciar o máximo empacotamento possível entre os agregados, com vistas a estabelecer com os outros materiais uma melhor compacidade.

5.1.5. Aditivo

O aditivo superplastificante utilizado foi o SIKAMENT 300, que é constituído por polímeros de formaldeído-melamina sulfonada (MSF), o qual é redutor da água de amassamento. A quantidade de água no aditivo é em torno de 60% e a cor é castanha. A maior porcentagem de aditivos em relação à massa de cimento utilizado nessa pesquisa foi de 1%, onde a faixa recomendada pelo fabricante varia entre 0,6% a 3,0%.

O SIKAMENT 300 é um aditivo superplastificante de pega normal, recomendado quando se deseja elevada resistência inicial e elevada impermeabilidade, diminui a segregação, aumenta a densidade e compacidade, garante um incremento de resistência mecânica e não contém cloretos ou quaisquer elementos corrosivos.

5.1.6. Sílica ativa

Foi utilizada sílica ativa de silício metálico (Fe-Si) em substituição volumétrica de 10% do cimento, a qual possui massa específica de 2,1 g/ml, com a seguinte especificação apresentada pelo distribuidor Elken-Microsílica Tecnologia Ind. e Com. Ltda.

TABELA 5.8 - Características da sílica ativa.

Teor mínimo de sílica amorfa	85%
Diâmetro médio das partículas	0,15 μ m
Perda ao fogo	6%
Teor de umidade - máximo	3%
Retido na peneira # 325 - máximo	10%
Área específica	20 m ² /g

TABELA 5.9 - Análise química da sílica ativa.

Elementos	Valores Médios
Teor de sílica amorfa (SiO ₂)	95,25%
Ferro (Fe ₂ O ₃)	0,345%
Alumina (Al ₂ O ₃)	0,040%
Cálcio (CaO)	0,170%
Fósforo (P ₂ O ₅)	0,17%
Manganês (MnO)	0,11%
Magnésio (MgO)	0,49%
Sódio (Na ₂ O)	0,22%
Potássio (K ₂ O)	1,33%

5.2. COMPOSIÇÃO DOS TRAÇOS

Objetivando verificar a durabilidade de elementos estruturais com diferentes características geométricas frente à ação da carbonatação, realizou-se um estudo de composições de traços. Foram produzidos concretos e argamassas estruturais executadas com cimentos Portland CP V ARI Plus e CP V ARI RS, com e sem adição de 10% de sílica ativa (SA) em substituição volumétrica de cimento Portland.

A argamassa é constituída apenas por agregado miúdo, sendo estudados três variações de traço (1:2,5; 1:3,0 e 1:3,5). Para a determinação desses traços, fixou-se a consistência em $k = 180 \text{ mm} \pm 10 \text{ mm}$, a relação água/aglomerante em 0,45 e determinou-se a quantidade suficiente de superplastificante necessária para a obtenção dessa consistência. O teor de consumo de cimento está variando de 586 kg/m³ a 424 kg/m³ e a porcentagem de superplastificante entre 0 e 1% (Tabela 5.10).

Em algumas composições, a relação água/aglomerante de 0,45 juntamente com a proporção máxima de superplastificante, fixada pelo fabricante do produto, não foi suficiente para a obtenção da consistência, fazendo-se necessário aumentar a relação água/aglomerante de algumas composições.

TABELA 5.10 – Composições dos traços de argamassas estudadas.

Cimento	Sílica ativa	Traço 1:m	a/agl kg/kg	SP (%)	k (mm)	C (kg/m ³)
CP V ARI RS	10% em volume	1 : 2,5	0,45	0	185	539
		1 : 3,0	0,45	0,8	190	486
		1 : 3,5	0,54	0,6	185	424
CP V ARI RS	-.-.-	1 : 2,5	0,43	0	177	586
		1 : 3,0	0,45	0,6	174	521
		1 : 3,5	0,50	1	181	463
CP V ARI Plus	10% em volume	1 : 2,5	0,45	0	176	539
		1 : 3,0	0,45	1	179	486
		1 : 3,5	0,54	1	187	424
CP V ARI Plus	-.-.-	1 : 2,5	0,44	0	184	586
		1 : 3,0	0,45	0,8	178	521
		1 : 3,5	0,54	1	187	463

sendo: k = índice de consistência;

C = consumo de cimento;

a/agl = relação água/aglomerante;

SP = Superplastificante.

O concreto é constituído por agregado miúdo e graúdo, para o qual fez-se uma análise de composição entre esses agregados como já foi mencionado. Estudou-se três variações de traço (1:1,1:1,4; 1:1,35:1,65 e 1:1,57:1,93). Para a determinação desses traços fixou-se a consistência em $k = 220 \text{ mm} \pm 10 \text{ mm}$, a relação água/aglomerante em 0,45, e determinou-se a quantidade suficiente de superplastificante necessária para a obtenção dessa consistência. O teor do consumo de cimento está variando de 604 kg/m^3 a 457 kg/m^3 e a porcentagem de superplastificante entre 0 e 0,8% (Tabela 5.11).

TABELA 5.11 – Composições dos traços de concretos analisados nesse trabalho.

Cimento	Silica ativa	Traço 1:a:p	a/agl kg/kg	SP (%)	k (mm)	C (kg/m ³)
CP V ARI RS	10% em volume	1:1,1:1,4	0,45	0	217	556
		1:1,35:1,65	0,45	0,2	215	501
		1:1,57:1,93	0,45	0,6	221	457
CP V ARI RS	-.-.-	1:1,1:1,4	0,43	0	227	604
		1:1,35:1,65	0,45	0	222	539
		1:1,57:1,93	0,45	0,4	219	491
CP V ARI Plus	10% em volume	1:1,1:1,4	0,45	0,2	223	556
		1:1,35:1,65	0,45	0,4	217	501
		1:1,57:1,93	0,45	0,8	223	457
CP V ARI Plus	-.-.-	1:1,1:1,4	0,43	0	226	604
		1:1,35:1,65	0,45	0	216	539
		1:1,57:1,93	0,45	0,8	219	491

5.3. MOLDAGEM DOS CORPOS-DE-PROVA

A mistura tanto para o concreto, quanto para a argamassa, foi realizada em uma argamassadeira de eixo vertical. As fôrmas utilizadas na moldagem possuem dimensões de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura. A moldagem dos corpos-de-prova cilíndricos foi realizada em quatro camadas e trinta golpes manuais para cada camada, utilizando um soquete para a execução desse adensamento (NBR 5738/84).

Depois que os corpos-de-prova foram desmoldados, todos foram lixados na superfície superior, objetivando uma uniformidade na distribuição da carga quando ensaiado, e em seguida foram submetidos à cura em câmara úmida.

5.4. CURA EM CÂMARA ÚMIDA

A câmara úmida possui umidade relativa de $95\% \pm 2\%$ e temperatura de $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. Os corpos-de-prova foram curados até a idade de 7 dias, com exceção dos corpos-de-prova de controle que permaneceram na câmara úmida por até 98 dias.

5.5. CÂMARA DE CARBONATAÇÃO ACELERADA

A câmara de carbonatação acelerada utilizada, possui dimensões de 1,15 m x 1,20 m x 0,9 m e um volume de 1,24 m³. A umidade aplicada foi de 60% $\pm$ 5%, controlada através de um recipiente com água e um desumidificador elétrico e automático, numa temperatura de 25 $\pm$ 5°C. A calibração da câmara foi feita com o seguinte procedimento:

- aplicou-se 10 litros de gás/minuto durante dois minutos, com fluxo livre no interior da câmara (registro de saída aberto);
- aplicou-se 10 litros de gás/minutos à pressão de 6 MPa (no manômetro do cilindro de gás) até que a pressão na câmara excedesse a pressão atmosférica, medida no manômetro de saída;
- mediu-se o tempo necessário para a variação de pressão no interior da câmara.

Com esse procedimento, obteve-se em média 2 minutos de fluxo de gás com uma vazão de 10 litros/min. para provocar variação da pressão no interior da câmara. De modo que esse volume de gás corresponde aproximadamente ao volume necessário para manter a câmara próxima à saturação (concentração de gás em torno de 97%). A câmara de carbonatação está mostrada na Figura 5.4.

FIGURA 5.4 - Câmara de carbonatação acelerada.

Os corpos-de-prova submetidos à atmosfera de gás carbônico foram curados por 7 dias em cura úmida e posteriormente colocados na câmara de carbonatação e ensaiados nas idades de 7, 14, 28, 63 e 91 dias de exposição ao gás, verificando-se assim a profundidade de carbonatação e a resistência mecânica.

5.6. DETERMINAÇÃO DA PROFUNDIDADE CARBONATADA

A profundidade de carbonatação foi obtida através da utilização de uma solução ácido/base nas proporções de 1% de fenolftaleína, 70% de álcool etílico e 29% de água destilada, esse indicador em contato com a região carbonatada não altera a cor do concreto, mas quando em contato com a região não carbonatada a cor é alterada para vermelho carmin.

A análise da profundidade carbonatada é feita a partir de sua medida em quatro corpos-de-prova cilíndricos de dimensões 50 mm de diâmetro x 100 mm de altura, nos quais foram realizadas no mínimo seis medidas em torno do perímetro da seção longitudinal utilizando-se uma régua comparadora (LNEC) com precisão de décimos de milímetro (Figura 5.5).

FIGURA 5.5 –Seção longitudinal do corpo-de-prova cilíndrico e, régua comparadora LNEC utilizado na pesquisa.

A profundidade carbonatada em cada corpo-de-prova foi considerada como a média entre seis leituras realizadas. Essa profundidade foi obtida com a média das profundidades carbonatadas dos quatro corpos-de-prova, executados para cada traço e idade. As medidas de profundidade carbonatada foram feitas nas idades de 14, 21, 35, 70 e 98 dias, utilizando os corpos-de-prova ensaiados para a obtenção da resistência à tração na compressão diametral.

5.7. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

Os ensaios de resistência à compressão axial seguiram as recomendações da NBR – 5739/1980. Foram ensaiados oito corpos-de-prova com dimensões 50 mm de diâmetro x 100 mm de altura para cada traço e idade de ensaio; destes, quatro corpos-de-prova foram ensaiados após exposição em câmara de carbonatação, enquanto os demais permaneceram na câmara úmida até a data do ensaio. Os ensaios foram realizados nas idades de 14, 21, 35, 70 e 98 dias, e o acabamento para obter uma melhor distribuição das cargas foi feito através de capeamento com enxofre.

5.8. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA COMPRESSÃO DIAMETRAL

Os ensaios de resistência à tração na compressão diametral seguem as recomendações da NBR – 7222/1994. A quantidade de corpos-de-prova ensaiados e as idades de ensaio foram as mesmas do ensaio de resistência à compressão axial.

6. RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo são apresentados os resultados de todos os ensaios realizados nesta pesquisa. São apresentados os valores das medidas da profundidade de carbonatação e respectiva resistência mecânica dos corpos-de-prova submetidos à cura úmida e daqueles expostos a uma atmosfera agressiva de gás carbônico.

É analisada a influência da relação água/aglomerante, do tipo de cimento, da composição do agregado, da adição de sílica ativa e adição de superplastificante na profundidade de carbonatação em condições aceleradas. Verifica-se também o comportamento mecânico do material carbonatado e não carbonatado.

6.1. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL E PROFUNDIDADE CARBONATADA.

6.1.1. Argamassa

A resistência à compressão axial foi obtida como o valor médio entre 4 corpos-de-prova, obedecendo ao critério de “Chauvenet” para descarte de resultados fora do intervalo de confiança (ANEXO D).

Devido aos cuidados de execução e controle de ensaio, todos os valores obtidos de resistência à compressão axial pertencem ao intervalo de confiança, de forma que nenhum resultado foi descartado.

No ANEXO A são mostrados os valores de resistência à compressão axial de todos os ensaios realizados para cada composição.

As Figuras 6.1, 6.2, 6.3 e 6.4 apresentam os resultados de resistência à compressão axial em função da idade para argamassas, comparando os resultados obtidos em corpos-de-prova expostos à câmara de carbonatação com os de controle, deixados em câmara úmida pelo mesmo período.

Observa-se que a resistência das argamassas expostas ao meio ambiente agressivo é maior que a resistência medida nas argamassas de controle, independentemente da idade ou do traço; isso ocorre devido à carbonatação provocar um aumento de volume de sólidos, deixando a matriz mais compacta e conseqüentemente mais resistente.

Apesar do traço 1:2,5 possuir uma quantidade maior de cimento que o traço 1:3,0, este apresenta maior resistência, tanto em câmara úmida quanto em câmara de carbonatação; isto se deve à utilização de uma quantidade maior de superplastificante na sua composição, com exceção da composição de argamassa com cimento CP V ARI RS sem adição de sílica ativa, devido ao traço 1:2,5 correspondente ter sido executado com uma menor relação água/aglomerante. Essa adição de superplastificante provoca a defloculação do cimento, melhorando a hidratação do compósito.

Como os dois tipos de cimento utilizados são de alta resistência inicial, nota-se que, para a maioria dos traços, mais de 85% da resistência total é adquirida nas primeiras idades.

FIGURA 6.1 – Resultados de resistência à compressão x idade para os corpos-de-prova de argamassa, curados em câmara úmida e expostos em câmara de carbonatação acelerada (CP V ARI RS, com adição de SA).

FIGURA 6.2 – Resultados de resistência à compressão x idade para os corpos-de-prova de argamassa, curados em câmara úmida e expostos em câmara de carbonatação acelerada (CP V ARI Plus, com adição de SA).

FIGURA 6.3 – Resultados de resistência à compressão x idade para os corpos-de-prova de argamassa, curados em câmara úmida e expostos em câmara de carbonatação acelerada (CP V ARI RS, sem adição de SA).

FIGURA 6.4 – Resultados de resistência à compressão x idade para os corpos-de-prova de argamassa, curados em câmara úmida e expostos em câmara de carbonatação acelerada (CP V ARI Plus, sem adição de SA).

6.1.1.1. Influência do tipo de cimento

No presente tópico é apresentado o desempenho entre os cimento CP V ARI Plus e CP V ARI RS.

A Figura 6.5 mostra a comparação entre os resultados de resistência a compressão axial obtida com composições semelhantes de CP V ARI Plus e CP V ARI RS, ambos com adição de 10% de sílica ativa por substituição volumétrica de cimento. O traço 1:2,5 tem um consumo de cimento de 539 kg/m³, relação água/aglomerante 0,45 e 0% de superplastificante; o traço 1:3,0 tem um consumo de cimento de 486 kg/m³, relação água/aglomerante 0,45, 0,8% e 1% de superplastificante para a composição com CP V ARI RS e CP V ARI Plus, respectivamente, e o traço 1:3,5 tem um consumo de cimento de 424 kg/m³, relação água/aglomerante 0,54, e 0,6% e 1% de superplastificante para a composição com CP V ARI RS e CP V ARI Plus, respectivamente.

FIGURA 6.5 – Desempenho mecânico de argamassas com cimento

CP V ARI Plus x CP V ARI RS, com adição de sílica ativa, para idades de 14, 21, 35, 70 e 98 dias, expostas em câmara de carbonatação e câmara úmida.

A Figura 6.6 mostra a comparação entre os resultados de resistência à compressão axial obtidos através de composições semelhantes de argamassas com cimentos CP V ARI Plus e CP V ARI RS, sem adição de sílica ativa. O consumo de cimento do traço 1:2,5 é 586 kg/m³, e a relação água/aglomerante é 0,43 e 0,44 para as composições com cimentos CP V ARI RS e CP V ARI Plus, respectivamente, sem aditivo superplastificante. No traço 1:3,0, o consumo de cimento é de 521 kg/m³, a relação água/aglomerante é 0,45, o consumo de superplastificante é de 0,6% e 0,8% para a composição com CP V ARI RS e CP V ARI Plus, respectivamente. O traço 1:3,5 tem um consumo de cimento de 463 kg/m³, relação água/aglomerante 0,50 e 0,54 para as composições com cimentos CP V ARI RS e CP V ARI Plus, respectivamente, e 1% de superplastificante.

a) câmara de carbonatação

b) câmara úmida

FIGURA 6.6 – Desempenho mecânico de argamassas com cimento CP V ARI Plus x CP V ARI RS, sem adição de sílica ativa, para idades de 14, 21, 35, 70 e 98 dias, expostas em câmara de carbonatação e câmara úmida.

Observando-se as Figuras 6.5 e 6.6, nota-se que as composições de argamassas executadas com o CP V ARI Plus e CP V ARI RS apresentaram

resistências semelhantes, tanto nos corpos-de-prova expostos em ambientes agressivos, quanto nos de controle, que foram deixados em condições ideais de cura, pontos dispersos em torno da reta de 45°.

A Figura 6.7 mostra a comparação entre profundidades de carbonatação medidas nas composições de argamassas executadas com CP V ARI Plus e CP V ARI RS, com e sem adição de sílica ativa.

FIGURA 6.7 – Profundidades de carbonatação em argamassas com cimento CP V ARI Plus x CP V ARI RS, para idades de 14, 21, 35, 70 e 98 dias.

Comparando as composições de argamassas Plus_A_CS com RS_A_CS e Plus_A_SS com RS_A_SS, verifica-se que a profundidade de carbonatação medida é praticamente a mesma, respectivamente, uma vez que os pontos se localizam em torno da reta de 45° (Figura 6.7).

6.1.1.2. Influência da sílica ativa

A Figura 6.8 apresenta resultados de resistência a compressão axial de corpos-de-prova de argamassas que foram depositados em câmara de carbonatação durante um período que variou entre 14 e 98 dias. Essas argamassas são compostas com e sem adição de sílica ativa e cimentos CP V ARI Plus e CP V ARI RS.

FIGURA 6.8 – Desempenho mecânico de argamassas para idades de 14, 21, 35, 70 e 98 dias - Câmara de carbonatação: a) composição Plus_A_SS x Plus_A_CS; b) composição RS_A_SS x RS_A_CS.

A adição de sílica ativa provoca um acréscimo de resistência mecânica, devido às reações pozolânicas, verificando-se assim sua eficiência, distribuição dos pontos em torno da reta de 45°. Essa propriedade é observada porque a adição de 10% de sílica ativa foi feita por substituição volumétrica ao cimento, ou seja, manteve-se a mesma quantidade de aglomerante (Figura 6.8).

A Tabela 6.1 mostra a eficiência da sílica ativa no ganho de resistência mecânica das argamassas aos 35 dias de idade.

TABELA 6.1 - Eficiência da sílica no ganho de resistência.

Composição	Traço	Eficiência (%)
Argamassa CP V ARI Plus	1:2,5	7
	1:3,0	6
	1:3,5	18
Argamassa CP V ARI RS	1:2,5	9
	1:3,0	23
	1:3,5	8

A Figura 6.9 mostra a relação entre profundidades de carbonatação de corpos-de-prova executados com o mesmo tipo de cimento com e sem adição de sílica ativa.

a) composição RS_A_SS x RS_A_CS

b) composição Plus_A_SS x Plus_A_CS

FIGURA 6.9 – Profundidades carbonatadas de argamassas nas idades de 14, 21, 35, 70 e 98 dias.

Comprova-se que a profundidade carbonatada em corpos-de-prova executados com sílica ativa é maior que a dos sem sílica ativa, devido as reações pozolânicas consumirem parte do CH e também dividido à adição de 10% de sílica ativa ter sido feita por substituição volumétrica de cimento. Isso pode ser visto na Figura 6.9, onde os pontos localizam-se acima da reta de 45°.

6.1.1.3. Influência do ambiente de exposição

As Figuras 6.10 e 6.11 apresentam a influência do ambiente de exposição no ganho de resistência mecânica para todas as composições de argamassas em estudo.

FIGURA 6.10 – Desempenho mecânico de corpos-de-prova de argamassa nas idades de 14, 21, 35, 70 e 98 dias - câmara de carbonatação x câmara úmida

FIGURA 6.11 – Desempenho mecânico de corpos-de-prova de argamassa nas idades de 14, 21, 35, 70 e 98 dias - câmara de carbonatação x câmara úmida.

Observa-se que a resistência das argamassas expostas em câmara de carbonatação acelerada é maior do que a resistência obtida nas argamassas de controle (distribuição dos pontos acima da reta de 45°). Verifica-se que o ganho de resistência devido à carbonatação é sensivelmente maior nas composições com CP V ARI RS, com e sem adição de sílica ativa; no entanto, essa diferença é pequena. Isto pode ser comprovado observando-se a dispersão dos pontos em relação à reta de 45°.

6.1.2. Concreto

São mostrados, nas Figuras 6.12, 6.13, 6.14 e 6.15, os resultados de resistência à compressão em função da idade para concretos, comparando os resultados obtidos em corpos-de-prova expostos à câmara de carbonatação acelerada com os de controle deixados em câmara úmida pelo mesmo período.

Os corpos-de-prova de concreto submetidos à exposição em câmara de carbonatação acelerada e de controle tendem a apresentar o mesmo comportamento mecânico.

Apesar dos traços 1:2,5 e 1:3,0 terem maior quantidade de cimento que o traço 1:3,5, esse apresentou maior resistência, tanto para os corpos-de-prova curados em câmara úmida quanto os expostos em câmara de carbonatação acelerada, devido à utilização de superplastificante em sua composição melhorar a hidratação, como já mencionado, uma vez que a relação água/aglomerante foi aproximadamente a mesma para todos os traços.

Comparando-se as Figuras 6.12, 6.13, 6.14 e 6.15, percebe-se que os concretos com cimento CP V ARI RS e os com cimento CP V ARI Plus com adição de sílica ativa, foram, geralmente, um pouco mais resistentes que os mesmos

compostos sem adição de sílica ativa, independentemente do ambiente ao qual foram expostos.

Como ocorreu com os traços de argamassas, a maioria dos traços de concreto adquiriram mais de 80% da resistência total nas primeiras idades, devido à utilização de cimentos com alta resistência inicial.

FIGURA 6.12 – Resultados de resistência à compressão x idade para os corpos-de-prova de concreto, curados em câmara úmida e expostos em câmara de carbonatação acelerada (CP V ARI RS, com adição de SA).

FIGURA 6.13 – Resultados de resistência à compressão x idade para os corpos-de-prova de concreto, curados em câmara úmida e expostos em câmara de carbonatação acelerada (CP V ARI Plus, com adição de SA).

FIGURA 6.14 – Resultados de resistência à compressão x idade para os corpos-de-prova de concreto, curados em câmara úmida e expostos em câmara de carbonatação acelerada (CP V ARI RS, sem adição de SA).

FIGURA 6.15 – Resultados de resistência à compressão x idade para os corpos-de-prova de concreto, curados em câmara úmida e expostos em câmara de carbonatação acelerada (CP V ARI Plus, sem adição de SA).

6.1.2.1. Influência do tipo de cimento

A Figura 6.16 mostra a comparação entre os resultados de resistência à compressão axial de concretos obtidos com composições semelhantes utilizando os cimentos CP V ARI Plus e CP V ARI RS, ambos com adição de 10% de sílica ativa por substituição volumétrica do cimento. O traço 1:2,5 tem um consumo de cimento de 556 kg/m³, relação água/aglomerante 0,45 e 0% e 0,2% de superplastificante para a composição com CP V ARI RS e CP V ARI Plus, respectivamente; o traço 1:3,0 tem um consumo de cimento de 501 kg/m³, relação água/aglomerante 0,45 e 0,2% e 0,4% de superplastificante para a composição com CP V ARI RS e CP V ARI Plus, respectivamente; e o traço 1:3,5 tem um consumo de cimento de 457 kg/m³, relação água/aglomerante 0,45 e 0,6% e 0,8% de superplastificante para a composição com CP V ARI RS e CP V ARI Plus, respectivamente.

FIGURA 6.16 – Desempenho mecânico de concretos com cimento CP V ARI Plus x CP V ARI RS, com adição de sílica ativa, para idades de 14, 21, 35, 70 e 98 dias, expostos em câmara de carbonatação e câmara úmida.

A Figura 6.17 mostra a comparação entre os resultados de resistência à compressão axial e de profundidade carbonatada obtidos através de composições semelhantes com cimentos CP V ARI Plus e CP V ARI RS, sem adição de sílica ativa por substituição. O consumo de cimento do traço 1:2,5 é 604 kg/m^3 , a relação água/aglomerante é 0,43 e sem aditivo superplastificante. No traço 1:3,0, o consumo de cimento é de 539 kg/m^3 , a relação água/aglomerante é 0,45, e sem consumo de superplastificante. O traço 1:3,5 tem um consumo de cimento de 491 kg/m^3 , relação água/aglomerante 0,45 e 0,4% e 0,8% de superplastificante para as composições com cimentos CP V ARI RS e CP V ARI Plus, respectivamente.

a) Câmara de carbonatação acelerada

b) Câmara úmida

FIGURA 6.17 – Desempenho mecânico de concretos com cimento CP V ARI Plus x CP V ARI RS, sem adição de sílica ativa, para idades de 14, 21, 35, 70 e 98 dias, expostos em câmara de carbonatação e câmara úmida.

Observando-se as Figuras 6.16 e 6.17, nota-se que as composições de concretos executadas com o CP V ARI Plus e CP V ARI RS apresentaram resistências praticamente iguais, tanto nos corpos-de-prova expostos em ambientes agressivos quanto nos de controle, que foram deixados em condições ideais de cura,

embora as resistências obtidas nas composições com CP V ARI Plus tenham sido sensivelmente maiores.

A Figura 6.18 mostra a comparação entre profundidades de carbonatação medidas nas composições de concreto executadas com CP V ARI Plus e CP V ARI RS, com e sem adição de sílica ativa.

FIGURA 6.18 – Profundidades de carbonatação em concretos com cimento CP V ARI Plus x CP V ARI RS, para idades de 14, 21, 35, 70 e 98 dias

Comparando as composições de concretos Plus_B_CS com RS_B_CS e Plus_B_SS com RS_B_SS, verifica-se que a profundidade de carbonatação medida é consideravelmente maior nas composições com CP V ARI RS, devido à adição por substituição de 30% de escória de alto forno em sua composição. Este comportamento é identificado pela localização de todos os pontos abaixo da reta de 45° (Figura 6.18).

6.1.2.2. Influência da sílica ativa

A Figura 6.19 apresenta resultados de resistência a compressão axial de concretos compostos com e sem adição de sílica ativa e cimentos CP V ARI Plus e CP V ARI RS.

FIGURA 6.19 – Desempenho mecânico de concretos para idades de 14, 21, 35, 70 e 98 dias - Câmara de carbonatação: a) composição Plus_B_SS x Plus_B_CS; b) composição RS_B_SS x RS_B_CS.

A eficiência do emprego da sílica ativa no ganho de resistência pode ser comprovada observando-se a Figura 6.19. Nota-se que a resistência das composições com e sem adição de sílica ativa são praticamente iguais, embora os traços com sílica ativa possuam menores consumos de cimento.

A Tabela 6.2 mostra a eficiência da sílica ativa no ganho de resistência mecânica dos concretos aos 35 dias.

TABELA 6.2 - Eficiência da sílica no ganho de resistência.

Composição	Traço	Eficiência (%)
Concreto CP V ARI Plus	1:2,5	7
	1:3,0	9
	1:3,5	15
Concreto CP V ARI RS	1:2,5	17
	1:3,0	15
	1:3,5	7

A Figura 6.20 mostra a relação entre profundidades de carbonatação de corpos-de-prova de concreto executados com o mesmo tipo de cimento com e sem adição de sílica.

a) composição RS_B_SS x RS_B_CS.

b) composição Plus_B_SS x Plus_B_CS

FIGURA 6.20 – Profundidades carbonatadas de concretos nas idades de 14, 21, 35, 70 e 98 dias.

Verifica-se que a profundidade carbonatada em corpos-de-prova executados com sílica ativa é maior que a dos sem sílica ativa, embora seus valores sejam pequenos (< 4 mm). Esse comportamento deve-se ao efeito das reações pozolânicas como já discutido. Isso pode ser visto na Figura 6.20, onde os pontos localizam-se acima da reta de 45° .

6.1.2.3. Influência do ambiente de exposição

As Figuras 6.21 e 6.22 apresentam a influência do ambiente de exposição no ganho de resistência mecânica para todas as composições de concreto estudadas.

a) composição RS_B_CS.

b) composição Plus_B_CS.

FIGURA 6.21 – Desempenho mecânico de corpos-de-prova de concreto nas idades de 14, 21, 35, 70 e 98 dias - câmara de carbonatação x câmara úmida

a) composição RS_B_SS

b) composição Plus_B_SS

FIGURA 6.22 – Desempenho mecânico de corpos-de-prova de concreto nas idades de 14, 21, 35, 70 e 98 dias - câmara de carbonatação x câmara úmida.

Observa-se que a resistência dos concretos expostos ao ambiente agressivo de gás carbônico é praticamente igual à resistência dos concretos de controle (distribuição dos pontos sobre da reta de 45°).

Comparando-se o comportamento das argamassas com os concretos, nota-se que os concretos foram menos susceptíveis ao avanço da carbonatação, de forma que as profundidades carbonatadas medidas foram muito pequenas em relação às medidas nas argamassas devido aos concretos possuírem uma matriz com maior compacidade obtida com a composição ideal entre agregados.

6.2. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA COMPRESSÃO DIAMETRAL E PROFUNDIDADE CARBONATADA.

A resistência à tração na compressão diametral foi obtida com o valor médio entre 4 corpos-de-prova curados por apenas 7 dias em câmara úmida e expostos, posteriormente, em câmara de carbonatação acelerada. Para descarte de resultados fora do intervalo de confiança utilizou-se, também, o critério de “Chauvenet”, ANEXO D.

Nos corpos-de-prova ensaiados à compressão diametral, também foram realizadas as medidas de profundidade carbonatada em, no mínimo, seis pontos em torno do perímetro de uma seção longitudinal.

As Figuras 6.23 e 6.24 mostram o comportamento dos compostos de argamassa executados com cimento CP VARI Plus e CP VARI RS com adição de sílica ativa por substituição parcial de cimento, considerando sua resistência à tração. Nota-se, nesses compostos, que praticamente não houve variação de resistência com os diferentes tipos de traços. No entanto, se considerada as diferenças de quantidade

de clínquer entre os cimentos, observa-se a ocorrência de uma grande eficiência nas argamassas com escória e sílica ativa. Com relação à profundidade carbonatada, observa-se que, quanto menor a resistência à tração, maior a profundidade carbonatada; no entanto, pode-se dizer que os traços 1:2,5 e 1:3,0 apresentaram comportamentos semelhantes, tanto no ganho de resistência quanto na profundidade carbonatada.

Considerando o traço 1:3,5, o composto com cimento CP V ARI RS apresentou maior profundidade carbonatada que o composto com cimento CP V ARI Plus; já nos demais traços, percebe-se que os valores de profundidade carbonatada são praticamente iguais.

A resistência à tração em função da idade dos compostos com adição de sílica ativa variou numa estreita faixa entre 4 MPa e 6 MPa, independentemente do tipo de cimento ou da idade.

As Figuras 6.25 e 6.26 mostram o comportamento da resistência à tração dos compostos de argamassa executados com cimento CP VARI Plus e CP VARI RS sem adição de sílica ativa. Observa-se nesse caso que não houve grandes variações na resistência à tração, de forma que seus valores permaneceram na faixa entre 4 MPa e 6 MPa, com exceção do traço 1:3,0 da composição Plus_A_SS.

As profundidades carbonatadas medidas nas composições sem sílica ativa foram consideravelmente menores que as medidas nos compostos com sílica ativa, embora não se tenha verificado a influência da adição de sílica ativa na resistência à tração dos compostos de argamassa (Figuras 6.23, 6.24, 6.25 e 6.26).

a) em função da idade

b) em função da profundidade carbonatada

FIGURA 6.23 – Resistência à tração na compressão diametral da composição

Plus_A_CS, para idades de 14, 21, 35, 70 e 98 dias.

a) em função da idade

b) em função da profundidade carbonatada

FIGURA 6.24 – Resistência à tração na compressão diametral da composição

RS_A_CS, para idades de 14, 21, 35, 70 e 98 dias.

a) em função da idade

b) em função da profundidade carbonatada

FIGURA 6.25 – Resistência à tração na compressão diametral da composição Plus_A_SS, para idades de 14, 21, 35, 70 e 98 dias.

a) em função da idade

b) em função da profundidade carbonatada

FIGURA 6.26 – Resistência à tração na compressão diametral da composição RS_A_SS, para idades de 14, 21, 35, 70 e 98 dias.

As Figuras 6.27, 6.28, 6.29 e 6.30 mostram os resultados de resistência à tração na compressão diametral dos compostos de concreto executados com cimento CP V ARI Plus e CP V ARI RS, com e sem adição de sílica ativa, em função da idade e da profundidade carbonatada. Como observado nas argamassas, a resistência à tração dos concretos permanece na faixa entre 4 MPa e 6 MPa, não se verificando,

portanto, influência significativa do tipo de agregado, do tipo de cimento e adições de sílica ativa na resistência à tração dos compostos estudados.

As profundidades carbonatadas medidas nas composições de concreto são menores que as medidas nas argamassas; isso se deve à composição ideal entre agregados graúdo e miúdo, que garante ao composto uma maior compacidade.

Verifica-se, ainda, que a profundidade de carbonatação dos compostos de concreto sem sílica ativa é menor que a dos concretos com sílica ativa, devido à reação pozolânica consumir parte do hidróxido de cálcio.

a) em função da idade b) em função da profundidade carbonatada
FIGURA 6.27 – Resistência à tração na compressão diametral da composição RS_B_CS, para idades de 14, 21, 35, 70 e 98 dias.

a) em função da idade b) em função da profundidade carbonatada
FIGURA 6.28 – Resistência à tração na compressão diametral da composição Plus_B_CS, para idades de 14, 21, 35, 70 e 98 dias.

a) em função da idade

b) em função da profundidade carbonatada

FIGURA 6.29 – Resistência à tração na compressão diametral da composição

RS_B_SS, para idades de 14, 21, 35, 70 e 98 dias.

a) em função da idade

b) em função da profundidade carbonatada

FIGURA 6.30 – Resistência à tração na compressão diametral da composição

Pus_B_SS, para idades de 14, 21, 35, 70 e 98 dias.

6.3. PROFUNDIDADE CARBONATADA

As Figuras 6.31, 6.32, 6.33 e 6.34 mostram as profundidades carbonatadas em função da idade para composições das argamassas com o cimento Portland CP V ARI RS e CP V ARI Plus, com e sem adição de sílica ativa.

Nota-se que os compostos com sílica ativa apresentam maiores profundidades de carbonatação devido à reação pozolânica consumir parte do hidróxido de cálcio, facilitando o avanço da frente de carbonatação.

Para o traço 1:3,5, Figuras 6.31, 6.32, 6.33 e 6.34, utilizou-se uma relação $a/agl > 0,45$, porque não foi possível obter a consistência pré-estabelecida apenas aumentando a porcentagem de superplastificante; portanto, esse traço possui uma matriz mais permeável; conseqüentemente, a profundidade carbonatada é maior para todas as composições de argamassa utilizadas. Apesar disto, todos os traços de argamassa apresentaram baixa profundidade carbonatada (no máximo 8 mm), comprovando a eficiência dos compostos estudados frente à ação do gás carbônico.

FIGURA 6.31 – Profundidade carbonatada x idade para argamassas expostas à carbonatação acelerada (CP V ARI RS, com adição de SA).

FIGURA 6.32 – Profundidade carbonatada x idade para argamassas expostas à carbonatação acelerada (CP V ARI RS, sem adição de SA).

FIGURA 6.33 – Profundidade carbonatada x idade para argamassas expostas à carbonatação acelerada (CP V ARI Plus, com adição de SA).

FIGURA 6.34 – Profundidade carbonatada x idade para argamassas expostas à carbonatação acelerada (CP V ARI Plus, sem adição de SA).

As Figuras 6.35, 6.36, 6.37 e 6.38 mostram as curvas de profundidade de carbonatação, por idade, para as composições de concreto com CP V ARI RS e CP V ARI Plus, com e sem adição de sílica ativa.

Nessas curvas de profundidade carbonatada em função da idade dos compostos de concreto, percebe-se que a carbonatação demora um determinado tempo para se iniciar, após a exposição dos corpos-de-prova ao ambiente agressivo. Isso possivelmente se deve à umidade inicial dos corpos-de-prova que, com o passar do tempo, tende a equilibrar com a umidade da câmara ($UR \approx 60\%$).

Percebe-se também que, para tempo elevado de exposição ao CO_2 , o processo de carbonatação tende à estabilização, com exceção do traço 1:3,5, cuja profundidade de carbonatação continua crescente após 98 dias.

Todos os traços de concreto apresentaram baixa profundidade carbonatada (no máximo 4 mm), comprovando a eficiência dos compostos estudados frente à ação do gás carbônico. Comparando-se seus valores com os obtidos para os

compostos de argamassa, nota-se que são menores, comprovando a eficiência da composição ideal de agregados.

Analisando a influência da adição de sílica ativa, verifica-se que a profundidade carbonatada é maior em seus compostos se comparados com compostos sem adição, comportamento esse também observado nas argamassas.

De maneira geral, percebe-se que os concretos executados com cimento CP V ARI RS possuem maior profundidade carbonatada que os compostos executados com cimento CP V ARI Plus, como já foi mencionado anteriormente.

FIGURA 6.35 – Profundidade carbonatada x idade para concretos expostos à carbonatação acelerada (CP V ARI RS, com adição de SA).

FIGURA 6.36 – Profundidade carbonatada x idade para concretos expostos à carbonatação acelerada (CP V ARI RS, sem adição de SA).

FIGURA 6.37 – Profundidade carbonatada x idade para concretos expostos à carbonatação acelerada (CP V ARI Plus, com adição de SA).

FIGURA 6.38 – Profundidade carbonatada x idade para concretos expostos à carbonatação acelerada (CP V ARI Plus, sem adição de SA).

6.4. AJUSTE DO MODELO TEÓRICO EXPERIMENTAL DO PROCESSO DE CARBONATAÇÃO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE EXPOSIÇÃO.

Nas curvas de profundidade carbonatada em função da idade dos corpos-de-prova percebe-se que o início da carbonatação se dá num instante diferente de zero, a partir da sua exposição ao ambiente agressivo.

Após a exposição dos corpos-de-prova na câmara de carbonatação acelerada, inicialmente não ocorre a difusão do CO_2 no interior do concreto devido à sua tendência de se combinar, ainda na superfície, com o Na, KOH e Ca(OH)_2 . Dessa forma, a carbonatação só ocorre após um determinado período necessário para a difusão do gás no seu interior e realização das suas reações. Percebe-se, também, que para tempos elevados de exposição ao CO_2 , o processo de carbonatação tende à estabilização.

Foi definida uma curva teórica experimental de profundidade de carbonatação em função do tempo de exposição através de ajustes de curvas, de forma a se obter o menor erro possível e representar o seu comportamento de estabilização para idades elevadas e tempo de início da carbonatação diferente de zero. A relação matemática ideal que se aplicou ao problema foi uma função potencial inversa de grau 2, na forma da Equação (6.1).

$$x = K \cdot \sqrt{t - t_0} \quad (6.1)$$

Onde: x - profundidade carbonatada;

K - coeficiente de carbonatação;

t - tempo de exposição;

t_0 - tempo para início da carbonatação.

As curvas ajustadas são mostradas no ANEXO B e os valores dos parâmetros ajustados e os coeficientes de correlação obtidos são mostrados na Tabela 6.3.

Observando os valores teóricos do coeficiente de carbonatação da Tabela 6.3 e os gráficos de profundidade de carbonatação x tempo para cada traço, verifica-se que, quanto maior a profundidade carbonatada maior é o valor do coeficiente de carbonatação teórico.

Os valores dos coeficientes de correlação são próximos de 1; isso significa que o ajuste da curva teórica com a experimental é satisfatório.

TABELA 6.3 – Valores ajustados e coeficientes obtidos.

Cimento	Tipo	Sílica ativa	Traço 1:m	t_0 (dias)	K (mm/dia ^{0,5})	R^2
CP V ARI RS	A	10% SA	1 : 2,5	6	0,36	0,996
			1 : 3,0	6	0,37	0,998
			1 : 3,5	6	0,75	0,984
CP V ARI RS	A	---	1 : 2,5	7	0,16	0,972
			1 : 3,0	3	0,33	0,963
			1 : 3,5	6	0,47	0,968
CP V ARI RS	B	10% SA	1 : 2,5	0	0,44	0,975
			1 : 3,0	1	0,44	0,966
			1 : 3,5	0	0,32	0,979
CP V ARI RS	B	---	1 : 2,5	28	0,11	0,989
			1 : 3,0	14	0,22	0,985
			1 : 3,5	14	0,22	0,999
CP V ARI Plus	A	10% SA	1 : 2,5	6	0,47	0,984
			1 : 3,0	6	0,42	0,954
			1 : 3,5	5	0,70	0,977
CP V ARI Plus	A	---	1 : 2,5	14	0,13	0,959
			1 : 3,0	7	0,19	0,965
			1 : 3,5	6	0,55	0,998
CP V ARI Plus	B	10% SA	1 : 2,5	13	0,18	0,988
			1 : 3,0	14	0,27	0,966
			1 : 3,5	14	0,19	0,962
CP V ARI Plus	B	---	1 : 2,5	28	0,008	0,999
			1 : 3,0	14	0,07	0,953
			1 : 3,5	14	0,11	0,959

Sendo: t_0 = tempo para início da carbonatação;

K = coeficiente de carbonatação;

R^2 = coeficiente de correlação;

A = Argamassa;

B = Concreto.

As Figuras 6.39, 6.40, 6.41 e 6.42 mostram a relação entre o coeficiente de carbonatação obtido pelo ajuste do modelo teórico experimental e o consumo de cimento para as composições de argamassa e concreto com e sem adição de sílica ativa.

FIGURA 6.39 – Coeficiente de carbonatação x consumo de cimento Portland para argamassa (CP V ARI RS, com e sem adição de SA).

FIGURA 6.40 - Coeficiente de carbonatação x consumo de cimento para argamassa (CP V ARI Plus, com e sem adição de SA).

FIGURA 6.41- Coeficiente de carbonatação x consumo de cimento para concreto (CP V ARI RS, com e sem adição de SA).

FIGURA 6.42 - Coeficiente de carbonatação x consumo de cimento para concreto (CP V ARI Plus, com e sem adição de SA).

Nas Figuras 6.39 e 6.40 observa-se que o traço 1:3,5 apresenta menor consumo de cimento e maior coeficiente de carbonatação nos compostos de argamassa com e sem sílica ativa; conseqüentemente, maior profundidade carbonatada, como já foi observado nas Figuras 6.41, 6.42, 6.43 e 6.44. Para os demais traços, verifica-se uma proporcionalidade entre os coeficientes de carbonatação e a profundidade carbonatada, como era de se esperar.

A Figura 6.41 mostra que o traço 1:2,5 com sílica apresenta maior consumo de cimento e maior coeficiente de carbonatação quando comparado com os demais traços; isso é explicado devido à adição de superplastificante nos traços 1:3,0 e 1:3,5, provocando uma melhor hidratação da pasta e, conseqüentemente, menores profundidades carbonatadas (Figura 6.35). No traço sem sílica ativa, nota-se uma diminuição do coeficiente de carbonatação com o aumento da quantidade de cimento.

Na Figura 6.42 nota-se que, para todos os traços, o coeficiente de carbonatação obtido foi aproximadamente o mesmo.

Considerando o efeito da sílica ativa no valor do coeficiente de carbonatação, verifica-se que todos os compostos com sílica ativa apresentam coeficiente de carbonatação maiores que os composto sem sílica ativa.

6.5. CORRELAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS MACROESTRUTURAIS E AS AVALIAÇÕES MICROESTRUTURAIS REALIZADAS PELO GRUPO LMABC-SET-USP.

Nesse trabalho foram realizadas análises do comportamento macroestrutural dos compostos de concreto e argamassa de cimento CP V ARI Plus e CP V ARI RS, com e sem adição de sílica ativa.

O comportamento microestrutural destes compostos foi estudado em pesquisas anteriores realizadas pelo Prof. Dr. Aluísio Braz de Melo, e os resultados constam no banco de dados do grupo LMABC-SET-EESC-USP liderado pelo Prof. Dr. Jefferson B. L. Liborio.

Desta forma, faz-se algumas considerações a respeito da relação entre os resultados do comportamento macroestrutural obtidos nessa pesquisa e os resultados do comportamento microestrutural extraídos desse banco de dados.

6.5.1. Microestrutura da pasta de cimento

O cimento Portland, quando hidratado, produz o hidróxido de cálcio e o silicato de cálcio hidratado. A proporção final desses dois compostos, após a

hidratação, depende do tipo de cimento e adições. Essas proporções estão diretamente ligadas ao seu comportamento mecânico e à sua susceptibilidade frente a agentes agressivos, como o gás carbônico presente na atmosfera.

A Figura 6.43 mostra a microestrutura do CH e do C-S-H em uma superfície fraturada. Nota-se que o CH apresenta-se em forma de facetas justapostas, enquanto o C-S-H apresenta-se na forma de fibras desarranjadas. A proporção entre estes dois compostos está diretamente relacionada ao volume de poros e, conseqüentemente, à carbonatação, uma vez que a morfologia dos compostos interfere no preenchimento dos poros.

FIGURA 6.43 - Microscopia eletrônica de varredura (MEV) da pasta de cimento: a) Hidróxido de cálcio - CH; b) Silicato de Cálcio Hidratado - C-S-H.

A Figura 6.44 mostra a ocorrência de C-S-H na matriz de concreto. A Figura 6.44a mostra região densa e porosa na matriz; a Figura 6.44b mostra feixes fibrosos de C-S-H; a Figura 6.44c mostra bastões de C-S-H localizados no interior do poro da matriz, enquanto que a Figura 6.44d mostra em detalhe o arranjo aleatório destes bastões.

FIGURA 6.44 - Fotografia da ocorrência do C-S-H no interior de um poro: a)

Região densa e porosa na matriz, b) Feixes fibrosos de C-S-H, c) Bastões de C-S-H localizados dentro do poro da matriz, d) Detalhe do arranjo aleatório dos bastões de C-S-H.

Devido ao preenchimento desses poros com o C-S-H, a dimensão desses canalículos foi diminuída e/ou desconectada, indicando, em todos os casos, uma diminuição da profundidade de carbonatação quando comparada com concretos convencionais, embora ainda assim haja uma relatividade entre aquelas profundidades remanescentes.

Através dos ensaios de difração de raios-X (DRX), verifica-se que a quantidade de CH disponível é menor nas composições com adição de sílica ativa, devido às reações pozolânicas consumirem uma parte desse produto (Figura 6.45).

FIGURA 6.45 - Altura do pico de CH em DRX ($18,3^\circ 2\theta$), realizado em pasta de cimento.

Esse comportamento justifica o fato de que, nas composições de concreto estudadas nesta pesquisa, obteve-se maiores profundidades de carbonatação nos compostos com CP V ARI RS com sílica.

Verifica-se, na Figura 6.46, que o volume de poros depende das adições. Nos compostos com adição de sílica ativa, os poros são tamponados, diminuindo o volume de vazios.

FIGURA 6.46 - Volume de poros obtidos por PIM para composições com CP V ARI, $a/c=0,45$ e idade de 28 dias.

Comparando as Figuras 6.45 e 6.46, verifica-se que as amostras com CP V ARI RS com adição de sílica ativa obtiveram menor intensidade de CH e um volume

de poros considerável, justificando o fato dos concretos com essa composição apresentarem um menor desempenho frente ao agente agressivo CO_2 .

6.5.2. Hidratação e cura

A Figura 6.47 mostra o comportamento da hidratação de pasta de cimento com 1 e 28 dias de idade após cura úmida, sendo os pontos *claros (branco)*: grãos anidros; *cinza médio*: portlandita; *cinza escuro*: outros produtos hidratados; e *preto*: poros. Deve-se notar, também, que a escória apresenta coloração entre *cinza claro* e *médio*.

Comparando-se as Figuras 6.47b, 6.47d e 6.47f, também se comprova que, ao se adicionar sílica ativa, a quantidade de poros é significativamente reduzida. Nesta mesma figura, nota-se a presença de grãos anidros, mesmo sob condições ideais de cura.

Todos os corpos-de-prova ensaiados nesta pesquisa foram submetidos à cura úmida por 7 dias, a fim de se garantir a hidratação. A eficiência desta cura foi considerada satisfatória, uma vez que o comportamento mecânico de todos os corpos-de-prova foi semelhante, tanto nos de controle, quanto nos expostos ao gás carbônico.

FIGURA 6.47 - Hidratação da pasta de cimento Portland com e sem adições nas idades de 1 e 28 dias, sob cura em câmara úmida: a) CP V ARI Plus (1 dia de cura); b) CP V ARI Plus (28 dias de cura); c) CP V ARI Plus + 10 % SA (1 dia de cura); d) CP V ARI Plus + 10 % SA (28 dias de cura); e) CP V ARI RS + 10 % SA (1 dia de cura); f) CP V ARI RS + 10 % SA (28 dias de cura).

7. CONCLUSÕES

No estudo da carbonatação, a simulação de um ambiente agressivo, em laboratório, que possa ser correlacionado com as condições de serviço da estrutura, é um fator de suma importância para que se possa extrapolar os resultados experimentais para casos reais.

A metodologia adotada nesta pesquisa mostrou-se válida devido à obtenção de concretos e argamassas pouco susceptíveis à ação dos agentes agressivos, uma vez que as profundidades carbonatadas, medidas em todos os compostos estudados, foram relativamente baixas.

De maneira geral, para as argamassas foram encontrados valores de profundidade carbonatada, aos 91 dias de exposição ao gás carbônico, em torno de 4 mm com o valor máximo de 8 mm. Nos concretos, esses valores são ainda mais reduzidos, em torno de 2,0 mm, com valor máximo de 4,1 mm.

Os resultados relativos às argamassas estão de acordo com as avaliações feitas por LIBORIO (1990), em vigas-telhas de argamassa com traço em massa de 1:2,0 (670 kg de cimento por metro cúbico), uma vez que, após 25 anos de exposição ao ar livre (concentração de gás carbônico em torno de 1%), se encontrou profundidade carbonatada de 2,0 mm.

A resistência à compressão obtida nos compostos estudados foi relativamente alta com valores em torno de 60 MPa.

A carbonatação aumenta a resistência à compressão das argamassas.

A resistência à tração na compressão diametral não apresentou grandes variações, permanecendo na faixa de 4 MPa a 6 MPa, tanto para as argamassas, quanto para os concretos, independentemente do tempo e da composição.

Nos concretos e argamassas com menor resistência mecânica, mediu-se profundidades carbonatadas maiores, devido à sua maior permeabilidade, facilitando a difusão do gás carbônico no interior do composto.

Apesar da adição de sílica ativa provocar uma descontinuidade nos poros, reduzindo a permeabilidade dos concretos e argamassas, verifica-se que todos os compostos com adição de sílica ativa apresentam coeficiente de carbonatação maiores que os composto sem sílica ativa. Isto se explica pelo fato da sílica ativa ter sido utilizada em substituição de 10% do volume de cimento, reduzindo a quantidade de hidróxido de cálcio presente no composto e, também, devido às reações pozolânicas.

Os concretos executados com a composição ideal entre agregados graúdos e miúdos apresentaram menores profundidades carbonatadas que as argamassas, devido à melhor disposição dos agregados (máxima massa unitária entre agregados miúdo/grauído) conferirem maior compacidade, melhorando o desempenho do composto quando submetido à ação de atmosfera agressiva.

Para os eventuais traços que possuem maior relação água/aglomerante, observou-se maiores profundidades carbonatadas. Isso acontece porque ocorre um aumento na porosidade da pasta endurecida e, conseqüentemente, um aumento na permeabilidade e difusividade do gás CO₂.

Os concretos sem adição de sílica ativa, executados com CP V ARI RS, possuem maior profundidade carbonatada e menor resistência à compressão axial

quando comparados com os executados com CP V ARI Plus. Isso acontece porque o CP V ARI RS possui em sua composição aproximadamente 30% de escória de alto forno em substituição ao clínquer; conseqüentemente, esse cimento possui menor quantidade de hidróxido de cálcio para reagir e formar o carbonato de cálcio, facilitando assim o avanço da frente de carbonatação para o interior do concreto.

O ajuste da função potencial inversa de grau 2 mostrou-se adequada, uma vez que reproduziu as curvas experimentais de profundidade carbonatada em função do tempo de exposição ao gás carbônico, com coeficientes de correlação próximos a 1, significando que o ajuste foi satisfatório.

Além disto, os coeficientes de carbonatação obtidos são compatíveis com os observados em outras pesquisas.

Outro fator marcante no ajuste, foi a determinação do tempo de início da carbonatação que, geralmente, é desconsiderado pela maioria dos modelos teóricos, mas que é significativo para compostos de alto desempenho frente a agentes agressivos, como os aqui estudados.

Sugestões para o prosseguimento da pesquisa

Para complementar este estudo, sugere-se:

- verificar a influência de concentrações variáveis de dióxido de carbono na carbonatação de concretos de alto desempenho e/ou alta resistência;
- analisar a influência de diferentes composições de concretos frente ao ambiente agressivo de gás carbônico;
- verificações em campo da profundidade de carbonatação a partir de resultados obtidos pelo monitoramento ao longo do tempo de casos reais de estruturas construídas em ambientes agressivos.

ANEXO A

TABELAS DE MEDIDAS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA E PROFUNDIDADE CARBONATADA

Argamassa com cimento CP V ARI RS e Com Sílica						
Resistência à Compressão Axial (MPa)						
Idade (dias)	Câmara de carbonatação			Câmara úmida		
	1:2,5	1:3,0	1:3,5	1:2,5	1:3,0	1:3,5
14	60,1	65,4	51,9	52,3	57,8	43,4
	57,2	64,5	49,6	52,3	52,8	45,2
	56,7	65,6	51,0	50,8	56,9	46,1
	58,2	65,7	48,8	54,8	54,5	46,1
	Média	Média	Média	Média	Média	Média
21	58,1	65,0	50,3	52,6	55,5	45,2
	63,7	71,6	52,5	54,7	62,0	45,8
	58,0	68,3	52,6	58,8	60,8	46,7
	60,6	67,3	51,0	53,5	62,5	46,4
	60,2	72,9	51,5	50,8	61,6	45,5
35	Média	Média	Média	Média	Média	Média
	60,6	70,0	51,9	54,5	61,7	46,1
	67,0	70,5	56,7	59,0	66,7	44,7
	63,4	68,8	59,0	59,0	63,4	49,6
	66,4	69,5	54,8	58,8	64,0	46,1
70	66,5	71,9	54,3	59,8	64,6	48,6
	Média	Média	Média	Média	Média	Média
	65,8	70,2	56,2	59,2	64,7	47,2
	62,2	72,9	56,4	60,5	69,2	50,8
	62,6	74,3	58,7	60,1	65,7	53,4
98	66,9	69,8	59,2	61,4	67,3	50,2
	65,4	73,2	58,5	59,8	67,2	54,1
	Média	Média	Média	Média	Média	Média
	64,3	72,5	58,2	60,4	67,4	52,1
	61,4	74,3	61,0	66,5	64,9	54,1
	62,0	71,9	58,1	66,4	65,1	54,3
	65,4	66,7	58,4	60,0	69,2	49,5
	65,7	73,6	53,7	63,7	66,4	51,0
	Média	Média	Média	Média	Média	Média
	63,6	71,6	57,8	64,1	66,4	52,2

Argamassa com cimento CP V ARI RS e Sem Sílica						
Resistência à Compressão Axial (MPa)						
Idade (dias)	Câmara de carbonatação			Câmara úmida		
	1:2,5	1:3,0	1:3,5	1:2,5	1:3,0	1:3,5
14	60,4	55,9	50,7	47,6	48,3	45,1
	59,0	58,1	52,0	49,7	49,7	43,9
	59,2	59,8	51,5	49,4	52,4	45,0
	56,7	58,5	52,7	46,4	49,0	45,5
	Média	Média	Média	Média	Média	Média
	58,8	58,1	51,7	48,3	49,9	44,9
21	65,0	60,8	56,2	57,9	53,1	45,4
	64,1	61,4	55,1	54,2	49,7	46,5
	65,5	59,5	54,2	55,1	52,9	46,0
	65,5	61,9	55,1	53,6	51,3	49,1
	Média	Média	Média	Média	Média	Média
	65,0	60,9	55,2	55,2	51,8	46,7
35	67,3	64,6	55,5	59,9	54,8	48,2
	61,7	59,8	54,0	59,6	52,6	45,9
	64,6	62,3	55,6	58,7	54,5	44,7
	67,3	61,2	59,5	55,0	52,7	51,0
	Média	Média	Média	Média	Média	Média
	65,2	62,0	56,1	58,3	53,7	47,5
70	67,6	63,8	60,4	57,1	56,1	55,0
	66,0	62,4	59,8	62,3	56,1	55,8
	64,2	61,5	63,5	61,9	56,8	54,1
	66,1	62,0	60,1	62,5	56,6	55,1
	Média	Média	Média	Média	Média	Média
	66,0	62,4	60,9	61,0	56,4	55,0
98	63,7	68,9	59,4	60,7	62,6	55,4
	70,6	65,9	63,7	65,0	63,1	57,4
	68,8	62,3	59,4	64,6	63,5	53,9
	64,2	64,1	59,4	59,9	62,0	55,1
	Média	Média	Média	Média	Média	Média
	66,8	65,3	60,5	62,6	62,8	55,4

Concreto com cimento CP V ARI RS e Com Sílica						
Resistência à Compressão Axial (MPa)						
Idade (dias)	Câmara de carbonatação			Câmara úmida		
	1:2,5	1:3,0	1:3,5	1:2,5	1:3,0	1:3,5
14	47,9	48,9	54,5	50,9	43,8	48,9
	52,5	48,4	49,9	53,5	48,4	45,8
	54,0	50,4	51,4	48,4	47,9	48,9
	51,9	45,8	47,9	48,9	47,4	46,3
	Média	Média	Média	Média	Média	Média
21	51,6	48,4	50,9	50,4	46,9	47,5
	53,9	52,6	54,0	55,5	49,5	55,6
	53,1	50,0	57,1	55,1	49,6	50,1
	51,5	51,1	58,5	54,8	51,1	57,3
	53,4	49,8	57,6	55,0	49,9	56,3
35	Média	Média	Média	Média	Média	Média
	53,0	50,9	56,8	55,1	50,0	54,8
	60,6	49,4	57,0	61,1	57,0	60,6
	50,4	56,5	56,5	60,1	58,6	55,5
	62,6	59,1	59,6	56,0	54,0	58,1
70	51,4	55,0	58,6	59,1	58,6	58,1
	Média	Média	Média	Média	Média	Média
	56,3	55,0	57,9	59,1	57,0	58,1
	54,5	52,5	62,0	63,2	57,0	64,8
	52,5	55,0	61,8	59,1	55,0	61,7
98	55,0	55,5	63,4	61,1	57,0	63,4
	55,0	56,0	60,1	61,1	59,1	63,3
	Média	Média	Média	Média	Média	Média
	54,2	54,7	61,8	61,1	57,0	63,3
	48,5	53,5	61,4	62,3	58,7	63,7
	55,7	60,9	64,7	62,9	58,6	63,0
	53,1	50,2	61,5	60,3	55,2	66,2
	56,7	54,7	67,5	66,1	60,7	69,4
	Média	Média	Média	Média	Média	Média
	53,5	54,8	63,8	62,9	58,3	65,6

Concreto com cimento CP V ARI RS e Sem Sílica						
Resistência à Compressão Axial (MPa)						
Idade (dias)	Câmara de carbonatação			Câmara úmida		
	1:2,5	1:3,0	1:3,5	1:2,5	1:3,0	1:3,5
14	48,9	49,9	57,0	43,8	45,8	51,9
	46,9	49,4	55,0	46,9	44,3	52,5
	49,4	47,9	61,1	46,9	43,3	52,5
	46,9	47,9	57,7	47,9	48,9	55,5
	Média	Média	Média	Média	Média	Média
21	48,0	48,8	57,7	46,3	45,6	53,1
	48,9	50,9	58,1	47,4	53,5	58,1
	52,5	47,9	59,1	49,4	47,4	51,9
	51,9	50,9	57,6	51,9	49,9	56,0
	50,9	51,4	58,6	48,4	49,4	57,6
35	Média	Média	Média	Média	Média	Média
	51,1	50,3	58,3	49,3	50,0	55,9
	51,4	54,5	61,6	55,0	54,0	57,6
	55,0	51,4	59,1	54,0	52,5	60,6
	52,5	52,5	56,5	50,9	49,9	57,6
70	59,6	53,0	58,6	53,5	52,1	57,0
	Média	Média	Média	Média	Média	Média
	54,6	52,8	59,0	53,3	52,1	58,2
	51,9	57,6	59,3	54,3	56,9	58,7
	53,8	52,0	57,3	53,1	56,2	63,7
98	57,0	54,0	60,0	57,4	56,6	61,2
	53,7	53,6	61,0	58,0	57,0	66,4
	Média	Média	Média	Média	Média	Média
	54,1	54,3	59,4	55,7	56,7	62,5
	52,5	55,3	60,0	62,1	56,0	65,9
	51,5	60,2	66,0	57,4	63,1	65,9
	51,9	52,5	60,0	57,0	60,7	61,3
	51,6	56,6	60,1	57,7	63,4	62,2
	Média	Média	Média	Média	Média	Média
	51,9	56,2	61,5	58,5	60,8	63,8

Argamassa com cimento CP V ARI Plus e Com Sílica						
Resistência à Compressão Axial (MPa)						
Idade (dias)	Câmara de carbonatação			Câmara úmida		
	1:2,5	1:3,0	1:3,5	1:2,5	1:3,0	1:3,5
14	56,6	60,4	52,0	52,6	59,4	45,0
	56,1	63,2	49,5	55,8	60,4	45,5
	55,4	63,3	50,1	49,8	59,4	44,8
	57,2	61,0	49,6	51,4	58,4	44,8
	Média	Média	Média	Média	Média	Média
21	56,3	62,0	50,3	52,4	59,4	45,0
	57,1	65,9	54,1	57,0	60,0	46,1
	57,7	64,0	53,7	59,2	59,0	49,3
	57,4	62,1	52,0	56,6	60,7	49,8
	59,2	62,8	52,0	57,4	60,2	47,6
35	Média	Média	Média	Média	Média	Média
	57,8	63,7	53,0	57,6	60,0	48,2
	61,2	67,7	49,5	59,6	65,7	53,3
	64,9	66,0	51,7	55,1	62,9	55,7
	58,6	65,1	56,4	60,2	61,4	52,4
70	67,6	65,3	57,3	65,8	63,2	53,9
	Média	Média	Média	Média	Média	Média
	63,1	66,0	53,7	60,2	63,3	53,8
	65,5	69,2	56,5	62,6	66,8	53,3
	62,1	67,4	59,2	66,0	66,5	53,8
98	62,6	68,3	58,8	65,5	66,5	54,1
	66,0	69,7	47,7	64,7	67,4	54,4
	Média	Média	Média	Média	Média	Média
	64,1	68,6	55,5	64,7	66,8	53,9
	65,0	69,2	57,5	63,8	65,8	55,4
	62,7	67,6	59,6	63,1	65,4	59,2
	64,1	67,0	59,9	64,1	64,4	57,1
	68,4	67,9	59,4	64,1	67,4	60,4
	Média	Média	Média	Média	Média	Média
	65,1	67,9	59,1	63,8	65,8	58,0

Argamassa com cimento CP V ARI Plus e Sem Sílica						
Resistência à Compressão Axial (MPa)						
Idade (dias)	Câmara de carbonatação			Câmara úmida		
	1:2,5	1:3,0	1:3,5	1:2,5	1:3,0	1:3,5
14	63,2	65,7	49,9	57,6	58,1	42,8
	64,2	67,2	51,9	56,5	58,6	43,8
	64,0	67,7	52,5	55,5	61,1	43,8
	64,7	67,7	52,5	57,0	61,6	42,8
	Média	Média	Média	Média	Média	Média
21	64,0	67,1	51,7	56,7	59,8	43,3
	63,7	68,8	54,0	57,6	58,1	45,8
	64,2	68,2	54,5	57,0	60,3	48,9
	65,7	67,7	54,5	58,1	62,1	49,9
	63,3	64,7	58,1	57,6	60,6	47,9
35	Média	Média	Média	Média	Média	Média
	64,2	67,4	55,3	57,6	60,3	48,1
	63,2	67,7	57,0	58,6	66,2	48,9
	66,2	66,6	60,0	63,2	62,1	48,6
	62,6	67,2	56,6	57,6	63,7	48,4
70	68,8	67,2	57,6	63,7	62,6	47,9
	Média	Média	Média	Média	Média	Média
	65,2	67,2	57,8	60,7	63,7	48,4
	66,0	71,2	56,4	67,2	67,4	53,6
	65,8	69,3	59,9	66,3	67,5	50,8
98	63,3	76,4	57,2	69,4	70,7	51,2
	68,1	72,7	59,0	68,5	69,4	54,5
	Média	Média	Média	Média	Média	Média
	65,8	72,4	58,1	67,9	68,7	52,5
	69,8	72,3	59,6	75,4	68,8	56,2
	69,3	78,4	62,6	70,4	69,8	55,7
	69,4	80,5	65,0	70,3	71,0	54,8
	69,3	76,4	62,6	75,4	74,4	55,2
	Média	Média	Média	Média	Média	Média
	69,4	76,9	62,5	72,8	71,0	55,5

Concreto com cimento CP V ARI Plus e Com Sílica						
Resistência à Compressão Axial (MPa)						
Idade (dias)	Câmara de carbonatação			Câmara úmida		
	1:2,5	1:3,0	1:3,5	1:2,5	1:3,0	1:3,5
14	55,0	61,1	59,1	53,0	54,5	54,7
	56,0	61,6	64,0	51,9	56,5	54,5
	55,3	58,0	62,4	51,4	55,0	57,0
	55,0	61,8	63,4	52,5	55,0	55,4
	Média	Média	Média	Média	Média	Média
21	55,3	60,6	62,2	52,2	55,3	55,4
	54,0	66,7	65,1	53,5	59,6	64,5
	55,0	64,7	69,8	52,5	62,1	62,4
	54,0	62,7	65,8	54,5	59,6	65,7
	54,5	64,6	67,3	53,5	57,0	63,1
35	Média	Média	Média	Média	Média	Média
	54,4	64,7	67,0	53,5	59,6	63,9
	53,3	67,2	68,7	57,6	60,0	67,3
	57,4	69,0	70,0	48,9	61,4	69,4
	57,6	68,8	70,0	55,8	60,3	69,1
70	56,1	63,8	72,1	60,4	63,1	70,3
	Média	Média	Média	Média	Média	Média
	56,1	67,2	70,2	55,7	61,2	69,0
	55,4	69,3	73,3	57,9	59,1	69,9
	55,5	66,4	70,8	63,2	64,2	73,3
98	55,3	66,3	75,4	68,5	66,2	70,8
	58,6	66,4	73,1	58,3	67,2	71,6
	Média	Média	Média	Média	Média	Média
	56,2	67,1	73,2	62,0	64,2	71,4
	62,1	69,2	75,1	63,2	67,5	71,6
98	59,6	67,7	64,7	65,7	65,0	72,7
	60,6	69,8	71,4	67,7	69,2	68,9
	60,1	66,8	67,6	66,7	68,4	73,0
	Média	Média	Média	Média	Média	Média
	60,6	68,4	69,7	65,8	67,6	71,5

Concreto com cimento CP V ARI Plus e Sem Sílica						
Resistência à Compressão Axial (MPa)						
Idade (dias)	Câmara de carbonatação			Câmara úmida		
	1:2,5	1:3,0	1:3,5	1:2,5	1:3,0	1:3,5
14	47,9	57,0	60,1	44,8	46,9	57,6
	49,4	52,7	61,1	46,9	51,4	60,1
	52,5	53,0	59,6	49,9	53,5	59,6
	50,4	52,5	61,1	50,9	54,5	56,0
	Média	Média	Média	Média	Média	Média
21	50,0	53,8	60,5	48,1	51,6	58,3
	52,5	54,7	62,6	50,9	51,9	59,1
	51,4	55,0	61,1	50,9	52,3	61,1
	52,5	54,5	58,6	49,9	52,5	62,1
	50,9	53,5	63,7	49,4	52,5	61,6
35	Média	Média	Média	Média	Média	Média
	51,8	54,4	61,5	50,3	52,3	61,0
	54,0	57,0	62,6	54,0	57,0	64,7
	52,6	56,0	61,6	56,0	61,1	61,1
	53,0	56,0	59,6	59,1	59,6	63,2
70	50,9	57,0	64,7	56,0	61,1	63,7
	Média	Média	Média	Média	Média	Média
	52,6	56,5	62,1	56,3	59,7	63,2
	53,4	60,3	62,9	62,7	63,1	72,3
	52,9	57,6	61,8	55,1	62,0	66,3
98	52,0	59,5	63,5	59,8	61,8	66,3
	52,8	51,2	64,8	60,4	62,5	70,5
	Média	Média	Média	Média	Média	Média
	52,8	57,2	63,2	59,5	62,3	68,8
	50,6	55,0	66,5	63,4	67,7	72,8
	54,3	56,7	66,1	64,0	65,6	73,2
	55,1	61,4	59,8	58,6	59,8	71,3
	56,1	58,1	62,2	64,9	66,1	71,8
	Média	Média	Média	Média	Média	Média
	54,0	57,8	63,7	62,7	64,8	72,3

Argamassa com cimento CP V ARI RS e Com Sílica						
Idade (dias)	Resistência à Tração (MPa)			Profundidade Carbonatada x(mm)		
	1:2,5	1:3,0	1:3,5	1:2,5	1:3,0	1:3,5
14	5,0	4,5	4,2	0,0	0,5	0,7
	5,2	5,3	4,0	0,0	0,5	0,6
	5,2	4,9	4,3	0,2	0,2	0,6
	5,0	5,1	3,3	0,3	0,3	0,5
	Média	Média	Média	Média	Média	Média
21	5,1	5,0	4,0	0,1	0,4	0,6
	5,3	5,5	4,5	0,8	1,5	1,7
	5,0	5,2	4,9	1,2	0,9	2,2
	5,2	5,2	4,4	0,7	1,0	1,9
	4,8	5,2	4,4	0,8	0,5	2,0
35	Média	Média	Média	Média	Média	Média
	5,1	5,3	4,5	0,9	1,0	2,0
	5,4	5,4	4,7	1,6	1,3	3,7
	5,5	5,6	4,4	1,5	1,9	3,6
	5,3	4,9	4,7	1,5	2,2	3,7
70	5,0	5,7	4,5	1,3	1,5	3,3
	Média	Média	Média	Média	Média	Média
	5,3	5,4	4,6	1,5	1,7	3,6
	5,6	5,4	4,3	3,1	2,9	5,0
	4,7	5,2	4,3	2,5	3,0	5,9
98	5,4	5,4	4,3	2,5	2,7	5,9
	5,7	5,4	4,5	2,9	2,7	5,2
	Média	Média	Média	Média	Média	Média
	5,4	5,4	4,3	2,8	2,8	5,5
	5,3	5,4	3,9	3,7	3,8	7,9
98	4,5	5,1	4,5	3,3	3,9	7,7
	4,9	4,9	4,3	3,7	3,0	8,3
	5,8	5,7	4,6	3,5	2,6	7,9
	Média	Média	Média	Média	Média	Média
	5,1	5,3	4,4	3,6	3,3	8,0

Argamassa com cimento CP V ARI RS e Sem Sílica						
Idade (dias)	Resistência à Tração (MPa)			Profundidade Carbonatada x(mm)		
	1:2,5	1:3,0	1:3,5	1:2,5	1:3,0	1:3,5
14	5,4	5,2	4,7	0,0	0,8	0,3
	5,3	4,5	5,0	0,0	0,8	0,5
	5,0	4,6	4,7	0,0	0,6	0,3
	5,4	4,9	4,6	0,0	0,7	0,3
	Média	Média	Média	Média	Média	Média
21	5,2	4,8	4,7	0,0	0,7	0,4
	5,8	5,1	4,8	0,2	0,7	2,0
	5,2	5,3	4,6	0,5	0,7	2,0
	5,0	4,9	4,3	0,3	0,9	2,0
	5,4	4,8	5,1	0,5	0,8	1,5
35	Média	Média	Média	Média	Média	Média
	5,4	5,0	4,7	0,4	0,8	1,9
	5,6	5,4	5,0	0,7	1,0	2,1
	5,2	4,5	5,0	0,0	1,3	1,6
	5,6	5,2	5,2	1,0	1,5	1,9
70	5,4	5,0	4,6	1,1	1,4	2,9
	Média	Média	Média	Média	Média	Média
	5,4	5,0	5,0	0,7	1,3	2,1
	4,9	5,0	5,2	1,3	2,8	4,0
	5,4	4,7	4,7	1,1	2,9	3,6
98	5,2	5,3	4,9	1,4	3,0	3,7
	5,8	5,8	5,0	1,1	2,4	3,4
	Média	Média	Média	Média	Média	Média
	5,3	5,2	4,9	1,2	2,8	3,7
	5,2	5,1	4,1	2,2	2,9	4,3
	5,6	5,1	5,7	1,7	3,6	4,0
	4,9	5,3	5,2	1,4	3,5	4,2
	5,7	5,5	5,4	2,0	2,7	4,4
	Média	Média	Média	Média	Média	Média
	5,3	5,3	5,1	1,8	3,2	4,2

Concreto com cimento CP V ARI RS e Com Sílica						
Idade (dias)	Resistência à Tração (MPa)			Profundidade Carbonatada x(mm)		
	1:2,5	1:3,0	1:3,5	1:2,5	1:3,0	1:3,5
14	4,8	4,4	5,7	2,0	1,0	1,0
	4,6	4,5	5,3	1,5	1,2	1,1
	4,8	4,2	4,9	1,2	1,1	0,8
	4,8	4,6	4,8	1,5	1,0	0,6
	Média	Média	Média	Média	Média	Média
21	4,8	4,6	5,4	1,6	1,8	1,0
	4,8	4,3	5,3	1,7	1,6	1,1
	4,7	4,3	5,5	1,7	1,3	0,8
	4,5	4,4	5,0	1,7	2,3	0,9
	Média	Média	Média	Média	Média	Média
35	4,7	4,4	5,3	1,7	1,8	1,0
	4,9	5,0	5,0	2,7	2,7	1,5
	4,4	4,9	5,2	3,0	2,5	1,8
	4,7	4,8	5,2	2,3	2,0	1,3
	4,7	5,0	5,6	2,9	2,2	1,5
70	Média	Média	Média	Média	Média	Média
	4,7	4,9	5,3	2,7	2,4	1,5
	4,5	4,9	5,8	3,5	3,8	2,3
	4,5	5,0	5,2	3,5	2,8	2,8
	4,5	5,0	5,1	4,0	4,0	2,2
98	4,6	4,5	5,5	3,7	3,5	3,2
	Média	Média	Média	Média	Média	Média
	4,5	4,8	5,4	3,7	3,5	2,6
	4,7	4,9	5,2	3,8	3,2	3,3
	4,2	5,3	4,8	4,5	4,0	3,2
98	4,8	4,7	5,4	4,0	3,3	3,2
	5,0	5,2	5,6	4,0	4,0	4,2
	Média	Média	Média	Média	Média	Média
98	4,7	5,0	5,2	4,1	3,6	3,5

Concreto com cimento CP V ARI RS e Sem Sílica						
Idade (dias)	Resistência à Tração (MPa)			Profundidade Carbonatada x(mm)		
	1:2,5	1:3,0	1:3,5	1:2,5	1:3,0	1:3,5
14	5,0	4,5	4,8	0,0	0,0	0,0
	4,6	4,1	5,1	0,0	0,0	0,0
	5,1	3,9	5,2	0,0	0,0	0,0
	5,2	4,9	5,0	0,0	0,0	0,0
	Média	Média	Média	Média	Média	Média
21	5,0	4,4	5,0	0,0	0,0	0,0
	4,8	4,8	5,2	0,0	0,0	0,0
	5,0	4,5	5,0	0,0	0,0	0,0
	5,1	4,5	5,1	0,0	0,0	0,0
	5,2	4,3	4,6	0,0	0,0	0,0
35	Média	Média	Média	Média	Média	Média
	5,0	4,5	5,0	0,0	0,0	0,0
	4,6	4,5	5,1	0,0	1,0	0,8
	5,1	4,5	5,2	0,0	1,0	0,6
	5,0	4,8	5,0	0,0	0,6	1,2
70	5,2	4,6	4,7	0,0	0,5	0,8
	Média	Média	Média	Média	Média	Média
	5,0	4,6	5,0	0,0	0,8	0,9
	5,0	4,5	5,4	0,3	1,7	1,5
	5,4	5,1	5,1	1,0	1,7	1,5
98	5,1	4,4	5,7	1,0	1,8	2,0
	3,7	4,7	5,1	0,5	1,5	1,5
	Média	Média	Média	Média	Média	Média
	4,8	4,7	5,3	0,7	1,7	1,6
	5,2	4,6	5,5	0,3	1,7	2,5
98	5,0	4,5	5,5	0,7	2,2	2,7
	5,3	4,6	5,7	1,0	1,7	1,2
	5,1	5,1	5,5	0,7	1,7	1,8
	Média	Média	Média	Média	Média	Média
	5,1	4,7	5,6	0,7	1,8	2,1

Argamassa com cimento CP V ARI Plus e Com Sílica						
Idade (dias)	Resistência à Tração (MPa)			Profundidade Carbonatada x(mm)		
	1:2,5	1:3,0	1:3,5	1:2,5	1:3,0	1:3,5
14	5,0	4,4	4,4	0,3	0,3	1,0
	4,7	5,0	3,5	0,7	0,5	0,7
	4,5	4,6	4,0	0,4	0,3	0,6
	4,8	4,9	4,4	0,4	0,7	1,2
	Média	Média	Média	Média	Média	Média
	4,8	4,7	4,1	0,5	0,4	0,9
21	5,2	5,5	4,6	1,0	0,6	1,8
	5,0	5,1	4,8	1,2	0,7	2,3
	4,8	5,4	4,7	0,7	0,5	1,3
	5,2	5,2	4,7	0,8	0,5	1,7
	Média	Média	Média	Média	Média	Média
	5,0	5,3	4,7	0,9	0,6	1,7
35	5,1	5,6	5,0	1,9	1,8	3,7
	5,5	5,6	4,9	2,3	1,0	4,1
	5,0	5,6	4,3	1,7	1,7	4,0
	4,9	5,7	5,0	2,2	1,5	4,0
	Média	Média	Média	Média	Média	Média
	5,1	5,6	4,8	2,0	1,5	4,0
70	5,5	4,8	4,9	3,3	3,2	5,5
	5,4	6,2	4,8	4,3	3,3	5,4
	5,1	5,4	4,9	3,8	3,6	4,8
	5,2	5,1	4,4	3,7	3,7	5,4
	Média	Média	Média	Média	Média	Média
	5,3	5,4	4,7	3,8	3,5	5,3
98	5,2	5,7	4,9	4,2	4,0	6,9
	5,4	5,2	4,9	3,9	3,5	6,3
	5,1	5,6	4,9	4,0	3,8	6,0
	5,4	4,6	4,9	4,9	3,7	6,3
	Média	Média	Média	Média	Média	Média
	5,3	5,3	4,9	4,3	3,8	6,4

Argamassa com cimento CP V ARI Plus e Sem Sílica						
Idade (dias)	Resistência à Tração (MPa)			Profundidade Carbonatada x(mm)		
	1:2,5	1:3,0	1:3,5	1:2,5	1:3,0	1:3,5
14	5,3	6,0	4,6	0,0	0,0	0,3
	5,5	4,3	4,3	0,0	0,0	0,3
	5,1	5,8	4,7	0,0	0,0	0,2
	5,1	5,7	4,9	0,0	0,0	0,3
	Média	Média	Média	Média	Média	Média
21	5,2	5,4	4,6	0,0	0,0	0,3
	5,5	6,0	4,8	0,0	0,5	1,7
	5,4	6,2	5,2	0,0	0,3	1,5
	5,7	5,7	5,0	0,0	0,5	1,2
	5,8	6,2	4,9	0,0	0,3	1,2
35	Média	Média	Média	Média	Média	Média
	5,6	6,0	5,0	0,0	0,4	1,4
	5,0	6,2	5,1	1,2	1,2	2,7
	5,5	6,7	5,5	0,6	0,5	2,3
	5,7	6,4	5,1	0,0	0,6	2,3
70	6,0	6,5	4,6	0,8	1,0	2,2
	Média	Média	Média	Média	Média	Média
	5,6	6,4	5,1	0,7	0,8	2,4
	5,9	6,7	5,4	1,2	1,5	5,0
	5,1	6,4	5,4	0,8	1,3	4,6
98	6,2	5,3	5,3	0,5	1,0	4,0
	5,9	6,9	5,5	1,0	1,0	3,8
	Média	Média	Média	Média	Média	Média
	5,8	6,3	5,4	0,9	1,2	4,4
	6,0	5,9	5,0	0,8	2,5	5,0
	5,6	6,2	4,9	1,1	1,8	5,9
	5,7	6,2	5,0	1,0	2,0	5,0
	5,6	6,2	5,1	1,0	2,4	5,5
	Média	Média	Média	Média	Média	Média
	5,7	6,1	5,0	1,0	2,2	5,4

Concreto com cimento CP V ARI Plus e Com Sílica						
Idade (dias)	Resistência à Tração (MPa)			Profundidade Carbonatada x(mm)		
	1:2,5	1:3,0	1:3,5	1:2,5	1:3,0	1:3,5
14	4,9	4,8	4,8	0,0	0,0	0,0
	5,1	4,4	5,3	0,0	0,0	0,0
	4,9	4,5	4,6	0,0	0,0	0,0
	4,8	5,1	5,2	0,0	0,0	0,0
	Média	Média	Média	Média	Média	Média
21	4,9	4,7	5,0	0,0	0,0	0,0
	5,2	5,0	4,3	0,2	0,0	0,0
	5,4	4,8	5,3	0,0	0,0	0,0
	5,4	4,7	5,2	0,0	0,0	0,0
	4,5	4,8	5,9	0,3	0,0	0,0
35	Média	Média	Média	Média	Média	Média
	5,2	4,9	5,2	0,1	0,0	0,0
	5,3	4,9	5,0	1,2	0,5	0,5
	5,2	5,1	5,8	1,0	0,5	0,3
	5,4	4,6	5,0	1,0	0,7	0,7
70	5,3	5,1	5,4	0,8	0,8	0,1
	Média	Média	Média	Média	Média	Média
	5,3	4,9	5,3	1,0	0,6	0,4
	5,2	5,1	5,2	0,7	1,8	1,5
	5,2	4,7	5,7	1,3	1,5	0,8
98	5,2	5,0	5,1	1,2	2,8	0,8
	5,4	5,1	5,4	1,2	2,3	1,0
	Média	Média	Média	Média	Média	Média
	5,3	5,0	5,4	1,1	2,1	1,0
	4,9	4,9	5,0	1,7	2,3	1,8
98	4,6	5,1	5,3	1,0	2,0	1,8
	5,3	5,2	5,4	2,0	3,0	2,5
	5,2	5,2	4,9	1,3	2,3	2,6
	Média	Média	Média	Média	Média	Média
	5,0	5,1	5,2	1,5	2,4	2,2

Concreto com cimento CP V ARI Plus e Sem Sílica						
Idade (dias)	Resistência à Tração (MPa)			Profundidade Carbonatada x(mm)		
	1:2,5	1:3,0	1:3,5	1:2,5	1:3,0	1:3,5
14	5,2	5,4	6,2	0,0	0,0	0,0
	4,6	4,6	5,2	0,0	0,0	0,0
	4,9	4,8	5,6	0,0	0,0	0,0
	5,6	4,4	5,3	0,0	0,0	0,0
	Média	Média	Média	Média	Média	Média
21	5,1	4,8	5,6	0,0	0,0	0,0
	4,9	5,5	5,3	0,0	0,0	0,0
	5,3	5,1	6,2	0,0	0,0	0,0
	5,2	5,0	6,0	0,0	0,0	0,0
	5,5	4,7	5,9	0,0	0,0	0,0
35	Média	Média	Média	Média	Média	Média
	5,3	5,1	5,9	0,0	0,0	0,0
	5,4	5,3	5,8	0,0	0,6	0,5
	5,0	5,6	5,8	0,0	0,5	0,3
	4,8	5,1	5,6	0,0	0,7	0,2
70	5,3	5,3	5,8	0,0	0,2	0,0
	Média	Média	Média	Média	Média	Média
	5,1	5,3	5,8	0,0	0,5	0,3
	5,1	5,0	5,4	0,2	0,3	0,8
	5,3	5,7	5,0	0,0	0,7	0,7
98	5,2	5,7	6,2	0,0	0,6	1,1
	4,3	4,7	5,6	0,0	0,3	0,9
	Média	Média	Média	Média	Média	Média
	5,0	5,3	5,6	0,1	0,5	0,9
	4,8	5,1	5,9	0,0	0,5	0,7
	4,9	5,0	5,6	0,0	0,8	1,3
	4,9	5,0	5,4	0,0	0,5	0,3
	5,2	5,6	5,3	0,2	0,6	1,5
	Média	Média	Média	Média	Média	Média
	4,9	5,2	5,5	0,1	0,6	1,0

ANEXO B

CURVAS TEORICAS EXPERIMENTAIS DE PROFUNDIDADE
CARBONATADA EM FUNÇÃO DO TEMPO

As Figuras A2,1 à A2,3 representam as curvas teóricas experimentais para argamassas com composição RS_A_CS, para os traços 1:2,5, 1:3,0 e 1:3,5 respectivamente.

Figura A2.1– Curva teórica experimental do traço 1:2,5.

Figura A2.2– Curva teórica experimental do traço 1:3,0.

Figura A2.3 – Curva teórica experimental do traço 1:3,5.

As Figuras A2,4 à A2,6 representam as curvas teóricas experimentais para concreto com composição RS_B_CS, para os traços 1:2,5, 1:3,0 e 1:3,5 respectivamente.

Figura A2.4– Curva teórica experimental do traço 1:2,5.

Figura A2.5 – Curva teórica experimental do traço 1:3,0.

Figura A2.6 – Curva teórica experimental do traço 1:3,5.

As Figuras A2,7 à A2,9 representam as curvas teóricas experimentais para argamassa com composição RS_A_SS, para os traços 1:2,5, 1:3,0 e 1:3,5 respectivamente.

Figura A2.7 – Curva teórica experimental do traço 1:2,5.

Figura A2.8 – Curva teórica experimental do traço 1:3,0.

Figura A2.9 – Curva teórica experimental do traço 1:3,5.

As Figuras A2.10 à A2.12 representam as curvas teóricas experimentais para concreto com composição RS_B_SS, para os traços 1:2,5, 1:3,0 e 1:3,5 respectivamente.

Figura A2.10 – Curva teórica experimental do traço 1:2,5.

Figura A2.11 – Curva teórica experimental do traço 1:3,0.

Figura A2.12 – Curva teórica experimental do traço 1:3,5.

As Figuras A2.13 à A2.15 representam as curvas teóricas experimentais para argamassa com composição Plus_A_CS, para os traços 1:2,5, 1:3,0 e 1:3,5 respectivamente.

Figura A2.13 – Curva teórica experimental do traço 1:2,5.

Figura A2.14 – Curva teórica experimental do traço 1:3,0.

Figura A2.15 – Curva teórica experimental do traço 1:3,5.

As Figuras A2.16 à A2.18 representam as curvas teóricas experimentais para argamassa com composição Plus_A_SS, para os traços 1:2,5, 1:3,0 e 1:3,5 respectivamente.

Figura A2.16 – Curva teórica experimental do traço 1:2,5.

Figura A2.17 – Curva teórica experimental do traço 1:3,0.

Figura A2.18 – Curva teórica experimental do traço 1:3,5.

As Figuras A2.19 à A2.21 representam as curvas teóricas experimentais para concreto com composição Plus_B_CS, para os traços 1:2,5, 1:3,0 e 1:3,5 respectivamente.

Figura A2.19 – Curva teórica experimental do traço 1:2,5.

Figura A2.20 – Curva teórica experimental do traço 1:3,0.

Figura A2.21 – Curva teórica experimental do traço 1:3,5.

As Figuras A2.22 à A2.24 representam as curvas teóricas experimentais para concreto com composição Plus_B_SS, para os traços 1:2,5, 1:3,0 e 1:3,5 respectivamente.

Figura A2.22 – Curva teórica experimental do traço 1:2,5.

Figura A2.23 – Curva teórica experimental do traço 1:3,0.

Figura A2.24 – Curva teórica experimental do traço 1:3,5.

ANEXO C

DOCUMENTAÇÃO FOTOGRÁFICA

Esse documento fotográfico refere-se a fotos de profundidades carbonatadas de concretos e argamassas com e sem adição de sílica ativa, para a idade de 98 dias, sendo o tempo de exposição ao gás carbônico de 91 dias.

a) Traço 1:2,5

b) Traço 1:3,0

c) Traço 1:3,5

Documento Fotográfico 3.1 – Profundidade carbonatada para concreto com CP V ARI RS e com 10% de sílica ativa (RS_B_CS).

a) Traço 1:2,5

b) Traço 1:3,0

c) Traço 1:3,5

Documento Fotográfico 3.2 – Profundidade carbonatada para concreto com CP V ARI RS e sem adição de sílica ativa (RS_B_SS).

a) Traço 1:2,5

b) Traço 1:3,0

c) Traço 1:3,5

Documento Fotográfico 3.3 – Profundidade carbonatada para argamassa com CP V ARI RS com 10% de sílica ativa (RS_A_CS).

a) Traço 1:2,5

b) Traço 1:3,0

c) Traço 1:3,5

Documento Fotográfico 3.4 – Profundidade carbonatada para argamassa com CP V ARI RS e sem adição de sílica ativa (RS_A_SS).

a) Traço 1:2,5

b) Traço 1:3,0

c) Traço 1:3,5

Documento Fotográfico 3.5 – Profundidade carbonatada para concreto com CP V ARI Plus e com 10% de sílica ativa (Plus_B_CS).

a) Traço 1:2,5

b) Traço 1:3,0

c) Traço 1:3,5

Documento Fotográfico 3.6 – Profundidade carbonatada para concreto com CP V ARI Plus e sem adição de sílica ativa (Plus_B_SS).

a) Traço 1:2,5

b) Traço 1:3,0

c) Traço 1:3,5

Documento Fotográfico 3.7 – Profundidade carbonatada para argamassa com CP V ARI Plus e com 10% de sílica ativa (Plus_A_CS).

a) Traço 1:2,5

b) Traço 1:3,0

c) Traço 1:3,5

Documento Fotográfico 3.8 – Profundidade carbonatada para argamassa com CP V ARI Plus e sem adição de sílica ativa (Plus_A_SS).

ANEXO D

TABELAS DE APLICAÇÃO DO CRITÉRIO DE CHAUVENET EMPREGADO PARA DEPURAÇÃO DE RESULTADOS

Plus A CS Traço 1:2,5					
Ensaio	Idade (dias)	Média (MPa)	Desvio padrão	L _{min} ,	L _{máx} ,
Compressão controle	14	52,4	2,54	48,5	56,3
	21	57,6	1,17	55,8	59,3
	35	60,2	4,39	53,5	66,9
	70	64,7	1,51	62,4	67,0
	98	63,8	0,48	63,0	64,5
Compressão câmara de carbonatação	14	56,3	0,76	55,2	57,5
	21	57,8	0,92	56,4	59,3
	35	63,1	3,99	57,0	69,2
	70	64,1	2,01	61,0	67,1
	98	65,1	2,43	61,3	68,8
Tração câmara de carbonatação	14	4,8	0,21	4,4	5,1
	21	5,0	0,19	4,8	5,3
	35	5,1	0,26	4,7	5,5
	70	5,3	0,20	5,0	5,6
	98	5,3	0,16	5,0	5,5
Ensaio	Idade (dias)	Média (mm)	Desvio padrão	L _{min} ,	L _{máx} ,
Profundidade carbonatada	14	0,4	0,17	0,2	0,7
	21	0,9	0,22	0,6	1,3
	35	2,0	0,28	1,6	2,4
	70	3,8	0,41	3,1	4,4
	98	4,2	0,45	3,6	4,9

Plus A CS Traço 1:3,0					
Ensaio	Idade (dias)	Média (MPa)	Desvio padrão	L _{min} ,	L _{máx} ,
Compressão controle	14	59,4	0,79	58,2	60,6
	21	59,9	0,73	58,8	61,1
	35	63,3	1,79	60,5	66,0
	70	66,8	0,43	66,1	67,4
	98	65,8	1,25	63,9	67,7
Compressão câmara de carbonatação	14	62,0	1,51	59,6	64,3
	21	63,7	1,65	61,2	66,2
	35	66,0	1,21	64,2	67,9
	70	68,6	1,01	67,1	70,2
	98	67,9	0,95	66,5	69,4
Tração câmara de carbonatação	14	4,7	0,29	4,3	5,2
	21	5,3	0,20	5,0	5,6
	35	5,6	0,04	5,6	5,7
	70	5,4	0,62	4,4	6,3
	98	5,3	0,50	4,5	6,0
Ensaio	Idade (dias)	Média (mm)	Desvio padrão	L _{min} ,	L _{máx} ,
Profundidade carbonatada	14	0,4	0,20	0,1	0,7
	21	0,6	0,10	0,4	0,7
	35	1,5	0,36	1,0	2,0
	70	3,4	0,24	3,1	3,8
	98	3,7	0,21	3,4	4,1

Plus A CS Traço 1:3,5					
Ensaio	Idade (dias)	Média (MPa)	Desvio padrão	L _{min}	L _{máx}
Compressão controle	14	45,0	0,31	44,5	45,5
	21	48,2	1,68	45,6	50,8
	35	53,8	1,40	51,7	56,0
	70	53,9	0,46	53,2	54,6
	98	58,0	2,21	54,6	61,4
Compressão câmara de carbonatação	14	50,3	1,19	48,4	52,1
	21	52,9	1,09	51,3	54,6
	35	53,7	3,73	48,0	59,4
	70	55,5	5,37	47,3	63,8
	98	59,1	1,09	57,4	60,8
Tração câmara de carbonatação	14	4,1	0,42	3,4	4,7
	21	4,7	0,10	4,6	4,8
	35	4,8	0,31	4,3	5,3
	70	4,7	0,24	4,4	5,1
	98	4,9	0,04	4,8	4,9
Ensaio	Idade (dias)	Média (mm)	Desvio padrão	L _{min}	L _{máx}
Profundidade carbonatada	14	0,9	0,3	0,4	1,3
	21	1,7	0,4	1,2	2,3
	35	3,9	0,2	3,7	4,2
	70	5,3	0,3	4,8	5,8
	98	6,4	0,4	5,8	6,9

Plus A SS Traço 1:2,5					
Ensaio	Idade (dias)	Média (MPa)	Desvio padrão	L _{min}	L _{máx}
Compressão controle	14	56,7	0,87	55,3	58,0
	21	57,5	0,42	56,9	58,2
	35	60,7	3,12	55,9	65,5
	70	67,9	1,35	65,8	69,9
	98	72,8	2,94	68,3	77,3
Compressão câmara de carbonatação	14	64,0	0,64	63,0	65,0
	21	64,2	1,05	62,6	65,8
	35	65,2	2,85	60,8	69,6
	70	65,8	1,98	62,7	68,8
	98	69,4	0,24	69,1	69,8
Tração câmara de carbonatação	14	5,2	0,18	4,9	5,5
	21	5,6	0,19	5,3	5,9
	35	5,6	0,45	4,9	6,3
	70	5,8	0,50	5,0	6,5
	98	5,7	0,22	5,4	6,1
Ensaio	Idade (dias)	Média (mm)	Desvio padrão	L _{min}	L _{máx}
Profundidade carbonatada	14	0,0	0,00	0,0	0,0
	21	0,0	0,00	0,0	0,0
	35	0,6	0,50	0,0	1,4
	70	0,9	0,30	0,4	1,3
	98	1,0	0,13	0,8	1,2

Plus A SS Traço 1:3,0					
Ensaio	Idade (dias)	Média (MPa)	Desvio padrão	L _{min} ,	L _{máx} ,
Compressão controle	14	59,8	1,79	57,1	62,6
	21	60,3	1,68	57,7	62,8
	35	63,7	1,82	60,9	66,4
	70	68,7	1,59	66,3	71,2
	98	71,0	2,44	67,2	74,7
Compressão câmara de carbonatação	14	67,1	0,97	65,6	68,6
	21	67,4	1,83	64,5	70,2
	35	67,2	0,44	66,5	67,8
	70	72,4	3,02	67,7	77,0
	98	76,9	3,48	71,6	82,2
Tração câmara de carbonatação	14	5,4	0,75	4,3	6,6
	21	6,0	0,23	5,7	6,4
	35	6,4	0,21	6,1	6,7
	70	6,3	0,72	5,2	7,4
	98	6,1	0,17	5,9	6,4
Ensaio	Idade (dias)	Média (mm)	Desvio padrão	L _{min} ,	L _{máx} ,
Profundidade carbonatada	14	0,0	0,00	0,0	0,0
	21	0,4	0,12	0,2	0,6
	35	0,8	0,33	0,3	1,3
	70	1,2	0,24	0,8	1,6
	98	2,2	0,33	1,7	2,7

Plus A SS Traço 1:3,5					
Ensaio	Idade (dias)	Média (MPa)	Desvio padrão	L _{min} ,	L _{máx} ,
Compressão controle	14	43,3	0,59	42,4	44,2
	21	48,1	1,74	45,5	50,8
	35	48,4	0,44	47,8	49,1
	70	52,5	1,80	49,8	55,3
	98	55,5	0,63	54,5	56,5
Compressão câmara de carbonatação	14	51,7	1,21	49,8	53,6
	21	55,3	1,88	52,4	58,1
	35	57,8	1,51	55,5	60,1
	70	58,1	1,63	55,6	60,6
	98	62,5	2,20	59,1	65,8
Tração câmara de carbonatação	14	4,6	0,24	4,3	5,0
	21	5,0	0,14	4,8	5,2
	35	5,1	0,34	4,6	5,6
	70	5,4	0,09	5,3	5,5
	98	5,0	0,07	4,9	5,1
Ensaio	Idade (dias)	Média (mm)	Desvio padrão	L _{min} ,	L _{máx} ,
Profundidade carbonatada	14	0,3	0,05	0,2	0,3
	21	1,4	0,24	1,0	1,8
	35	2,4	0,22	2,0	2,7
	70	4,3	0,55	3,5	5,2
	98	5,3	0,44	4,7	6,0

Plus_B_CS Traço 1:2,5					
Ensaio	Idade (dias)	Média (MPa)	Desvio padrão	L _{min}	L _{máx}
Compressão controle	14	52,2	0,66	51,2	53,2
	21	53,5	0,83	52,2	54,7
	35	55,7	4,86	48,2	63,1
	70	62,0	4,96	54,4	69,6
	98	65,8	1,97	62,8	68,8
Compressão câmara de carbonatação	14	55,3	0,48	54,6	56,1
	21	54,4	0,48	53,6	55,1
	35	56,1	2,00	53,0	59,1
	70	56,2	1,59	53,7	58,6
	98	60,6	1,10	58,9	62,3
Tração câmara de carbonatação	14	4,9	0,15	4,7	5,2
	21	5,2	0,42	4,5	5,8
	35	5,3	0,09	5,1	5,4
	70	5,3	0,11	5,1	5,4
	98	5,0	0,29	4,5	5,4
Ensaio	Idade (dias)	Média (mm)	Desvio padrão	L _{min}	L _{máx}
Profundidade carbonatada	14	0,0	0,00	0,0	0,0
	21	0,1	0,15	0,0	0,4
	35	1,0	0,16	0,7	1,2
	70	1,1	0,27	0,7	1,5
	98	1,5	0,44	0,8	2,2

Plus_B_CS Traço 1:3,0					
Ensaio	Idade (dias)	Média (MPa)	Desvio padrão	L _{min}	L _{máx}
Compressão controle	14	55,3	0,88	53,9	56,6
	21	59,6	2,08	56,4	62,8
	35	61,2	1,40	59,0	63,3
	70	64,2	3,63	58,6	69,7
	98	67,5	1,81	64,8	70,3
Compressão câmara de carbonatação	14	60,6	1,78	57,9	63,3
	21	64,7	1,60	62,2	67,1
	35	67,2	2,39	63,5	70,9
	70	67,1	1,49	64,8	69,4
	98	68,4	1,36	66,3	70,5
Tração câmara de carbonatação	14	4,7	0,32	4,2	5,2
	21	4,9	0,13	4,6	5,1
	35	4,9	0,25	4,5	5,3
	70	5,0	0,16	4,7	5,2
	98	5,1	0,15	4,9	5,3
Ensaio	Idade (dias)	Média (mm)	Desvio padrão	L _{min}	L _{máx}
Profundidade carbonatada	14	0,0	0,00	0,0	0,0
	21	0,0	0,00	0,0	0,0
	35	0,6	0,15	0,4	0,9
	70	2,1	0,57	1,2	3,0
	98	2,4	0,42	1,7	3,0

Plus_B_CS Traço 1:3,5					
Ensaio	Idade (dias)	Média (MPa)	Desvio padrão	L _{min}	L _{máx}
Compressão controle	14	55,4	1,13	53,7	57,2
	21	63,9	1,47	61,7	66,2
	35	69,0	1,26	67,1	71,0
	70	71,4	1,43	69,2	73,6
	98	71,5	1,90	68,6	74,5
Compressão câmara de carbonatação	14	62,2	2,16	58,9	65,5
	21	67,0	2,07	63,8	70,2
	35	70,2	1,39	68,1	72,3
	70	73,2	1,88	70,3	76,1
	98	69,7	4,52	62,7	76,6
Tração câmara de carbonatação	14	5,0	0,34	4,5	5,5
	21	5,2	0,65	4,2	6,2
	35	5,3	0,40	4,7	5,9
	70	5,3	0,29	4,9	5,8
	98	5,2	0,24	4,8	5,5
Ensaio	Idade (dias)	Média (mm)	Desvio padrão	L _{min}	L _{máx}
Profundidade carbonatada	14	0,0	0,00	0,0	0,0
	21	0,0	0,00	0,0	0,0
	35	0,4	0,26	0,0	0,8
	70	1,0	0,33	0,5	1,5
	98	2,2	0,43	1,5	2,8

Plus_B_SS Traço 1:2,5					
Ensaio	Idade (dias)	Média (MPa)	Desvio padrão	L _{min}	L _{máx}
Compressão controle	14	48,1	2,80	43,8	52,4
	21	50,3	0,77	49,1	51,5
	35	56,3	2,10	53,1	59,5
	70	59,5	3,17	54,6	64,3
	98	62,7	2,85	58,4	67,1
Compressão câmara de carbonatação	14	50,0	1,93	47,1	53,0
	21	51,8	0,77	50,6	53,0
	35	52,6	1,27	50,7	54,6
	70	52,8	0,54	51,9	53,6
	98	54,0	2,39	50,4	57,7
Tração câmara de carbonatação	14	5,1	0,43	4,4	5,8
	21	5,2	0,25	4,9	5,6
	35	5,1	0,30	4,7	5,6
	70	5,0	0,45	4,3	5,7
	98	4,9	0,20	4,6	5,2
Ensaio	Idade (dias)	Média (mm)	Desvio padrão	L _{min}	L _{máx}
Profundidade carbonatada	14	0,0	0,00	0,0	0,0
	21	0,0	0,00	0,0	0,0
	35	0,0	0,00	0,0	0,0
	70	0,1	0,10	0,0	0,2
	98	0,1	0,10	0,0	0,2

Plus_B_SS Traço 1:3,0					
Ensaio	Idade (dias)	Média (MPa)	Desvio padrão	L _{min} ,	L _{máx} ,
Compressão controle	14	51,6	3,39	46,4	56,8
	21	52,3	0,24	51,9	52,7
	35	59,7	1,93	56,8	62,7
	70	62,3	0,55	61,5	63,2
	98	64,8	3,44	59,5	70,1
Compressão câmara de carbonatação	14	53,8	2,17	50,5	57,1
	21	54,4	0,67	53,4	55,4
	35	56,5	0,59	55,6	57,4
	70	57,2	4,10	50,9	63,4
	98	57,8	2,70	53,6	61,9
Tração câmara de carbonatação	14	4,8	0,43	4,1	5,5
	21	5,1	0,35	4,5	5,6
	35	5,3	0,21	5,0	5,7
	70	5,3	0,50	4,5	6,0
	98	5,2	0,30	4,7	5,6
Ensaio	Idade (dias)	Média (mm)	Desvio padrão	L _{min} ,	L _{máx} ,
Profundidade carbonatada	14	0,0	0,00	0,0	0,0
	21	0,0	0,00	0,0	0,0
	35	0,5	0,22	0,2	0,8
	70	0,5	0,22	0,1	0,8
	98	0,6	0,14	0,4	0,8

Plus_B_SS Traço 1:3,5					
Ensaio	Idade (dias)	Média (MPa)	Desvio padrão	L _{min} ,	L _{máx} ,
Compressão controle	14	58,3	1,89	55,4	61,2
	21	61,0	1,34	58,9	63,0
	35	63,1	1,50	60,9	65,4
	70	68,8	3,05	64,2	73,5
	98	72,3	0,88	70,9	73,6
Compressão câmara de carbonatação	14	60,5	0,76	59,3	61,7
	21	61,5	2,21	58,1	64,9
	35	62,1	2,12	58,9	65,4
	70	63,2	1,24	61,3	65,1
	98	63,7	3,20	58,8	68,6
Tração câmara de carbonatação	14	5,6	0,45	4,9	6,2
	21	5,8	0,39	5,2	6,5
	35	5,8	0,08	5,6	5,9
	70	5,6	0,48	4,8	6,3
	98	5,5	0,27	5,1	5,9
Ensaio	Idade (dias)	Média (mm)	Desvio padrão	L _{min} ,	L _{máx} ,
Profundidade carbonatada	14	0,0	0,00	0,0	0,0
	21	0,0	0,00	0,0	0,0
	35	0,2	0,21	0,0	0,6
	70	0,9	0,17	0,6	1,1
	98	0,9	0,55	0,1	1,8

RS A CS Traço 1:2,5					
Ensaio	Idade (dias)	Média (MPa)	Desvio padrão	L _{min}	L _{máx}
Compressão controle	14	52,6	1,62	50,1	55,0
	21	54,5	3,34	49,3	59,6
	35	59,2	0,43	58,5	59,8
	70	60,4	0,71	59,4	61,5
	98	64,1	3,05	59,4	68,8
Compressão câmara de carbonatação	14	58,1	1,51	55,7	60,4
	21	60,6	2,34	57,0	64,2
	35	65,8	1,66	63,3	68,4
	70	64,3	2,28	60,8	67,8
	98	63,6	2,22	60,2	67,0
Tração câmara de carbonatação	14	5,1	0,15	4,8	5,3
	21	5,1	0,20	4,7	5,4
	35	5,3	0,22	5,0	5,6
	70	5,4	0,43	4,7	6,0
	98	5,1	0,54	4,3	5,9
Ensaio	Idade (dias)	Média (mm)	Desvio padrão	L _{min}	L _{máx}
Profundidade carbonatada	14	0,1	0,15	0,0	0,4
	21	0,9	0,22	0,5	1,2
	35	1,5	0,13	1,3	1,7
	70	2,7	0,30	2,3	3,2
	98	3,5	0,19	3,3	3,8

RS A CS Traço 1:3,0					
Ensaio	Idade (dias)	Média (MPa)	Desvio padrão	L _{min}	L _{máx}
Compressão controle	14	55,5	2,28	52,0	59,0
	21	61,7	0,72	60,6	62,8
	35	64,7	1,44	62,5	66,9
	70	67,3	1,43	65,1	69,5
	98	66,4	1,98	63,4	69,4
Compressão câmara de carbonatação	14	65,0	0,59	64,1	66,0
	21	70,0	2,66	65,9	74,1
	35	70,2	1,35	68,1	72,2
	70	72,5	1,93	69,6	75,5
	98	71,6	3,43	66,4	76,9
Tração câmara de carbonatação	14	5,0	0,34	4,4	5,5
	21	5,3	0,15	5,0	5,5
	35	5,4	0,36	4,8	5,9
	70	5,3	0,10	5,2	5,5
	98	5,3	0,35	4,7	5,8
Ensaio	Idade (dias)	Média (mm)	Desvio padrão	L _{min}	L _{máx}
Profundidade carbonatada	14	0,4	0,15	0,1	0,6
	21	1,0	0,41	0,3	1,6
	35	1,7	0,40	1,1	2,3
	70	2,8	0,15	2,6	3,1
	98	3,3	0,63	2,4	4,3

RS_A_CS Traço 1:3,5					
Ensaio	Idade (dias)	Média (MPa)	Desvio padrão	L _{min}	L _{máx}
Compressão controle	14	45,2	1,26	43,3	47,2
	21	46,1	0,52	45,3	46,9
	35	47,2	2,24	43,8	50,7
	70	52,1	1,92	49,2	55,1
	98	52,2	2,37	48,6	55,9
Compressão câmara de carbonatação	14	50,3	1,39	48,2	52,5
	21	51,9	0,76	50,7	53,1
	35	56,2	2,13	52,9	59,4
	70	58,2	1,23	56,3	60,1
	98	57,8	3,02	53,2	62,4
Tração câmara de carbonatação	14	3,9	0,43	3,3	4,6
	21	4,5	0,24	4,1	4,9
	35	4,6	0,15	4,4	4,8
	70	4,3	0,09	4,2	4,5
	98	4,4	0,30	3,9	4,8
Ensaio	Idade (dias)	Média (mm)	Desvio padrão	L _{min}	L _{máx}
Profundidade carbonatada	14	0,6	0,08	0,5	0,7
	21	1,9	0,21	1,6	2,3
	35	3,6	0,19	3,3	3,9
	70	5,5	0,47	4,8	6,2
	98	7,9	0,25	7,6	8,3

RS_A_SS Traço 1:2,5					
Ensaio	Idade (dias)	Média (MPa)	Desvio padrão	L _{min}	L _{máx}
Compressão controle	14	48,3	1,56	45,9	50,7
	21	55,2	1,90	52,3	58,1
	35	58,3	2,30	54,8	61,8
	70	61,0	2,57	57,0	64,9
	98	62,6	2,64	58,5	66,6
Compressão câmara de carbonatação	14	58,8	1,53	56,5	61,2
	21	65,0	0,66	64,0	66,1
	35	65,2	2,69	61,1	69,4
	70	66,0	1,42	63,8	68,1
	98	66,8	3,40	61,6	72,0
Tração câmara de carbonatação	14	5,2	0,20	4,9	5,5
	21	5,4	0,31	4,9	5,8
	35	5,4	0,17	5,2	5,7
	70	5,3	0,37	4,8	5,9
	98	5,3	0,37	4,8	5,9
Ensaio	Idade (dias)	Média (mm)	Desvio padrão	L _{min}	L _{máx}
Profundidade carbonatada	14	0,0	0,00	0,0	0,0
	21	0,4	0,15	0,1	0,6
	35	0,7	0,50	0,0	1,5
	70	1,2	0,15	1,0	1,5
	98	1,8	0,35	1,3	2,4

RS A SS Traço 1:3,0					
Ensaio	Idade (dias)	Média (MPa)	Desvio padrão	L _{min}	L _{máx}
Compressão controle	14	49,8	1,79	47,1	52,6
	21	51,7	1,59	49,3	54,2
	35	53,6	1,16	51,9	55,4
	70	56,4	0,36	55,8	56,9
	98	62,8	0,65	61,8	63,8
Compressão câmara de carbonatação	14	58,1	1,62	55,6	60,6
	21	60,9	1,04	59,3	62,5
	35	62,0	2,03	58,9	65,1
	70	62,4	0,99	60,9	63,9
	98	65,3	2,81	61,0	69,6
Tração câmara de carbonatação	14	4,8	0,32	4,3	5,3
	21	5,0	0,22	4,7	5,4
	35	5,0	0,39	4,4	5,6
	70	5,2	0,47	4,5	5,9
	98	5,2	0,19	5,0	5,5
Ensaio	Idade (dias)	Média (mm)	Desvio padrão	L _{min}	L _{máx}
Profundidade carbonatada	14	0,7	0,10	0,6	0,9
	21	0,8	0,10	0,6	0,9
	35	1,3	0,22	0,9	1,6
	70	2,8	0,26	2,4	3,2
	98	3,2	0,44	2,5	3,8

RS A SS Traço 1:3,5					
Ensaio	Idade (dias)	Média (MPa)	Desvio padrão	L _{min}	L _{máx}
Compressão controle	14	44,8	0,70	43,7	46,0
	21	46,7	1,63	44,1	49,4
	35	47,5	2,79	42,9	52,0
	70	55,0	0,69	53,8	56,1
	98	55,4	1,46	53,0	57,8
Compressão câmara de carbonatação	14	51,7	0,85	50,3	53,1
	21	55,2	0,82	53,8	56,5
	35	56,1	2,38	52,2	60,1
	70	60,9	1,72	58,1	63,8
	98	60,5	2,11	57,0	64,0
Tração câmara de carbonatação	14	4,7	0,16	4,5	5,0
	21	4,7	0,33	4,1	5,2
	35	5,0	0,22	4,6	5,3
	70	4,9	0,19	4,6	5,2
	98	5,1	0,67	4,0	6,2
Ensaio	Idade (dias)	Média (mm)	Desvio padrão	L _{min}	L _{máx}
Profundidade carbonatada	14	0,3	0,10	0,2	0,5
	21	1,9	0,25	1,5	2,3
	35	2,1	0,56	1,2	3,0
	70	3,7	0,25	3,3	4,1
	98	4,2	0,17	3,9	4,5

RS_B_CS Traço 1:2,5					
Ensaio	Idade (dias)	Média (MPa)	Desvio padrão	L _{min} ,	L _{máx} ,
Compressão controle	14	50,4	2,32	46,6	54,2
	21	55,1	0,28	54,6	55,5
	35	59,1	2,20	55,5	62,7
	70	61,1	1,66	58,4	63,8
	98	62,9	2,38	59,0	66,8
Compressão câmara de carbonatação	14	51,6	2,61	47,3	55,9
	21	53,0	1,01	51,3	54,6
	35	56,3	6,24	46,0	66,5
	70	54,2	1,21	52,2	56,2
	98	53,5	3,68	47,4	59,5
Tração câmara de carbonatação	14	4,8	0,09	4,6	4,9
	21	4,7	0,15	4,4	4,9
	35	4,7	0,21	4,3	5,0
	70	4,5	0,06	4,4	4,6
	98	4,7	0,31	4,1	5,2
Ensaio	Idade (dias)	Média (mm)	Desvio padrão	L _{min} ,	L _{máx} ,
Profundidade carbonatada	14	1,5	0,33	1,0	2,1
	21	1,7	0,05	1,6	1,8
	35	2,7	0,31	2,2	3,2
	70	3,7	0,24	3,3	4,1
	98	4,1	0,30	3,6	4,6

RS_B_CS Traço 1:3,0					
Ensaio	Idade (dias)	Média (MPa)	Desvio padrão	L _{min} ,	L _{máx} ,
Compressão controle	14	46,8	2,08	43,4	50,3
	21	50,0	0,74	48,8	51,2
	35	57,0	2,16	53,5	60,6
	70	57,0	1,67	54,3	59,8
	98	58,3	2,28	54,5	62,0
Compressão câmara de carbonatação	14	48,4	1,90	45,2	51,5
	21	50,9	1,27	48,8	53,0
	35	55,0	4,10	48,3	61,7
	70	54,7	1,58	52,1	57,3
	98	54,8	4,45	47,5	62,1
Tração câmara de carbonatação	14	4,4	0,16	4,1	4,7
	21	4,4	0,12	4,2	4,6
	35	4,9	0,06	4,8	5,0
	70	4,8	0,26	4,4	5,3
	98	5,0	0,27	4,6	5,5
Ensaio	Idade (dias)	Média (mm)	Desvio padrão	L _{min} ,	L _{máx} ,
Profundidade carbonatada	14	1,1	0,10	0,9	1,2
	21	1,7	0,42	1,1	2,4
	35	2,3	0,31	1,8	2,9
	70	3,5	0,53	2,7	4,4
	98	3,6	0,43	2,9	4,3

RS_B_CS Traço 1:3,5					
Ensaio	Idade (dias)	Média (MPa)	Desvio padrão	L _{min}	L _{máx}
Compressão controle	14	46,7	1,50	44,3	49,2
	21	54,5	3,11	49,4	59,6
	35	57,7	2,06	54,4	61,1
	70	62,7	1,26	60,7	64,8
	98	65,2	2,87	60,5	70,0
Compressão câmara de carbonatação	14	50,9	2,79	46,3	55,5
	21	56,8	1,94	53,6	60,0
	35	57,9	1,40	55,6	60,2
	70	61,8	1,33	59,6	64,0
	98	63,8	2,92	59,0	68,5
Tração câmara de carbonatação	14	5,2	0,38	4,5	5,8
	21	5,3	0,22	4,9	5,6
	35	5,2	0,26	4,8	5,7
	70	5,4	0,34	4,8	6,0
	98	5,2	0,35	4,7	5,8
Ensaio	Idade (dias)	Média (mm)	Desvio padrão	L _{min}	L _{máx}
Profundidade carbonatada	14	0,9	0,22	0,5	1,2
	21	0,9	0,13	0,7	1,2
	35	1,5	0,21	1,2	1,9
	70	2,6	0,46	1,9	3,4
	98	3,5	0,49	2,7	4,3

RS_B_SS Traço 1:2,5					
Ensaio	Idade (dias)	Média (MPa)	Desvio padrão	L _{min}	L _{máx}
Compressão controle	14	46,3	1,76	43,4	49,2
	21	49,3	1,97	46,0	52,5
	35	53,3	1,73	50,5	56,2
	70	55,7	2,38	51,8	59,6
	98	58,5	2,39	54,6	62,5
Compressão câmara de carbonatação	14	48,0	1,34	45,8	50,2
	21	51,1	1,58	48,5	53,6
	35	54,6	3,63	48,6	60,6
	70	54,1	2,14	50,6	57,6
	98	51,9	0,45	51,1	52,6
Tração câmara de carbonatação	14	5,0	0,23	4,6	5,3
	21	5,0	0,16	4,8	5,3
	35	5,0	0,26	4,5	5,4
	70	4,8	0,77	3,5	6,1
	98	5,1	0,13	4,9	5,3
Ensaio	Idade (dias)	Média (mm)	Desvio padrão	L _{min}	L _{máx}
Profundidade carbonatada	14	0,0	0,00	0,0	0,0
	21	0,0	0,00	0,0	0,0
	35	0,0	0,00	0,0	0,0
	70	0,7	0,36	0,1	1,3
	98	0,7	0,29	0,2	1,1

RS_B_SS Traço 1:3,0					
Ensaio	Idade (dias)	Média (MPa)	Desvio padrão	L _{min}	L _{máx}
Compressão controle	14	45,6	2,44	41,6	49,6
	21	50,0	2,55	45,8	54,2
	35	52,1	1,68	49,3	54,9
	70	56,6	0,37	56,0	57,3
	98	60,8	3,43	55,2	66,5
Compressão câmara de carbonatação	14	48,8	1,05	47,0	50,5
	21	50,3	1,63	47,6	53,0
	35	52,8	1,27	50,7	54,9
	70	54,3	2,37	50,4	58,2
	98	56,2	3,22	50,9	61,5
Tração câmara de carbonatação	14	4,4	0,42	3,7	5,0
	21	4,5	0,21	4,2	4,8
	35	4,6	0,13	4,4	4,8
	70	4,7	0,31	4,2	5,2
	98	4,7	0,27	4,2	5,1
Ensaio	Idade (dias)	Média (mm)	Desvio padrão	L _{min}	L _{máx}
Profundidade carbonatada	14	0,0	0,00	0,0	0,0
	21	0,0	0,00	0,0	0,0
	35	0,8	0,26	0,3	1,2
	70	1,7	0,13	1,5	1,9
	98	1,8	0,25	1,4	2,2

RS_B_SS Traço 1:3,5					
Ensaio	Idade (dias)	Média (MPa)	Desvio padrão	L _{min}	L _{máx}
Compressão controle	14	53,1	1,63	50,4	55,8
	21	55,9	2,77	51,3	60,4
	35	58,2	1,63	55,5	60,9
	70	62,5	3,30	57,1	67,9
	98	63,8	2,43	59,8	67,8
Compressão câmara de carbonatação	14	57,7	2,54	53,5	61,9
	21	58,3	0,66	57,2	59,4
	35	58,9	2,09	55,5	62,4
	70	59,4	1,55	56,8	61,9
	98	61,5	2,97	56,6	66,4
Tração câmara de carbonatação	14	5,0	0,17	4,7	5,3
	21	5,0	0,24	4,6	5,4
	35	5,0	0,22	4,6	5,4
	70	5,3	0,28	4,8	5,8
	98	5,5	0,10	5,4	5,7
Ensaio	Idade (dias)	Média (mm)	Desvio padrão	L _{min}	L _{máx}
Profundidade carbonatada	14	0,0	0,00	0,0	0,0
	21	0,0	0,00	0,0	0,0
	35	0,8	0,25	0,4	1,3
	70	1,6	0,25	1,2	2,0
	98	2,0	0,69	0,9	3,2

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT - Associação brasileira de normas técnicas NBR 5738/84 **Moldagem e Cura de Corpos-de-Prova de Concreto Cilíndricos ou Prismáticos**, Rio de Janeiro.
- ____ NBR 6118/80, **Projeto e execução de obras de concreto armado**, Rio de Janeiro.
- ____ NBR 7217/82 **Determinação da Composição Granulométrica dos Agregados**, Rio de Janeiro.
- ____ NBR 7218/82 **Determinação do Teor de Argila em Torrões nos Agregados**, Rio de Janeiro.
- ____ NBR 7251/82 **Agregado em Estado Solto Determinação da Massa Unitária**, Rio de Janeiro.
- ____ NBR 9776/87 **Determinação da Massa Específica de Agregados Miúdos por Meio do Frasco Chapman**, Rio de Janeiro.
- ____ NBR 5739/80 **Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto: método de ensaio**, Rio de Janeiro.
- ____ NBR 7222/83 **Argamassas e concretos - determinação da resistência à tração na compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos: método de ensaio**, Rio de Janeiro.
- ABREU, A.G.; DENISE, C.C. (1997). Efeito da adição de sílica ativa na resistividade elétrica de concretos convencionais. In: CON PAT 97, Porto Alegre - RS, 1997.
- AFONSO, L. (1995). **Contribuição ao estudo das propriedades de concretos estruturais com cimentos portland submetidos a cura a vapor sob pressão atmosférica**. Departamento de Arquitetura e Urbanismo, EESC-USP, São Carlos, Dissertação de Mestrado.
- AITCIN, P.C. (2000). **Concreto de alto desempenho**. São Paulo: Pini.667p.
- ALCOCEL, E.G.; GARCÉS, P.; CHINCHÓN, S. (2000). General study of alkaline hydrolysis in calcium aluminate cement mortars under a broad range of experimental conditions. **Cement and Concrete Research**, v. 30, p. 1689-1699.
- ANDRADE, M.C.P. (1992). **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras**. São Paulo: Pini.
- BARRA, M.; VAZQUEZ, E. (1997). Particularidades do processo de carbonatação em concretos de agregado reciclado. In: CON PAT 97, Porto Alegre - RS, 1997.
- BASHEER, L.; KROPP, J.; CLELAND, D.J. (2001). Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: a review. **Construction and Building Materials**, v. 15, p. 93-103.

- BENTZ, D.P.; GARBOCZI, E.J. (1991). Percolation of phases in a three-dimensional cement paste microstructure model. **Cement and Concrete Research**, v. 21, p. 325-344.
- BENTZ, D.P.; STUTZMAN, P.E.; GARBOCZI, E.J. (1992). Experimental and simulation studies of the interfacial zone in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 22, n. 5, p. 891-992.
- BIJEN, J. (1996). Benefits of slag and fly ash. **Construction and Building Materials**, v. 10, n. 5, p. 309-314.
- BIJEN, J.; VAN SELST, R. (1993). Cement equivalence factors for fly ash. **Cement and Concrete Research**, v. 23, n. 5, p. 1029-1039.
- CASCUDO, O. (1997). **O controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas**. Goiânia - GO: Editora UFG.
- CASTEL, A.; FRANCOIS, R.; ARLIGUIE, G. (1999). Effect of loading on carbonation penetration in reinforced concrete elements. **Cement and Concrete Research**, v. 29, p. 561-565.
- CASTRO, P.; SANJUÁN, M.A.; GENESCÁ, J. (2000). Carbonation of concretes in the Mexican Gulf. **Building and Environment**, v. 35, p. 145-149.
- CLAISSE, P.A.; EL-SAYAD, H.; SHAABAN, I.G. (1999). Permeability and pore volume of carbonated concrete. **ACI Materials Journal**, v. 96, n.3, May-June.
- COMITE EURO INTERNATIONAL du BETON/CEB (1982). **Durability of concrete structure**. state of art report, Bulletin D'information, n. 148, Munich.
- COMITE EURO INTERNATIONAL du BETON/CEB (1982). **Durability of concrete structure: Final report of CEB-RILEM International**. Bulletin D'information, n. 152, Copenhagen.
- CURTIL, L.; GIELLY, J.; MURAT, M. (1993). The polarizing microscope: A tool of interest for investigation on concrete; application to carbonation. **Cement and Concrete Research**, v. 23, n.2, p. 329-334.
- DHIR, R.K.; HEWLETT, P.C.; CHAN, Y.N. (1989). Near-surface characteristics of concrete: prediction of carbonation resistance. **Magazine of Concrete Research**, v. 41, n. 148, p. 137-143.
- DUVAL, R.; KADRI, E.H. (1998). Influence of silica fume on the workability and the compressive strength of high-performance concretes. **Cement and Concrete Research**, v. 28, n. 4, p. 533-547.
- ELFVING, P.; PANAS, I.; LINDQVIST, O. (1996). In situ ir study on the initial sulphitation and carbonation of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ and CaO by SO_2 polluted air. **Atmospheric Environment**, v. 30, n. 23, p. 4085-4089.
- FAGURY, S. C. (2002). **Concretos e pastas de elevado desempenho: contribuição aos estudos dos reparos estruturais e ligações entre concreto novo e velho, com tratamento da zona de interface**. Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais – EESC-IFSC-IQSC-USP, São Carlos, Dissertação de Mestrado.
- FERNANDES PARIS, J.M. (1973). **La Carbonatación de la Pasta Hidrata de Cimento Portland Interpretación Físico-Química**. Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento, Madrid, 69 p.
- FIGUEIREDO, E.J.P. (1994). **Avaliação do desempenho de revestimentos para proteção da armadura contra a corrosão através de técnicas eletroquímicas - contribuição ao estudo de reparo de estruturas de concreto armado**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo/USP, São Paulo, Tese (doutorado).

- FRANCISCO, D. (1995). **Normas para elaboração de dissertações e teses no IFSC-USP**. Universidade de São Paulo, Instituto de Física de São Carlos, Serviço de Biblioteca e Informação.
- GARCIA, C.C. (1999). **Avaliação das incidências patológicas em edificações na região de São Carlos/SP**. Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais, EESC-IFSC-IQSC-USP, São Carlos, Dissertação de Mestrado.
- HAQUE, M.N.; KHAIAT, H.A. (1997). Carbonation of concrete structures in hot dry coastal regions. **Cement and Concrete Research**, v. 19, p. 123-129.
- HELENE, P.R.L. (1986). **Corrosão em armaduras para concreto armado**. São Paulo: Pini.
- HELENE, P.R.L. (1993). **Contribuição ao estudo da corrosão em armadura de concreto armado**. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese (Livre Docência).
- HELENE, P.R.L.; TERZIAN, P. (1992). **Manual de dosagem e controle do concreto**. Brasília - DF: Pini.
- HO, D.W.S.; LEWIS, R.K. (1987). Carbonation of concrete and its prediction. **Cement and Concrete Research**, v. 17, n. 3, p. 489-504.
- HOBBS, D.W. (1988). Carbonation of concrete containing pfa. **Magazine of Concrete Research**, v. 40, n. 143, p. 69-78.
- HOBBS, D.W. (1999). Aggregate influence on chloride ion diffusion into concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 29, p. 1995-1998.
- ISAIA, G.C. (1995) **Efeito de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concreto de elevado desempenho: um estudo de durabilidade com vista á corrosão da armadura**. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese (Doutorado).
- ISAIA, G.C. (1997). Carbonatação de concreto de elevado desempenho com cinza volante, cinza de casca de arroz e microsilica. In: CON PAT 97, Porto Alegre - RS.
- ISAIA, G.C.; VAGHETTI, M.A.O.; GASTALDINI, A.L.G. (1998). Efeitos de misturas pozolânicas sobre a carbonatação do concreto de cimento Portland. In: Congresso Brasileiro do Concreto - IBRACON, 40.
- IHEKWABA, N.M.; HOPE, B.B.; HANSSON, C.M. (1996). Carbonation and eletrochemical chloride extraction from concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 26, n. 7, p. 1095-1107.
- JANOTKA, I. *et al.* (1996). Behavior of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ in the presence of the set styrene-acrylate dispersion. **Cement and Concrete Research**, v. 26, n. 11, p. 1727-1735.
- JONES, M.R.; DHIR, R.K.; MAGEE, B.J. (1997). Concrete containing ternary blended binders: resistance to chloride ingress and carbonation. **Cement and Concrete Research**, v. 27, n. 6, p. 825-831.
- JIANG, L.; LIN, B. CAI, Y. (2000). A model for predicting carbonation of high-volume fly ash concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 30, p. 699-702.
- KLIMESCH, D.S.; RAY, A. (1997). Autoclaved cement-quartz pastes: the effects on chemical and physical properties when using ground quartz with different surface areas part II: results of accelerated carbonation. **Cement and Concrete Research**, v. 27, n.7, p. 1073-1083.
- KOBAYASHI, K.; UNO, Y. (1989). Influence of alkali on carbonation of concrete, Part 1, preliminary tests with mortar specimens. **Cement and Concrete Research**, v. 19, n. 5, p. 821-826.

- KOBAYASHI, K.; SUZUKI, K.; UNO, Y. (1994). Carbonation of concrete structures and decompositions of C-S-H. **Cement and Concrete Research**, v. 24, n. 1, p. 55-61.
- LARBI, J.A.; BIJEN, J.M. (1990). Orientation of calcium hydroxide at the Portland cement paste-aggregate interface in mortars in the presence of silica fume: A contribution. **Cement and Concrete Research**, v. 20, n. 3, p. 461-470.
- LIBORIO, J.B.L. (1990). **Contribuição ao estudo patológico de construções de argamassa armada existente no Brasil**. Universidade de São Paulo, São Carlos, Tese (Doutorado).
- LIBORIO, J.B.L. (1999). **Patologia na Construção Civil**. Notas de Aula, Curso de Pós-Graduação, EESC-USP.
- LIBORIO, J.B.L. (1996). **Patologia na Construção Civil**. Notas de Aula, SAP-4847.
- LIBORIO, J.B.L. (2001). Pesquisa não divulgada.
- LIBORIO, J.B.L.; MELO, A.B. (1999). Processo FAPESP 96-00357-9, pesquisa não divulgada.
- MALANI, C.H.; KALOIDAS, V. (1994). Carbonation and porosity of mortar specimens with pozzolanic and hydraulic cement admixtures. **Cement and Concrete Research**, v. 24, n. 8, p. 1444-1454.
- MASSAZZA, F. (1987). The role of the additions to cement in the concrete durability. **Journal of Cement**, p. 359-382.
- MASSONI, R.F.A.P. (1996). **Fôrmas estruturais de argamassa e concreto para elementos de concreto armado**. Departamento de Arquitetura e Urbanismo, EESC-USP, São Carlos, Dissertação de Mestrado.
- MARELLI, L. M. (2000). **Estudo de alternativa construtiva para reatores anaeróbios tipo UASB, utilizados no tratamento de esgoto doméstico**. Departamento de Arquitetura e Urbanismo, EESC, São Carlos, Dissertação de Mestrado.
- MEHTA, P.K.; AITCIN, P.C. (1990). Principles underlying production of high-performance concrete. **Cement Concrete and Aggregates**, CCAGDP, v. 12, n. 2, p. 70-78.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P.J.M. (1994). **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini.
- MELO, A.B. (2000). **Influência da cura térmica (vapor) sob pressão atmosférica no desenvolvimento da microestrutura dos concretos de cimento Portland**. Interunidade EESC-IFSC-IQSC, Universidade de São Paulo, São Carlos, Tese (Doutorado).
- MELO, A. B. (1996). **Estudo da cura térmica (vapor) sob pressão atmosférica na produção de elementos pré-moldados**. Interunidades EESC-IFSC-IQSC-USP, São Carlos, Dissertação de Mestrado.
- MELO, A.B.; LIBORIO, J.B.L. (1994). Cura acelerada de argamassas estruturais mediante cura térmica (vapor), sob pressão atmosférica. In: REIBRAC-IBRACON, 36., Porto Alegre, 1994. **Anais**.
- MINGSHU, T. *et al.* (1994). Studies on alkali-carbonate reaction. **ACI Materials Journal**, v. 91, n. 1.
- MOLLAH, M.Y.A. *et al.* (1993). An FTIR and XPS investigations of the effects of carbonation on the solidification/stabilization of cement based systems-Portland type V with zinc. **Cement and Concrete Research**, v. 23, n. 4, p. 773-784.

- MONTEIRO, E.C.B.; NEPOMUCENO, A.A. (1997). 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: cloreto - carbonatação. In: CON PAT 97, Porto Alegre - RS.
- NEVILLE, A.M. (1997). **Propriedades do concreto**. São Paulo: Pini.
- NILSSON, L.O. (1996). Interaction between microclimate and concrete - a prerequisite for deterioration. **Construction and Building Materials**, v. 10, n. 5, p. 301-308.
- NISHIKAWA, T.; SUZUKI, K. (1994). Chemical conversion of C-S-H in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 24, n. 1, p. 176-182.
- NISHIKAWA, T.; SUZUKI, K.; ITO, S. (1992). Decomposition of synthesized ettringite by carbonation. **Cement and Concrete Research**, v. 22, n. 1, p. 6-14.
- NGALA, V.T.; PAGE, C.L. (1997). Effects of carbonation on pore structure and diffusional properties of hydrated cement pastes. **Cement and Concrete Research**, v. 27, n. 7, p. 995-1007.
- NUNES, F.L. (1998). **Influência da dosagem na carbonatação dos concretos**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Dissertação de Mestrado.
- OLIVEIRA, P.S.F.; HELENE, P.R.L. (1991). Proteção e manutenção das estruturas de concreto. **Engenharia**, n. 485, p. 11-25.
- OKOCHI, H. *et al.* (2000). Deterioration of concrete structures by acid deposition an assessment of the role of rainwater on deterioration by laboratory and field experiments using mortar specimens. **Atmospheric Environment**, v. 34, p. 2937-2945.
- OZYILDIRIM, C. (1994). Laboratory investigation of low-permeability concretes containing slag and silica fume. **ACI Materials Journal**, v. 91, n. 2, p. 197-202.
- PAULON, V. A. (1981). **Reações álcali-agregado em concreto**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Dissertação (Mestrado).
- PAPADAKIS, V.G. (2000). Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress. **Cement and Concrete Research**, v. 30, p. 291-299.
- PAPADAKIS, V.G. (1999). Experimental investigation and theoretical modeling of silica fume activity in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 29, p. 79-86.
- PAPADAKIS, V. G.; VAYENAS, C.G.; FARDIS, M.N. (1991). Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation. **ACI Materials Journal**, v. 88, n. 4, p. 363-373.
- PAPADAKIS, V. G.; VAYENAS, C.G.; FARDIS, M.N. (1992). Hydration and carbonation of pozzolanic cements. **ACI materials journal**, v. 89, n. 2, p. 119-130.
- PARROTT, J.L. (1996). Some effects of cement and curing upon carbonation and reinforcement corrosion in concrete. **Materials and Structures**, v. 29, n. 4, p. 164 - 173.
- RAO, G.A. (1998). Influence of silica fume replacement of cement on expansion and drying shrinkage. **Cement and Concrete Research**, v. 28, n. 10, p. 1505-1509.
- RAUPACH, M.; SCHIESSL, P. (1997). Monitoring system for the penetration of chlorides, carbonation and the corrosion risk for the reinforcement. **Construction and Building Materials**, v. 11, n. 4, p. 207-214.

- REARDON, E.J.; JAMES, B.R.; ABOUCHAR, J. (1989). High pressure carbonation of cementitious grout. **Cement and Concrete Research**, v. 19, n. 3, p. 385-399.
- RICHARDSON, M.G. (1988). **Carbonation of reinforced concrete: Its causes and management**. New York: CITIS Ltd, Publishers.
- ROY, S.K.; NORTHWOODT, D.O.; POH, K.B. (1996). Effect of plastering on the carbonation of a 19-year-old reinforced concrete building. **Construction and Building Materials**, v. 10, n. 4, p. 267-272.
- ROY, S.K.; NORTHWOODT, D.O.; POH, K.B. (1999). Durability of concrete - accelerated carbonation and weathering studies. **Building and Environment**, v. 34, p. 597-606.
- SANJUAN, M.A.; OLMO, C. (2001). Carbonation resistance of one industrial mortar used as a concrete coating. **Building and Environment**, v. 36, p. 949-953.
- SAROTT, F.A. *et al.* (1992). Diffusion and adsorption studies on hardened cement paste and the effect of carbonation on diffusion rates. **Cement and Concrete Research**, v. 22, n. 2/3, p. 439-444.
- SILVA, I.J. (2000). **Contribuição ao estudo dos concretos de elevado Desempenho: propriedades mecânicas, durabilidade e microestrutura**. Interunidade EESC-IFSC-IQSC, Universidade de São Paulo, São Carlos, Tese (Doutorado).
- SILVA, I.J.; LIBORIO, J.B.L.; MELO, A.B. (2000). Influência da estrutura porosa da pasta e concretos de cimento Portland na durabilidade das estruturas. In: JORNADAS SUDAMERICANAS DE INGENIERIA ESTRUCTURAL, 29.
- SILVA, V.M.; LIBORIO, J.B.L. (2002). A carbonatação em concretos e argamassas com e sem adição de sílica ativa. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO IBRACON, 44., Artigo ainda não publicado.
- SILVA, V.M.; LIBORIO, J.B.L. (2001). **A carbonatação em concretos constituídos com agregados ($D_{máx} < 9,5\text{mm}$), executado com e sem adição de sílica ativa, mediante curas normal e térmica (vapor) sob pressão atmosférica**. Interunidades EESC-IFSC-IQSC, Universidade de São Paulo, São Carlos, Relatório anual não publicado.
- SILVA, V.M.; LIBORIO, J.B.L. (2002). **O efeito da carbonatação em concretos e argamassas executados com e sem adição de sílica ativa**. Interunidades EESC-IFSC-IQSC, Universidade de São Paulo, São Carlos, Relatório anual não publicado.
- SUGAMA, T. (1996). Hot alkali carbonation of sodium metaphosphate modified fly ash/calcium aluminate blend hydrothermal cements. **Cement and Concrete Research**, v. 26, n. 11, p. 1661-1672.
- SUGAMA, T.; CARCIELLO, N.R. (1992). Carbonation of hydrothermally treated phosphate-bonded calcium aluminate cements. **Cement and Concrete Research**, v. 22, n. 5, p. 783-792.
- SURYAVANSHI, A.K.; SWAMY, R.N. (1996). Stability of friedel's salt in carbonated concrete structural elements. **Cement and Concrete Research**, v. 26, n. 5, p. 729-741.
- SURYAVANSHI, A.K.; SWAMY, R.N. (1997). An evaluation of controlled permeability formwork for long-term durability of structural concrete elements. **Cement and Concrete Research**, v. 27, n.7, p. 1047-1060.
- TAKEYA, T. (2001). **Análise experimental de estruturas**. Notas de aula.

- TAYLOR, H.F.W. (1992). **Cement Chemistry**. London: Academic Press Ltd.
- TSIVILIS, S. *et al.* (2000). Properties and behavior of limestone cement concrete and mortar. **Cement and Concrete Research**, v. 30, p. 1679-1683.
- VAYSBURD, A.M.; EMMONS, P.H. (2000). How to make today's repairs durable for tomorrow corrosion protection in concrete repair. **Construction and Building Materials**, v. 14, p. 189-197.
- VAGHETTI, M.A.O. (1999). **Efeitos da cinza volante com cinza de casca de arroz ou sílica ativa sobre a carbonatação do concreto de cimento Portland**. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Dissertação de Mestrado.
- VEIGA, F.N.; BITTENCOURT, R.M.; ANDRADE, W.P. (1998). Influencia da adição de filler calcário na carbonatação do concreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO - IBRACON, 40.
- VUCAK, M. *et al.* (1998). Effect of precipitation conditions on the morphology of calcium carbonate: quantification of crystal shapes using image analysis. **Powder Technology**, p. 1-5.
- XUEQUAN, W. *et al.* (1999). Study on steel slag and fly ash composite Portland cement. **Cement and Concrete Research**, v. 29, p. 1103-1106.
- ZELIC, J. *et al.* (2000). The properties of Portland cement-limestone-silica fume mortars. **Cement and Concrete Research**, v. 30, p. 145-152.