

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE PROPRIEDADES DE
TRANSPORTE DE ÁGUA E OS MECANISMOS DE
CORROSÃO DAS ARMADURAS**

PATRÍCIA LOPES DE OLIVEIRA LARA

ORIENTADOR: ELTON BAUER

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E
CONSTRUÇÃO CIVIL**
PUBLICAÇÃO: E.DM 002/2003

BRASÍLIA/DF: 19/03/2003.

FICHA CATALOGRÁFICA

LARA, PATRÍCIA LOPES DE OLIVEIRA

Análise da Relação entre Propriedades de Transporte de Água e os Mecanismos de Corrosão das Armaduras [Distrito Federal] 2003.

xix, 154p., 210 mm x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Estruturas e Construção Civil, 2003).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília.

Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1 – Concreto Armado

2 – Corrosão

3 – Carbonatação

I. ENC/FT/UnB

4 – Porosimetria por dessorção

5 – Resistência de Polarização

6 – Intensidade Galvânica

II – Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

LARA, P. L. O., 2003. Análise da Relação entre Propriedades de Transporte de Água e os Mecanismos de Corrosão das Armaduras. Dissertação de Mestrado, Publicação E.DM 002/2003, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 154p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Patrícia Lopes de Oliveira Lara

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Análise da Relação entre Propriedades de Transporte de Água e os Mecanismos de Corrosão das Armaduras

GRAU/ANO: Mestre em Ciências/2003.

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Patrícia Lopes de Oliveira Lara
SHIS QL-28 Conjunto-03 Casa-19
CEP.71665-235 – Brasília/DF – Brasil
Fone: (61) 367-1938

DEDICATÓRIA

*Aos meus pais, José Eugênio e Maria, responsáveis
por todas as minhas vitórias.*

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Elton Bauer, pela orientação segura e competência incontestável.

Aos Professores do Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, em especial ao Prof. Nepomuceno, pelos ensinamentos transmitidos.

Ao Laboratório de Ensaios de Materiais da Universidade de Brasília, onde foram realizados os ensaios.

Aos técnicos Severino e Xavier, pela amizade e colaboração indispensável para a realização deste trabalho.

Ao Sr. José Gonçalves, chefe do Centro de Manutenção de Equipamentos da Universidade de Brasília, pela colaboração no desenvolvimento de equipamentos.

A CAPES e CNPq, pelo apoio financeiro, na forma de bolsa de pesquisa e auxílios.

Aos amigos do mestrado pela amizade, em especial: Carla, Isaura, Getúlio, Nielsen, Aarão, Arlindo e Gláucio.

Ao GEMAT – Grupo de Estudos Avançados em Materiais, pelas valiosas discussões.

As minhas irmãs, Cris e Fú, para que esta vitória sirva como incentivo aos seus estudos.

À Vovó Neném, pelo carinho.

À família Almeida Lara por me proporcionarem um lar aqui em Brasília.

Ao Fred pelo amor, companheirismo e paciência.

À Deus, nosso pai.

RESUMO

ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE PROPRIEDADES DE TRANSPORTE DE ÁGUA E OS MECANISMOS DE CORROSÃO DAS ARMADURAS

A água, se não é elemento principal nos mecanismos de deterioração do concreto, consiste em um coadjuvante de importância nos processos. A corrosão de armaduras, particularmente, é dependente da presença de água, tanto na fase de iniciação, onde os agentes agressivos atuam na despassivação das armaduras, como na fase de propagação, onde uma vez despassivada a armadura a corrosão evolui em taxas que dependem do teor de umidade, da resistividade, da temperatura, dentre outros fatores.

Neste sentido, o presente trabalho foi desenvolvido com base na investigação da relação entre propriedades de transporte de água e os mecanismos de corrosão das armaduras, em estruturas carbonatadas. As diferentes microestruturas estudadas foram determinadas em função da variação da relação água/cimento e do consumo de cimento, e sua caracterização foi feita a partir da técnica de porosimetria por dessorção de vapor de água. Para o monitoramento da movimentação e fixação de água foi utilizado o teor de umidade, o conteúdo de umidade e o sensor de umidade, e para avaliar o desenvolvimento do processo de corrosão foi utilizada a técnica de resistência de polarização e intensidade galvânica.

Os resultados obtidos indicaram, de modo geral que a resistividade é fator controlador da corrosão induzida por carbonatação, o comportamento dinâmico da corrosão em relação aos ciclos de umedecimento e secagem, e ainda que o registro do conteúdo de umidade e o sensor de umidade se mostraram efetivos na avaliação da movimentação de água.

ABSTRACT

ANALYSIS OF THE RELATIONSHIP BETWEEN PROPERTIES OF WATER TRANSPORT AND THE MECHANISMS OF REINFORCEMENT CORROSION

If the water is not the main element in the mechanism of concrete deterioration, it is an important element in the process. The reinforcement corrosion depends on the presence of water as much in the beginning phase, where the aggressive agents act in the reinforcement despassivation, as in the propagation phase, where once the reinforcement is despassivated, the corrosion develops in taxes which depends on the humidity, resistivity, temperature, among other factors.

From this point of view, the present work was developed in the investigation of the relationship between properties of the water transport and the mechanisms of reinforcement corrosion, in the carbonated structures. The different microstructures studies were determined in function of the variation of water/cement relationship and the cement consumption, and the characterization was made from the porosimetry technique by desorption of water. For the monitoring of the movement and fixation of water was used the humidity tenor, humidity content and the sensor of humidity and, to evaluate the development of the corrosion was used both techniques: polarization resistance and galvanic intensity.

In general, the results indicated that the resistivity is a controlling factor of the corrosion induced by carbonatation, the corrosion behavior regarding to the humidity and dry cycles was dynamic, and the moisture content and sensor of humidity had shown effective in the evaluation of the movement of water.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	01
1.1. IMPORTÂNCIA DO TEMA	01
1.2. OBJETIVOS	02
1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO	03
2. ESTRUTURA INTERNA DO CONCRETO	05
2.1. INTRODUÇÃO	05
2.2. FASE AQUOSA DO CONCRETO	05
2.3. POROSIDADE DO CONCRETO	07
2.3.1. Distribuição de Tamanho de Poros e Diâmetro Crítico de Poros	08
2.4. TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO DA ESTRUTURA POROSA	10
2.4.1. Porosimetria por Intrusão de Mercúrio	10
2.4.2. Porosimetria por Dessorção	11
2.4.3. Análise de Imagens de Microscopia Eletrônica	12
2.4.4. Difusão em Pequenos Ângulos de Nêutrons	12
3. MECANISMOS DE TRANSPORTE E FIXAÇÃO DE ÁGUA NO CONCRETO	13
3.1. INTRODUÇÃO	13
3.2. PERMEABILIDADE	15
3.2.1. Lei de Darcy	16
3.2.2. Concentração de Água	18
3.3. ABSORÇÃO CAPILAR	19
3.4. ADSORÇÃO	21
3.4.1. Adsorção de vapor de água no concreto	23
3.5. TRANSPORTE DE ÁGUA PELA TEORIA DE POROS NÃO SATURADOS	24
4. CORROSÃO DE ARMADURAS	26
4.1. INTRODUÇÃO	26
4.2. PRINCÍPIOS ELETROQUÍMICOS	27
4.3. CONSIDERAÇÕES TERMODINÂMICAS DA CORROSÃO DE ARMADURAS	28
4.4. TÉCNICAS ELETROQUÍMICAS PARA AVALIAÇÃO DA CORROSÃO	29
4.4.1. Resistência de Polarização	30
4.4.2. Intensidade Galvânica	32
4.5. CORROSÃO DE ARMADURAS DEVIDO À CARBONATAÇÃO	33
4.5.1. Mecanismo de carbonatação	35
4.5.2. Principais Fatores que Condicionam a Velocidade da Frente de Carbonatação	36
4.5.2.1. Concentração de CO ₂	36
4.5.2.2. Condições de Umidade	37
4.5.2.3. Composição Química do Cimento	38
4.5.2.4. Relação água/cimento	39

4.5.2.5. Qualidade na Execução	40
5. PROGRAMA EXPERIMENTAL	41
5.1. INTRODUÇÃO	41
5.2. PROJETO DE PESQUISA	41
5.3. SÉRIES DE ESTUDO	44
5.4. ESTUDO PILOTO	45
5.4.1. Apresentação dos Resultados e Definições com Base no Estudo Piloto	48
5.5. METODOLOGIA OPERACIONAL	51
5.5.1. Montagem e Concepção do Corpo-de-Prova	51
5.5.2. Preparação das Barras	54
5.5.3. Sensor de Umidade	55
5.5.4. Moldagem e Cura dos Corpos-de-Prova	57
5.6. METODOLOGIA DE ENSAIO	58
5.6.1. Ensaio Acelerado de Carbonatação	58
5.6.1.1. Câmara de Carbonatação	60
5.6.2. Período de Umedecimento e de Secagem	61
5.6.3. Técnicas para Monitoramento da Movimentação e Fixação de Água no Concreto	62
5.6.3.1. Leituras no Sensor de Umidade	63
5.6.3.2. Conteúdo de Umidade	63
5.6.4. Técnicas para Monitoramento do Processo de Corrosão	65
5.6.4.1. Resistência de Polarização	65
5.6.4.2. Intensidade Galvânica	66
5.7. ENSAIOS COMPLEMENTARES	67
5.7.1. Absorção de Água por Capilaridade (NBR 9779-95)	68
5.7.2. Absorção de Água por Imersão (NBR 9778-87)	69
5.7.3. Porosimetria por Dessorção	69
5.7.3.1. Preparação das Amostras na Região das Armaduras	71
5.8. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	72
5.8.1. Cimento	72
5.8.2. Areia	73
6. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	75
6.1. INTRODUÇÃO	75
6.2. ESTRUTURA FÍSICA	75
6.2.1. Porosimetria por Dessorção	75
6.2.2. Absorção Capilar, Absortividade e Absorção por Imersão	78
6.3. ESTUDO DA CORROSÃO DE ARMADURAS E DA MOVIMENTAÇÃO DE ÁGUA	81
6.3.1. Avaliação da Movimentação e Fixação de Água	81
6.3.1.1. Teor de Umidade	81
6.3.1.2. Conteúdo de Umidade Interno	83
6.3.1.3. Leituras de Umidade	85
6.3.2. Avaliação Eletroquímica da Corrosão	87
6.3.2.1. Potencial de Corrosão	88
6.3.2.2. Intensidade de Corrosão	89
6.3.2.3. Resistência Ôhmica	93

6.3.2.4. Intensidade Galvânica	94
6.3.3. Correlações entre Medidas Eletroquímicas e a Movimentação e	
Fixação de Água	97
6.4. PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO	99
 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	102
7.1. CONCLUSÕES	102
7.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	103
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104
 ANEXOS	109
Anexo A	110
Anexo B	114
Anexo C	132
Anexo D	135
Anexo E	139
Anexo F	143
Anexo G	147
Anexo H	151

LISTA DE TABELAS

4.1 – Principais fatores que condicionam a velocidade de penetração da frente de carbonatação (KAZMIERCZAK, 1995)	36
5.1 – Definição dos traços e grupos de ensaios	44
5.2 – Definições obtidas a partir do estudo piloto	51
5.3 – Corpos-de-prova	52
5.4 – Relação entre o diâmetro aproximado do poro que está vazio a uma certa umidade relativa	71
5.5 – Análise química e propriedades físicas do cimento	73
5.6 – Caracterização da areia utilizada	73
6.1 – Absorção Capilar, Absortividade e Absorção por Imersão	79
A.1 – Dados Iniciais	110
A.2 – Parâmetros de Mistura	111
B.1 – Resultados do ensaio de porosimetria por dessorção para G1-Não Carbonatado	116
B.2 – Tabela resumo para elaboração do porograma referente às amostras com 10mm de cobrimento e grupo G1-Não Carbonatado	117
B.3 – Tabela resumo para elaboração do porograma referente às amostras com 20mm de cobrimento e grupo G1-Não Carbonatado	117
B.4 – Resultados do ensaio de porosimetria por dessorção para G2-Não Carbonatado	118
B.5 – Tabela resumo para elaboração do porograma referente às amostras com 10mm de cobrimento e grupo G2-Não Carbonatado	119
B.6 – Tabela resumo para elaboração do porograma referente às amostras com 20mm de cobrimento e grupo G2-Não Carbonatado	119
B.7 – Resultados do ensaio de porosimetria por dessorção para G3-Não Carbonatado	120
B.8 – Tabela resumo para elaboração do porograma referente às amostras com 10mm de cobrimento e grupo G3-Não Carbonatado	121
B.9 – Tabela resumo para elaboração do porograma referente às amostras com 20mm de cobrimento e grupo G3-Não Carbonatado	121
B.10 – Resultados do ensaio de porosimetria por dessorção para G4-Não Carbonatado	122
B.11 – Tabela resumo para elaboração do porograma referente às amostras com 10mm de cobrimento e grupo G4-Não Carbonatado	123
B.12 – Tabela resumo para elaboração do porograma referente às amostras com 20mm de cobrimento e grupo G4-Não Carbonatado	123
B.13 – Resultados do ensaio de porosimetria por dessorção para G1- Carbonatado	124
B.14 – Tabela resumo para elaboração do porograma referente às amostras com 10mm de cobrimento e grupo G1-Carbonatado	125
B.15 – Tabela resumo para elaboração do porograma referente às amostras com 20mm de cobrimento e grupo G1-Carbonatado	125
B.16 – Resultados do ensaio de porosimetria por dessorção para G2- Carbonatado	126
B.17 – Tabela resumo para elaboração do porograma referente às amostras com 10mm de cobrimento e grupo G2-Carbonatado	127
B.18 – Tabela resumo para elaboração do porograma referente às amostras com	

10mm de cobrimento e grupo G2-Carbonatado	127
B.19 – Resultados do ensaio de porosimetria por dessorção para G3- Carbonatado	128
B.20 – Tabela resumo para elaboração do porograma referente às amostras com	
10mm de cobrimento e grupo G3-Carbonatado	129
B.21 – Tabela resumo para elaboração do porograma referente às amostras com	
20mm de cobrimento e grupo G3-Carbonatado	129
B.22 – Resultados do ensaio de porosimetria por dessorção para G4- Carbonatado	130
B.23 – Tabela resumo para elaboração do porograma referente às amostras com	
10mm de cobrimento e grupo G4-Carbonatado	131
B.24 – Tabela resumo para elaboração do porograma referente às amostras com	
20mm de cobrimento e grupo G4-Carbonatado	131
C.1 – Resultados do ensaio de absorção capilar para G1-Não Carbonatado	132
C.2 – Resultados do ensaio de absorção capilar para G2-Não Carbonatado	132
C.3 – Resultados do ensaio de absorção capilar para G3-Não Carbonatado	133
C.4 – Resultados do ensaio de absorção capilar para G4-Não Carbonatado	133
C.5 – Resultados do ensaio de absorção capilar para G1- Carbonatado	133
C.6 – Resultados do ensaio de absorção capilar para G2- Carbonatado	134
C.7 – Resultados do ensaio de absorção capilar para G3- Carbonatado	134
C.8 – Resultados do ensaio de absorção capilar para G4- Carbonatado	134
D.1 – Resultados do ensaio de absorção por imersão para G1-Não Carbonatado	135
D.2 – Resultados do ensaio de absorção por imersão para G2-Não Carbonatado	135
D.3 – Resultados do ensaio de absorção por imersão para G3-Não Carbonatado	136
D.4 – Resultados do ensaio de absorção por imersão para G4-Não Carbonatado	136
D.5 – Resultados do ensaio de absorção por imersão para G1- Carbonatado	137
D.6 – Resultados do ensaio de absorção por imersão para G2- Carbonatado	137
D.7 – Resultados do ensaio de absorção por imersão para G3- Carbonatado	137
D.8 – Resultados do ensaio de absorção por imersão para G4- Carbonatado	138
E.1 – Determinação do conteúdo de umidade para o grupo G1	139
E.2 – Determinação do conteúdo de umidade para o grupo G2	140
E.3 – Determinação do conteúdo de umidade para o grupo G3	141
E.4 – Determinação do conteúdo de umidade para o grupo G4	142
F.1 –Leituras no sensor de umidade para o grupo G1	143
F.2 –Leituras no sensor de umidade para o grupo G2	144
F.3 –Leituras no sensor de umidade para o grupo G3	145
F.4 –Leituras no sensor de umidade para o grupo G4	146
G.1–Teor de umidade para o grupo G1	147
G.2–Teor de umidade para o grupo G2	148
G.3–Teor de umidade para o grupo G3	149
G.4–Teor de umidade para o grupo G4	150
H.1–Resultados do ensaio de resistência de polarização para o grupo G1	151
H.2–Resultados do ensaio de resistência de polarização para o grupo G2	152
H.3–Resultados do ensaio de resistência de polarização para o grupo G3	153
H.4–Resultados do ensaio de resistência de polarização para o grupo G4	154

LISTA DE FIGURAS

2.1 – Volume incremental de mercúrio intrudido em função das dimensões dos poros para as séries AR 0,5 (a/c=0,5, não carbonatado) e AR 0,5 C (a/c=0,5 carbonatado) (BAUER,2001)	09
2.2 – Volume acumulado de mercúrio intrudido em função das dimensões dos poros para as séries AR 0,5 (a/c=0,5, não carbonatado) e AR 0,5 C (a/c=0,5 carbonatado) (BAUER, 2001)	09
2.3 – Faixa de aplicação dos principais métodos de caracterização de espaços porosos	10
3.1 – Representação esquemática de um poro sob processo de transporte de umidade (ANDRADE et al. 1999)	13
3.2 – Transporte de água unidirecional em uma amostra de material poroso, conforme as condições (a), (b) e (c) definidas anteriormente. (HALL, 1989)	14
3.3 – Representação esquemática mostrando a definição da zona convectiva a partir dos perfis de umidade (CHRISP et al 2001)	15
3.4 – Representação de um poro sob absorção capilar (ATKINS, 1997)	19
3.5 – Evolução da absorção capilar durante ensaio (BAUER, 2001)	21
4.1 – Representação esquemática do modelo de vida útil proposto por TUUTTI, 1982	27
4.2 - Representação gráfica da corrosão da armadura no concreto	28
4.3 - Diagrama de POURBAIX: equilíbrio pH-Potencial para o ferro em água a 25°C (GENTIL, 1987)	29
4.4 – Influência da umidade relativa na intensidade de corrosão (a) e na resistividade (b) em ensaio de carbonatação acelerada (NEPOMUCENO, 1992)	34
4.5 – Grau de carbonatação em função da umidade relativa do ar (VENAUT apud GONZÁLEZ & ANDRADE, 1980)	37
4.6 – Profundidade de carbonatação em função da relação água/cimento (HELENE, 1993)	39
5.1 – Esquema das variáveis em estudo	42
5.2 – Etapas do programa experimental	43
5.3 – Esquema do sensor galvânico utilizado. Em preto estão os fios de aço inoxidável, em vermelho os fios de aço carbono, em cinza a pintura com resina a base de epóxi e em verde e vermelho as conexões aos fios flexíveis.....	46
5.4 – Montagem do corpo-de-prova piloto	47
5.5 – Foto da câmara de carbonatação utilizada no estudo piloto	48
5.6 – Comportamento do sensor de umidade frente à umedecimento e secagem	49
5.7 – [a] Temperatura e umidade relativa x tempo. [b] Conteúdo de umidade x tempo	50
5.8 – Relação entre as leituras no sensor de umidade e o conteúdo de umidade	50

5.9 – Esquema do conjunto de barras (AC - barras de aço carbono, AI - eletrodos de aço inoxidável)	52
5.10 – Esquema dos corpos-de-prova destinados aos ensaios de corrosão	53
5.11 - Esquema da delimitação da área exposta ao ataque na barra com fita de PVC (preto), conexão com fio flexível (vermelho) e pintura com resina a base de epóxi (cinza). As unidades estão em cm	55
5.12 – Condutividade x tempo em ciclos de umedecimento e secagem para argamassas de cimento Portland Comum (CHRISP et al., 2001)	55
5.13 – Esquema mostrando a movimentação da frente de umidade na região de cobrimento (CHRISP et al., 2001)	56
5.14 – Esquema do sensor de umidade	57
5.15 – Concentração de CO ₂ na câmara de carbonatação	59
5.16 – Kit para análise de CO ₂	59
5.17 – Esquema da câmara de carbonatação	61
5.18 – Equipamento para leituras no sensor de umidade	63
5.19 – Leitura de umidade relativa e temperatura interna ao do corpo-de-prova	64
5.20 – Gráfico das relações entre temperatura, umidade relativa e conteúdo de umidade (RIVERO, 1985)	64
5.21 – Equipamento para medidas de resistência de polarização	65
5.22 – Célula eletroquímica	66
5.23 – Curva de estabilização de intensidade galvânica	67
5.24 – Equipamento para medidas de intensidade galvânica.	67
5.25 – Foto do ensaio de porosimetria por dessorção. [a] Recipientes para ensaio de porosimetria por dessorção. [b] Controle de umidade relativa no recipiente	70
5.26 – Fotos da operação de corte das amostras	71
5.27 – Esquema da operação de corte das amostras	72
5.28 – Curva granulométrica da areia utilizada	74
6.1 – Perfil acumulado de distribuição de tamanho de poros	76
6.2 – Distribuição de tamanho de poros por faixas de diâmetro dos mesmos	77
6.3 – Evolução do ensaio de absorção capilar (g/cm ²). [a] Corpos-de-prova cilíndricos não carbonatados. [b] Corpos-de-prova cilíndricos carbonatados	80
6.4 – Teor de umidade para os grupos de estudo	82
6.5 – Conteúdo de umidade interno nos grupos de estudo.	83
6.6 – Conteúdo de umidade interno x Teor de umidade	84
6.7 – Leituras no sensor de umidade dos grupos de estudo	85
6.8 – [a] Teor de umidade x Leituras no sensor de umidade e [b] Conteúdo de umidade dos poros x Leitura no sensor de umidade	87
6.9 – Evolução do potencial de corrosão para os grupos de estudo	88
6.10 – Evolução da intensidade de corrosão dos grupos de estudo	90
6.11 – Intensidade de corrosão em função das leituras no sensor de umidade	92
6.12 – Evolução da resistência ôhmica	93
6.13 – Evolução da intensidade galvânica para os grupos de estudo	95
6.14 – Potencial de corrosão em função dos parâmetros de umidade	97
6.15 – Intensidade de corrosão em função dos parâmetros de umidade	98
6.16 – Resistência ôhmica em função dos parâmetros de umidade	99
6.17 – Acompanhamento da frente de carbonatação nos corpos-de-prova cilíndricos	100

6.18 – Medidas de profundidade de carbonatação	100
6.19 – Situação dos corpos-de-prova testemunho após término da carbonatação	101

LISTA DE SÍMBOLOS

\AA	Angstrom
Ω	Ohm
θ	Concentração de água
θ'	Ângulo de contato entre o mercúrio e a superfície do poro
ρ	Densidade do líquido
β	Ângulo de contato entre a água e a superfície do poro
γ	Tensão superficial do líquido
ΔH	Variação da altura hidráulica
μm	Micrometro
a	Absortividade
A	Área transversal
$A\%$	Relação água/materiais secos
a/c	Relação água/cimento
B	Constante de Stern-Geary
C	Consumo de cimento
Ca(OH)_2	Hidróxido de cálcio
CaCO_3	Carbonato de cálcio
CO_2	Dióxido de carbono
D	Diâmetro do poro capilar
d	Diâmetro de poro cilíndrico
E	Potencial de corrosão
g	Aceleração da gravidade
I	Absorção de água

<i>i_{corr}</i>	Intensidade de corrosão
<i>I_{gal}</i>	Intensidade galvânica
<i>K</i>	Condutividade hidráulica
<i>L</i>	Comprimento
<i>m</i>	Massa
<i>M</i>	Massa molecular da água
<i>P</i>	Pressão
<i>r</i>	Raio do poro capilar
<i>R</i>	Constante universal dos gases
<i>R_c</i>	Resistência ôhmica
<i>R_p</i>	Resistência de polarização
<i>S</i>	Superfície exposta do metal
<i>T</i>	Temperatura
<i>UR</i>	Umidade relativa
<i>u</i>	Velocidade de Escoamento

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 – IMPORTÂNCIA DO TEMA

A armadura imersa no concreto está, em princípio, protegida da corrosão em virtude da formação de uma camada passivante. Esta camada é formada em decorrência do alto pH do concreto ($\text{pH} \sim 13$), proveniente dos produtos de hidratação do cimento, principalmente dos hidróxidos de cálcio, sódio e potássio, que, ao se dissolverem na fase aquosa do concreto proporcionam ambiente altamente alcalino.

A perda desta proteção pode-se dar, principalmente, através do fenômeno de carbonatação do concreto e contaminação por cloretos, face à diminuição do pH. TUUTTI (1982), chama este período, onde os agentes agressivos atuam na despassivação das armaduras, de fase de iniciação da corrosão e, de fase de propagação ao período seguinte, onde uma vez despassivada a armadura a corrosão evolui em taxas que depende do teor de umidade, da resistividade, da temperatura dentre outros fatores.

A corrosão de armaduras é dependente da presença de umidade tanto na fase de iniciação, como na fase de propagação. A influência da presença de água, ou do transporte da mesma na fase de iniciação se concentra em dois aspectos básicos, ou seja, no ingresso de cloretos, a água é veículo de transporte dos mesmos (quer seja por difusão, absorção, migração iônica, ou permeabilidade). Na carbonatação a água é necessária para dissolução do CO_2 e então poder ocorrer a reação com o Ca(OH)_2 .

Na fase de propagação o teor de água é fator determinante na velocidade da corrosão, uma vez que afeta a resistividade do meio e a respectiva mobilidade iônica, repercutindo essa influência na intensidade de corrosão, conforme ilustram os trabalhos de NEPOMUCENO

(1992) e BAUER (1995), dentre vários. O fator controlador da propagação da corrosão sob efeito de carbonatação do concreto é a resistividade, a qual por sua vez depende do grau de umidade dos poros, bem como da porosidade. A existência de controle da corrosão por resistividade implica no fato da velocidade de corrosão ser restringida ou limitada pelo fluxo de íons entre regiões anódicas e catódicas (BAUER, 1995; GLASS, 1991).

Sabe-se, portanto da influência da água nas fases pertinentes do processo de corrosão, necessitando assim de mais estudos relacionando as variáveis microestrutura física (porosidade), intensidade de corrosão e conteúdo de umidade. Uma modelação quantitativa pelo menos entre as macro variáveis mencionadas, é necessária para que se possa entender a real influência da água nos processos e, a partir daí, aplicar isso aos processos de manutenção e reparo das estruturas de concreto armado.

A corrosão de armaduras é abordada na linha de pesquisa de “Patologia, Reparo e Manutenção de Estruturas” do Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade de Brasília, na qual se insere o presente trabalho, evidenciando a relação entre propriedades de transporte de água e os mecanismos de corrosão das armaduras. Este trabalho visa complementar os estudos realizados, nos quais se destacam os seguintes trabalhos: MONTEIRO, 1996; CASTANHEIRA, 1997; GUIMARÃES, 1997; VASCONCELOS, 1997; TEIXEIRA, 1998; FEIJÃO, 2000 e PESSÔA, 2002; uma vez que, tem enfoque na fase de propagação do processo de corrosão, ainda não avaliado nas pesquisas anteriores, que tinham como enfoque principal a fase de iniciação.

1.2 – OBJETIVOS

O objetivo geral da presente pesquisa é estudar a relação entre o transporte e fixação de água no concreto com os parâmetros eletroquímicos, que caracterizam o processo de corrosão das armaduras. Para tal, serão empregados corpos-de-prova submetidos a carbonatação acelerada, considerando este mecanismo de indução da corrosão das armaduras como sendo o mais adequado para este estudo, uma vez que a “morfologia” deste processo de corrosão é mais uniforme, comparando-se com a corrosão induzida por cloretos.

Como objetivos específicos tem-se:

- o entendimento das leis do transporte de umidade no concreto;
- a compreensão dos mecanismos envolvidos na corrosão das armaduras;
- o desenvolvimento de metodologias e rotinas experimentais, dentre estas, o aprimoramento do ensaio acelerado de carbonatação e a adaptação da técnica de porosimetria por dessorção de vapor de água;
- o desenvolvimento do sensor de umidade para o acompanhamento da movimentação de água na região de cobrimento das armaduras e;
- a avaliação da influência da relação água/cimento e do consumo de cimento na corrosão de armaduras.

1.3 – ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho se apresenta subdividido em 7 capítulos, sendo que o primeiro se refere a introdução, ressaltando a importância do tema pesquisado, justificando sua escolha, além de definir os objetivos propostos.

A revisão bibliográfica é dividida em 3 capítulos, sendo que o primeiro, referente ao capítulo 2, trata da estrutura interna do concreto, ressaltando os aspectos intervenientes relacionados ao seu desempenho frente à durabilidade, com enfoque principal na porosidade e suas técnicas de caracterização e na presença de água na microestrutura. O capítulo 3 se refere à movimentação e fixação de água no concreto, retratando os principais mecanismos de transporte de água. A corrosão de armaduras e o processo de carbonatação do concreto se encontram no capítulo 4.

O capítulo 5 é destinado a apresentação do programa experimental, destacando o projeto de pesquisa, que define as variáveis envolvidas no estudo, as metodologias de ensaio e a caracterização dos materiais.

Os resultados obtidos a partir dos ensaios realizados são apresentados e discutidos no capítulo 6. O capítulo 6 aborda, primeiramente, a caracterização da estrutura física dos grupos de estudo, através de ensaios de porosimetria por dessorção de vapor de água e ensaios de absorção por capilaridade e por imersão. Em seguida é feita a avaliação da movimentação e fixação de água, através do teor de umidade, conteúdo de umidade e leituras no sensor de umidade, do processo de corrosão das armaduras pela técnica de resistência de polarização e medidas de intensidade galvânica, bem como da correlação entre parâmetros eletroquímicos e de umidade, buscando atingir os objetivos da pesquisa.

Por fim, no capítulo 7 encontram-se as conclusões finais obtidas a partir dos resultados analisados, bem como a sugestão para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

ESTRUTURA INTERNA DO CONCRETO

2.1 - INTRODUÇÃO

As relações entre estrutura e propriedades do material são de fundamental importância para o entendimento dos mecanismos envolvidos nos processos de deterioração, partindo do princípio de que, as propriedades do material têm origem na sua estrutura interna, e podem ser modificadas por mudanças adequadas na estrutura (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

Em se tratando de concreto, sua estrutura é heterogênea e altamente complexa. A nível macroscópico, o concreto pode ser considerado um material bifásico, consistindo de partículas de agregado dispersas em uma matriz de cimento. A nível microscópico, começam a aparecer as complexidades da estrutura do concreto, visto que, as duas fases da estrutura não se apresentam de forma homogênea e nem se encontram distribuídas de forma regular uma em relação a outra. A região da interface entre as partículas do agregado e a pasta representa uma terceira fase, a zona de transição. Outro fator complicador da estrutura do concreto é que esta não permanece estável, isto porque dois constituintes da estrutura – a pasta e a zona de transição – estão sujeitas a modificações com o tempo, umidade ambiente e temperatura (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

2.2 – FASE AQUOSA DO CONCRETO

Dependendo da umidade ambiente e da sua porosidade, a pasta de cimento é capaz de reter uma grande quantidade de água. A água pode estar presente na pasta de várias formas e, pode ser classificada de acordo com o grau de dificuldade ou facilidade com o qual, ela pode ser removida (MEHTA & MONTEIRO, 1994):

- Água capilar: água que está presente nos poros maiores que 50Å. Pode ser descrita como o volume de água que está livre da influência das forças de atração exercidas pela superfície sólida. A água capilar pode ser dividida em duas categorias: a água em vazios de diâmetro maiores que 50nm, a qual, pode ser considerada água livre, uma vez que, a sua remoção não causa variação de volume e, a água retida por tensão capilar em capilares de 5 a 50 nm, cuja remoção pode causar retração do sistema;
- Água adsorvida: moléculas de água que estão fisicamente adsorvidas na superfície dos sólidos na pasta, sob a influência de forças de atração;
- Água interlamelar: água associada à estrutura do C-S-H. A água interlamelar é perdida somente por secagem forte, com umidade relativa abaixo de 11%. Neste caso, a estrutura do C-S-H retrai consideravelmente quando a água é perdida;
- Água quimicamente combinada: É a água que é parte integrante da estrutura de vários produtos hidratados do cimento. Esta água não é perdida na secagem a 100°C, e é liberada quando os produtos hidratados são decompostos por aquecimento, em temperaturas superiores a 100°C.

A fase aquosa do concreto tem origem, parcialmente, na água excedente à necessária para a hidratação do cimento, que não se evapora, a qual se encontra, principalmente, nos poros capilares da matriz e onde estão dissolvidos os principais componentes solúveis do cimento hidratado (NEPOMUCENO, 1992). Quanto à composição da fase aquosa, tem sido observado que a concentração inicial de cada um dos íons presentes (Ca^{2+} , K^+ , Na^+ , SO_4^{2-} , OH^-), depende principalmente do tipo e teor de cimento e da relação água/cimento (TAYLOR, 1992).

Sob o enfoque da proteção das armaduras no concreto armado, é de fundamental importância o elevado pH da fase aquosa do concreto, devido à formação e manutenção da película passivadora sobre a superfície da armadura, a qual, tem natureza protetora, propiciando valores desprezíveis de intensidade de corrosão (ANDRADE, 1992).

A fase aquosa tem fundamental importância no mecanismo de carbonatação do concreto. A reação do CO_2 com o Ca(OH)_2 , com conseqüente redução do pH, ocorre em fase aquosa, sendo dependente da composição da mesma. A concentração de íons Na^+ e K^+ é significativa na fase aquosa, pois seus compostos dissolvem-se completamente limitando a dissolução do Ca(OH)_2 que se encontra em grande parte precipitado. Assim, como os álcalis, NaOH e KOH ,

são mais solúveis que o Ca(OH)_2 , estes, no desenvolvimento do processo de carbonatação, carbonatam-se primeiro, precipitando na forma de carbonatos, aumentando, com isso, a solubilidade do Ca(OH)_2 para carbonatar (TUUTTI, 1982).

2.3 – POROSIDADE DO CONCRETO

A fase sólida do concreto é constituída pelos agregados e pela pasta. A parte sólida da pasta é formada pelo silicato de cálcio hidratado (C-S-H), pelo hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), pelos sulfoaluminatos e pelos grãos de cimento não hidratados, além de outros compostos menores. Em relação às características de porosidade do concreto, pode-se considerar que estas são devidas, principalmente, à pasta, já que, de forma geral, os agregados apresentam pequena permeabilidade.

Os vazios na pasta diferenciam-se quanto à sua origem e dimensões conforme descrito abaixo (MEHTA & MONTEIRO, 1994):

- Espaço interlamelar do C-S-H: caracteriza os poros de diâmetros da ordem de 18 Å, sendo responsáveis por 28% da porosidade capilar no C-S-H sólido (POWERS, apud MEHTA & MONTEIRO, 1994). Entretanto, considera-se que este tamanho do vazio é muito pequeno para ter um efeito desfavorável sobre a resistência e a permeabilidade da pasta.
- Vazios capilares: representa o espaço não preenchido pelos compostos sólidos da pasta, sendo o volume e o tamanho dos capilares determinados pela distância inicial entre as partículas de cimento anidro, na pasta de cimento recém-misturada, dada pela relação água/cimento e o grau de hidratação do cimento.
- Ar incorporado: aditivos podem ser colocados no concreto propositadamente para incorporar poros muito pequenos na pasta de cimento. O ar, também, pode ser aprisionado na pasta de cimento fresca durante a operação de mistura, sendo que seus vazios podem chegar a 3 nm, enquanto que os vazios de ar incorporado variam de 50 a 200 µm. Conseqüentemente, tanto os vazios de ar incorporado como os de ar

aprisionado na pasta são muito maiores do que os vazios capilares, sendo capazes de afetar negativamente a resistência e impermeabilidade.

A relação água/cimento, o grau de hidratação do cimento, a idade (maturidade) e cura são fatores determinantes na porosidade e permeabilidade do concreto. A utilização de relações água/cimento reduzidas têm seus efeitos evidenciados por uma diminuição no volume total de poros de maior diâmetro (capilares). Além do mais, tende a modificar a microestrutura reduzindo a interconectividade da estrutura porosa.

2.3.1 – Distribuição de Tamanho de Poros e Diâmetro Crítico de Poros

A distribuição de tamanho de poros é fator determinante da permeabilidade do concreto enquanto a porosidade total é responsável pela resistência e elasticidade do concreto (MEHTA & MONTEIRO, 1994). Vazios capilares maiores que 50 nm (macroporos) são admitidos como prejudiciais à resistência e à impermeabilidade, enquanto que os vazios menores que 50 nm (microporos) são considerados como mais importantes para a retração por secagem e a fluência. Para cada tipo de cimento, a distribuição de tamanho de poros é influenciada pela relação água/cimento, pelo grau de hidratação do cimento, pela idade e pela cura.

A carbonatação do concreto, também, é fator influenciante da distribuição de tamanho de poros, promovendo um refinamento da porosidade do concreto, como pode ser observado na figura 2.1 e 2.2, para argamassa de mesma relação água/cimento de 0,5 (BAUER et al., 2001). Sabe-se que no decorrer do processo de carbonatação, ocorre a redução do tamanho dos poros da pasta devido à formação do CaCO_3 e a produção de água que contribui para a continuidade do processo de hidratação do cimento. Tais efeitos promovem um refinamento da estrutura de poros tendendo a melhorar a qualidade da pasta através da redução da porosidade do concreto (HELENE, 1993). Porém, pode-se ter a possibilidade de corrosão devido à destruição da película passivadora pelo efeito da carbonatação.

Enquanto a série não carbonatada, AR 0,5, apresenta um pico bem definido, caracterizando uma concentração significativa de poros com dimensões entre 0,015 a 0,15 μm , a série carbonatada, AR 0,5 C, apresenta uma distribuição de poros em uma faixa mais extensa e bem distribuída compreendendo diâmetros entre 0,003 a 1 μm , e eliminando o pico observado

na série AR 0,5. Na Figura 2.2 percebe-se também, a grande redução do volume total intrudido da série carbonatada em relação à mesma não carbonatada.

Outro parâmetro de importância relevante para caracterização da estrutura porosa é o diâmetro crítico de poro, definido como a menor dimensão de poro acima da qual se estabelece uma trajetória de poros conectados de uma extremidade a outra da amostra. O diâmetro crítico é caracterizado pelo ponto de inflexão da curva de volume acumulado versus diâmetro de poros na porosimetria por intrusão de mercúrio.

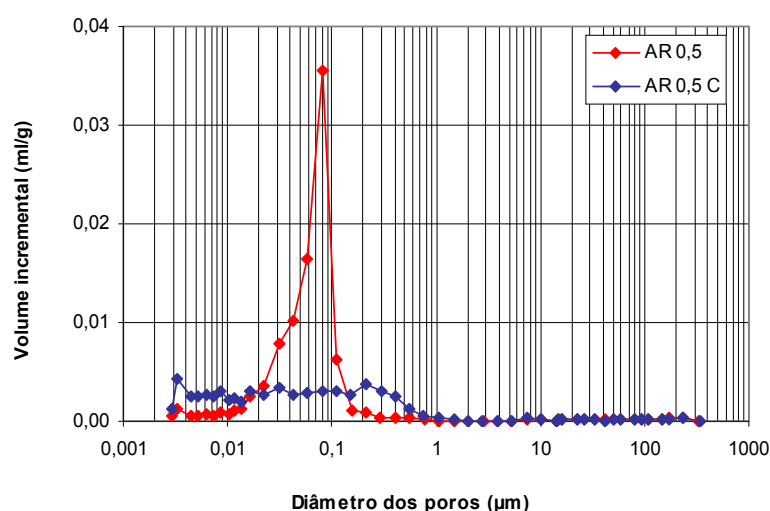


Figura 2.1—Volume incremental de mercúrio intrudido em função das dimensões dos poros para as séries AR 0,5 ($a/c=0,5$, não carbonatado) e AR 0,5 C ($a/c=0,5$ carbonatado) (BAUER et al.,2001).

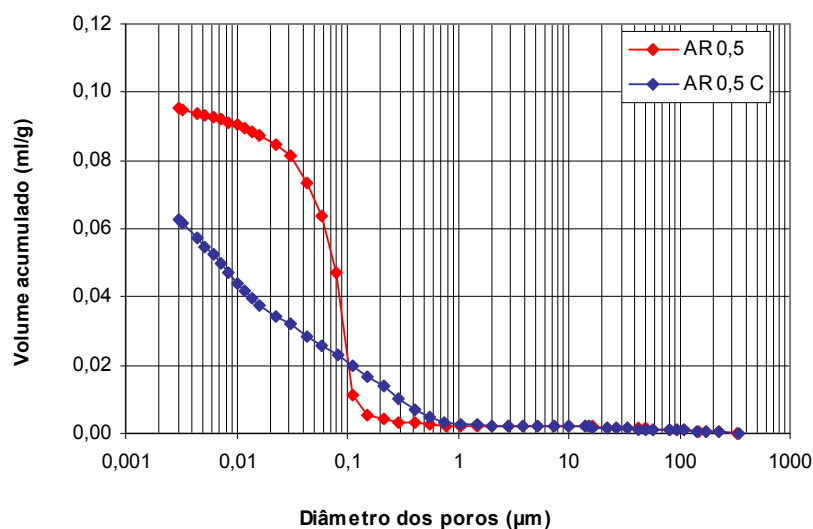


Figura 2.2 – Volume acumulado de mercúrio intrudido em função das dimensões dos poros para as séries AR 0,5 (a/c=0,5, não carbonatado) e AR 0,5 C (a/c=0,5 carbonatado) (BAUER et al, 2001).

2.4 – TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO DA ESTRUTURA POROSA

Dentre as técnicas para caracterização da estrutura porosa estão a porosimetria por intrusão de mercúrio, porosimetria por dessorção, análise de imagens de microscopia eletrônica, difusão em pequenos ângulos de nêutrons e adsorção de nitrogênio.

As principais técnicas para caracterização de espaços porosos estão apresentados, de forma sucinta, na figura 2.3 a seguir, com ênfase especial a técnica de porosimetria por dessorção de vapor de água que foi aplicada neste trabalho.

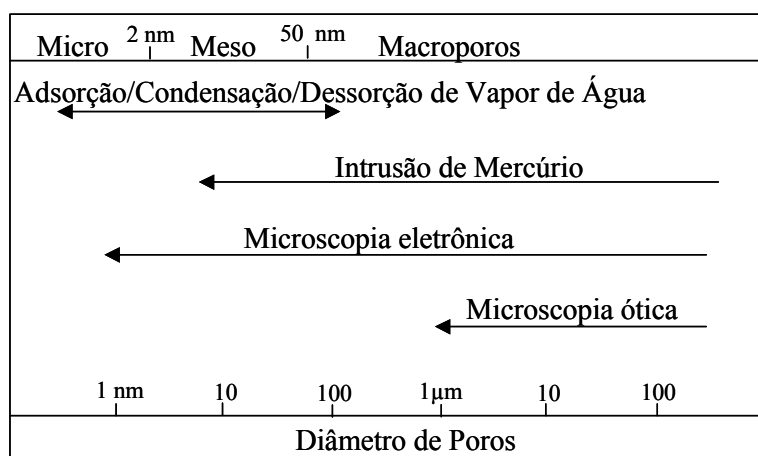


Figura 2.3 – Faixa de aplicação dos principais métodos de caracterização de espaços porosos (BAROGUEL, 1994).

2.4.1 – Porosimetria por Intrusão de Mercúrio

A técnica de porosimetria por intrusão de mercúrio é vastamente utilizada para avaliar a distribuição de tamanho de poros em pastas de cimento, argamassas e concreto. O método se aplica para a medição de poros na faixa de 0,003 a 400 µm, sendo mais adequado na faixa de 0,1 a 100 µm (BS 7591, 1992). O princípio da técnica se baseia na relação entre o diâmetro do

poro (assumindo como sendo cilíndrico) e o volume de mercúrio que pode penetrá-lo em função da pressão aplicada.

A técnica consiste basicamente na secagem da amostra e aplicação de vácuo, garantindo a remoção de vapores e gases presentes na amostra antes de se injetar o mercúrio. Após a preparação da amostra, esta é levada à câmara onde será injetado mercúrio sob pressão crescente, monitorando-se os volumes intrudidos correspondentes às pressões aplicadas (SATO, 1998).

O diâmetro de poro a cada passo de pressão aplicada é calculado pela equação de Washburn:

$$d = \frac{-4 \cdot g \cdot \cos(\theta')}{P} \quad (\text{Equação 2.1})$$

Sendo:

d = diâmetro de poro cilíndrico

g = tensão superficial do mercúrio (485×10^{-3} N/m)

θ' = ângulo de contato entre o mercúrio e a parede do poro;

P = pressão aplicada (Pa)

A principal crítica feita a esta técnica refere-se com base na forma dos poros, pois todos são considerados cilíndricos, a acessibilidade dos poros e a possível quebra das paredes do poro, por causa das altas pressões aplicadas ao mercúrio. Entretanto, o conhecimento do diâmetro crítico e do volume de poros penetráveis, através da porosimetria por intrusão de mercúrio, pode constituir um índice comparativo útil das pastas de cimento ou poros de concreto e, podem ser determinados sem referência de nenhuma distribuição de tamanho calculada (DIAMOND, 2000). Comparativamente é possível modelar vários comportamentos quanto aos estudos de durabilidade.

2.4.2 – Porosimetria por Dessorção de Vapor de Água

A porosidade é determinada a partir de isotermas de dessorção de água. A partir de modelos de adsorção física e condensação capilar, é estimada a distribuição de volume de poros, em

função da massa de água adsorvida (SATO, 1998). O método se aplica para a medição de poros na faixa de 0,0015 a 10 μm , sendo mais adequado para a faixa de 0,0015 a 0,1 μm .

A técnica consiste na colocação de amostra, previamente saturadas, em ambiente com solução saturada de LiCl, MgCl₂, K₂CO₃, NaBr, NaCl, KCl, KNO₃, K₂SO₄ e água destilada até estabilização de massa. A pressão de vapor de água obtida, deste modo, provém da umidade relativa por volta de 11%, 33%, 43%, 59%, 75%, 86%, 94%, 98%, 100%, respectivamente. Um equilíbrio de massa preciso nunca será alcançado porque mudanças estruturais podem ocorrer na exposição prolongada sob vários ambientes (KJELLEN, 1999).

Isotermas de dessorção de vapor d'água nos dá informação sobre o raio do poro (abertura) através do qual a água do poro pode evacuar por secagem. A relação entre a abertura do poro que está vazio (seco) a uma certa umidade relativa é dada pela equação de Kelvin, descrita no item 3.4.1.

2.4.3 – Análise de Imagens de Microscopia Eletrônica

A microscopia eletrônica de varredura é geralmente utilizada para observação e análise da superfície de amostras espessas não transparentes a elétrons e, sua aplicação aos materiais à base de cimento é ainda recente. Sua utilização está associada à alta resolução que pode ser atingida, da ordem de 3 nm, e a grande profundidade de foco, da ordem de 300 vezes melhor que a do microscópio ótico.

A técnica consiste na obtenção de imagens de amostras com o microscópio eletrônico de varredura e na posterior digitalização, binarização e tratamento destas imagens. Baseia-se no fato de que, em imagens obtidas com microscópio eletrônico de varredura por elétrons retroespalhados, as fases de maior número atômico, presentes na amostra, apresentam-se com brilho, enquanto que os poros ficam negros (SATO, 1998).

2.4.4 - Difusão em Pequenos Ângulos de Nêutrons

A difusão em pequenos ângulos de nêutrons baseia-se no fato de que, a fase líquida ou gasosa contida dentro do espaço poroso dos materiais tem uma densidade eletrônica diferente da fase

sólida, fazendo com que um feixe de raios X ou de nêutrons incidente sofra difração e permita a identificação das diferentes fases presentes na amostra.

CAPÍTULO 3

MECANISMOS DE TRANSPORTE E FIXAÇÃO DE ÁGUA NO CONCRETO

3.1 - INTRODUÇÃO

A durabilidade das estruturas de concreto armado está relacionada com os mecanismos de transporte de líquidos e gases no concreto. Na maioria das vezes, a difusão e a permeabilidade são os mecanismos responsáveis pelo transporte de água, gases e outras substâncias deletérias do meio ambiente até a superfície das armaduras no interior do concreto (FERREIRA et al., 1999).

A figura 3.1 apresenta um modelo simplificado dos principais mecanismos envolvidos nas trocas de umidade de um poro com o exterior, quando exposto ao intemperismo natural e artificial: (ANDRADE et al, 1999).

- Processo I – evaporação e condensação;
- Processo II – difusão de vapor de água através dos espaços vazios (ar) ou difusão da fase líquida através das paredes dos poros;
- Processo III – trocas com o exterior através da absorção/dessorção de água líquida ou vapor de água.

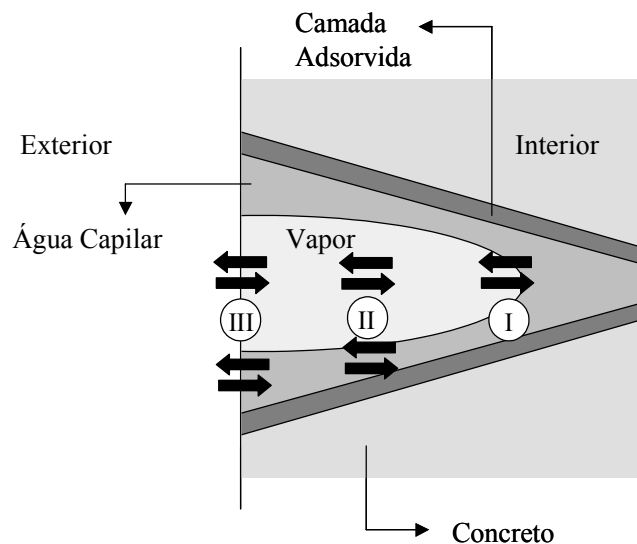


Figura 3.1 – Representação esquemática de um poro sob processo de transporte de umidade (ANDRADE et al. 1999)

Existem dois mecanismos de transporte de água em meios porosos. Quando o teor de umidade é muito baixo, não existindo continuidade do líquido no seu interior; a umidade, em forma de vapor de água, se transfere devido a gradientes de pressão de vapor existentes nos poros. Nesta situação, a água se move, também, devido a gradientes de temperatura, sendo o fluxo de calor e umidade interdependentes. Com o aumento do teor de umidade do material, passa a existir a continuidade de líquido no interior dos poros e a transferência de umidade passa a ser, predominantemente, em decorrência da ação de forças capilares, agindo sobre a água no estado líquido. Neste caso, a transferência de umidade se processa segundo as equações governantes do fluxo de água em meio poroso não saturado (HALL, 1977).

O transporte de massa, em materiais de construção, ocorre com mais frequência quando expostos à água no estado líquido segundo três condições, a saber (HALL, 1989):

- Fluxo de massa horizontal, com o transporte de água independente da ação da gravidade;
- Fluxo de massa vertical, com o transporte de água total resultante da adição das forças gravitacional e capilar;
- Fluxo de massa vertical, com o transporte total resultante da ação das forças gravitacional e capilar, porém, com os efeitos da absorção capilar e da gravidade em sentidos opostos.

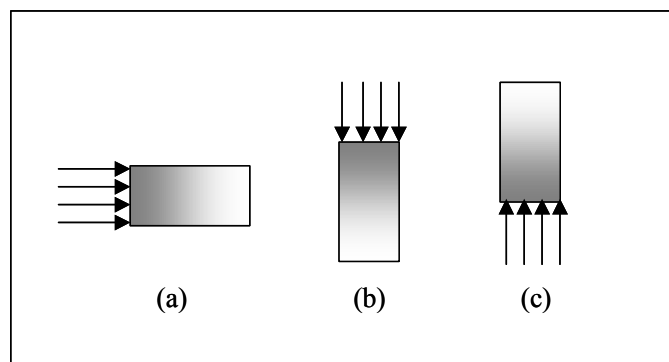


Figura 3.2 – Transporte de água unidirecional em uma amostra de material poroso, conforme as condições (a), (b) e (c) definidas anteriormente. (HALL, 1989).

Para a grande maioria dos materiais de construção, nas suas condições usuais de aplicação, a influência da força gravitacional nas taxas de umidade transportada é pequena, não se observando então diferenças significativas na absorção de água medida nas situações (a), (b) ou (c) (HALL, 1994). Desta maneira, as modelagens dos fenômenos de transporte são feitas, em geral, desprezando-se a gravidade (SATO, 1998).

Em se tratando de corrosão de armaduras, o estudo da movimentação de água na zona de cobrimento é de fundamental importância. CHRISP et al. (2001) estudando a condutividade elétrica do concreto, por meio da utilização de pares de eletrodos posicionados na região de cobrimento das armaduras, em ciclos de umedecimento até saturação e secagem natural (em temperatura e umidade relativa ambiente), concluíram que o limite definido pelo ponto onde, o perfil de condutividade antes e após secagem é coincidente, é considerado como a região mais influenciada pela ação de umedecimento e secagem. Tal região é denominada zona convectiva e representa a porção da região do cobrimento que não contribui na proteção da armadura, ou seja, uma vez que ocorre umidificação e secagem os fenômenos associados à corrosão são mais intensos nesta região. A figura 3.3 ilustra esquematicamente a definição de zona convectiva.

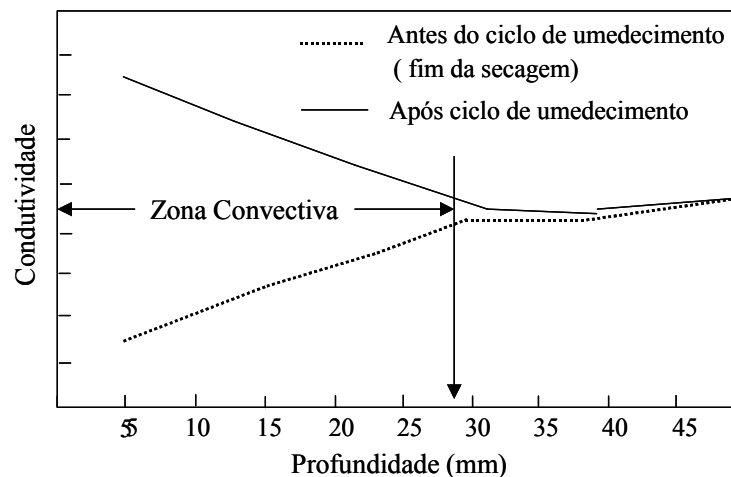


Figura 3.3 – Representação esquemática mostrando a definição da zona convectiva a partir dos perfis de umidade (CHRISP et al 2001)

3.2 - PERMEABILIDADE

A permeabilidade é definida como a propriedade na qual um fluido passa através de uma amostra por ação de pressão diferencial. A permeabilidade, bem como, a resistência e a retração são diretamente influenciadas e controladas pelo número, tipo, tamanho e distribuição dos poros presentes na pasta de cimento, o agregado componente e a interface entre a pasta de cimento e o agregado. Por exemplo, resistência e elasticidade do concreto são afetadas pelo volume total de poros, enquanto a permeabilidade é influenciada pela distribuição do tamanho de poros e a continuidade (BASHEER, 2001).

Teoricamente, a permeabilidade do material deve ser uma propriedade do material, não dependendo do tipo de percolação do fluido ou do tipo de amostra. Entretanto, a microestrutura do concreto muda com o desenvolvimento da hidratação. Além do mais, o concreto é um material trifásico, na qual a fase gasosa nunca pode ser totalmente removida. Se por outro lado, é feita a remoção da fase líquida, ocorrerão microfissuras e assim grandes mudanças na microestrutura sólida, afetando conseqüentemente os fenômenos de transporte. Assim é impossível definir, ou medir, um único índice que descreva a permeabilidade do concreto (DE LARRARD, 1999).

A primeira grande contribuição para o estudo do transporte de água em meios porosos foi dada por Henry Darcy que, em 1856 formulou a sua equação, utilizada até hoje, para

caracterizar os materiais quanto ao transporte de água líquida em meios saturados. Esta equação foi estendida, em 1931, pelo pesquisador L.A.A. Richards, para descrever os casos de transporte em meios não saturados (SATO, 1998).

3.2.1. – Lei de Darcy

A resistência ao fluxo oferecida pelo espaço no poro do material é descrita pela lei de Darcy. Henry Darcy, em 1856, formulou uma lei para o movimento de água no solo como resultado de ensaios sobre a infiltração de água verticalmente através de camadas de filtro de areia. O princípio desta lei é basicamente o seguinte:

Sendo Q a vazão através de uma seção transversal A , tem-se:

$$Q = \frac{V}{t} \propto \frac{A \cdot \Delta H}{L} \quad (\text{Equação 3.1})$$

Onde:

ΔH = variação da altura hidráulica

L = comprimento da coluna

$\frac{\Delta H}{L}$ = gradiente hidráulico ou força direcional

$\frac{Q}{A}$ = volume de água fluindo através de uma área transversal A no tempo t , representando a velocidade de escoamento u .

Tem-se, portanto:

$$u = \frac{Q}{A} \propto \frac{\Delta H}{L} \quad (\text{Equação 3.2})$$

Substituindo o sinal de proporcionalidade por um coeficiente de proporcionalidade K , o qual chama-se condutividade hidráulica^{3.1}, tem-se:

^{3.1} A condutividade hidráulica representa a facilidade com que a água é transportada através da matriz porosa. Depende de atributos do meio e do líquido. Quanto ao meio o volume total de poros, sua distribuição e conectividade, com relação ao líquido, sua densidade e viscosidade.

$$u = K \frac{\Delta H}{L} \quad (\text{Equação 3.3})$$

A Equação 3.3, nada mais é que, a equação de Darcy expressa em termos de velocidade de escoamento.

Um certo grau de generalização precisa ser introduzido nesta lei antes que ela possa ser aplicada para outras condições além daquela que foi estudada por Darcy. Um enunciado mais geral da lei de Darcy para materiais anisotrópicos porosos, ou seja, materiais que não tem qualquer direção preferencial de fluxo em função de sua estrutura e na qual, no entanto, o fluxo está na direção do gradiente de potencial é (HALL, 1994):

$$u = -K \nabla H \quad (\text{Equação 3.4})$$

O sinal negativo indica que a direção do fluxo é contrária ao potencial e vai da direção de maior potencial para a região de menor potencial. K é a condutividade hidráulica^{3.1}, e u é o vetor velocidade do fluxo de água.

Richards, em 1931, assumiu que a lei de Darcy pode ser aplicada ao fluxo de água em meio não saturado, numa forma modificada, na qual K é uma função da concentração volumétrica de água θ :

$$u = -K(\theta) \nabla H \quad (\text{Equação 3.5})$$

3.2.2. – Concentração de Água

A concentração de água em materiais porosos é definida, comumente, pela pesagem da amostra molhada e seca de material, sendo a concentração normalmente expressa como uma fração da massa de material seco. Se a massa inicial da amostra, m , é conhecida e a amostra é pesada no estado seco, m_d , a concentração de água da amostra, expressa com base no seu peso, θ_w , é:

$$\theta_w = \frac{m - md}{md} \quad (\text{Equação 3.6})$$

Alternativamente, a concentração de água pode ser definida como a proporção do volume de água contido, pelo volume da amostra de material ensaiado. Desta forma, a concentração de água, em volume, da amostra θ é:

$$\theta = \frac{\theta_w \cdot \rho_d}{\rho} \quad (\text{Equação 3.7})$$

Onde: ρ_d = densidade do material no estado seco

Freqüentemente, se defini uma concentração de água adimensional, denominada de concentração de água normalizada, θ_r :

$$\theta_r = \frac{\theta - \theta_0}{\theta_1 - \theta_0} \quad (\text{Equação 3.8})$$

Onde θ_0 e θ_1 são as concentrações de água máxima e mínima alcançadas e $0 \leq \theta_r \leq 1$. Usualmente θ_0 é a concentração de água no estado seco e θ_1 a concentração de água na saturação.

3.3 – ABSORÇÃO CAPILAR

A absorção capilar, também chamada sucção capilar, pode ser definida como o transporte devido à tensão superficial atuante nos poros do concreto. Este fenômeno é dependente, dentre outros fatores, das características do líquido tais como, viscosidade, densidade e tensão superficial, e das características do sólido poroso como o raio, tortuosidade e a continuidade dos poros, além da energia superficial.

Quando em um capilar, a pressão de vapor sobre o líquido é menor que a de saturação, se produz a evaporação de moléculas deste. Quando se está a 100% de umidade relativa, a superfície da água no capilar é plana e não se produz evaporação. Ao diminuir a pressão de

vapor, começa a evaporação e a formação do menisco com um raio de menisco, nunca inferior ao raio do poro. Na pasta de cimento, primeiramente, esvaziam-se (secam) os poros grandes (poros capilares) e logo os poros pequenos (poros de gel).

A pressão junto ao menisco é menor, por aproximadamente $2\gamma/r$, que a pressão atmosférica. Esta diferença se deve a superfície curva do líquido no interior do poro. A pressão sob a superfície plana do líquido fora do poro é p , a pressão atmosférica, mas no interior do poro, sob a superfície curva, é apenas $p - 2\gamma/r$. A pressão externa impulsiona o líquido para cima do poro, até que o equilíbrio da pressão hidrostática seja atingido (ATKINS, 1997).

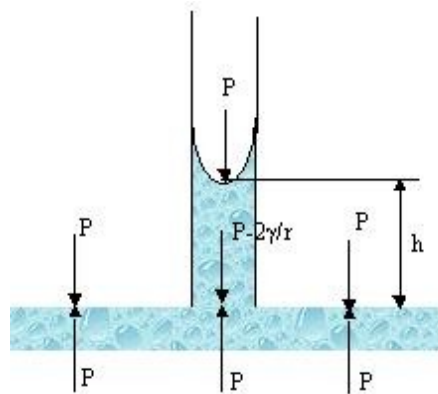


Figura 3.4 – Representação de um poro sob absorção capilar (ATKINS, 1997).

A pressão de uma coluna vertical de líquido com densidade ρ e a altura h é:

$$p = \rho \cdot g \cdot h \quad (\text{Equação 3.9})$$

Esta pressão hidrostática equilibra a diferença de pressões $2\gamma/r$. Então, a altura da coluna em equilíbrio se obtém pela igualdade entre $2\gamma/r$ e $\rho \cdot g \cdot h$, o que nos dá:

$$h = \frac{2\gamma}{\rho \cdot g \cdot r} \quad (\text{Equação 3.10})$$

Onde:

h = altura de sucção (m);

γ = tensão superficial do líquido (N/m);

ρ = densidade do líquido (kg/m³)

g = aceleração da gravidade (m/s²)

r = raio do poro capilar (m)

2γ = diferença entre a pressão atmosférica e a pressão junto ao menisco

r

Como descrito na introdução do capítulo 3, as modelagens dos fenômenos de transporte são feitas em geral desprezando-se a gravidade, isto, devido à grande maioria dos materiais de construção, nas suas condições usuais de aplicação, não terem grande influência da força gravitacional nas taxas de umidade transportada. Portanto, tem-se:

$$h = \frac{2\gamma}{\rho \cdot r} \quad (\text{Equação 3.11})$$

A microestrutura porosa tem influência determinante na absorção capilar, quer seja no volume de água absorvido, na velocidade de absorção, como também na altura de sucção. Em princípio, quanto menor for o diâmetro dos capilares, maiores as pressões capilares e consequentemente, maior e mais rápida a absorção de água. Por outro lado, com poros maiores, temos altura de sucção menor, porém volumes absorvidos maiores. HELENE (1993), coloca que concretos de reduzida relação água/cimento apresentam capilares de menores diâmetros, ao mesmo tempo em que estes são muito menos intercomunicáveis, resultando menores alturas de sucção e menores volumes absorvidos.

A teoria do fluxo em poros não saturados, descrita no item 3.4, modela o fenômeno da absorção capilar, relacionando o aumento de massa ou, o volume de água absorvido por unidade de área, em função da raiz quadrada do tempo. Neste caso, a constante de proporcionalidade determinada na relação dada pela inclinação do trecho indicado, é conhecida como absortividade (a) e, caracteriza a tendência de um material poroso em absorver e transmitir água por capilaridade (HALL, 1989).

A evolução da absorção capilar durante execução do ensaio pode ser observada na figura 3.5 (BAUER et al., 2001). Inicialmente observa-se uma relação próxima da linearidade entre a absorção capilar e a raiz quadrada do tempo. Nesta região, pode-se calcular a declividade da reta obtendo-se o parâmetro absortividade. A absortividade tem o significado de ser uma

grandeza que avalia indiretamente a velocidade do fluxo de água para o interior da microestrutura nos instantes iniciais (linearidade).

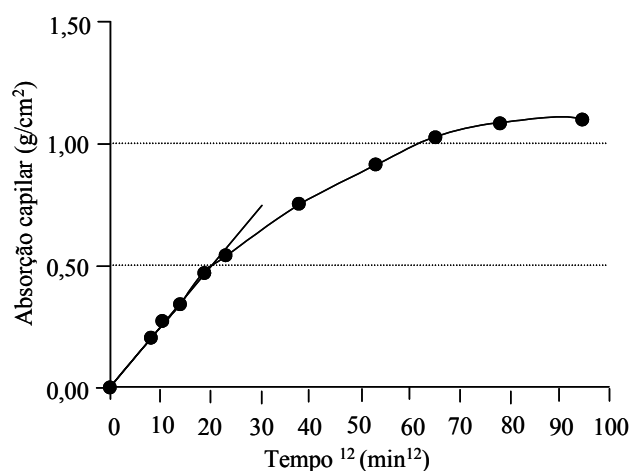


Figura 3.5 – Evolução da absorção capilar durante ensaio (BAUER et al., 2001).

3.4 – ADSORÇÃO

A adsorção consiste na concentração de uma substância na interface de duas fases. A interface pode ser entre um sólido e um líquido, um sólido e um gás, um líquido e um líquido, ou entre um gás e um líquido. A substância em cuja superfície ocorre a adsorção é o adsorvente, e a que é adsorvida é o adsorvato (CROCKFORD e KNIGHT, 1977). Existem dois tipos principais de adsorção: a física, também chamada fisissorção, e a química, muitas vezes denominada quimissorção.

Na adsorção física, as moléculas adsorvidas matêm-se fixas à superfície do adsorvente por intermédio, principalmente, das forças de van der Waals. A adsorção física é caracterizada por um calor de adsorção, relativamente, baixo devido às fracas forças de ligação, sendo uma reação exotérmica, isso significa que a adsorção ocorre com diminuição de energia. Para que ocorra dessorção têm-se que fornecer energia ao sistema. Por este mecanismo, pode-se entender o fato do concreto umidificar muito mais rapidamente do que secar.

A energia liberada quando uma partícula é adsorvida fisicamente é da mesma ordem de grandeza que a entalpia de condensação. A camada adsorvida tem, usualmente, espessura maior que um diâmetro molecular, sendo constituída por várias camadas moleculares. Esta

adsorção é, geralmente, reversível, isto é, diminuindo a pressão, o gás adsorvido é dessorvido ao longo da mesma curva de adsorção.

A adsorção química se deve a forças de ligação devidas a uma reação entre as moléculas ou íons adsorvidos e as moléculas ou íons superficiais do adsorvente. Diferentemente da adsorção física, ocorre completa saturação da superfície por uma camada monomolecular, porém podemos observar a formação de outras capas sobre esta por adsorção física. O calor de adsorção na adsorção química é muito maior que o envolvido na adsorção física

Um mesmo sistema pode exibir adsorção física numa temperatura e adsorção química numa outra mais elevada (MOORE, 1976). Outro dado importante é que a velocidade da adsorção física é consideravelmente maior que a da adsorção química. Isto pode ser explicado, em sua maior parte, porque a adsorção física não requer energia de ativação enquanto a adsorção química necessita.

A adsorção tem influência determinante no mecanismo de absorção capilar, pois esta ocorre devido à adsorção do líquido nas paredes do capilar, com formação do menisco, sendo que a pressão junto ao menisco é menor que a pressão atmosférica, fazendo com que a pressão externa impulsione o líquido para cima do capilar, até que o equilíbrio seja atingido. Substâncias hidrofugantes impedem o mecanismo de adsorção nas paredes do capilar, não havendo assim a formação do menisco e conseqüentemente impedindo o processo de absorção capilar.

3.4.1. – Adsorção de vapor de água no concreto

O fenômeno da adsorção do vapor de água pela superfície dos poros é decorrente das interações físicas entre as moléculas de gás e a superfície sólida, e acontece até que se estabeleça o equilíbrio termodinâmico entre o meio gasoso e a camada adsorvida.

Como a razão entre a área superficial e o volume dos poros aumenta com a diminuição do raio do poro, a quantidade de vapor de água adsorvido em relação ao volume aumenta, até que a umidade relativa local atinge valores elevados e o poro é completamente preenchido com água. Este processo é denominado de condensação capilar e, o raio crítico de poros abaixo do

qual ocorrerá condensação de vapor de água, a uma certa umidade relativa e temperatura ambiente, é dado pela lei de Kelvin-Laplace (SATO, 1998):

$$rc = \frac{-2.M.\sigma.\cos\beta}{\rho.R.T.\ln(UR)} \quad (\text{Equação 3.12})$$

Onde:

rc = raio crítico		m
M = massa molecular da água	$\cong 18,0148 \times 10^{-3}$	Kg/mol
σ = tensão superficial da água	$= 727,5 \times 10^{-4}$	N/m
β = ângulo de contato entre a água e a superfície do poro	$= 20^\circ \cong 0,349$	rad
ρ = densidade da água	$= 1000$	Kg/m ³
R = constante universal dos gases	$= 8,31451$	J/K.mol
T = temperatura		K
UR = umidade relativa		$0 < UR < 1$

Com base nos resultados obtidos a partir da lei de Kelvin-Laplace, pode-se observar que, devido às pequenas dimensões dos vazios interlamelares do C-S-H (de 0,5 a 2,5 nm), neles o vapor de água é condensável mesmo em umidades relativas não muito elevadas. Assim o concreto apresenta uma certa quantidade de umidade mesmo quando exposto a ambientes relativamente secos, em decorrência da umidade adsorvida e condensada nos vazios interlamelares e da umidade apenas adsorvida nos poros maiores. Assim, os concretos com uma fração grande de poros menores são mais hidrófilos, ou seja, quando em contato com o ar úmido, retém uma quantidade maior de água líquida que os materiais de poros maiores.

A equação de Kelvin-Laplace é utilizada para caracterização da estrutura de poros através da porosimetria por dessorção.

3.5 – TRANSPORTE DE ÁGUA PELA TEORIA DE POROS NÃO SATURADOS

O estudo do transporte de água em meio poroso não saturado tem sido realizado pela combinação da equação da continuidade, na forma diferencial, para a umidade, e a lei de

Darcy modificada. A extensão da lei de Darcy para meio poroso não saturado, a qual foi descrita no item 3.1.1, é:

$$u = -K(\theta)\nabla H \quad (\text{Equação 3.13})$$

E a equação da continuidade é dada por:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\nabla u \quad (\text{Equação 3.14})$$

Pela combinação da equação de Darcy com a equação da continuidade tem-se a equação diferencial básica para o fluxo em meio poroso não saturado:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla u = \nabla(K(\theta)\nabla H) \quad (\text{Equação 3.15})$$

Sendo $K(\theta)$ a condutividade hidráulica dependente da concentração de água.

A teoria de fluxo não saturado provê suporte teórico para a lei $t^{1/2}$ de absorção e penetração de água, que reza que a quantidade de massa absorvida por capilaridade varia linearmente em função da raiz quadrada do tempo.

$$\frac{\Delta m}{A} = a \cdot t^{1/2} \quad (\text{Equação 3.16})$$

Onde:

Δm = medida de massa ganha no tempo t ;

A = área da face de entrada do fluxo (seção transversal);

a = constante característica do material (absortividade).

CAPÍTULO 4

CORROSÃO DE ARMADURAS

4.1 - INTRODUÇÃO

A deterioração do concreto devido à corrosão de armaduras, a muito tempo, tem despertado a atenção como uma das principais manifestações patológicas, em função dos prejuízos por ela causados. As estatísticas mostram que, a corrosão das armaduras do concreto é um dos principais problemas com respeito à durabilidade das estruturas de concreto armado. Na região centro-oeste do Brasil, a incidência da corrosão de armadura em estruturas de concreto armado que apresentaram patologias, é da ordem de 30,1%, associada a um ou mais eventos: cobrimento deficiente, fissuras, infiltrações, presença contínua de umidade, meio ambiente

agressivo e falta ou deficiência de manutenção. Apresentando o 2º maior índice^{4.1}, é uma das manifestações patológicas que causa mais prejuízos as edificações, pois, no processo de desenvolvimento estão, em geral, envolvidas diversas outras manifestações patológicas (NINCE, 1996). Torna-se claro, a preocupação atual sobre a durabilidade das estruturas de concreto, particularmente no caso da corrosão de armaduras.

As estruturas de concreto armado devem ser projetadas, construídas e utilizadas, de modo que, sob as condições ambientais previstas e respeitadas as condições de manutenção preventiva, especificadas no projeto, conservem sua segurança, estabilidade, aptidão em serviço e aparência aceitável, durante um período pré-fixado de tempo sem exigir medidas extras de manutenção e reparo. Assim, entende-se por vida útil o período de tempo no qual a estrutura é capaz de desempenhar as funções para as quais foi projetada, sem necessidade de intervenções não previstas, ou seja, as operações de manutenção previstas e especificadas ainda na fase de projeto, fazem parte do período total de tempo, durante o qual se admite que a estrutura está cumprindo bem sua função (CEB/FIP Model Code 1990). O Projeto de Revisão da NBR 6118 pressupõe uma vida útil de no mínimo 50 anos para as estruturas de concreto armado.

O modelo clássico de vida útil das armaduras das estruturas de concreto foi proposto por TUUTTI em 1982, o qual, divide a vida útil da armadura em duas fases distintas: a fase de iniciação e fase de propagação.

A fase de iniciação corresponde ao período de tempo onde os agentes agressivos atuam na despassivação da armadura pelos mecanismos clássicos de carbonatação e cloretos. A fase de propagação inicia-se após a despassivação da armadura, e, o processo de corrosão evolui em taxas que dependem do teor de umidade, da resistividade, da temperatura, dentre outros fatores.

^{4.1.} No levantamento realizado, a manifestação de dano predominante foi à ocorrência de fissuras (60,2%)

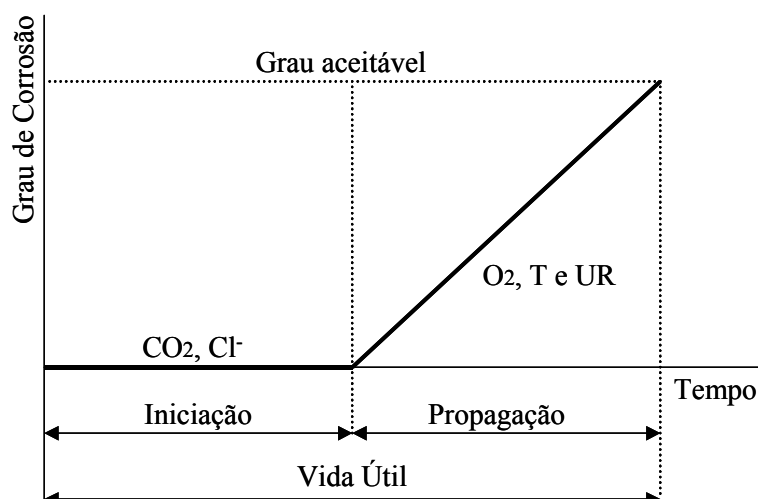


Figura 4.1 – Representação esquemática do modelo de vida útil proposto por TUUTTI, 1982.

4.2 – PRINCÍPIOS ELETROQUÍMICOS

A corrosão de armaduras do concreto é um processo eletroquímico caracterizado pela formação de uma célula de corrosão, a qual é formada por zona anódica e catódica na superfície do metal, sendo que o processo de transferência de elétrons ocorre através do metal, e o transporte de íons através da solução. Nas regiões anódicas ocorrem as reações de dissolução do metal, ou seja, o mesmo passa para a solução em forma de íon positivos, sendo que os elétrons gerados na reação são conduzidos pelo metal até as zona catódicas. Nestas regiões ocorrem as reações de redução do hidrogênio e oxigênio dissolvidos, consumindo-se os elétrons. A Figura 4.2 mostra a representação esquemática da corrosão da armadura no concreto.

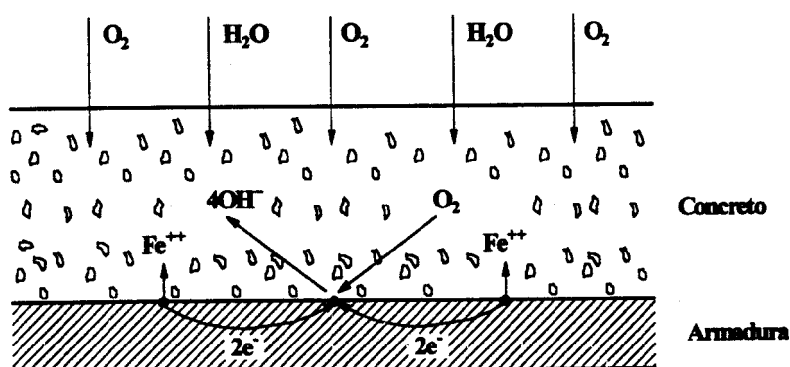


Figura 4.2 - Representação gráfica da corrosão da armadura no concreto.

A reação anódica mais provável para o caso de corrosão de armaduras é equação 4.1. Como reações catódicas possíveis temos para o caso de meios aerados de pH neutros e básicos ($\text{pH} > 7$), equação 4.2, e para meios ácidos ($\text{pH} < 7$) e desaerados a equação 4.3.



4.3 – CONSIDERAÇÕES TERMODINÂMICAS DA CORROSÃO DE ARMADURAS

Uma das qualidades químicas mais importantes da pasta de cimento endurecida é seu caráter fortemente básico, com pH entre 12 e 13. Entretanto, o meio ambiente que a circunda tende a diminuir seu pH mediante reações de neutralização, sendo que, dentre elas se encontra a carbonatação do concreto. O elevado pH da fase aquosa é proporcionado pela sua reserva alcalina, definida como o teor de hidróxidos presentes na microestrutura capaz de entrar em solução na fase aquosa presente nos poros.

Devido à elevada alcalinidade da solução aquosa do concreto, forma-se uma película passivante, supostamente de Fe_2O_3 e Fe_3O_4 sobre a superfície da armadura, que lhe confere proteção do fenômeno da corrosão, e é a chamada proteção química.

O diagrama de POURBAIX (GENTIL, 1987) relaciona pH e potencial, identificando regiões de corrosão, imunidade e passividade, conforme figura 4.3. O potencial eletroquímico de um metal tem relação com a carga elétrica que o metal alcança, em função do equilíbrio entre a tendência à ionização e a tendência à deposição. Por convenção, consideram-se valores negativos de potencial quando a tendência à oxidação é maior do que a correspondente a do hidrogênio, e valores positivos quando a tendência à redução é maior do que as dos íons hidrogênio (ANDRADE e FELIU, 1991).

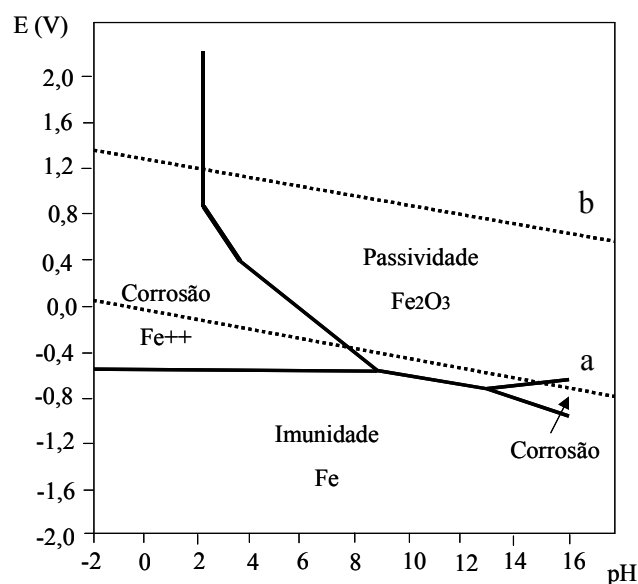


Figura 4.3 - Diagrama de POURBAIX: equilíbrio pH - Potencial para o ferro em água a 25°C (GENTIL, 1987).

A região de imunidade corresponde à região onde a corrosão é termodinamicamente desfavorável, ou seja, o metal é estável. A região de passivação corresponde a uma região onde óxidos ou hidróxidos do metal são as fases estáveis. Na região de corrosão têm-se as combinações de pH e potencial que indicam que os íons de metal ou íons complexos são as fases estáveis. As linhas tracejadas (a e b) delimitam a zona onde a água é termodinamicamente estável. Abaixo da linha (a) ocorre redução do hidrogênio, enquanto que acima da linha (b) tem-se a evolução de oxigênio (GENTIL, 1987).

4.4 – TÉCNICAS ELETROQUÍMICAS PARA AVALIAÇÃO DA CORROSÃO

As técnicas eletroquímicas para o estudo da corrosão são muito atrativas, pois buscam interpretar as variáveis intervenientes no processo eletroquímico no momento em que se desenvolve o fenômeno, além de necessitar de um número menor de amostras, já que algumas delas não são técnicas destrutivas (NEPOMUCENO, 1992).

As técnicas eletroquímicas, freqüentemente, aplicadas no estudo da corrosão de armaduras são:

- Curvas de polarização: dão informação sobre a intensidade de corrosão, bem como sobre a morfologia do processo de corrosão. Considerada técnica destrutiva.

- Resistência de polarização
- Medidas de intensidade galvânica
- Medidas de impedância: empregada também no cálculo da velocidade de corrosão, como a técnica de resistência de polarização, porém utilizando a corrente alternada.
- Registro do potencial de corrosão: técnica não destrutiva e de fácil aplicação, porém, fornece apenas informações sobre a termodinâmica do processo de corrosão.
- Medidas de resistividade: apresenta comportamento diferente dependendo do tipo de agressivo, havendo uma boa correlação entre seu valor e a velocidade de corrosão para o caso de carbonatação, o mesmo não ocorrendo quando se trata de íon cloreto como agente agressivo (NEPOMUCENO, 1992).

Será dada ênfase as técnicas de resistência de polarização e medidas por intensidade galvânica, uma vez que são utilizadas nesta pesquisa.

4.4.1. – Resistência de Polarização

A resistência de polarização (R_p) representa a inércia que um sistema possui em desenvolver um processo eletroquímico de corrosão, isto é, um processo de transferência de carga elétrica no metal, ante uma polarização imposta. Sendo assim, quanto maior for a R_p , menos intensas serão as velocidades de corrosão encontradas.

O princípio básico para determinação da R_p , consiste na aplicação de uma pequena polarização ($\pm 10\text{mV}$) em torno do potencial de corrosão livre do metal em análise (E_{corr}). O objetivo de se adotar uma pequena polarização é para se garantir que, após a aplicação do potencial, quando da determinação da R_p , o potencial do eletrodo em análise (armadura) retorne ao seu valor inicial, qual seja E_{corr} . A partir daí, registram-se os incrementos de corrente (Δi) oriundos da polarização imposta. Dessa forma, o valor de R_p é definido como o quociente entre os incrementos de potencial e corrente (equação 4.4):

$$R_p = \frac{\Delta E}{\Delta i} \quad (\text{Equação 4.4})$$

Após a determinação experimental de R_p , utiliza-se a equação de Stern-Geary (equação 4.5) para a determinação da intensidade de corrosão.

$$i_{corr} = \frac{B}{R_p.S} \quad (\text{Equação 4.5})$$

Sendo:

i_{corr} = intensidade de corrosão ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$);

B = constante de Stern-Geary, dependente das contribuições anódicas e catódicas;

R_p = resistência de polarização (ohm);

S = superfície exposta do metal (cm^2).

A constante de Stern-Geary pode ser determinada experimentalmente, ou podem ser retiradas da literatura para o sistema em questão (aço/concreto). A obtenção experimental é feita através de métodos eletroquímicos independentes, como, por exemplo, pelo método das curvas de Tafel. A equação 4.6 apresenta a fórmula para determinação da constante de Stern-Geary:

$$B = \frac{ba.bc}{2,3(ba + bc)} \quad (\text{Equação 4.6})$$

Os valores de B , na corrosão das armaduras no concreto, não variam muito de pesquisador para pesquisador. ANDRADE (1988) e GONZALEZ et al (1985) especificam $B=52\text{mV}$, para armaduras no estado passivo, e valores de $B=26\text{mV}$, para armaduras em estado ativo de corrosão. Os pesquisadores referenciados têm obtido uma concordância muito aceitável entre as perdas de massa obtidas gravimetricamente e as obtidas eletroquimicamente, utilizando os comentados valores para B .

Cabe ressaltar, a importância em compensar a queda ôhmica do concreto, corrigindo os valores de R_p medidos. A queda ôhmica é uma queda de potencial provocada pela alta resistividade elétrica do concreto e, é função tanto da corrente quanto da forma geométrica e distância dos eletrodos.

A partir dos valores de i_{corr} obtidos, ao longo do tempo, pode-se determinar a intensidade de corrosão total (I_t) a partir da equação:

$$I_t = \int i_{corr}.dt \quad (\text{Equação 4.7})$$

Aplicando-se I_t na fórmula da lei de Faraday, equação 4.8, obtém-se o valor da perda de massa eletroquímica, podendo-se compará-la à perda de massa gravimétrica.

$$P_{elétr.} = 0,025 \int i_{corr}.dt \quad (\text{Equação 4.8})$$

4.4.2. – Intensidade Galvânica

A corrente que flui da zona anódica para a zona catódica é conhecida como corrente galvânica (I_{gal}). Considera-se zona anódica, a região da armadura onde ocorre corrosão, devido à presença de agentes agressivos como cloretos e CO_2 , e a região não corroída de zona catódica. A intensidade desta corrente é influenciada pelos potenciais do ânodo e do cátodo, pela resistividade entre eles e pela geometria da peça. É conhecida a grande influência da relação área anódica/catódica e a distância entre cátodo e ânodo nas medidas galvânicas (ANDRADE e ALONSO, 1996; ARYA e VASSIE, 1996 apud, FEIJÃO, 2000).

Quando uma peça de aço está corroída no concreto, ambas as áreas anódica e catódica desenvolvem-se simultaneamente, então, quando a peça corroída é ligada a uma completamente passiva, as áreas anódicas e catódicas são polarizadas para alcançarem um novo potencial de equilíbrio. No entanto, parte da peça corroída ainda contém cátodos, isto é, a atividade de microcélulas é mantida e, a corrente galvânica de macrocélula, passa a representar apenas uma parte da corrosão total. A corrente galvânica iguala-se a i_{corr} quando a parte corroída torna-se um ânodo puro, sem atividade de microcélula, o qual, pode acontecer no concreto, apenas, quando uma atmosfera livre de oxigênio existe ao redor da área corroída, ou quando a área corroída é comparativamente muito pequena (pites). Estas condições são muito peculiares o que leva a conclusão que provavelmente nunca teremos um ânodo puro. As medidas de intensidade galvânica são obtidas usando-se um amperímetro de resistência nula acoplado a um multímetro, onde a I_{gal} é lida diretamente em μA .

4.5 – CORROSÃO DE ARMADURAS DEVIDO A CARBONATAÇÃO DO CONCRETO

O concreto armado reúne dois materiais que se complementam do ponto de vista da resistência a esforços mecânicos: o concreto, devido a sua adequada resistência a compressão, e o aço, que é dimensionado de modo a resistir aos esforços de tração previstos para a estrutura. A interação entre os materiais constituintes do concreto também se dá a nível químico, devido à proteção conferida a armadura pela pasta hidratada.

A armadura, normalmente, se encontra protegida da corrosão devido à alta alcalinidade do concreto ($\text{pH} \geq 12,7$), sendo que isto favorece a formação de uma camada de óxido passivante (película passivadora), compacta e aderente sobre a superfície da armadura. A passivação aliada a um cobrimento adequado, proporciona ao concreto armado uma eficaz proteção contra corrosão.

A partir do momento em que o concreto é exposto ao meio ambiente, inicia-se um contínuo processo de degradação. Em geral, a degradação inicia-se na superfície dos elementos estruturais, assumindo proporções mais sérias à medida que o elemento agressivo penetra na estrutura. Dentre os principais agentes agressivos do concreto, se encontra o CO_2 , que através das reações de carbonatação, diminui o pH do concreto a valores inferiores a nove, despassivando a armadura.

O processo de carbonatação é relativamente lento e provoca uma série de alterações nas propriedades físico-químicas da pasta endurecida, alterando a sua estrutura (variando assim a resistência mecânica e química), originando retrações e reduzindo a porosidade (SANJUAN, 1992).

A partir da despassivação, a armadura torna-se susceptível a corrosão, dependendo da interação entre fatores, como a existência de oxigênio e umidade em quantidade suficiente para desencadear as reações de corrosão. O fator controlador da propagação da corrosão sob efeito de carbonatação é a resistividade, a qual por sua vez, depende do grau de umidade dos poros (umidade relativa), bem como da porosidade. A figura 4.4 evidencia a influência do grau de umidade dos poros na resistividade e, por conseguinte na intensidade de corrosão (NEPOMUCENO, 1992). A existência de controle por resistividade implica no fato da velocidade de corrosão ser restringida ou limitada pelo fluxo de íons entre regiões anódicas e catódicas (BAUER, 1995).

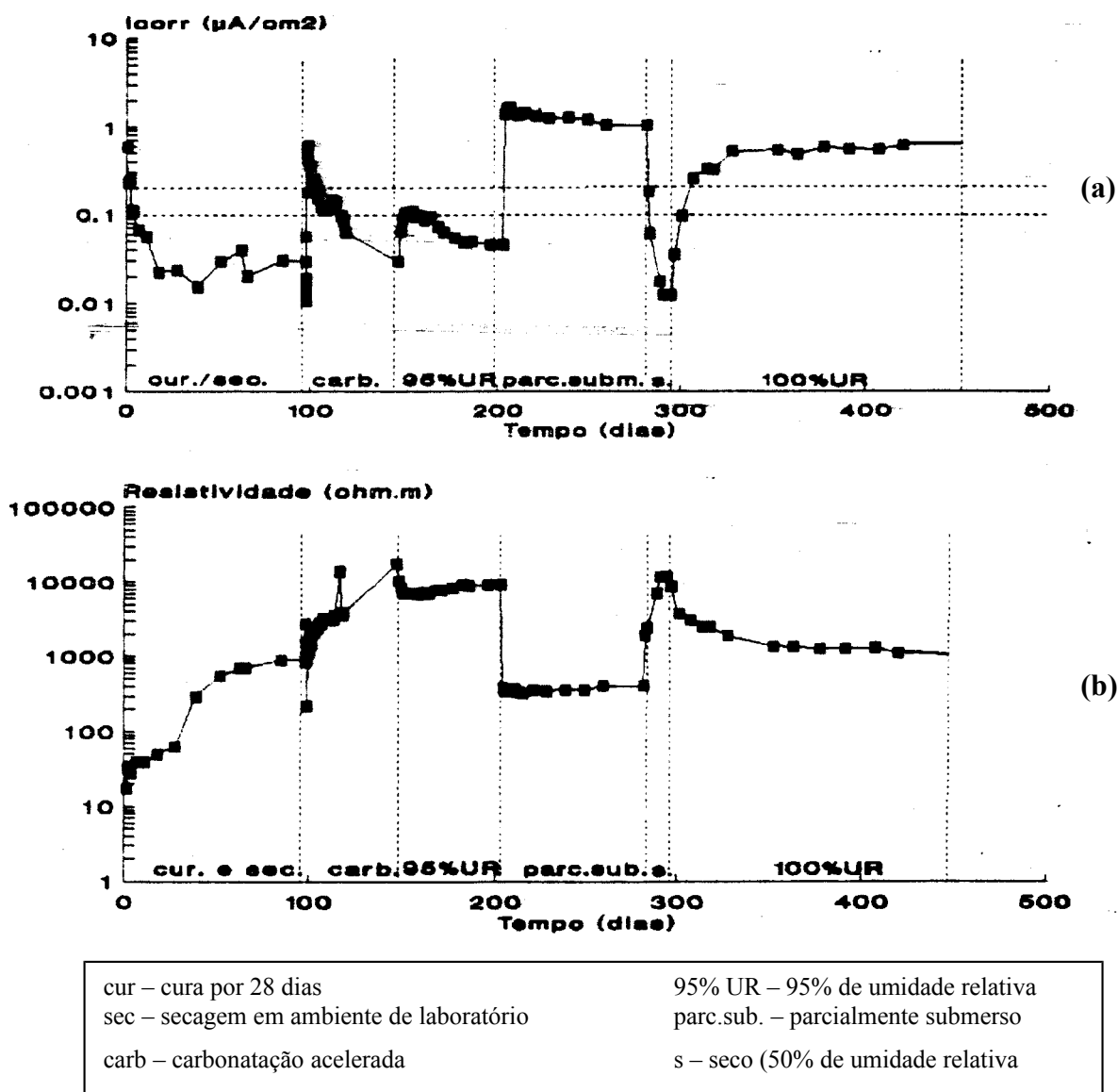


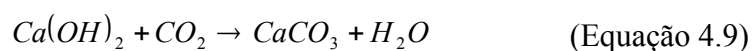
Figura 4.4 – Influência da umidade relativa na intensidade de corrosão (a) e na resistividade (b) em ensaio de carbonatação acelerada (NEPOMUCENO, 1992).

Estruturas carbonatadas, face principalmente as alterações na estrutura dos espaços porosos, têm um desempenho superior, no sentido de evitar ou, diminuir o acesso da água por absorção capilar, quando comparada com estruturas não carbonatadas. Esse aspecto se torna importante, uma vez que, o controle do mecanismo de corrosão induzida por carbonatação, é anódico-resistivo, ou seja, uma maior dificuldade de acesso da água leva a maiores resistividades, o que resulta em intensidades de corrosão menores (BAUER et al. 2001).

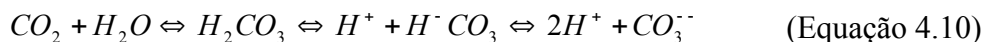
4.5.1 – Mecanismo de Carbonatação

A carbonatação do concreto dá-se a partir da penetração do CO₂ no concreto ocorrendo, normalmente, de forma difusa, avançando progressivamente para o interior e, ao atingir a armadura, gera sua despassivação. O ingresso de CO₂ ocorre por mecanismo de difusão, principalmente, pela diferença de concentração entre o ambiente externo e os poros do concreto.

O gás carbônico, ao penetrar pelos poros, reage com os compostos hidratados do cimento suscetíveis a carbonatação, como, hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂), hidróxido de sódio (NaOH) e o hidróxido de potássio (KOH), assim como os silicatos alcalinos, diminuindo o pH do concreto. A principal reação de carbonatação é resultante da reação entre o hidróxido de cálcio e o gás carbônico, conforme expresso a seguir:



Para que a reação de carbonatação se produza naturalmente, é necessário que, o anidrido carbônico seja solubilizado, esta solubilização ocorre devido à água adsorvida na parede dos poros, conforme apresentado na equação 4.10.



Reações semelhantes ocorrem com os outros álcalis do cimento (NaOH, KOH). Esses álcalis, normalmente, encontram-se dissolvidos na fase aquosa na forma de íons, sendo mais solúveis que o hidróxido de cálcio. Desse modo, são os primeiros compostos a serem carbonatados. A longo prazo, os silicatos e aluminatos também podem sofrer carbonatação (TUUTTI, 1982).

4.5.2.- Principais Fatores que Condicionam a Velocidade da Frente de Carbonatação

A tabela 4.1 relaciona os principais fatores determinantes na velocidade de penetração da frente de carbonatação:

Tabela 4.1 – Principais fatores que condicionam a velocidade de penetração da frente de carbonatação (KAZMIERCZAK, 1995)

	Fatores condicionantes	Características influenciadas
Condições de exposição	Concentração de CO ₂	- mecanismo físico-químico - velocidade de carbonatação
	Umidade relativa do ar	- grau de saturação de poros - velocidade de carbonatação
	Temperatura	- velocidade de carbonatação
Características do concreto	Composição química do cimento: - características do clínquer - teor de adições	- porosidade da pasta carbonatada - reserva alcalina
	Traço	- porosidade
	Qualidade da execução: - defeitos - cuidados com cura	- porosidade - grau de hidratação

4.5.2.1 – Concentração de CO₂

A concentração de CO₂ na atmosfera exerce grande influência na velocidade de carbonatação. A concentração em volume de CO₂ no ar, por exemplo, pode variar de 0,03% a 0,05% em atmosferas rurais e de 0,1% a 1,2% em ambientes urbanos (HELENE, 1993). Além disto, a concentração de CO₂, também, altera-se significativamente quando comparamos ambientes fechados e abertos. A velocidade de carbonatação em ambientes fechados, geralmente, é superior a observada em ambientes que permitem a renovação constante do ar (KAZMIERCZAK, 1995).

Grande parte das pesquisas desenvolvidas são realizadas com concentração de CO₂ superiores às encontrados naturalmente, na forma de ensaios acelerados devido a necessidade de ensaios de menor duração (NEPOMUCENO, 1992; BAUER, 1995; PESSÔA, 2002). Em contraposição, na utilização de altos teores de CO₂ em ensaios acelerados, deve-se alertar para a possibilidade de alterações na microestrutura da pasta carbonatada (MEHTA & MONTEIRO, 1994). Tomando-se como exemplo a reação de carbonatação do hidróxido de cálcio, verifica-se que, em velocidades elevadas de carbonatação, a reação entre o hidróxido de cálcio e o dióxido de carbono, que em situação normal resulta na formação de carbonato de cálcio e água, poderá tornar-se instável, pela geração de ácido carbônico e, conseqüentemente

transformação do carbonato de cálcio (insolúvel) em bicarbonato de cálcio (solúvel), sempre que houver CO_2 em excesso. A geração de compostos solúveis permite a migração do carbonato de cálcio pelos poros da pasta de cimento e pode gerar uma região carbonatada cuja microestrutura apresente características distintas daquela gerada em exemplares carbonatados sob pequenas condições de gás carbônico (KAZMIERCZAK, 1995).

4.5.2.2 – Condições de Umidade

A umidade relativa tem influência na velocidade de carbonatação, devido a sua relação com o grau de saturação de poros. A figura 4.5 apresenta a relação entre umidade relativa do ar e grau de carbonatação. O conteúdo de umidade de poros que produz a maior velocidade de carbonatação, corresponde a umidade relativa ambiente entre 50% e 70% (VERNAU apud GONZÁLEZ & ANDRADE, 1980).

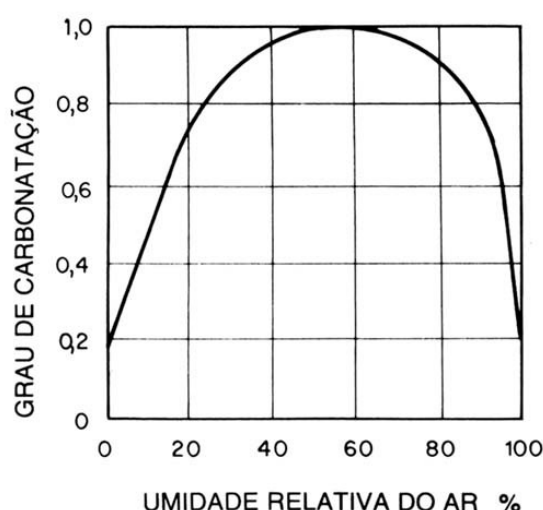


Figura 4.5 – Grau de carbonatação em função da umidade relativa do ar (VENAUT apud GONZÁLEZ & ANDRADE, 1980)

Quando os poros do concreto estão completamente preenchidos por água, não haverá quase carbonatação, devido à baixa taxa de difusão do CO_2 na água. No outro extremo, se os poros do concreto estiverem praticamente secos, o CO_2 se difundirá no interior deles, porém a dissolução do $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e do CO_2 praticamente não ocorrerá, retardando substancialmente a velocidade das reações de carbonatação. A situação ideal para que haja carbonatação, são poros parcialmente preenchidos com água, onde o CO_2 se difundirá e, ocorrerá as reações devido a presença de água.

Estudando a influência da atmosfera litorânea do Golfo do México em relação a carbonatação, CASTRO et al (2000) avaliando e monitorando edifícios da região costeira, observaram que a profundidade de carbonatação aumenta, com o aumento da altura da região em análise dos edifícios. De forma generalizada, constataram que a temperatura permanece, relativamente, constante em toda a fachada, mas a umidade tem tendência a diminuir com a altura do edifício. Esse perfil de umidade resulta em que, as partes mais baixas da estrutura têm menos acesso de CO₂ (devido a um maior grau de saturação dos poros no concreto), resultando em menores profundidades carbonatadas.

4.5.2.3 – Composição Química do Cimento

A velocidade de carbonatação é influenciada pela composição química do cimento e pelas adições, considerando que a reserva alcalina é função destes parâmetros. Cimentos que apresentam maior liberação de hidróxido de cálcio por unidade de volume, tais como, cimentos com elevados teores de silicato tricálcio, C3S, apresentam espessura carbonatada inferiores aos demais, mantidas as demais condições. Portanto, para uma mesma estrutura física da pasta hidratada, o fator de controle é a concentração de Ca(OH)₂ nos poros, que depende, exclusivamente, do tipo de cimento, da relação água/cimento e do grau de hidratação do cimento, sendo independente do consumo de cimento por m³ de concreto (HELENE, 1993).

A relação entre o uso de adições no concreto e a reserva alcalina, se concentra no fato de que, as reações pozolânicas consomem os álcalis livres, principalmente o Ca(OH)₂, resultantes da hidratação do clínquer, diminuindo os teores de álcalis da pasta, havendo menores teores de álcalis, a velocidade da frente de carbonatação, devido às reações com o CO₂ dissolvido na fase aquosa dos poros, será maior. De outra forma, o possível refinamento de porosidade atuaria como barreira física, diminuindo principalmente o coeficiente de difusão de CO₂ (BAUER, 1995).

4.5.2.4 – Relação Água/Cimento

A relação água/cimento é, provavelmente, o principal fator para se controlar a frente de carbonatação, uma vez que tem relação direta com a porosidade. A redução da relação

água/cimento significa uma alteração nos poros capilares, numa faixa de $0,05\ \mu\text{m}$ a $0,03\ \mu\text{m}$, que são os que mais influenciam a permeabilidade dos concretos (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

BAUER et al (2001), constataram que os diâmetros de poros característicos diminuem com a relação água/aglomerante, ou seja, para relação água/aglomerante 0,5 tem-se diâmetro crítico de $0,08\ \mu\text{m}$ e para relação água/aglomerante 0,3 tem-se diâmetro crítico de $0,03\ \mu\text{m}$. Isto indica a melhoria, com ênfase à durabilidade, no que se refere a porosidade devido ao menor consumo de água, que está diretamente relacionado com a distribuição do tamanho de poros, correndo-se entretanto risco de corrosão pelo efeito da carbonatação.

A figura 4.6 reúne resultados de vários pesquisadores, com o objetivo de quantificar a influência da relação água/cimento no processo de carbonatação:

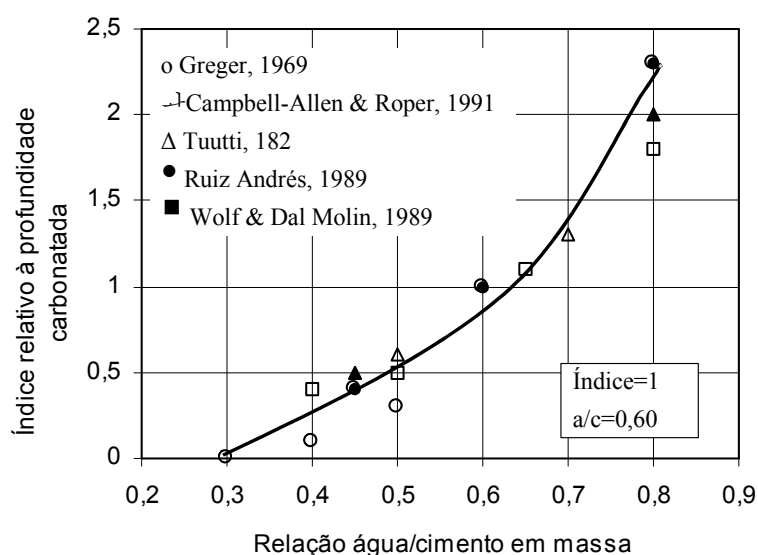


Figura 4.6 – Profundidade de carbonatação em função da relação água/cimento (HELENE, 1993).

4.5.2.5 – Qualidade de Execução

A qualidade na execução tem relação direta com a velocidade de carbonatação, devido à influência na porosidade do concreto. Um fator de extrema importância é a cura, que tem como objetivo, manter o concreto saturado, ou mais próximo do possível da saturação, até que os espaços da pasta de cimento fresca tenham sido preenchidos pelos produtos de hidratação do cimento, até uma condição desejável (NEVILLE, 1997).

Um menor tempo de cura supõe um menor grau de hidratação, diminuindo a formação do C-S-H e, ainda, a água que se evapora mais rapidamente nas primeiras idades, provoca retração maior, devido a menor resistência à tração do concreto nestes momentos, provocando um aumento nos canais capilares (PARROT, 1987 apud NEPOMUCENO, 1992).

Outro fator importante, quanto à influência da qualidade de execução na carbonatação, é o cobrimento da armadura, pois além da proteção de caráter químico, o cobrimento do concreto proporciona à armadura uma proteção física, ou seja, o cobrimento constitui uma barreira contra a penetração de agentes agressivos.

CAPÍTULO 5

PROGRAMA EXPERIMENTAL

5.1 - INTRODUÇÃO

A água é elemento fundamental no processo de corrosão induzido por carbonatação do concreto. Na fase de iniciação do processo de corrosão, quando o CO₂ atua na despassivação

da armadura, a água é necessária para a dissolução do mesmo, e assim ocorrer a reação com o Ca(OH)_2 . Já na fase de propagação, uma vez que a armadura já se encontra despassivada, um dos fatores controladores do processo de corrosão, é a condutividade do concreto, a qual, depende do teor de umidade dos poros e da porosidade.

Com base na descrição acima, o programa experimental desta pesquisa apresenta como objetivo principal o estudo da relação entre o transporte e fixação de água no concreto, com os parâmetros eletroquímicos que caracterizam o processo de corrosão de armaduras, tendo como enfoque a fase de propagação. Para tal, será empregada a carbonatação como mecanismo de indução da corrosão de armaduras, considerando este mecanismo como sendo o mais adequado para este estudo, uma vez que, a morfologia deste processo é mais uniforme, comparando-se com a corrosão induzida por cloretos.

Dentro do programa experimental, procurou-se utilizar algumas grandezas eletroquímicas para o acompanhamento da fase de propagação do processo de corrosão. Após o processo de corrosão instalado, o período de propagação foi monitorado através da técnica de resistência de polarização e medidas de intensidade galvânica e a movimentação e fixação de água foram monitoradas através do teor de umidade dos poros, sensor de umidade e do conteúdo de umidade interno do concreto.

5.2 – PROJETO DE PESQUISA

Inicialmente, definiu-se as variáveis de estudo com base no objetivo da pesquisa. Com finalidade de modificação da estrutura porosa, uma vez que a movimentação de água no concreto está intimamente ligada a este parâmetro, definiu-se como variáveis independentes: o consumo de cimento, a relação água/cimento e a espessura do cobrimento das armaduras.

As variáveis dependentes estão relacionadas com o acompanhamento do processo de corrosão de armaduras (fase de propagação), em função da movimentação de água. Em relação à movimentação e fixação de água tem-se como variáveis dependentes: o teor de umidade do concreto (relação entre a massa de água nos poros e a massa seca), leituras de umidade (sensor de umidade) e o conteúdo de umidade (peso de vapor d'água contido na mistura por Kg de ar seco). Quanto ao monitoramento eletroquímico do processo de corrosão tem-se: a intensidade de corrosão, intensidade galvânica, potencial de corrosão e resistência ôhmica. A figura 5.1 apresenta esquema das variáveis em estudo.

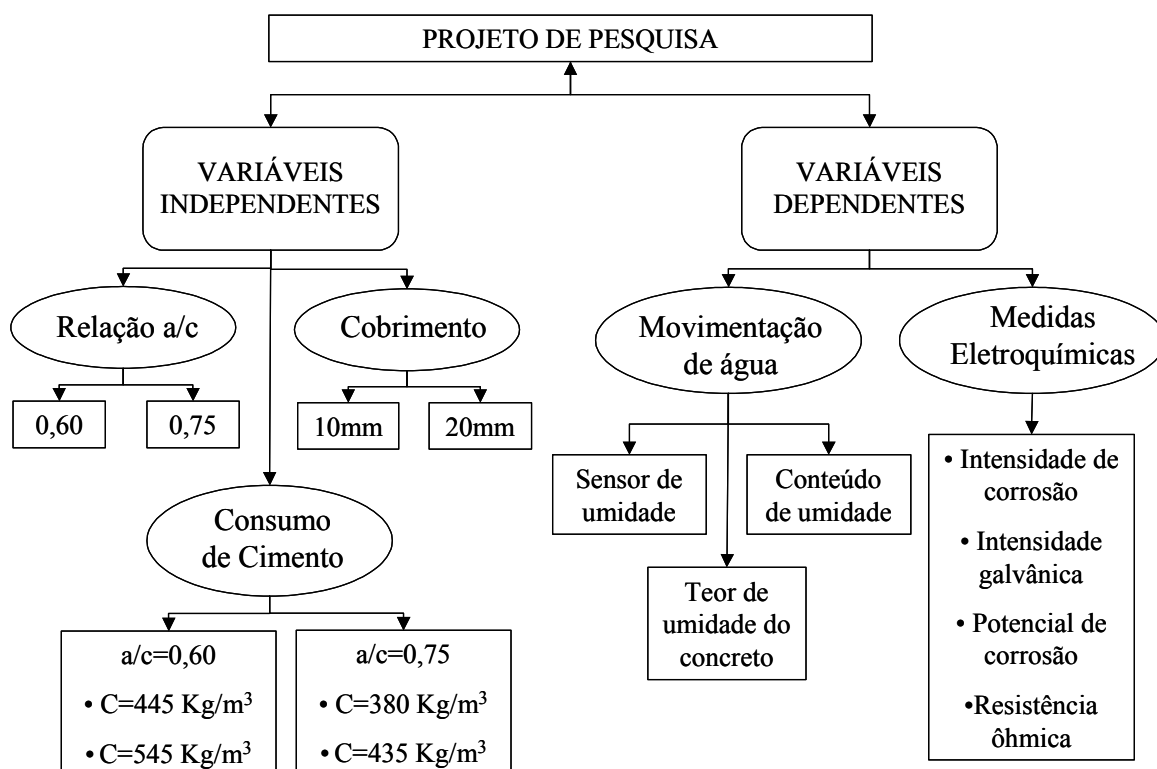


Figura 5.1 – Esquema das variáveis em estudo.

Definidas as variáveis a serem estudadas, desenvolveu-se um corpo-de-prova piloto, com o intuito de averiguar o funcionamento do sensor de umidade, sensor galvânico (FEIJÃO, 2000) e orifícios para leitura de umidade relativa e temperatura interna ao corpo-de-prova (ANDRADE et al, 1999) e, além disso, definir a metodologia a ser utilizada para variar o teor de água nos poros. Uma descrição mais detalhada do estudo piloto (descrição do corpo-de-prova piloto, etapas e definições) se encontra no item 5.4.

Feitas as definições necessárias com base no corpo-de-prova piloto, partiu-se para a moldagem e cura dos corpos-de-prova definitivos e posterior carbonatação. Foram reservados corpos-de-prova sem carbonatar para os ensaios de imersão e de caracterização da estrutura porosa, com o intuito de avaliar as modificações na estrutura porosa e, conseqüentemente nas propriedades do material, com a carbonatação.

Encerrada a carbonatação, iniciou-se os períodos de umedecimento e secagem (metodologia definida a partir do corpo-de-prova piloto), sendo que a fase de umedecimento se estende até a saturação dos poros e, a secagem é feita de forma lenta, proporcionando um melhor

monitoramento do processo, para que se possa avaliar o processo de corrosão de armaduras, frente a diferentes condições de umidade. As etapas constituintes do programa experimental estão resumidas na figura 5.2.

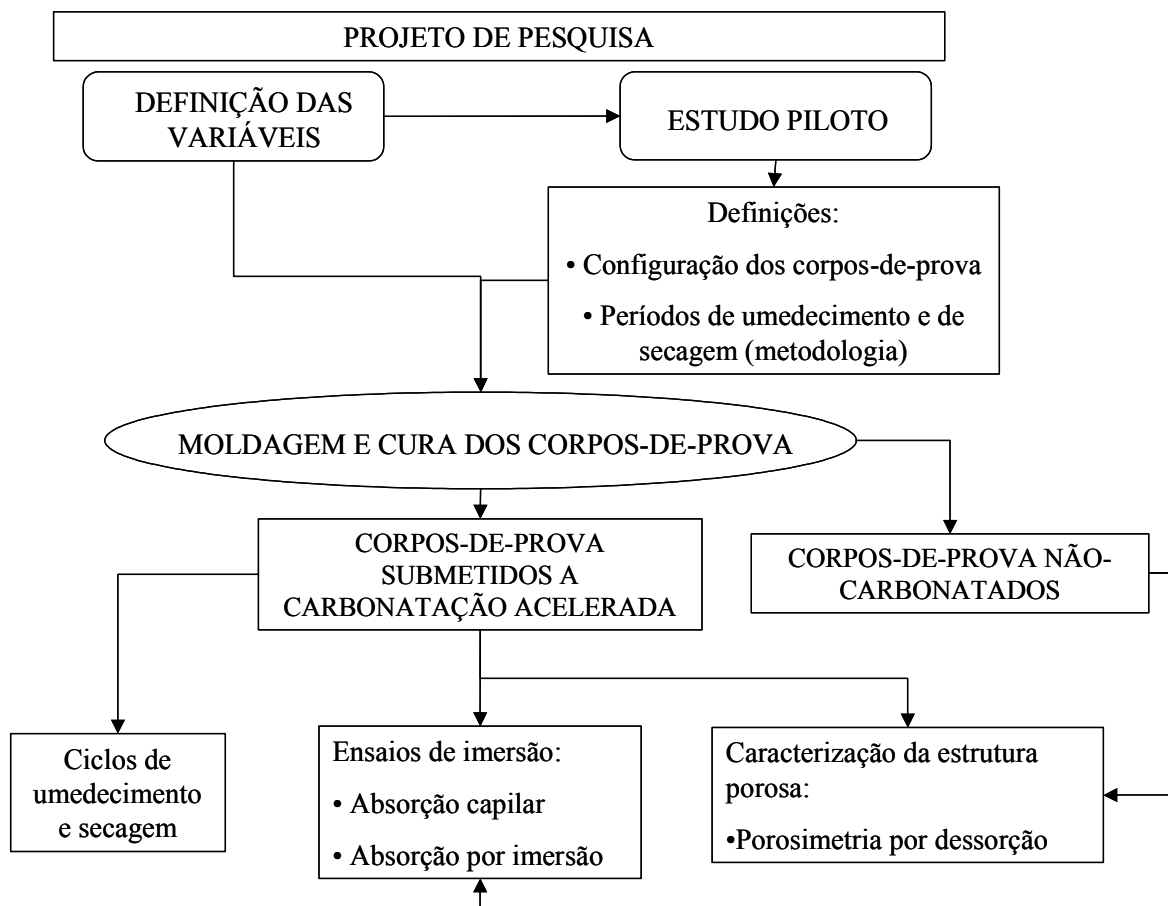


Figura 5.2 – Etapas do programa experimental

5.3 – SÉRIES DE ESTUDO

A definição das dosagens em estudo tem como referência o trabalho de PESSÔA (2002), o qual, avaliava a influência do consumo de cimento na corrosão de armaduras em estruturas de concreto carbonatadas. A principal observação que motivou a utilização das mesmas dosagens foi que as dosagens com maiores consumos de cimento são as que absorvem mais água, sendo este fato comprovado pelos ensaios de absorção por capilaridade e absorção por imersão. No entanto, esta maior absorção não refletiu na intensidade de corrosão. Pelo contrário, as argamassas com menores consumos de cimento foram as que proporcionaram menor período

de proteção (menor período de iniciação) e maiores intensidades de corrosão. Tal fato foi explicado pela possível interconexão da zona de transição, nas argamassas com menor consumo de cimento, que embora não tenha refletido em um aumento de massa, serviu como caminho preferencial para a umidade chegar até as armaduras e, assim, provocar maiores intensidades de corrosão.

Baseado na descrição acima, utilizou-se na presente pesquisa, os mesmos materiais, com exceção do cimento, que eram de fabricantes diferentes, apesar de serem um CP IIF – 32, e traços para relação a/c=0,60, utilizados por PESSÔA (2002), uma vez que utilizando um corpo-de-prova mais instrumentado (sensor de umidade, orifícios para medida de umidade relativa e temperatura interna), haverá a possibilidade de um melhor monitoramento dos fenômenos ocorridos. A relação a/c=0,60 foi escolhida por ser comumente utilizada para níveis de resistência especificados em projetos e a relação a/c=0,75 foi utilizada por caracterizar um concreto mais poroso, permitindo assim uma resposta mais rápida, quanto à penetração de água e agentes agressivos. Desta forma os traços utilizados estão dispostos na tabela 5.1, assim como suas denominações e definições.

Tabela 5.1 - Definição dos traços e grupos de ensaios

Grupo	Relação	Consumo de Cimento (Kg/m ³)	Traço Cimento : areia	A%	Consistência ^{5.1} (mm)
G1	0,60	445	1 : 3,47	13,43	230
G2		545	1 : 2,39	17,71	340
G3	0,75	380	1 : 4,06	14,80	260
G4		435	1 : 3.23	17,71	330

A relação água/materiais secos apresentada na tabela 5.1, com o símbolo A%, é dada pela equação 5.1:

$$A\% = \frac{x}{1 + m} * 100 \quad (\text{Equação 5.1})$$

Onde:

x = relação a/c

m = proporção do agregado, neste caso somente areia.

^{25.1} A consistência das argamassas foi determinada segundo o Anexo B da norma NBR 7215-96.

Como foi comentado, anteriormente, os traços para relação água/cimento 0,60 foram os mesmos utilizados por PESSÔA (2002), cabendo ressaltar que, o menor consumo de cimento foi escolhido de maneira que, correspondesse a uma argamassa onde o volume de vazios do agregado fosse igual ou menor ao volume da pasta de cimento, e, a partir deste consumo, fez-se uma variação de 100 Kg/m³, para o cálculo do traço seguinte. Para relação água/cimento 0,75, manteve-se o mesmo critério para o cálculo do traço com menor consumo de cimento, e, para o cálculo do traço com maior consumo de cimento, adotou-se a mesma relação água/materiais secos (A%) do traço de maior consumo da relação 0,60, e, a partir daí determinou-se os demais parâmetros, garantindo assim que as argamassas são similares, em relação a trabalhabilidade, no estado fresco. O anexo A apresenta roteiro para o cálculo das respectivas dosagens.

5.4 – ESTUDO PILOTO

O estudo piloto teve como objetivo principal a definição do corpo-de-prova a ser utilizado na pesquisa, bem como das metodologias utilizadas nas diversas etapas do programa experimental.

O corpo-de-prova piloto foi desenvolvido com a finalidade de acompanhamento do processo de corrosão em função da movimentação de água, e dispunha de:

- Sensor galvânico: utilizado para o acompanhamento da frente de carbonatação através de medidas de intensidade galvânica, nas diferentes profundidades em que se encontram os pares galvânicos. A utilização de macropares galvânicos para o monitoramento da corrosão no concreto é um dos sistemas mais simples, pois conectando-se dois metais, pode ser desenvolvida uma corrente galvânica no circuito gerado, podendo ser detectada por um amperímetro de resistência nula e analisada para se obter dados sobre a corrosão (SHIESSL,1992 apud FEIJÃO,2000). O sensor galvânico desenvolvido consiste de eletrodos de aço carbono e de aço inoxidável, de 1mm de diâmetro, espaçados de 5mm e alternados, atingindo a altura de 40mm. O corpo do sensor é feito de acrílico com função de suportar e manter os eletrodos de aço carbono e aço inoxidável devidamente espaçados. A figura 5.3 mostra um esquema do sensor galvânico.

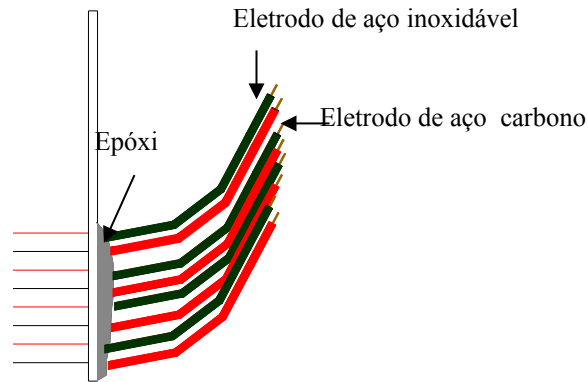


Figura 5.3 – Esquema do sensor galvânico utilizado. Em preto estão os fios de aço inoxidável, em vermelho os fios de aço carbono, em cinza a pintura com resina a base de epóxi e em verde e vermelho as conexões aos fios flexíveis.

- Sensor de umidade: baseado no princípio resistivo, de que, ao se aplicar uma diferença de potencial entre dois eletrodos desenvolve uma corrente entre eles, que é medida através de um multímetro. Utilizou-se os eletrodos de aço inoxidável do sensor galvânico como sensores de umidade.
- Orifícios de UR e T: utilizados para medidas de umidade relativa e temperatura interna ao corpo-de-prova, através de penetração da sonda do aparelho medidor no interior do corpo-de-prova, tentando simular o conteúdo de umidade dos poros (ANDRADE, 2000). Foi executado em tubo de pvc, alcançando a altura de cobrimento desejada, e a extremidade exposta ao ambiente foi selada com borracha, porém permitindo a penetração da sonda do aparelho medidor, sem que haja influência do ambiente externo.
- Conjunto de barras: destinados à investigação do processo de corrosão, contendo duas barras de aço carbono e três eletrodos de aço inoxidável, posicionados alternadamente.

Para a moldagem foi utilizada uma argamassa no traço 1:1,85:0,5 (cimento:areia:relação a/c) e o período de cura foi de 7 dias. Todas as faces do corpo-de-prova, exceto a correspondente a região de cobrimento, foram seladas com resina a base de epóxi, garantindo que os processos a que o corpo-de-prova seja submetido ocorram apenas pela região de cobrimento. A figura 5.4 apresenta foto da montagem do corpo-de-prova piloto.

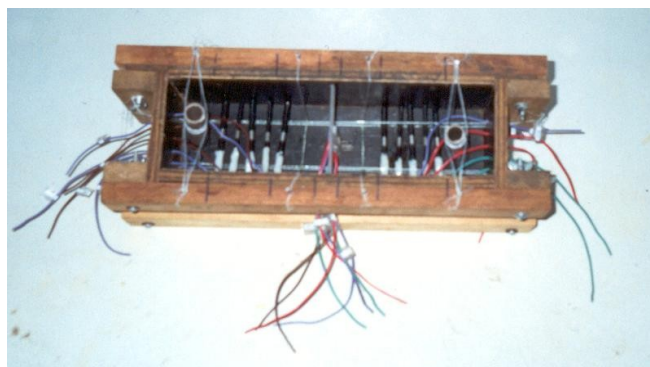


Figura 5.4 – Montagem do corpo-de-prova piloto

Após a moldagem e cura do corpo-de-prova inicia-se o processo de carbonatação. Previamente, o corpo-de-prova foi seco em estufa a temperatura de 60°C e mantido em ambiente com umidade relativa de 70% até estabilização de massa (BAUER, 1995). O teor de CO₂ na câmara de carbonatação foi próxima a 100% para o corpo-de-prova piloto. A câmara de carbonatação foi desenvolvida de modo que as conexões, (fios de cobre) tanto do sensor, como dos conjuntos de barras, fiquem externamente, permitindo assim, o monitoramento do período de carbonatação, sem a necessidade de retirada dos corpos-de-prova da câmara para tal procedimento, evitando modificações na temperatura e umidade relativa da câmara de carbonatação e interna ao corpo-de-prova.

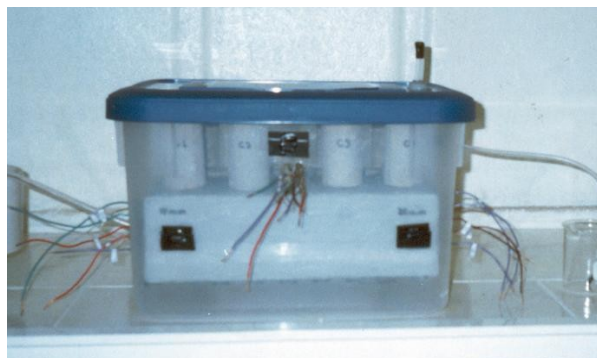


Figura 5.5 – Foto da câmara de carbonatação utilizada no estudo piloto

O período de carbonatação, a princípio, seria acompanhado através do sensor galvânico, porém não houve resposta advinda deste e, o acompanhamento passou a ser feito através da aspersão de fenolftaleína em superfície fraturada em corpos-de-prova cilíndricos. Nesta fase,

também são monitoradas a umidade relativa e temperatura ambiente e interna ao corpo-de-prova.

Com o fim da carbonatação, começou-se a umedecer o corpo-de-prova de forma gradativa, com colocação de pano úmido na superfície exposta, e posterior imersão em água até saturação dos poros, e a secagem feita em estufa a 80°C. Este período foi monitorado através da técnica de resistência de polarização e medidas de intensidade galvânica, além de leituras de umidade (sensor de umidade) e umidade relativa e temperatura interna ao corpo-de-prova.

5.4.1 – Apresentação dos Resultados e Definições com Base no Estudo Piloto

Os resultados apresentados não têm como objetivo principal chegar a conclusões quanto aos objetivos desta pesquisa, mas sim chegar a definições quanto à montagem do corpo-de-prova definitivo e as metodologias a serem utilizadas no programa experimental.

- Sensor galvânico: não forneceu resposta quanto à frente de carbonatação, assim optou-se por monitorar este processo através da aspersão de indicadores químicos em superfície fraturada, no caso, fenolftaleína.
- Sensor de umidade: Este dispositivo para o acompanhamento da movimentação de água no concreto, será utilizado no corpo-de-prova definitivo em virtude do resultado apresentado. Podemos observar na figura 5.6 que durante o período de umedecimento a camada intermediária (par 2-3 cm) é a que apresenta maior teor de água, uma vez que apresenta as maiores correntes elétricas, somente sendo igualada pela camada mais interna (par 3-4 cm) no período final do umedecimento. Durante a fase de secagem, observamos a dificuldade em se perder água nas camadas mais internas, mostrado pelo par 3-4 cm apresentar durante toda a secagem as maiores correntes elétricas.

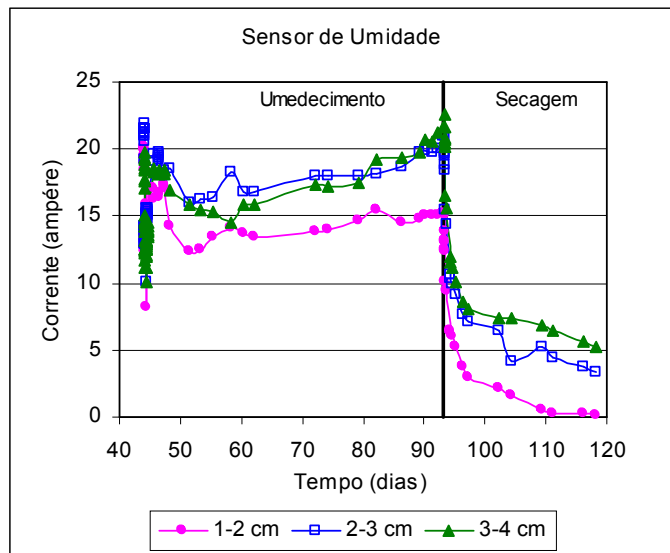
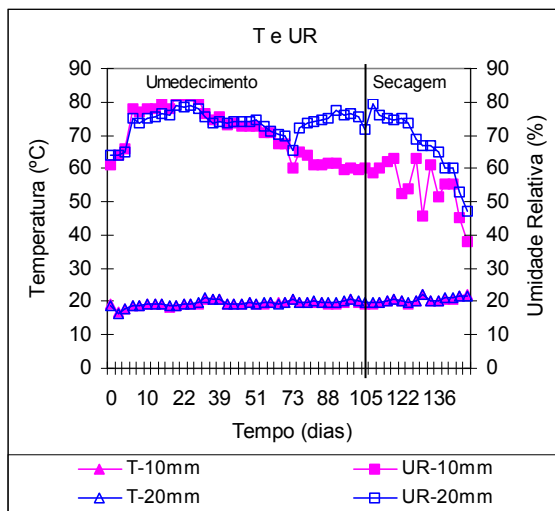
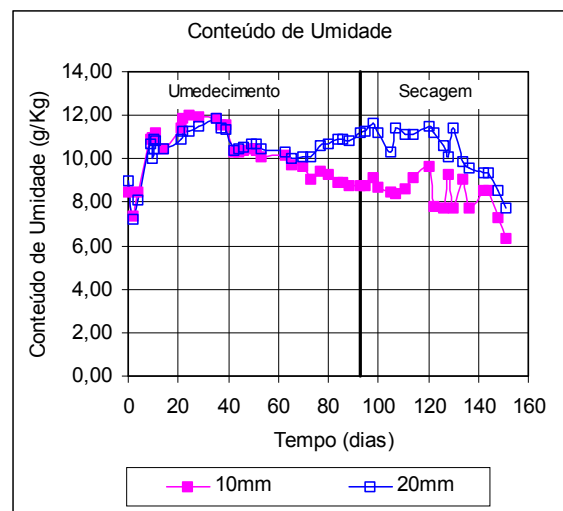


Figura 5.6 – Comportamento do sensor de umidade frente à umedecimento e secagem

- Orifícios para medidas de umidade relativa e temperatura interna ao corpo-de-prova: A figura 5.7 [b] mostra o conteúdo de umidade nos dois cobrimentos, obtidos a partir de [a], e observa-se que com o início da fase de secagem (93 dias), o conteúdo de umidade a 10mm tende a ficar menor, e com o andamento da secagem a diferença entre os dois cobrimentos tende a ser ainda maior, isto podendo ser explicado pelo fato de que as trocas de umidade são mais intensas em 10 mm que a 20 mm.



[a]



[b]

Figura 5.7 – [a] Temperatura e umidade relativa x tempo. [b] Conteúdo de umidade x tempo

A figura 5.8 apresenta a relação entre o conteúdo de umidade e o sensor de umidade, onde podemos observar uma tendência entre os dois parâmetros, indicando que a utilização de tais dispositivos reproduz os fenômenos em questão.

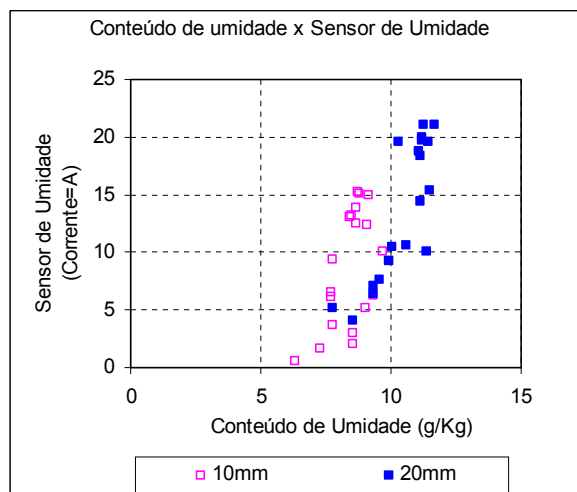


Figura 5.8 – [a] Temperatura e umidade relativa x tempo. [b] Conteúdo de umidade x tempo

Quanto à metodologia a ser utilizada na fase de umedecimento e secagem, optou-se por umedecimento até a saturação, através de colocação da superfície exposta em contato com água (imersão), e a secagem feita em estufa a temperatura de 80°C. Esta definição fundamenta-se em que a penetração de água é de difícil controle, assim se torna mais fácil saturar os poros e fazer secagem gradativa, monitorando melhor o processo. A tabela 5.2 apresenta as definições obtidas a partir do estudo piloto.

Tabela 5.2 - Definições obtidas a partir do estudo piloto

Definições com base no estudo piloto		
Corpo-de-prova	Sensor galvânico	Não será utilizado
	Sensor de umidade	É de fundamental importância para o acompanhamento da movimentação de água
	Orifícios de T e UR	
Metodologias	Técnicas para monitoramento do processo de corrosão	Resistência de Polarização e Intensidade Galvânica
	Técnicas para monitoramento da movimentação de água	Sensor de Umidade Conteúdo de umidade Teor de umidade
	Fase de umedecimento	Imersão até a saturação
	Fase de secagem	Estufa a 80°C em ciclos de 6 horas

5.5 – METODOLOGIA OPERACIONAL

Neste sub-item estão descritas, de forma detalhada, as operações relacionadas à fase inicial do programa experimental, sendo elas: montagem e concepção de corpo-de-prova, com descrição individual de cada dispositivo (sensor de umidade, orifícios de UR e T e conjuntos de barras) utilizado na estruturação do mesmo e ainda os procedimentos de moldagem e cura.

5.5.1 – Montagem e Concepção do Corpo-de-Prova

Foram utilizados três tipos de corpos-de-prova: corpos-de-prova destinados aos ensaios de corrosão, corpos-de-prova testemunho, e corpos-de-prova para os ensaios complementares. Os corpos-de-prova para ensaios complementares têm forma cilíndrica com 50 mm de diâmetro (ϕ) e 100 mm de altura (h), enquanto os corpos-de-prova testemunho e os destinados aos ensaios de corrosão têm a forma prismática. A tabela 5.3 apresenta a configuração de cada um dos corpos-de-prova, bem como a sua destinação.

Tabela 5.3 - Corpos-de-prova

Tipo	Formato	Dimensões	Destino
Corpo-de-prova de corrosão	Prismático	100x100x300 mm	- Monitoramento do processo de corrosão em função da movimentação e fixação de água.
Corpo-de-prova testemunho	Prismático	100x100x300 mm	- Acompanhamento da frente de carbonatação - Retirada de amostras para os ensaios de caracterização da estrutura porosa
Corpo-de-prova para ensaios complementares	Cilíndrico	$\phi=50$ mm h=100 mm	- Acompanhamento da frente de carbonatação - Absorção Capilar - Absorção por Imersão

A definição da configuração dos corpos-de-prova destinados aos ensaios de corrosão fundamenta-se na necessidade do monitoramento dos mesmos, quanto à movimentação e fixação de água no concreto e umidade relativa e temperatura interna, resumidas em conteúdo de umidade.

Os corpos-de-prova destinados aos ensaios de corrosão têm forma prismática nas dimensões 100x100x300mm e dispõe de dois conjuntos de barras, posicionados, um com 10mm e outro com 20mm de cobrimento. Os conjuntos de barras contêm duas barras de aço carbono (4,2 mm) e três eletrodos de aço inoxidável (6 mm) posicionadas alternadamente, conforme figura 5.9.

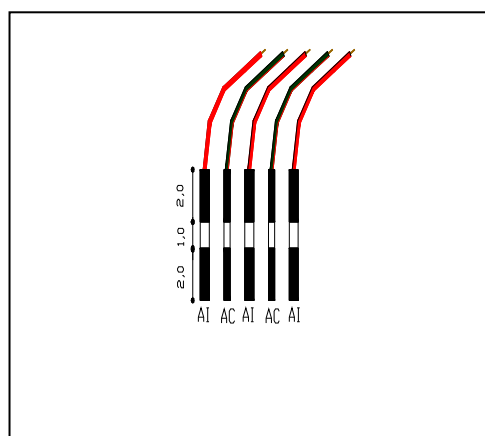


Figura 5.9 – Esquema do conjunto de barras (AC - barras de aço carbono, AI - eletrodos de aço inoxidável).

Além dos dois conjuntos de barras mencionados acima, os corpos-de-prova destinados aos ensaios de corrosão dispõem de sensor de umidade, descrito no item 5.5.2, e também de dois orifícios, o qual uma de suas extremidades alcança o cobrimento de 10mm e o outro de 20mm, para possibilitar o monitoramento da temperatura e da umidade relativa interna, ou melhor, na altura do cobrimento das barras, através de sonda. Tal orifício é executado com tubo de PVC de 20mm de diâmetro, e sua extremidade exposta ao ambiente é selada com um dispositivo desenvolvido a base de borracha e fita isolante, de forma a proporcionar a penetração da sonda do aparelho medidor, sem permitir que haja interferência do ambiente externo, em relação à umidade relativa, principalmente, e a temperatura, na altura do cobrimento (ANDRADE et al, 1999). A figura 5.10 apresenta o esquema dos corpos-de-prova destinados aos ensaios de corrosão.

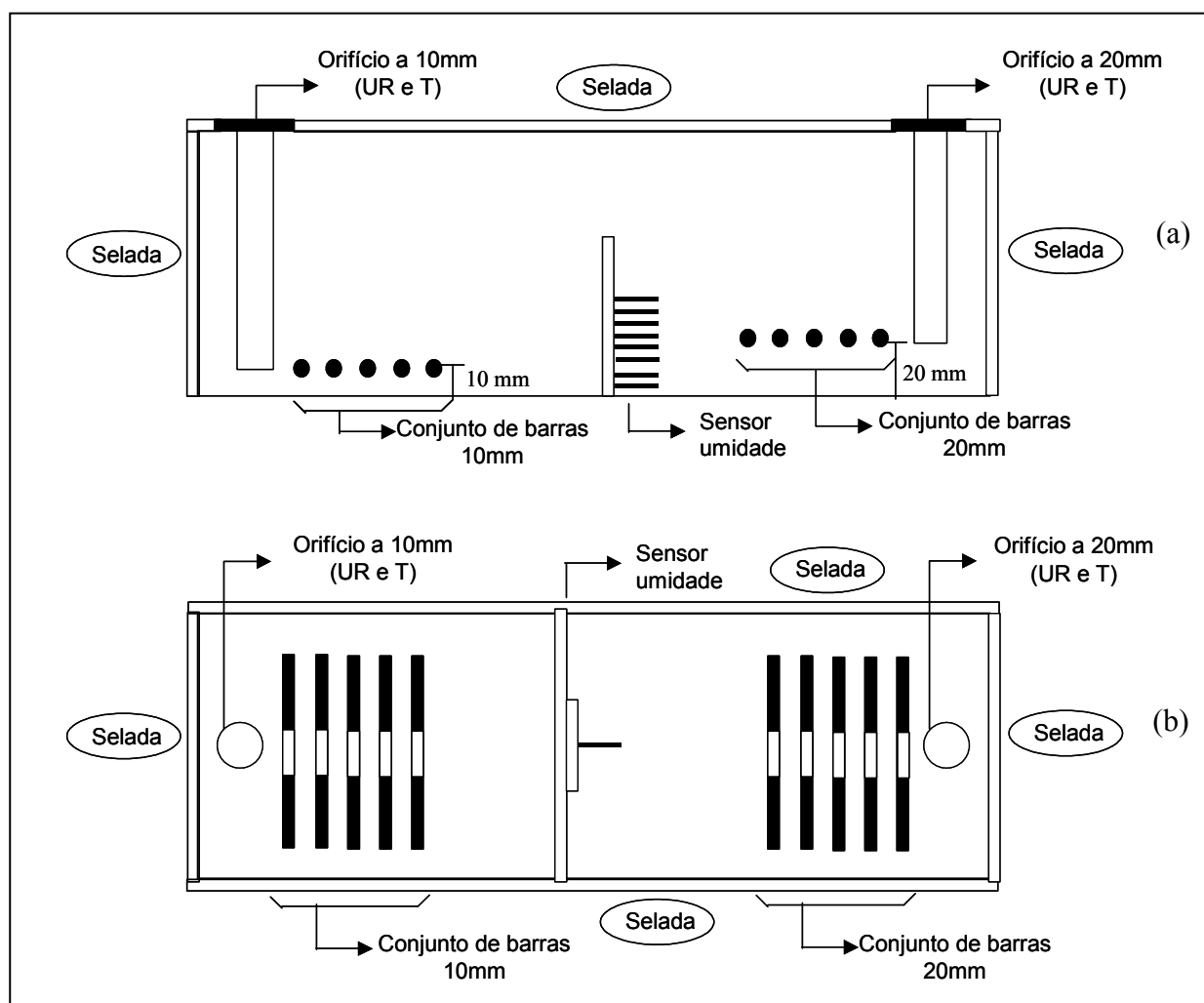


Figura 5.10 – Esquema dos corpos-de-prova destinados aos ensaios de corrosão. (a)

Vista lateral (b) Vista superior

Após os corpos-de-prova moldados e curados, descritos no item 5.5.3, aplica-se uma pintura com resina a base de epóxi em 5 (cinco) das 6 (seis) faces do corpo-de-prova. Esta pintura é feita para garantir que a carbonatação e também os diversos processos (ciclos de umedecimento e secagem) a que o corpo-de-prova será submetido ocorram através da região de cobrimento das armaduras.

5.5.2 – Preparação das Barras

As barras utilizadas para investigação do processo de corrosão foram submetidas ao processo de limpeza, de modo que todas apresentassem as mesmas condições superficiais, estando isentas de qualquer produto de corrosão. O procedimento de limpeza das barras é baseado na Norma ASTM C-1152/92, e consiste de:

- Imersão das mesmas em uma solução de ácido clorídrico 1:1 com 3,5 g/l de hexametilenotetramina por 15 minutos.
- Escovação das barras em água corrente para remoção de óxidos.
- Imersão em acetona, por dois minutos, para a retirada de elementos gordurosos e favorecer a evaporação da água na superfície das mesmas.
- Secagem com ar quente.

Terminado o processo de limpeza, as barras foram pesadas, em uma balança analítica com precisão de quatro casas decimais em gramas, e identificadas. Em seguida, fez-se a delimitação da região da barra a ser exposta ao ataque do agente agressivo (1 cm) com fita isolante, foi feita a conexão da barra com o fio flexível, aplicou-se nesta área pintura com resina a base de epóxi, e, as mesmas são mantidas em um recipiente fechado com sílica gel, para evitar umidade, até o momento da montagem do corpo-de-prova.

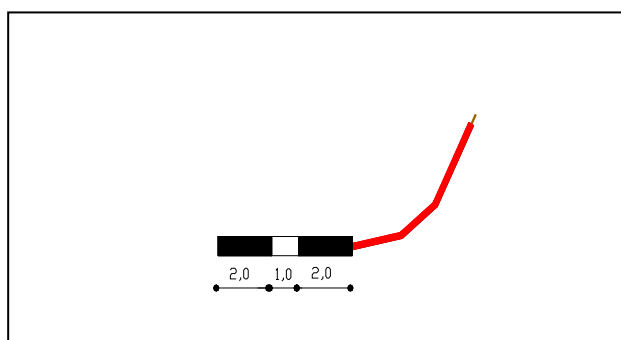


Figura 5.11 - Esquema da delimitação da área exposta ao ataque na barra com fita de PVC (preto), conexão com fio flexível (vermelho) e pintura com resina a base de epóxi (cinza). As unidades estão em cm.

5.5.3 – Sensor de Umidade

CHRISP et al.(2001) estudando a condutividade na região de cobrimento do concreto, utilizaram de pares de eletrodos de aço inoxidável para medidas elétricas (condutividade) durante ciclos de umedecimento e secagem, chegando a seguinte conclusão: Quando a água penetra na região de cobrimento do concreto, onde estão posicionados os pares de eletrodos, observa-se em todas as séries estudadas que na fase de umedecimento dos ciclos, a condutividade aumenta, sendo que com o passar dos ciclos os picos de condutividade vão

diminuindo (Figura 5.12). Observa-se também que à medida que se aumenta a profundidade do cobrimento, as medições indicam menor variação em função dos ciclos.

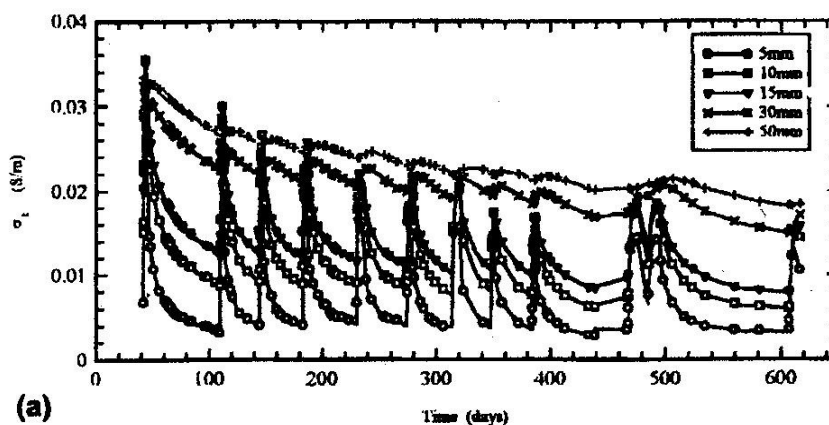


Figura 5.12 – Condutividade x tempo em ciclos de umedecimento e secagem para argamassas de cimento Portland Comum (CHRISP et al., 2001)

Os aumentos de condutividade significam que a umidade penetrou na zona de influência do campo elétrico entre aqueles pares de eletrodos. Isto pode ser explicado com referência ao diagrama esquemático apresentado na figura 5.13. Na posição I indicada, a frente de umidade está distante da região de influência do campo elétrico entre os pares de eletrodos e, conseqüentemente, uma pequena mudança na condutividade seria detectado. Na posição II, a frente de umidade avançou na zona de influência do campo elétrico. Durante este período (entre a posição II e III), a condutividade do concreto aumentará à medida que a frente de umidade estabeleça contato entre os eletrodos. Finalmente, na posição IV, a frente de umidade avançou além da zona de influência do campo elétrico dos pares de eletrodos e a condutividade agora atingirá um valor relativamente constante com o tempo (CHRISP et al., 2001).

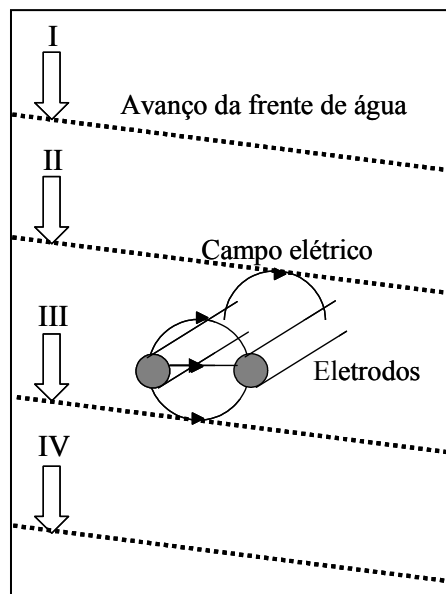


Figura 5.13 – Esquema mostrando a movimentação da frente de umidade na região de cobertura (CHRISP et al., 2001)

O sensor de umidade desenvolvido para a presente pesquisa baseia-se no princípio resistivo, de que, ao se aplicar uma diferença de potencial entre dois eletrodos, desenvolve uma corrente entre eles, que é medida através do multímetro. Tal sensor consiste de eletrodos de aço inoxidável dispostos verticalmente, considerando a região exposta do corpo-de-prova como sendo horizontal, espaçados de 5 mm atingindo a altura de 40 mm, totalizando 8 eletrodos ou 4 pares, fixados a uma haste de acrílico, com finalidade de suportar e manter os eletrodos devidamente espaçados.

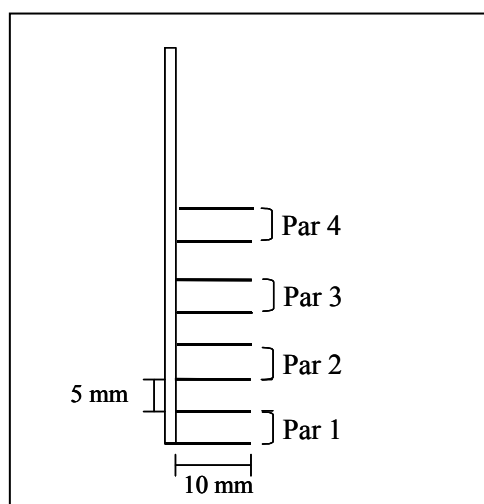


Figura 5.14 – Esquema do sensor de umidade.

5.5.4 – Moldagem e Cura dos Corpos-de-Prova

O processo de mistura da argamassa foi realizado em misturador mecânico, sendo que inicialmente foi feita a homogeneização dos materiais secos (areia e cimento) e somente após esta etapa terminada, iniciou-se a adição da água gradativamente com o misturador em movimento. É importante ressaltar que as dimensões reduzidas dos corpos-de-prova inviabilizam a utilização de agregado graúdo, que geraria dificuldades na moldagem. Portanto, a argamassa foi utilizada para substituir o concreto, pois sua estrutura de poros é muito semelhante à estrutura de poros do concreto (Wislow e Liu, 1990).

A moldagem dos corpos-de-prova testemunho e para ensaio de corrosão foi feita em fôrma, nas dimensões 100 x 100 x 300 mm, de madeira impermeabilizada com uma pintura de tinta látex, para evitar a absorção de água da argamassa pela fôrma, sem a utilização de desmoldante. Já os corpos-de-prova cilíndricos foram moldados em fôrmas metálicas normalizada, de 50 mm de diâmetro por 100 mm de altura, sem o uso de desmoldante. O adensamento para todos os corpos-de-prova foi realizado em três camadas de forma mecânica, em mesa vibratória.

Após a moldagem os corpos-de-prova foram levados a câmara úmida para cura por 28 dias, garantindo assim um elevado grau de hidratação do cimento. A desmoldagem foi feita após 24 horas da operação de moldagem.

5.6 – METODOLOGIA DE ENSAIO

Neste sub-item é apresentada, detalhadamente, a descrição das diversas metodologias utilizadas no programa experimental.

5.6.1 - Ensaio Acelerado de Carbonatação

Preliminarmente, faz-se necessário uma preparação dos corpos-de-prova para o ensaio de carbonatação, dado ao fato do processo ocorrer em fase aquosa, exigindo assim um certo grau de umidade nos poros. Uma condição intermediária ideal, na qual a carbonatação ocorre em maior escala, corresponde a uma faixa de umidade relativa entre 50 e 70% (HELENE, 1981;

NEPOMUCENO, 1992; BAUER, 1995). O procedimento de preparação dos corpos-de-prova consistiu de (BAUER, 1995):

- Secagem em estufa a temperatura de 60°C até constância de massa;
- Manutenção dos corpos-de-prova em recipiente com umidade relativa na faixa de 65 a 70% até constância de massa.

Após o processo de acondicionamento dos corpos-de-prova iniciou-se o ensaio de carbonatação, propriamente dito. O procedimento de ensaio consiste, basicamente, na colocação dos corpos-de-prova em câmara, na qual se introduz uma mistura de CO₂ e ar atmosférico com concentração de CO₂ por volta de 10%. Quando da aplicação do fluxo, a concentração de CO₂ era de aproximadamente 16%, com o passar do tempo este valor decrescia, chegando a zero por volta de 6 horas após aplicação do fluxo. A concentração de 10% de CO₂ foi escolhida, pois, ao se utilizar 100% o ambiente é muito agressivo, podendo levar a alterações na microestrutura carbonatada. Foram aplicados 2 fluxos diários com intervalo de 4 horas entre eles, com duração necessária a lavagem da câmara com a mistura, por duas vezes. A figura 5.15 apresenta o desenvolvimento da concentração de CO₂ na câmara durante o ensaio.

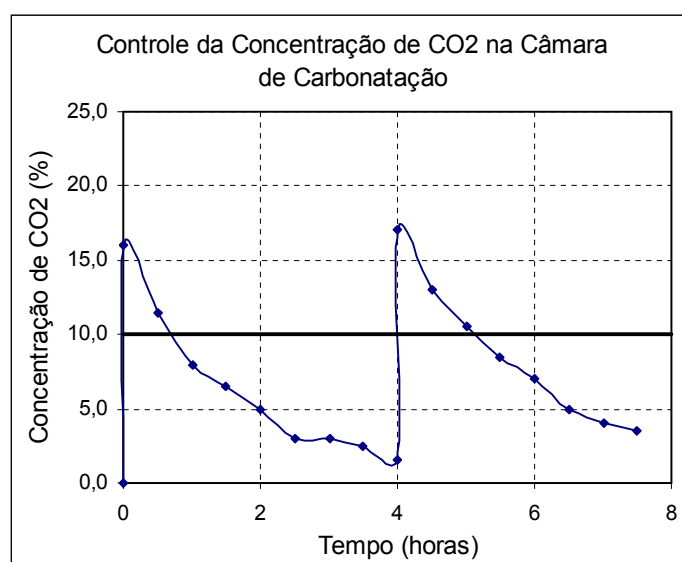


Figura 5.15 – Concentração de CO₂ na câmara de carbonatação

A concentração de CO₂ na câmara foi acompanhado através do Kit para Análise de CO₂ – Dioxor Test Kit da empresa CONFOR Instrumentos de Medição Ltda. O kit era composto de analisador “Testoryt” de CO₂ (escala de 0 a 20%), coletor de gás e solução Disorbent (80 ml). O princípio de funcionamento do kit é que quando a solução Disorbent entra em contato com o CO₂, a mesma expande, ou aumenta de volume, e através da escala graduada do analisador, lê-se a concentração de CO₂ diretamente. A figura 5.16 mostra o Kit para análise de CO₂.



Figura 5.16 – Kit para análise de CO₂.

O avanço da frente de carbonatação foi avaliado através da aspersão de indicador químico, o qual em função do pH referente ao ponto de viragem^{5.2} permite mensurar a espessura carbonatada, em superfície fraturada do corpo-de-prova, de modo a aplicá-lo sobre a superfície interna. Neste estudo foi utilizada a fenolftaleína para o acompanhamento da frente de carbonatação, que tem ponto de viragem por volta de 9,3. O ensaio foi encerrado quando a frente de carbonatação atingiu as barras com 20 mm de cobrimento.

Durante o período de carbonatação foram feitas, também, leituras de intensidade galvânica nos conjuntos de barras e leituras no sensor de umidade, uma vez que, as conexões dos mesmos alcançavam o exterior, porém, estas medidas não deram resposta durante este período, provavelmente devido ao baixo teor de umidade. Este procedimento foi adotado na tentativa de monitorar o avanço da frente de carbonatação sem a necessidade de abertura da câmara de carbonatação.

^{5.2} Ponto de viragem corresponde ao valor de pH no qual o indicador muda sua coloração de modo a distinguir alterações no corpo-de-prova.

5.6.1.1 – Câmara de Carbonatação

A câmara de carbonatação consiste em ambiente fechado na qual foram aplicados fluxos de mistura de CO₂ e ar atmosférico através de um orifício situado na parte inferior da câmara, fazendo com que a mistura de gases se desloque entre os corpos-de-prova, uma vez que a saída está em sua parte superior.

A concentração de CO₂ era de aproximadamente 10% e foi conseguida através da mistura de gases. Um compressor captava o ar atmosférico que era levado até uma conexão do tipo T, na qual se encontrava com o CO₂ proveniente de um cilindro, se misturavam e eram introduzidos na câmara. A vazão do cilindro de CO₂ e do compressor era regulada através de fluxômetro acoplado a saída do gás. A figura 5.17 apresenta esquema da câmara de carbonatação.

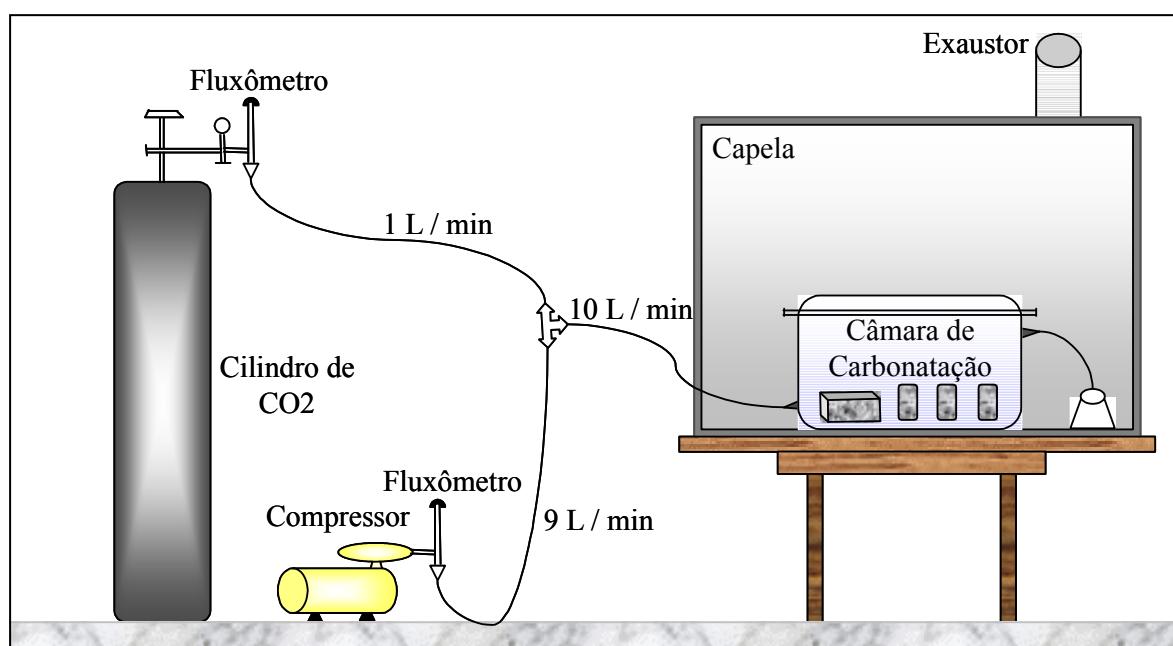


Figura 5.17 – Esquema da câmara de carbonatação

A câmara de carbonatação foi desenvolvida de forma a permitir a leitura de umidade relativa e temperatura da câmara e interna ao corpo-de-prova. As conexões (fios de flexíveis) dos conjuntos de barras e também do sensor de umidade alcançavam o exterior da câmara, permitindo o monitoramento do processo de carbonatação através de medidas de intensidade galvânica e leituras no sensor de umidade, respectivamente.

5.6.2 – Períodos de Umedecimento e de Secagem

Com o intuito de atingir o objetivo da pesquisa, faz-se necessária a variação do teor de umidade dos poros, e para tal utilizou-se de umedecimento e secagem dos corpos-de-prova.

O período de umedecimento, com colocação dos corpos-de-prova em contato com uma lâmina de água, tem início imediatamente após o término da carbonatação dos corpos-de-prova e se estende até saturação dos poros, determinado por constância de massa. Após provável saturação dos poros, iniciou-se o período de secagem que consiste de permanência dos corpos-de-prova em estufa a temperatura de 80°C por 6 horas. Retirados os corpos-de-prova da estufa, os mesmos eram envolvidos em película plástica para resfriamento por aproximadamente 14 horas. A película plástica tinha função de não permitir trocas com ambiente, em relação à umidade, durante o período de resfriamento dos corpos-de-prova. A fase de secagem chega ao final quando a intensidade de corrosão não apresentar mais mudanças, ou melhor, se tornar constante.

Durante tanto a fase de umedecimento, quanto a de secagem eram feitas as leituras na seguinte ordem:

- 1) Leituras no sensor de umidade
- 2) Em paralelo com as leituras no sensor de umidade, eram feitas medidas de umidade relativa e temperatura interna ao corpo-de-prova e também ambiente.
- 3) Leituras de resistência de polarização.
- 4) Medidas de intensidade galvânica
- 5) Determinação da massa dos corpos-de-prova

Foram realizados dois períodos de umedecimento e dois de secagem alternadamente, iniciando-se pelo umedecimento.

5.6.3 – Técnicas para Monitoramento da Movimentação e Fixação de Água no Concreto

Para avaliar a movimentação e fixação de água no concreto foram utilizadas as seguintes técnicas:

- Leituras no sensor de umidade;
- Conteúdo de umidade (orifícios);
- Teor de umidade: relação entre a massa de água presente nos poros do concreto em determinado momento e a sua massa seca.

5.6.3.1 – Leituras no Sensor de Umidade

A leitura no sensor de umidade corresponde a corrente entre os pares de eletrodos do sensor de umidade, a partir da aplicação de um potencial, quando o concreto apresenta um determinado teor de umidade.

O procedimento de ensaio consiste na aplicação de diferença de potencial de 5 V entre os eletrodos através de uma fonte, que tem acoplada a ela um multímetro, onde são feitas as leituras de umidade (corrente) após período de estabilização de 30 segundos. A figura 5.18 apresenta equipamento utilizado nas leituras de umidade.

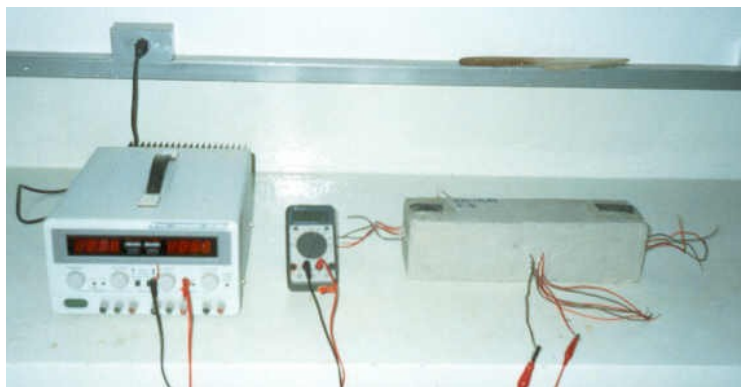


Figura 5.18 – Equipamento para leituras de umidade.

5.6.3.2 – Conteúdo de Umidade

Recentemente algumas tentativas tem ligado o conteúdo de umidade interno do concreto com os parâmetros eletroquímicos que caracterizam os processos de corrosão das armaduras (ANDRADE et al, 1999). Assim recebe o nome de conteúdo de umidade, o peso de vapor de água contido na mistura por Kgf de ar seco (COSTA, 1987).

Através dos orifícios executados com tubo de pvc, existentes no corpo-de-prova, é possível a determinação da umidade relativa e temperatura interna do mesmo, que são fundamentais na determinação do conteúdo de umidade. A figura 5.19 mostra o corpo-de-prova durante leitura de umidade relativa e temperatura interna através de sonda.



Figura 5.19 – Leitura de umidade relativa e temperatura interna ao do corpo-de-prova.

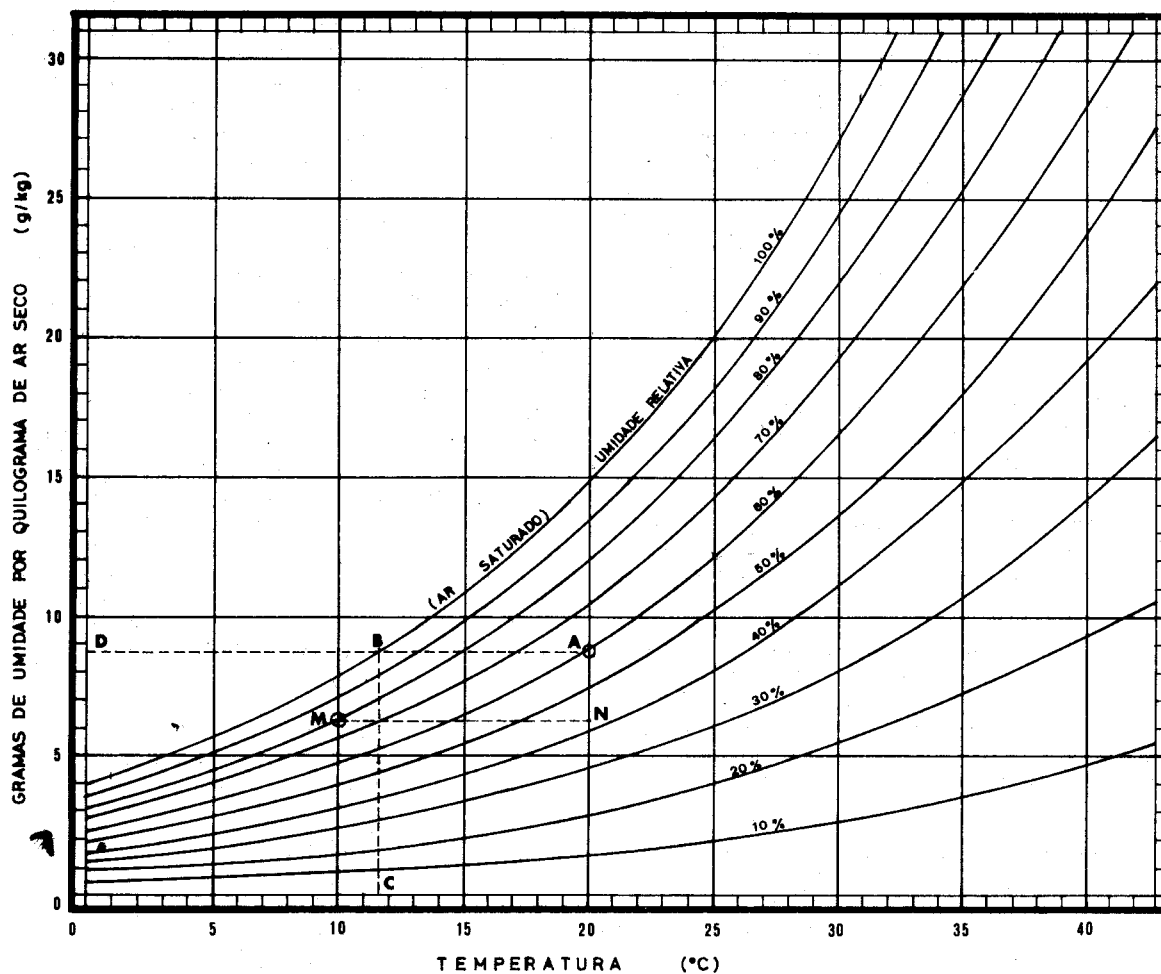


Figura 5.20 – Gráfico das relações entre temperatura, umidade relativa e conteúdo de umidade (RIVERO, 1985).

O conteúdo de umidade é obtido através do gráfico apresentado na figura 5.20, da seguinte forma: a temperatura se encontra no eixo das abscissas, a umidade relativa nas linhas de gráfico e o conteúdo de umidade no eixo das ordenadas. Por exemplo, se a temperatura do ar é 20°C e a umidade relativa é 60% (ponto A), o conteúdo de umidade é lido em D.

5.6.4 – Técnicas para Monitoramento do Processo de Corrosão

Para avaliar o fenômeno da corrosão de armaduras induzida por carbonatação do concreto em função da movimentação e fixação de água no mesmo, foram utilizadas as seguintes técnicas:

- Resistência de polarização
- Medidas de intensidade galvânica

As leituras eletroquímicas foram diárias durante a fase de umedecimento dos corpos-de-prova, e na fase de secagem as leituras eram feitas a cada 6 horas de permanência em estufa. A rotina de ensaios durante a fase de secagem consistia de colocação em estufa por 6 horas, após este período os corpos-de-prova ficavam envolvidos em plástico filme, para resfriamento dos mesmos, durante 14 horas.

5.6.4.1 – Resistência de Polarização

A partir do ensaio de resistência de polarização é obtida a intensidade de corrosão da armadura (*icorr*), que é um importante parâmetro de caracterização do processo de corrosão. Para realização do ensaio utilizou-se um potenciostato com compensação de queda ôhmica (MONTALVÃO, 1992), acoplado a um sistema aquisitor de dados.



Figura 5.21 – Equipamento para medidas de resistência de polarização

A célula eletroquímica utilizada para medidas de resistência de polarização é composta pelo corpo-de-prova de corrosão, no qual está embutido o eletrodo de trabalho (barras de aço carbono) e o contra-eletrodo (eletrodos de aço inoxidável), e pelo eletrodo de referência, neste caso o eletrodo de calomelano saturado (ECS), que é posicionado na superfície exposta do corpo-de-prova. Uma esponja umedecida realiza contato entre o ECS e o corpo-de-prova. A figura 5.22 apresenta a célula eletroquímica utilizada para ensaio de resistência de polarização.

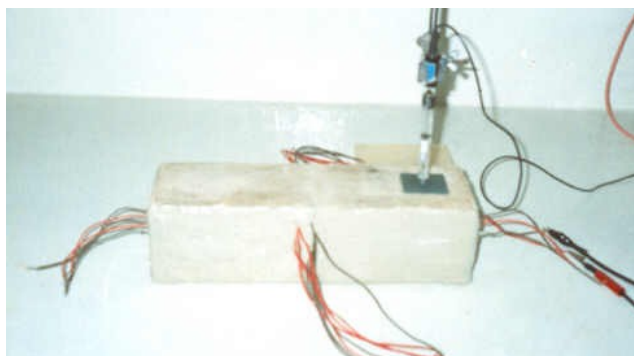


Figura 5.22 – Célula eletroquímica

Para aquisição dos dados, foi realizada uma polarização anódica de -10 mV em relação ao potencial de corrosão (E_{corr}) da armadura em questão, e uma varredura potenciodinâmica de -10 a $+10$ mV a uma velocidade de 10 mV/minuto.

O valor da resistência de polarização foi obtido através de um programa computacional que, calcula a tangente da curva de variação de corrente em função da variação de potencial. Através do valor da resistência de polarização, chega-se a intensidade de corrosão utilizando a equação de STERN & GEARY (1957), como foi visto no item 4.3.2. A resistência ôhmica foi determinada através da compensação de queda ôhmica no momento do ensaio.

5.6.4.2 – Intensidade Galvânica

As medidas de intensidade galvânica foram obtidas usando um amperímetro de resistência nula acoplado a um multímetro, onde a intensidade galvânica era lida diretamente em μA , após um período de estabilização de 2 minutos (CASTANHEIRA, 1997). A figura 5.23 apresenta a curva de estabilização de intensidade galvânica para definição do tempo de 2 minutos para a presente pesquisa.

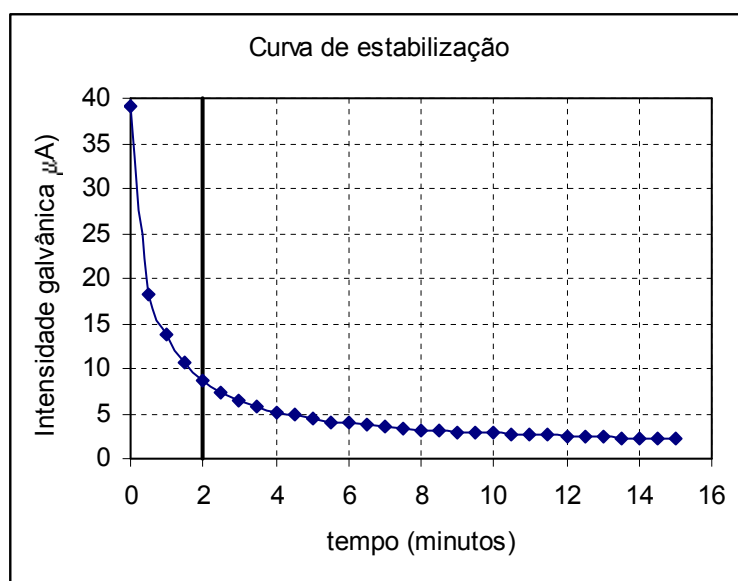


Figura 5.23 – Curva de estabilização de intensidade galvânica.

As leituras eram feitas ligando-se as barras de aço carbono aos eletrodos de aço inoxidável. Inicialmente, as leituras eram feitas ligando-se a barra a apenas um eletrodo e posteriormente ligando-se a mesma barra a 2 eletrodos, ou seja, aumentando a relação área catódica/anódica. A figura 5.24 mostra o equipamento para medidas de intensidade galvânica.

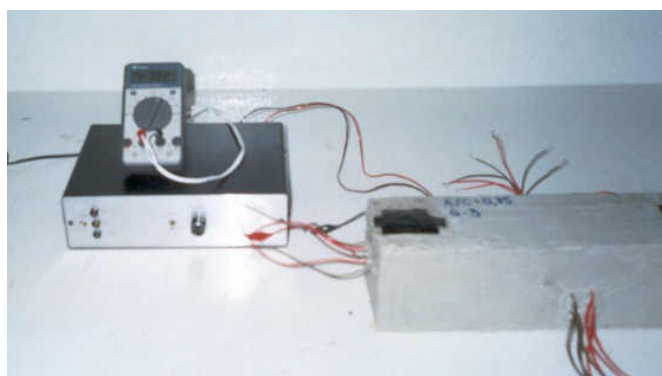


Figura 5.24 – Equipamento para medidas de intensidade galvânica.

5.7 – ENSAIOS COMPLEMENTARES

Com o intuito de caracterizar a estrutura porosa, avaliar os mecanismos de transporte de água, além de analisar a influência da carbonatação nas propriedades do concreto, foram feitos os seguintes ensaios:

- Absorção de água por capilaridade
- Absorção de água por imersão
- Porosimetria por dessorção

Tais ensaios estão descritos detalhadamente a seguir.

5.7.1 – Absorção de Água por Capilaridade (NBR 9779-95)

A influência da absorção capilar na corrosão de armadura induzida por carbonatação se concentra, basicamente, no transporte de eletrólito (fase aquosa) para o interior do concreto, necessário ao desenvolvimento da célula de corrosão.

Os ensaios de absorção capilar foram realizados segundo a norma brasileira NBR 9779-95, utilizando corpos-de-prova cilíndricos carbonatados e não carbonatados. O procedimento consiste na secagem em estufa a temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$ até constância de massa^{5.3}. Após secagem em estufa, os corpos-de-prova são resfriados em dessecador, e então são pesados e colocados em contato com uma lâmina de água com nível constante de 5 ± 1 mm acima de sua face inferior, de forma que, ocorra a ascensão vertical do líquido, no caso a água, para o seu interior. A evolução de massa dos corpos-de-prova foi monitorada durante 72 horas através de pesagens sucessivas: nas primeiras 3 horas a cada 30 minutos, nas 3 horas subsequentes a cada 1 hora e após este período nas idades de 24, 48, 72 horas após contato com a água. A absorção capilar é obtida segundo a equação

$$C = \frac{A + B}{S} \quad (\text{Equação 5.2})$$

Onde:

C = absorção de água por capilaridade (g/cm²)

A = massa do corpo-de-prova na idade de 72 horas (g)

B = massa do corpo-de-prova seco (g)

S = área de contato do corpo-de-prova com a água (cm²)

^{5.3} Considera-se constância de massa, quando a diferença entre duas pesagens consecutivas do mesmo corpo-de-prova, entre períodos de 24 horas de permanência em estufa, não exceder 0,5% do menor valor obtido.

Para realização do ensaio utilizou-se de um recipiente com tampa e canaleta, que serviram de suporte para os corpos-de-prova, de forma que a face inferior do corpo-de-prova fique completamente exposta, evitando o bloqueio do fenômeno de ascensão capilar.

5.7.2 – Absorção de Água por Imersão (NBR 9778-87)

O ensaio de absorção por imersão foi feito segundo a norma brasileira NBR 9778-87 em corpos-de-prova cilíndricos carbonatados e não carbonatados. O procedimento adotado consiste na secagem em estufa a $105 \pm 5^\circ\text{C}$ até constância de massa. Após secagem os corpos-de-prova são resfriados em dessecador, pesados e colocados em contato com a água, segundo a norma, de modo que permanecesse com 1/3 do seu volume imerso em água nas primeiras 4 horas, 2/3 nas 4 horas subseqüentes e, completamente imersos até completar um total de 72 horas de ensaio. A evolução de massa foi monitorada a cada 30 minutos nas primeiras 4 horas, a cada 1 hora nas 4 horas subseqüentes e, posteriormente nas idades de 24, 48 e 72 horas.

A absorção por imersão é calculada segundo a equação 5.3

$$I = \frac{M_{sat} - M_s}{M_s} * 100 \quad (\text{Equação 5.3})$$

Onde:

I = absorção de água por imersão (%)

M_{sat} = Massa do corpo-de-prova saturado (72 horas) (g)

M_s = Massa do corpo-de-prova seco (g)

5.7.3 – Porosimetria por Dessorção

O procedimento de ensaio consiste de corte e preparação de amostra, como descrito no item 5.7.3.1, com posterior colocação em água de cal até saturação completa e em seguida as amostras são pesadas e armazenadas em recipientes com solução saturada de LiCl, MgCl₂, K₂CO₃, NaBr, KCl, KNO₃, K₂SO₄ e água destilada. A pressão de vapor de água, assim obtida, provém de umidade relativa por volta de 11%, 33%, 43%, 59%, 75%, 86%, 94%, 98% e 100%, respectivamente. São feitos registros periódicos do peso das amostras até estabilização de massa, porém um equilíbrio de peso constante nunca será alcançado porque mudanças

estruturais podem ocorrer (KJELSEN, 1998). Após o final do ensaio, estabilização de massa das amostras, as mesmas são secas em estufa a temperatura de 105°C para obtenção da massa seca das amostras.



[a]



[b]

Figura 5.25 – Foto do ensaio de porosimetria por dessorção. [a] Recipientes para ensaio de porosimetria por dessorção. [b] Controle de umidade relativa no recipiente

O recipiente desenvolvido para armazenar as amostras com solução saturada para controle da umidade relativa, dispunha de dois níveis separados por uma superfície perfurada. No nível inferior é colocada a solução saturada e no superior são colocadas as amostras. A figura 5.25 apresenta os recipientes para armazenamento das amostras.

A relação entre o diâmetro aproximado da abertura do poro que está vazio (seco) a uma certa umidade relativa é dada pela lei de Kelvin, como apresenta a tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Relação entre o diâmetro aproximado do poro que está vazio a uma certa umidade relativa.

Umidade Relativa (%)	Diâmetro do poro (μm)
11%	0,0015
33%	0,0025
43%	0,0035
59%	0,0050
75%	0,0095
86%	0,016
94%	0,04
98%	0,1

Os resultados do ensaio são apresentados em volume de água na amostra em relação à massa seca da mesma (ml/g) em função do diâmetro de poro (μm). Cabe ressaltar a necessidade de fazer uma correção das massas das amostras em relação a uma massa padrão, uma vez que a massa das diversas amostras armazenadas nos recipientes com diferentes umidades relativa não é constante.

5.7.3.1 – Preparação das Amostras da Região das Armaduras

As amostras para realização do ensaio de porosimetria por dessorção (item 5.7.3) foram extraídas dos corpos-de-prova testemunhos através de serra circular de bancada. Amostras foram extraídas do corpo-de-prova testemunho antes da carbonatação e também após o corpo-de-prova carbonatado. A figura 5.26 apresenta fotos da operação de corte das amostras.



Figura 5.26 – Fotos da operação de corte das amostras

As amostras foram extraídas de forma a caracterizar a região do corpo-de-prova onde o conjunto de barras está inserido no mesmo. Inicialmente, o corpo-de-prova testemunho foi cortado transversalmente (figura 5.27[a]), a partir destas fatias retirou-se as amostra por região correspondente à posição das armaduras em corpos-de-prova de corrosão, como mostra a figura 5.27 [b] e [c]. As linhas em vermelho destacam as linhas de corte para extração das amostras. A figura 5.27 apresenta a sequência completa para a extração das amostras.

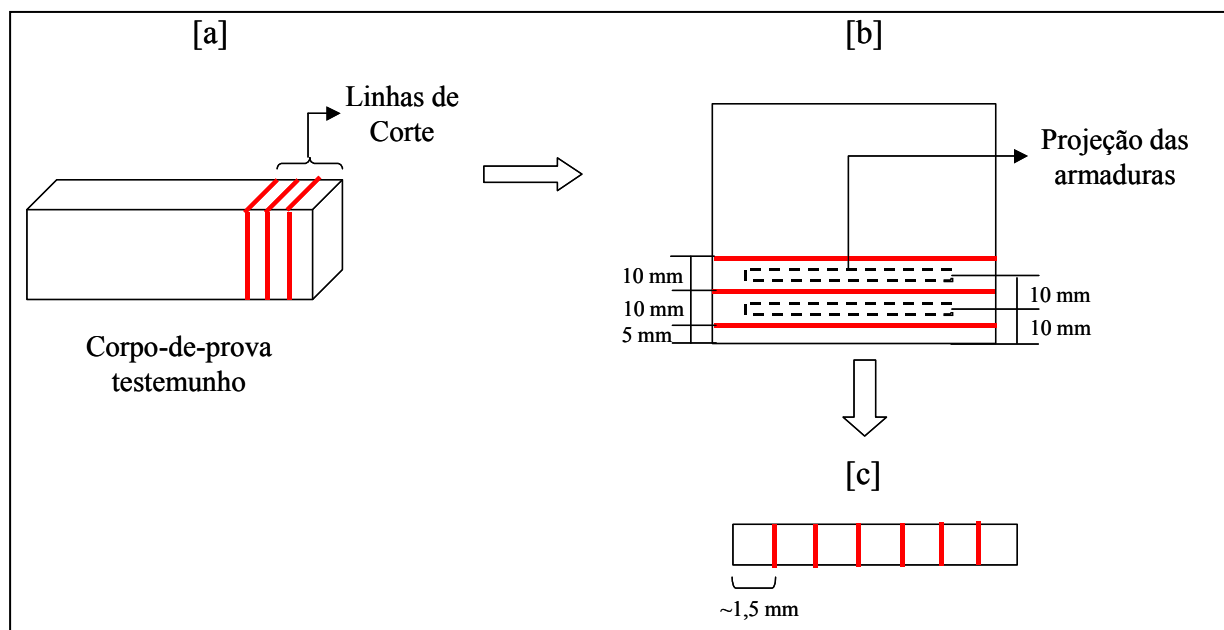


Figura 5.27 – Esquema da operação de corte das amostras

5.8– Caracterização dos Materiais

5.8.1 – Cimento

O cimento utilizado para a confecção dos corpos-de-prova foi o CP II–F32, ou cimento Portland composto com filler, da marca CIPLAN (Cimento Planalto S.A.), comum na região do Distrito Federal. A análise química e as propriedades físicas do cimento utilizado estão apresentadas na tabela 5.4, e os respectivos ensaios foram realizados no Laboratório de Furnas – Centrais Elétricas.

Tabela 5.4 – Análise química e propriedades físicas do cimento

PROPRIEDADES DETERMINADAS CP II F-32		CP II-F32	Limite NBR 11578/91
Massa específica (g/cm ³)		3,04	---
Finura	resíduo na peneira 200 (%)	2,9	≤ 12
	resíduo na peneira 325 (%)	12,0	---
	área específica (cm ² /g)	4.000	≥ 2600

Tempos de Pega	Índice de Pega (h:min)	2:00	$\geq 1:00$
	Fim de Pega (h:min)	3:20	$\leq 10:00$
Água de Consistência – Pasta (%)		27,0	---
Resistência à Compressão (MPa)	3 dias	20,3	≥ 10
	7 dias	22,4	≥ 20
	28 dias	29,6	≥ 32 e ≤ 49
Componentes Químicos (%)	perda ao fogo	5,16	$\leq 6,5$
	resíduo insolúvel	10,38	$\leq 2,5$
	trióxido de enxofre (SO ₃)	2,81	$\leq 4,0$
	óxido de magnésio (MgO)	4,05	$\leq 6,5$
	dióxido de silício (SiO ₂)	25,95	---
	óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)	3,25	---
	óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	4,68	---
	óxido de cálcio (CaO)	52,99	---
	óxido de cálcio livre (CaO)	1,13	---
	Alcalis óxido de sódio (Na ₂ O)	0,34	---
	Totais óxido de potássio (K ₂ O)	0,77	---
	equivalente alcalino em Na ₂ O	0,85	---
	Sulfato de cálcio (CaSO ₄)	4,78	---

5.8.2 – Areia

O agregado utilizado na presente pesquisa é uma areia natural, proveniente do rio Corumbá, estado de Goiás. Os ensaios utilizados para a caracterização e os respectivos resultados estão dispostos na tabela 5.5.

Tabela 5.5 - Caracterização da areia utilizada

Ensaio	Norma	Resultado
Massa específica (g/cm ³)	NBR 9776-87	2,62
Massa unitária no estado solto (Kg/dm ³)	NBR 7251-82	1,44
Massa unitária no estado compactado seco (Kg/dm ³)	NBR 7810-83	1,55

A distribuição granulométrica da areia está representada na figura 5.28, tal ensaio foi realizado segundo a NBR 7217-87. As linhas pontilhadas mostram os limites impostos pela NBR 7211-83 para uma areia tipo média, zona 3. Sua dimensão característica máxima é 4.8 mm e seu módulo de finura 2.63.

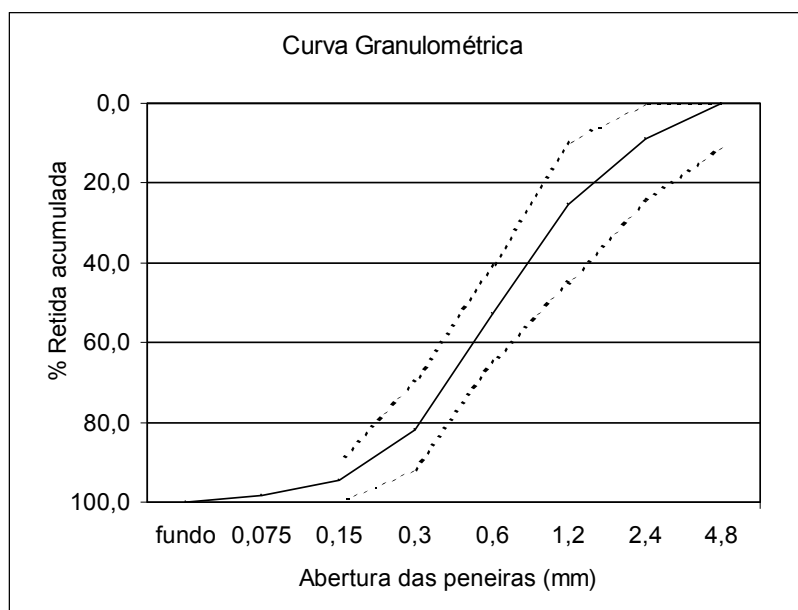


Figura 5.28: Curva granulométrica da areia utilizada

CAPÍTULO 6

APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

6.1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos no programa experimental. Primeiramente, são apresentados os resultados de porosimetria por dessorção, com finalidade de caracterização da estrutura porosa dos 4 grupos de ensaios, nas duas camadas (10mm e 20 mm) onde estão inseridas as armaduras, com estrutura carbonatada e não carbonatada. Em seguida, são apresentados os ensaios complementares de absorção capilar e absorção por imersão, em estruturas carbonatadas e não carbonatadas.

Terminada a apresentação dos resultados de caracterização da estrutura porosa e de avaliação dos mecanismos de transporte de água, são apresentados os resultados dos ensaios realizados no corpo-de-prova de corrosão, para monitorar a movimentação e fixação no mesmo, ou seja, teor de umidade, conteúdo de umidade interno e leituras no sensor de umidade.

Em seguida são apresentados os resultados referentes às medidas eletroquímicas (*icorr*, *E0*, *Rc* e *Igal*) em relação as diferentes condições de umidades impostas, e as correlações entre as medidas eletroquímicas e as utilizadas para monitorar a movimentação e fixação de água no concreto. E, por último são apresentados os resultados de profundidade de carbonatação.

6.2 – ESTRUTURA FÍSICA DOS GRUPOS DE ENSAIO

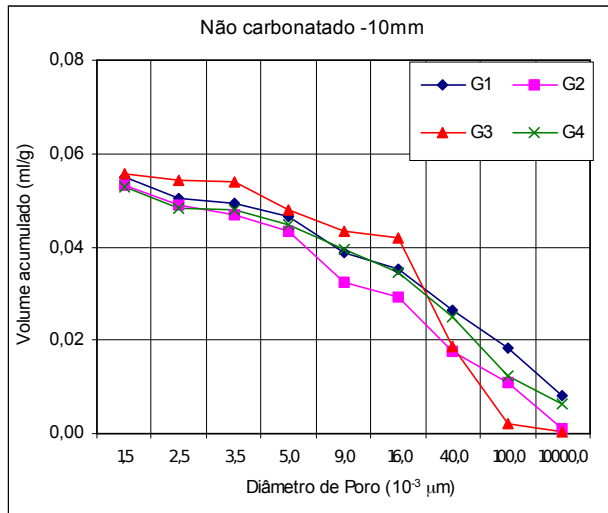
A caracterização da estrutura física foi realizada através das técnicas de porosimetria por dessorção de vapor de água, com finalidade de caracterização da estrutura porosa, e ensaios de absorção capilar e absorção por imersão, para avaliação dos mecanismos de transporte de água.

6.2.1 – Porosimetria por Dessorção

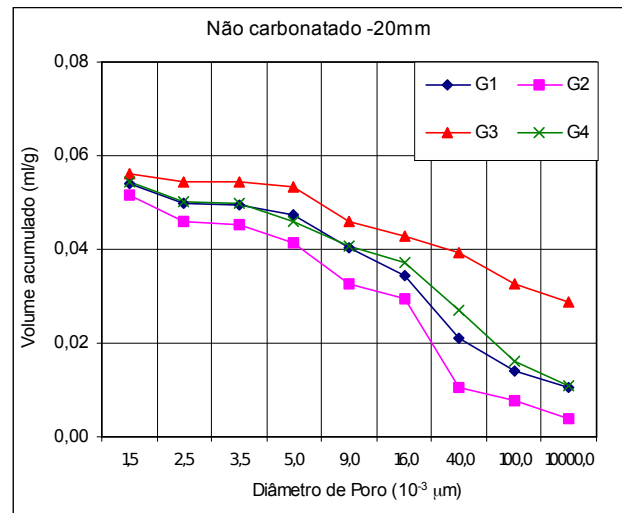
A caracterização da estrutura porosa das argamassas dos 4 grupos de estudo foi realizada através da técnica de porosimetria por dessorção de vapor de água, a qual se aplica a faixa de poros entre 0,0015 e 0,1 μm , onde a perda ou saída de água ocorre por evaporação. Os resultados do ensaio são apresentados de duas formas, e foram elaborados com base nos dados apresentados no anexo B:

1. Perfil acumulado de distribuição de tamanho de poros

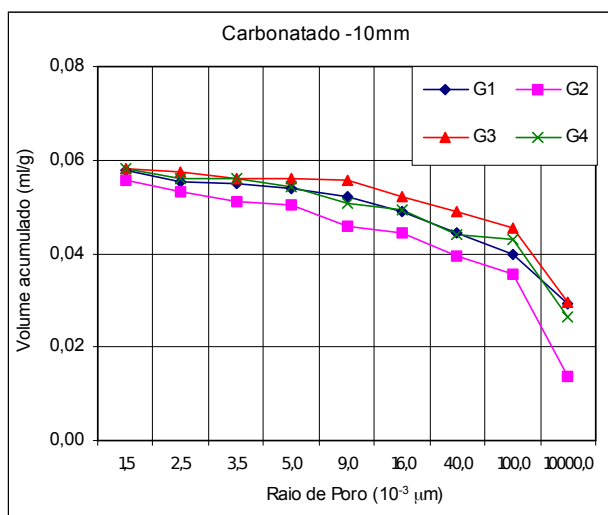
2. Volume de poros, distribuído em 4 faixas de tamanho de poros distintas: $< 0,003 \mu\text{m}$, $0,003$ a $0,005 \mu\text{m}$, $0,005$ a $0,05 \mu\text{m}$ e $0,05$ a $0,1 \mu\text{m}$.



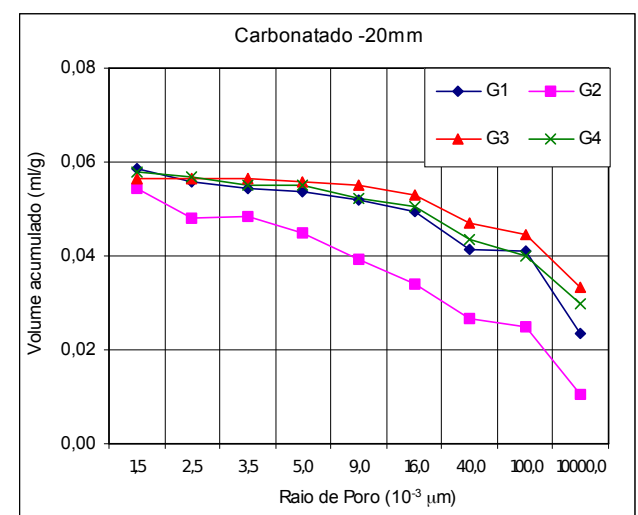
[a]



[b]



[c]



[d]

Figura 6.1 – Perfil acumulado de distribuição de tamanho de poros

A figura 6.1 apresenta o perfil de distribuição de tamanho de poros acumulado, dos grupos de estudo, com estrutura não carbonatada (a e b) e carbonatada (c e d), nas camadas de 10 mm (a e c) e 20 mm (b e d). Podemos observar a influência do consumo de cimento no volume de poros. Os grupos de estudo com menores consumos de cimento (G1 e G3) apresentam menor volume de poros para a faixa analisada, com exceção para o grupo G3 na camada de 10mm, não carbonatada, onde esta tendência não ficou clara.

Para realização de uma análise mais minuciosa, faz-se necessária a apresentação da figura 6.2, que mostra o volume de poros distribuído em 4 faixas de tamanho de poros. Os gráficos são divididos em: não carbonatados (a e b), carbonatados (c e d) e camada de 10mm (a e c), 20mm (b e d).

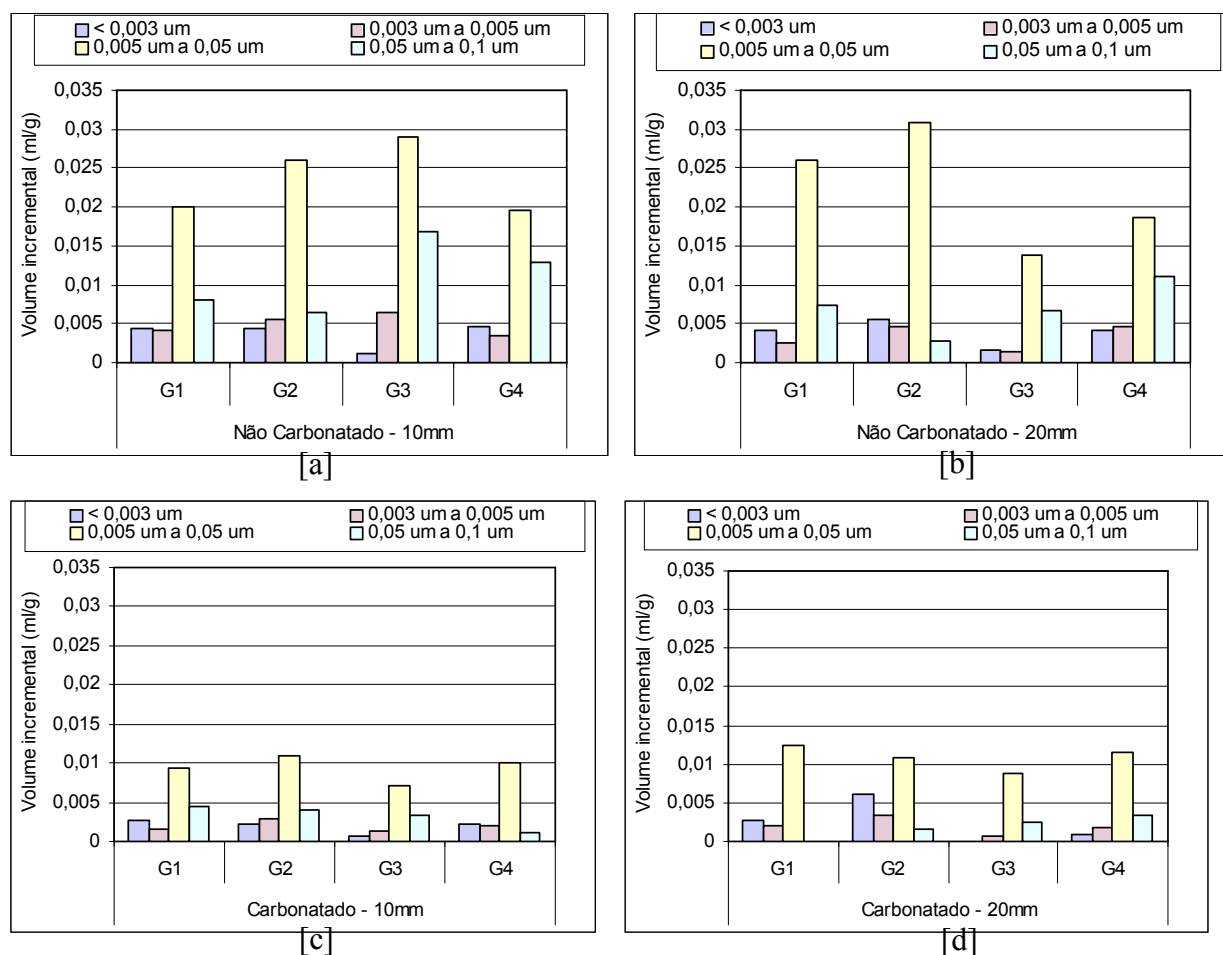


Figura 6.2 – Distribuição de tamanho de poros por faixas de diâmetro dos mesmos

Para as estruturas não carbonatadas, observamos a faixa de poros de 0,005 a 0,05 μm como a predominante, perante as demais. Os grupos com maior relação água/cimento (G3 e G4) apresenta também volume de poros significativo na faixa de 0,05 a 0,1 μm , indicando um volume de poros maior, nos diâmetros maiores, não analisados pela porosimetria por dessorção. O aumento no volume de poros para esta faixa analisada, para os grupos com maior consumo de cimento também ficou evidenciado neste tipo de análise, salvo as observações para o grupo G3 na camada de 10mm.

O refinamento de poros promovido pela carbonatação é evidente, ao comparar as figuras 6.2 [a] e [b], com estrutura não-carbonatada e [c] e [d], com estrutura carbonatada. A faixa que apresenta o maior volume de poros para estruturas carbonatadas é a de 0,005 a 0,05 μm , porém em menor escala.

A porosimetria por dessorção de vapor de água se mostrou importante na avaliação da estrutura porosa, para a faixa de poros a que se aplica. Mesmo que os resultados absolutos apresentados pela técnica não sejam conclusivos, para uma análise comparativa os mesmos são válidos. São necessários mais estudos para o aprimoramento da técnica, uma vez que é uma técnica pouco utilizada.

6.2.2 – Absorção Capilar, Absortividade e Absorção por Imersão

A análise da absortividade complementa os resultados de absorção capilar, uma vez que caracteriza o fenômeno da absorção e fluxo de água pela porosidade, e avalia a tendência de maior ou menor absorção em um dado tempo. Somente o dado de absorção capilar, em g/cm^2 , traduz um conjunto de fenômenos que ocorre e, são função da estrutura de poros, principalmente.

A tabela 6.1 apresenta o resultado de absorção capilar e absorção por imersão medidos na idade de 72 horas, conforme prescrito pelas respectivas normas. Tais resultados representam a média obtida do ensaio de três corpos-de-prova de cada grupo de estudo, com estrutura carbonatada ou não. Visando complementar a avaliação do comportamento dos grupos de estudo em relação ao mecanismo de absorção capilar, determinou-se também a absortividade.

A absorção capilar e absorção por imersão apresentaram a mesma tendência quanto à influência da relação água/cimento, consumo de cimento e carbonatação. Quanto à relação água/cimento, observa-se que quanto maior a mesma, grupo G3 e G4, é maior a absorção capilar e também a absorção por imersão, como tem sido comprovado por diversos trabalhos (BAUER, 1995; BAUER et al, 2001; PESSÔA, 2002). As alterações da porosidade promovidas por um menor consumo de água nas argamassas podem ser atribuídas à presença de poros capilares de menores diâmetros e, muito menos intercomunicáveis, resultando assim, menores volumes absorvidos e menor altura de ascensão (HELENE, 1993). A influência da relação água/cimento na estrutura porosa dos grupos de estudo não ficou evidente no ensaio

de porosimetria por dessorção de vapor de água, provavelmente, porque as modificações estruturais decorrentes deste parâmetro, ocorrem em uma faixa de diâmetro de poros superior a aquela analisada pela técnica.

Tabela 6.1 – Absorção capilar, absortividade e absorção por imersão dos grupos de estudo.

	Não carbonatado				Carbonatado			
	G1	G2	G3	G4	G1	G2	G3	G4
Absorção capilar (g/cm ²)	1,87	2,13	1,94	2,16	1,75	1,74	1,67	1,88
Absortividade (g/cm ² . min ^{1/2})	0,045	0,037	0,046	0,046	0,080	0,040	0,058	0,082
Absorção por Imersão (%)	9,35	10,51	9,74	11,07	8,92	9,19	8,82	9,92

Os grupos de estudo com maior consumo de cimento (G2 e G4) apresentaram maior absorção capilar e absorção por imersão, o que pode ser relacionado ao maior teor de pasta existente, ou maior teor de fase porosa, comprovado pelo ensaio de porosimetria por dessorção, onde na faixa de poros de 0,0015 µm a 0,1 µm, o maior consumo apresentou maior porosidade.

Do ponto de vista da carbonatação, observa-se que estruturas carbonatadas apresentam menor absorção capilar e absorção por imersão, quando comparadas com estruturas não carbonatadas. Tal fato pode ser explicado, pela carbonatação promover um refinamento (colmatação) dos poros, o qual foi comprovado pela porosimetria por dessorção de vapor de água. A carbonatação contribui à ocorrência de modificações na microestrutura, para a melhoria da porosidade do concreto e argamassas e, conseqüentemente sua resistência frente aos mecanismos de movimentação e ingresso de água e agentes agressivos (HELENE, 1993).

Visando complementar a avaliação do comportamento das argamassas estudadas em relação ao mecanismo de absorção capilar, determinou-se a absortividade, cujos resultados, foram obtidos a partir do ensaio de absorção capilar mostrado nas figuras 6.3 [a] para estrutura não-carbonatada e [b] para estrutura carbonatada. Inicialmente observa-se uma relação próxima da linearidade entre a absorção capilar e a raiz quadrada do tempo. Nesta região, pode-se calcular a declividade da reta obtendo-se o parâmetro absortividade. A absortividade tem o significado de ser uma grandeza que avalia indiretamente a velocidade do fluxo de água para o interior da microestrutura nos instantes iniciais (linearidade).

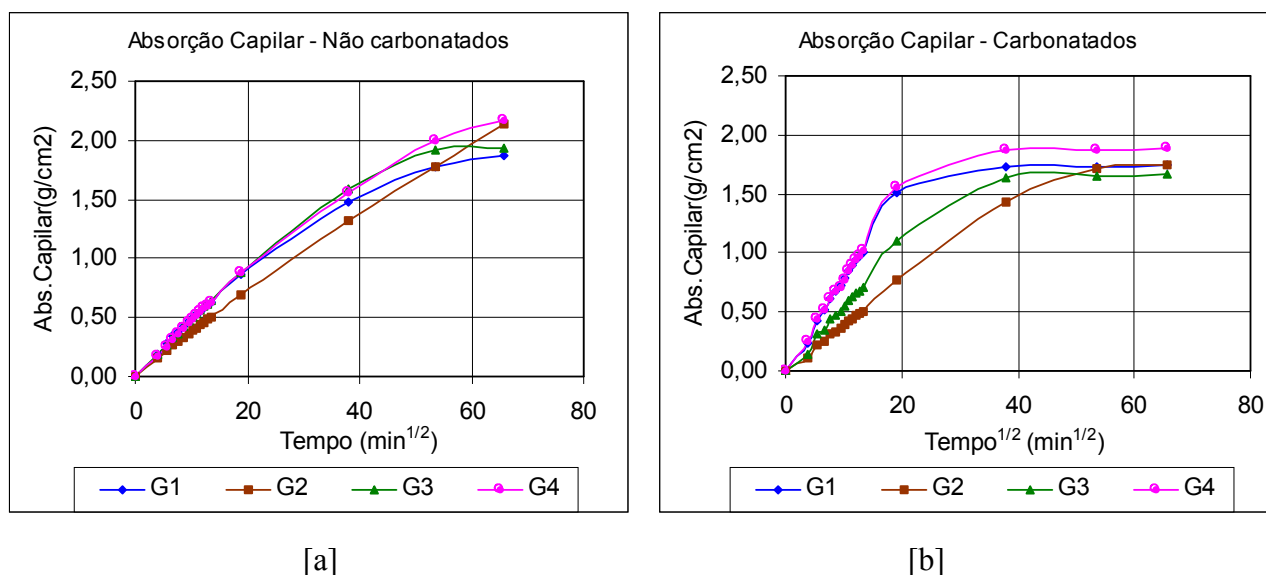


Figura 6.3 – Evolução do ensaio de absorção capilar (g/cm²). [a] Corpos-de-prova cilíndricos não carbonatados. [b] Corpos-de-prova cilíndricos carbonatados.

A absortividade não apresentou uma tendência de aumento ou diminuição com a relação água/cimento ou o consumo de cimento, já, em relação ao processo de carbonatação, houve aumento da mesma para todos os grupos de estudo, quando comparados com estruturas não carbonatadas. Tais resultados se mostram contrários aos observados por BAUER (1995) e BAUER et al (2001), quando a absortividade diminuiu para todas as séries de ensaio, comparativamente às séries não carbonatadas. Isto pode ser explicada pelas maiores relações água/cimento utilizada na presente pesquisa (0,60 e 0,75), quando comparadas a daqueles pesquisadores ($< 0,5$), tenha provocado um refinamento dos poros, sem aumento na tortuosidade dos mesmos, aumentando assim as pressões capilares e conseqüentemente velocidade de absorção.

De forma generalizada, podemos observar nos resultados apresentados, um aumento na absorção de água dos grupos de estudo, com o aumento da relação água/cimento e o consumo de cimento, enquanto que, com relação a carbonatação houve uma diminuição do fenômeno de absorção. Em se tratando de absortividade, esta somente apresenta tendência em relação ao processo de carbonatação, onde houve aumento da mesma para todos os grupos de ensaio, comparativamente a situação não carbonatada.

6.3 – ESTUDO DA CORROSÃO DE ARMADURAS E DA MOVIMENTAÇÃO DE ÁGUA

Neste item são apresentados e discutidos os resultados referentes à avaliação da movimentação e fixação de água, das medidas eletroquímicas para monitorar o processo de corrosão das armaduras, bem como de suas correlações.

6.3.1 – Avaliação da Movimentação e Fixação de Água

A avaliação da movimentação e fixação de água no corpo-de-prova é feita segundo 3 parâmetros, cujos resultados estão apresentados a seguir: teor de umidade, conteúdo de umidade interno e leituras no sensor de umidade.

6.3.1.1 – Teor de Umidade

Paralelamente às medidas eletroquímicas foi monitorada a massa dos corpos-de-prova, para o cálculo do teor de umidade, que corresponde à relação entre a massa de água presente no corpo-de-prova em determinado momento do ensaio e a sua massa seca. As figuras 6.4 de [a] a [d] apresenta os resultados referentes ao teor de umidade, cada qual para um grupo de estudo, em figuras semelhantes aos apresentados pelas medidas eletroquímicas.

Os resultados apresentados mostram o teor de umidade, nas idades relativas às medidas eletroquímicas, onde fazendo uma análise generalizada, podemos observar que a absorção de água é muito mais rápida que a secagem, justificando assim o fato das análises que serão realizadas apresentarem foco no período de secagem. Os períodos delimitados correspondem a dois ciclos de umedecimento e secagem, iniciando pelo umedecimento.

O grupo G1 apresenta variações rápidas do teor de umidade, em relação à situação (umedecimento ou secagem) imposta, quando comparado com os demais, e o G2 apresenta as menores variações, e também a uma velocidade mais lenta, justificando assim os valores de absortividade apresentados para estes grupos (G1 apresentou alta absortividade e G2 baixa), uma vez que este parâmetro avalia indiretamente a velocidade do fluxo de água para o interior da microestrutura. O comportamento dos grupos G3 e G4, com relação água/cimento de 0,75,

foi semelhante entre eles no período de umedecimento, porém na secagem o grupo com menor consumo, G3, apresentou maior intervalo de variação do teor de umidade.

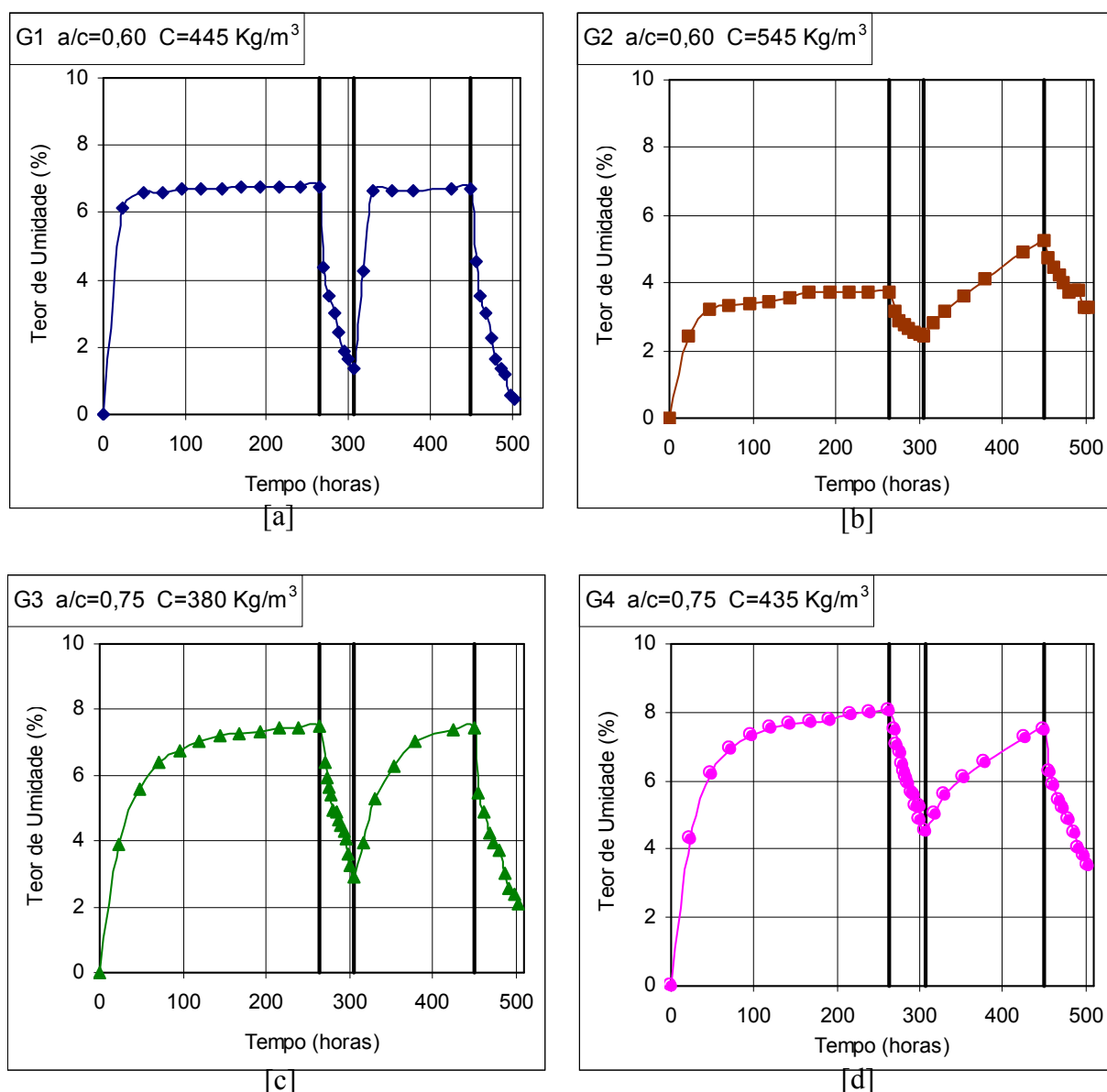


Figura 6.4 – Teor de umidade para os grupos de estudo.

Não se identificou relação entre o teor de umidade, determinado no corpo-de-prova prismático de corrosão, e as avaliações de absorção capilar e por imersão, efetuadas em corpos-de-prova cilíndricos, provavelmente, devido à geometria dos corpos-de-prova e, principalmente da selagem, que foi feita no corpo-de-prova prismático de corrosão, pode ter alterado o fenômeno de absorção de água.

6.3.1.2 – Conteúdo de Umidade Interno

O conteúdo de umidade interno dos corpos-de-prova, dos 4 grupos de estudo, é apresentado nas figuras 6.5 de [a] a [d]. As medidas foram feitas no momento em que se realizaram as medidas eletroquímicas.

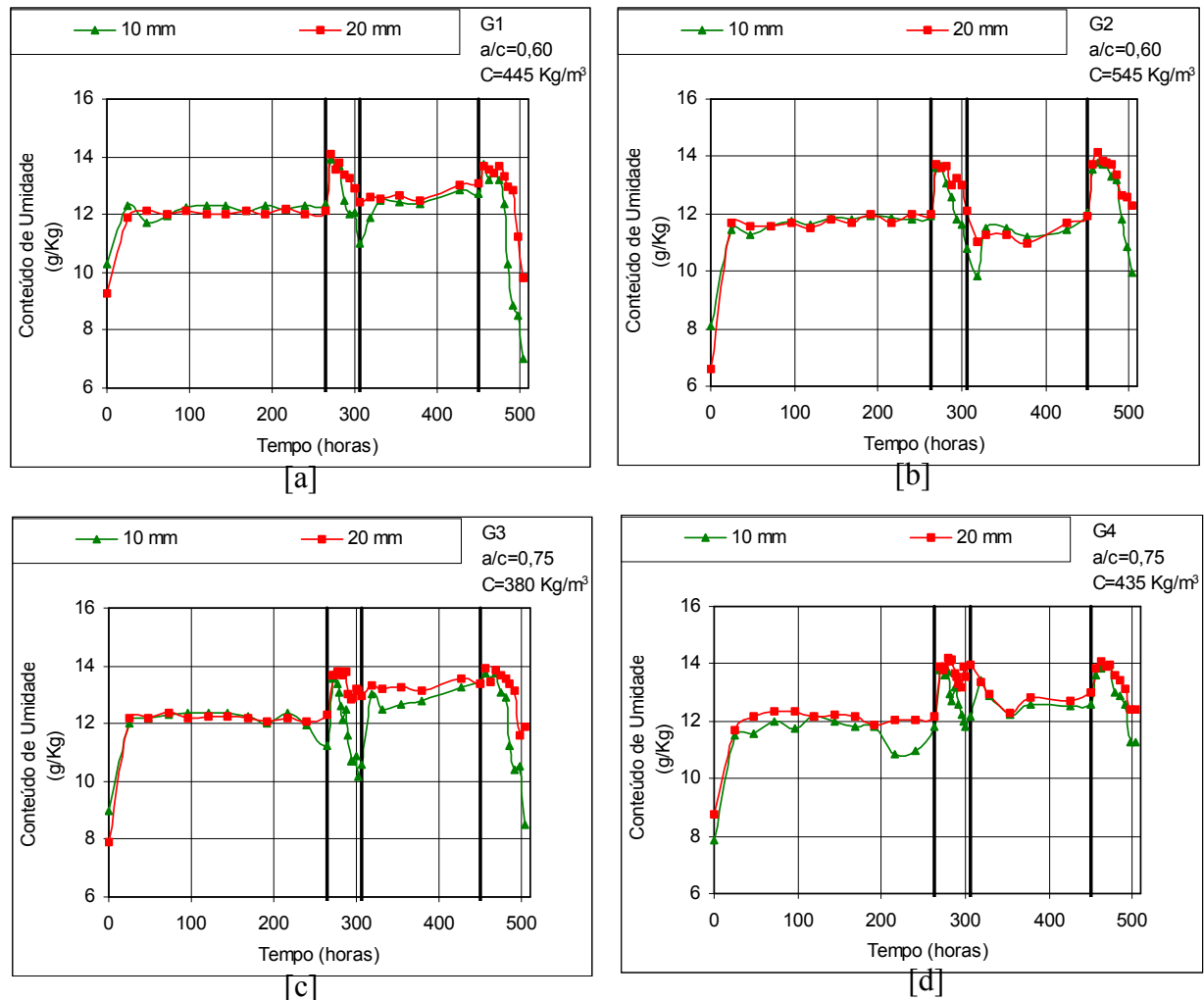


Figura 6.5 – Conteúdo de umidade interno nos grupos de estudo.

Podemos observar o comportamento semelhante para todos os grupos de estudo. No período de umedecimento dos corpos-de-prova, o conteúdo de umidade interno, nas camadas de 10 e 20 mm, é praticamente igual, porém na secagem, fica evidente que as trocas de umidade na camada mais externa são mais intensas, uma vez que, o conteúdo de umidade interno ao corpo-de-prova na camada de 10 mm, tende a ser sempre menor, quando comparado com o de 20 mm. Um comportamento peculiar observado durante o período de secagem, foi o aumento do conteúdo de umidade interno para todos os grupos de estudo nos momento iniciais da secagem. Provavelmente, em virtude da secagem da superfície, a água mais interna ao corpo-

de-prova desloca para a superfície, por pressão capilar, fazendo com que o conteúdo de umidade aumente.

Outra observação importante é que, os grupos com menor consumo de cimento (G1 e G3) se apresentam mais suscetíveis a mudanças no conteúdo de umidade interno que os demais grupos, no período de secagem, fato este evidenciado pelo teor de umidade, onde os grupo com menor consumo, também apresentam menores teores de umidade, ou melhor maior variação no teor de umidade durante o período de secagem.

A figura 6.6 apresenta a relação entre o conteúdo de umidade interno do corpo-de-prova e o seu teor de umidade. Não se observa tendência clara entre os dois parâmetros, uma vez que o teor de umidade trata da água no estado líquido presente no corpo-de-prova, enquanto o conteúdo de umidade tenta simular as alterações no vapor de água do orifício, decorrentes da variação da umidade interna do corpo-de-prova, em função dos mesmos buscarem entrar em equilíbrio.

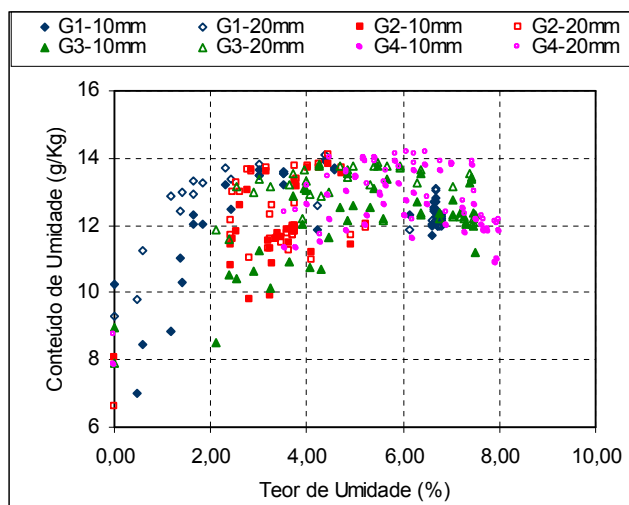


Figura 6.6 – Conteúdo de umidade interno x Teor de umidade.

6.3.1.3 – Leituras no Sensor de Umidade

A figura 6.7 de [a] a [d] apresentam os resultados de leituras no sensor de umidade, cada qual referente a um grupo de estudo. Com relação à visualização do gráfico, as leituras no sensor

de umidade, também, são correspondentes ao momento em se fez as medidas eletroquímicas, e os pares de eletrodos apresentados na legenda são numerados em ordem crescente do par posicionado mais externamente até o mais interno.

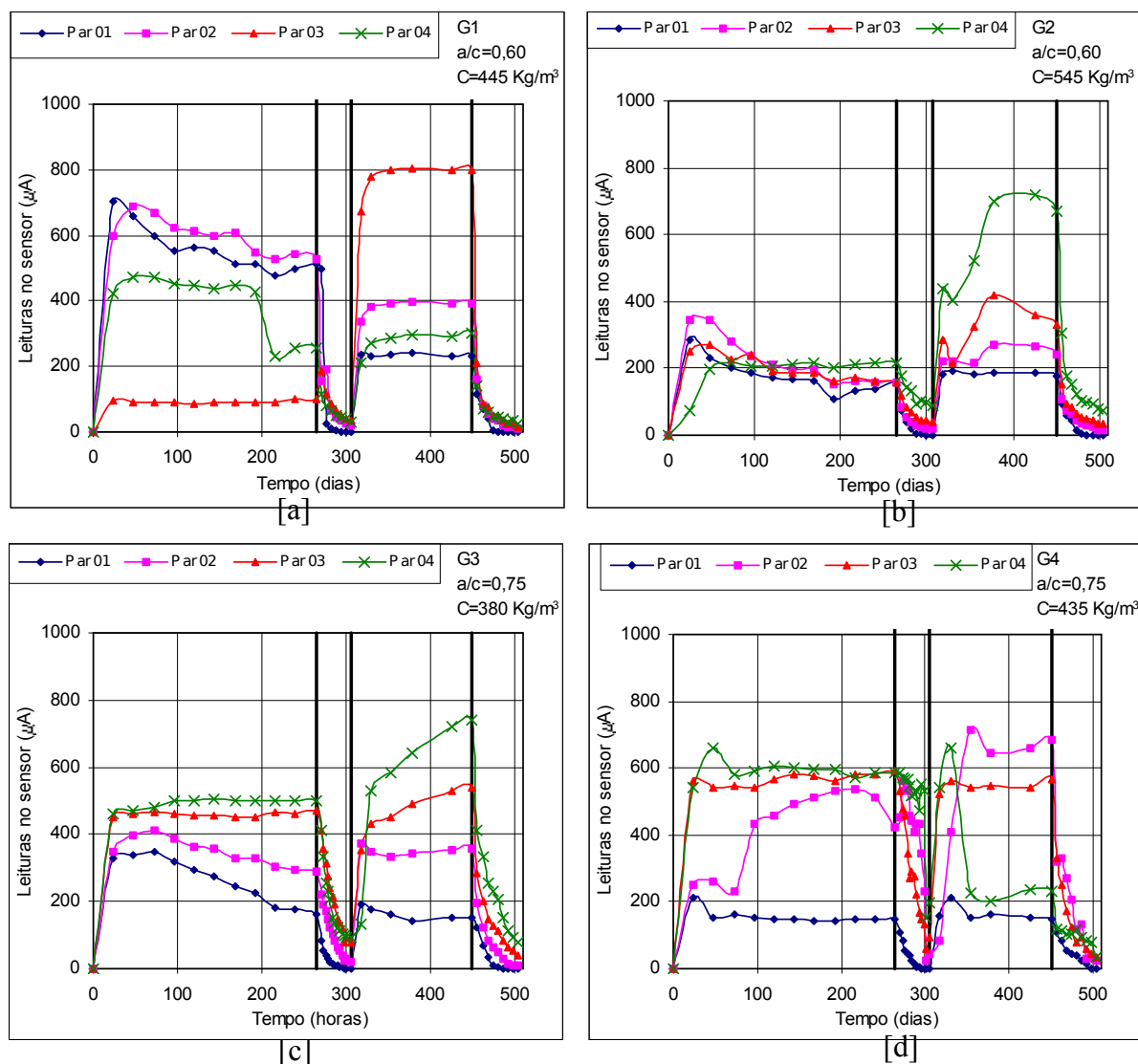


Figura 6.7 – Leituras no sensor de umidade dos grupos de estudo.

A leitura no sensor de umidade, além de nos dar informações sobre a movimentação e fixação de água, nos fornece também, idéia das diferenças na estrutura física, entre as camadas analisadas do material (concreto, argamassa ou pasta de cimento), uma vez que se não houvessem estas variações, o par de eletrodos mais externo apresentaria valores de leituras de umidade maiores no período inicial de umedecimento e, quando o material estivesse saturado tais valores seriam iguais. Estas mudanças estruturais foram mostradas nos resultados de

porosimetria por dessorção de vapor de água, onde analisando apenas duas camadas bastante próximas, estas mudanças já foram evidentes.

O grupo G3 apresentou comportamento bem definido durante os períodos de umedecimento e secagem, não ocorrendo oscilações dos valores apresentados pelos pares de eletrodos, ou seja, o par 1 apresentou durante todos os períodos as menores leituras, independente de período de umedecimento ou secagem, seguido pelos demais pares até o mais interno ao corpo-de-prova (par 4), que apresentou sempre as maiores leituras. Entretanto, o grupo G4 apresentou comportamento bastante indefinido em relação ao posicionamento dos pares de eletrodos, um em relação ao outro, nos períodos de umedecimento, porém apresentando comportamento mais regular na secagem.

O grupo G1, também apresentou resultados mais definidos de leituras de umidade, exceto para o par 3, no primeiro período de umedecimento, que apresentou leituras de umidade menores que as demais, inclusive menores que o par 4, este comportamento pode ser devido à água não ter chegado efetivamente (pequeno volume) a esta camada neste período, uma vez que no segundo período de umedecimento as leituras de umidade deste par se tornaram maiores. O comportamento anômalo do par 4, no primeiro período de umedecimento, pode ser devido a um volume de água retido anteriormente nesta camada, uma vez que no segundo período de umedecimento ele apresentou leituras de umidade bem inferiores.

O grupo G2 apresentou os menores valores de leituras no sensor de umidade, e os demais apresentaram valores da mesma ordem de grandeza, indicando relação com o teor de umidade. A figura 6.8 apresenta a correlação das leituras no sensor de umidade com o teor de umidade [a] e o conteúdo de umidade interno [b], respectivamente.

As figuras 6.8 [a] e [b] foram elaboradas utilizando apenas os períodos de secagem, uma vez que as leituras no sensor de umidade para os períodos de umedecimento são praticamente constantes, o que resultaria em uma nuvem de pontos concentrada em apenas uma região.

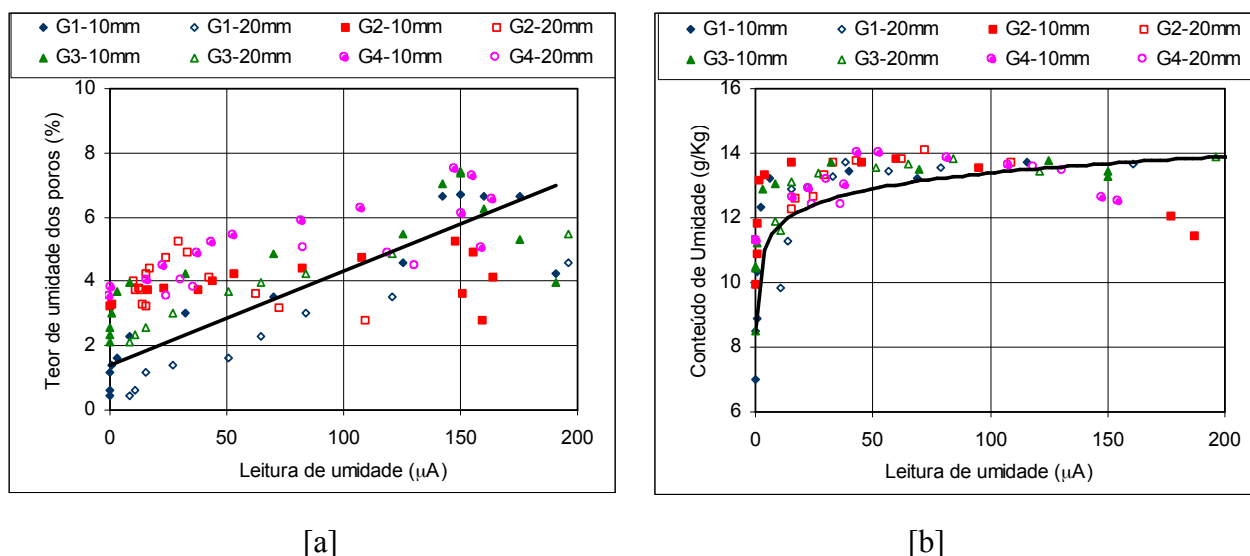


Figura 6.8 – [a] Teor de umidade dos poros x Leituras no sensor de umidade e [b] Conteúdo de umidade dos poros x Leitura no sensor de umidade

Podemos observar uma curva de tendência retilínea para a primeira correlação e uma aproximação do tipo parabólica para a segunda. A melhor relação entre teor de umidade e leituras no sensor de umidade no sensor é devido aos mesmos se referirem a água no estado líquido, presente no corpo-de-prova, enquanto o conteúdo de umidade é devido a água no estado de vapor, presente no orifício, em decorrência do equilíbrio entre o ambiente internamente ao orifício e a camada de concreto em contato com o mesmo.

6.3.2 – Avaliação Eletroquímica da Corrosão

A avaliação do processo de corrosão é feita segundo a técnica de resistência de polarização, a qual apresenta como resultados o potencial de corrosão, a intensidade de corrosão e a resistência ôhmica, e medidas de intensidade galvânica.

Estes resultados são apresentados na forma de 4 figuras identificadas de [a] a [d], cada qual correspondente a um grupo de estudo. As linhas verticais presentes nos gráficos representam as mudanças nas condições de exposição do corpo-de-prova, iniciando por um período de umedecimento, seguido por secagem e assim sucessivamente. O critério utilizado para avaliação das grandezas eletroquímicas foi a média dos valores correspondentes as duas barras posicionadas com 10 ou 20 mm de cobrimento. Cabe ressaltar também que, os

resultados se referem a fase de propagação do processo de corrosão, sendo que a primeira leitura corresponde ao final do período de carbonatação.

6.3.2.1 – Potencial de Corrosão

A figura 6.9 apresenta a evolução do potencial de corrosão em função do tempo, durante períodos de umedecimento e secagem. A discussão dos resultados será feita em sequência conforme a apresentação dos parâmetros eletroquímicos, pois é necessária a confirmação do fenômeno ocorrido, em mais de um parâmetro eletroquímico, para assim poder discuti-lo.

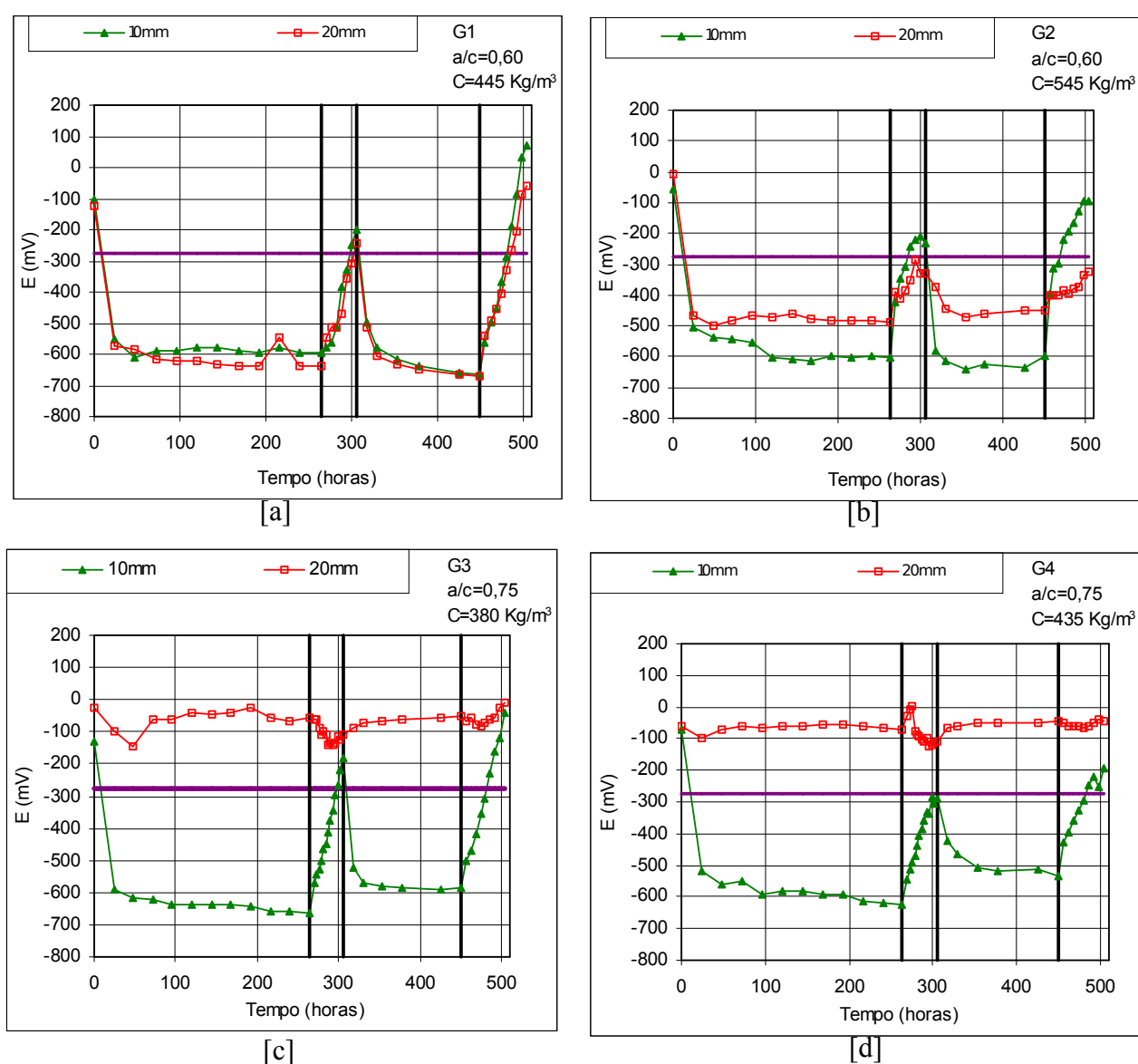


Figura 6.9 – Evolução do potencial de corrosão para os grupos de estudo.

O grupo G1 apresentou valores de potencial de corrosão bem semelhantes para as barras, independente do cobrimento. Já, o grupo G2 apresentou comportamento distinto do G1, demonstrando comportamento dependente da variação do ciclo (umedecimento ou secagem). Neste grupo, as barras com 10 mm de cobrimento apresentaram, nos períodos de umedecimento, potencial de corrosão mais negativos, quando comparadas com as barras com 20 mm de cobrimento, e na secagem, tal comportamento era inverso, passando agora as barras com 20 mm de cobrimento a apresentarem potenciais de corrosão mais negativos.

Os grupos com relação água/cimento de 0,75 (G3 e G4), além de apresentarem valores de potencial de corrosão da mesma ordem de grandeza, mostraram também a particularidade das barras com cobrimento de 20 mm apresentarem potenciais de corrosão mais positivos, quando comparadas com as demais, não indicando assim probabilidade de corrosão. Cabe ressaltar, o cuidado que se teve na carbonatação dos corpos-de-prova, a qual foi acompanhado através da aspersão de indicador químico, tanto nos corpos-de-prova cilíndricos, quanto nos testemunhos, sendo que todos indicavam que a frente de carbonatação já havia ultrapassado as barras com 20mm de cobrimento ao final do ensaio de carbonatação acelerada .

6.3.2.2 – Intensidade de Corrosão

A partir da apresentação dos resultados de intensidade de corrosão (figura 6.10 de [a] a [d]), tem-se a confirmação dos fenômenos indicados pelo potencial de corrosão, permitindo assim a discussão de tais fenômenos, atribuindo-lhes possíveis causas. A faixa horizontal entre 0,1 e 0,2 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ demarcada nas figuras de intensidade de corrosão, limitam a zona de passivação da armadura. Valores de intensidade de corrosão abaixo de 0,1 a 0,2 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ indicam uma corrosão insignificante em termos de vida útil da estrutura (ANDRADE, 1992) e, maiores que 0,2 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ já são considerados prejudiciais.

Os resultados de intensidade de corrosão estão em concordância com os de potencial de corrosão, confirmando inclusive, que as barras com 20 mm de cobrimento para a relação água/cimento de 0,75 não apresentaram corrosão, o qual podemos observar na figura 6.10, que tais barras apresentaram durante todo o tempo intensidades de corrosão inferiores ao limite de 0,2 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$. O fato das barras com 20 mm de cobrimento, da relação água/cimento 0,75, não terem entrado em processo de corrosão, indica que não houve carbonatação naquela

região do corpo-de-prova. Sendo a carbonatação do concreto um fenômeno difuso, provavelmente, o CO_2 penetrou, carbonatando regiões mais internas, porém deixando outras regiões sem carbonatar, em regiões mais externas. E ainda, o fato de acompanhar a frente de carbonatação nos corpos-de-prova testemunhos, além de nos cilíndricos, e todos eles apresentarem profundidades de carbonatação que ultrapassavam as barras de 20 mm, mostra a imprecisão no monitoramento do processo de carbonatação, através da aspersão de indicadores químicos.

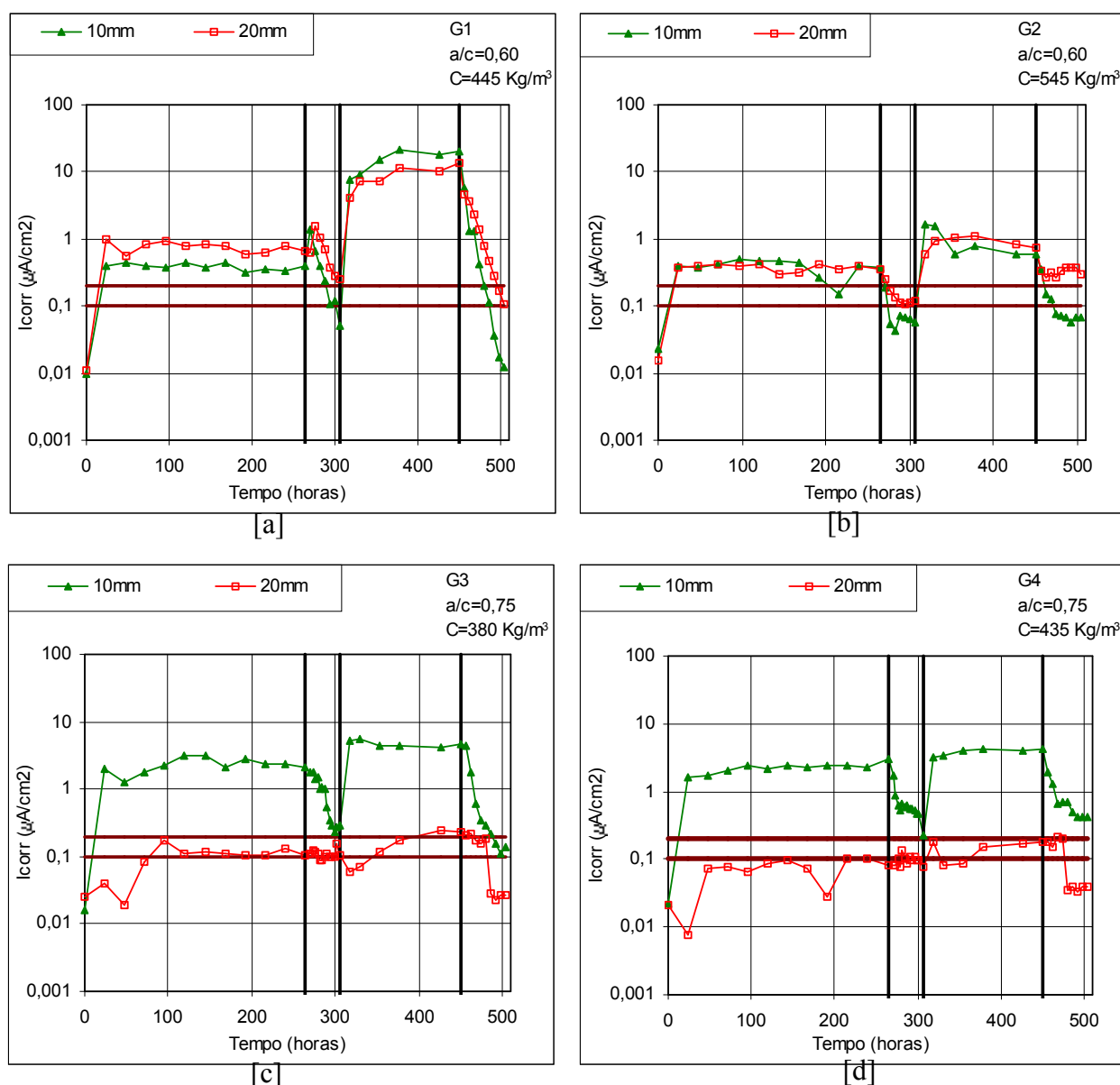


Figura 6.10 – Evolução da intensidade de corrosão dos grupos de estudo.

Quanto ao consumo de cimento, para a relação água/cimento de 0,60, o grupo G2, com maior consumo de cimento, apresentou intervalo de variação de intensidade de corrosão menores, em função dos períodos de umedecimento ou secagem, que o grupo G1. Já os grupos com relação água/cimento de 0,75 apresentaram valores semelhantes de intensidade de corrosão no período de umedecimento e, na secagem a grupo G3, com menor consumo de cimento, apresentou valores de intensidade de corrosão pouco menores que o grupo G4. Possivelmente, o consumo de cimento não tem influência significativa quando se trata de relações água/cimento altas, da ordem de 0,75, porém conclusões precipitadas não devem ser feitas a este respeito, uma vez que as opiniões quanto a influência do consumo de cimento, no que concerne a durabilidade, ainda são contraditórias (PESSÔA, 2002; BUENFELD & OKUNDI, 1998).

O grupo G1 apresentou maiores intensidades de corrosão no segundo período de umedecimento, quando comparado com o primeiro. Os pares de eletrodo 1 e 2 do sensor de umidade que representam, respectivamente, as camadas de 10 e 20 mm, não apresentaram leituras maiores, no segundo período de umedecimento, porém o par 3 mostrou-se com as maiores leituras no sensor de umidade neste período, o que indica uma maior quantidade de água na circunvizinhança das barras, o que pode explicar esta maior intensidade de corrosão.

A figura 6.11 apresenta a intensidade de corrosão em função das leituras no sensor de umidade, para todos os grupos de estudo, visando uma melhor análise da influência da movimentação e fixação de água, na intensidade de corrosão, parâmetro que, dentre os utilizados para avaliar o processo de corrosão, melhor o representa. Tal figura foi desenvolvida apenas com os dados referentes ao período secagem, por apresentar um comportamento mais representativo, em virtude de permitir maior controle, quando comparado com o umedecimento. Os dígitos apresentados após o cobrimento da armadura analisada, representam: 1 para o primeiro período de secagem e, 2 para o segundo período de secagem.

Supostamente, o que influencia as alterações na intensidade de corrosão são o teor de umidade, atrelado à estrutura porosa. O grupo G1 apresenta as maiores variações de intensidades de corrosão, em função das leituras no sensor de umidade, quando comparado com os demais. As barras com 10mm de cobrimento apresentam comportamento diferenciado das de 20mm de cobrimento, onde as primeiras se mostram mais suscetíveis as variações de

umidade. Além do fato das barras de 10mm serem mais externas, facilitando o acesso de água, podemos observar, também, no ensaio de porosimetria por dessorção de vapor de água, que a camada de 10mm, carbonatada, apresenta mais poros na faixa de 0,05 a 0,1 μm , indicando incidência de poros maiores nesta camada, quando comparada com a de 20mm. O grupo G2 apresentou as menores intensidades de corrosão, em decorrência da menor acesso de água a este grupo, mostrado pelo teor de umidade, conteúdo de umidade interno e leituras no sensor de umidade.

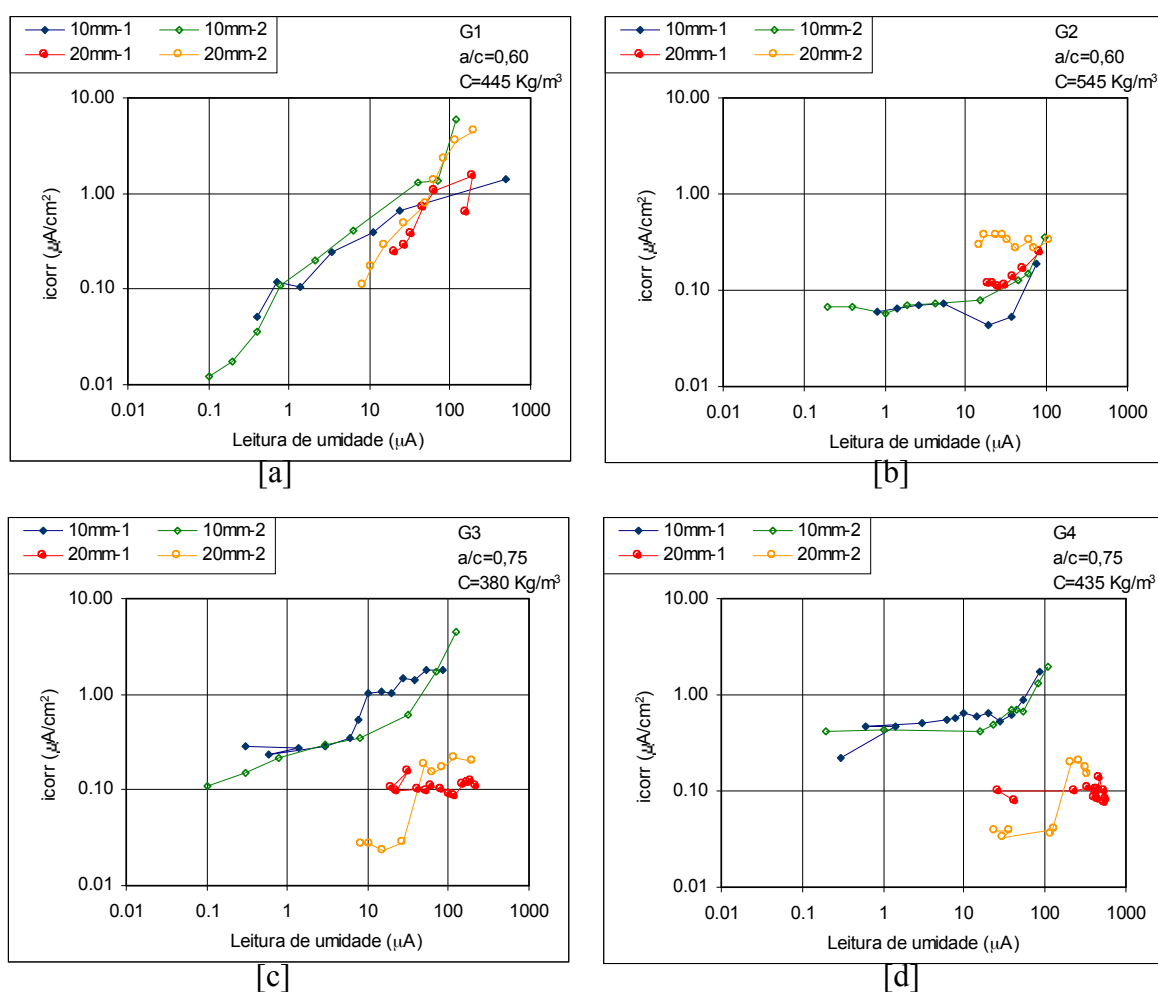


Figura 6.11 – Intensidade de corrosão em função das leituras no sensor de umidade.

Para análise dos grupos com relação água/cimento de 0,75 serão descartados os resultados referentes as barras com 20mm de cobrimento, uma vez que as mesmas não corroeram. A variação da intensidade de corrosão, para o grupo com menor consumo de cimento, foi ligeiramente maior, apresentando menores valores de intensidade de corrosão menores, quando comparado com o G4, em virtude de, na secagem o grupo G3, perder mais água que o

G4, mostrado na figura 6.6 que apresenta o teor de umidade, uma vez que a estrutura porosa dos dois grupos é muito parecida.

6.3.2.3 – Resistência Ôhmica

A figura 6.12 apresenta os resultados obtidos de resistência ôhmica para todos os grupo de estudo. Levando-se em consideração o cobrimento das barras, podemos observar que as barras com 10 mm de cobrimento apresentaram sempre, independente do período de umedecimento ou secagem, as maiores resistências ôhmicas, o que concorda com os resultados apresentados de leituras de umidade, uma vez que, os pares 1 e 2, que representam os cobrimentos de 10 e 20 mm, respectivamente, também apresentaram sempre as menores leituras de umidade.

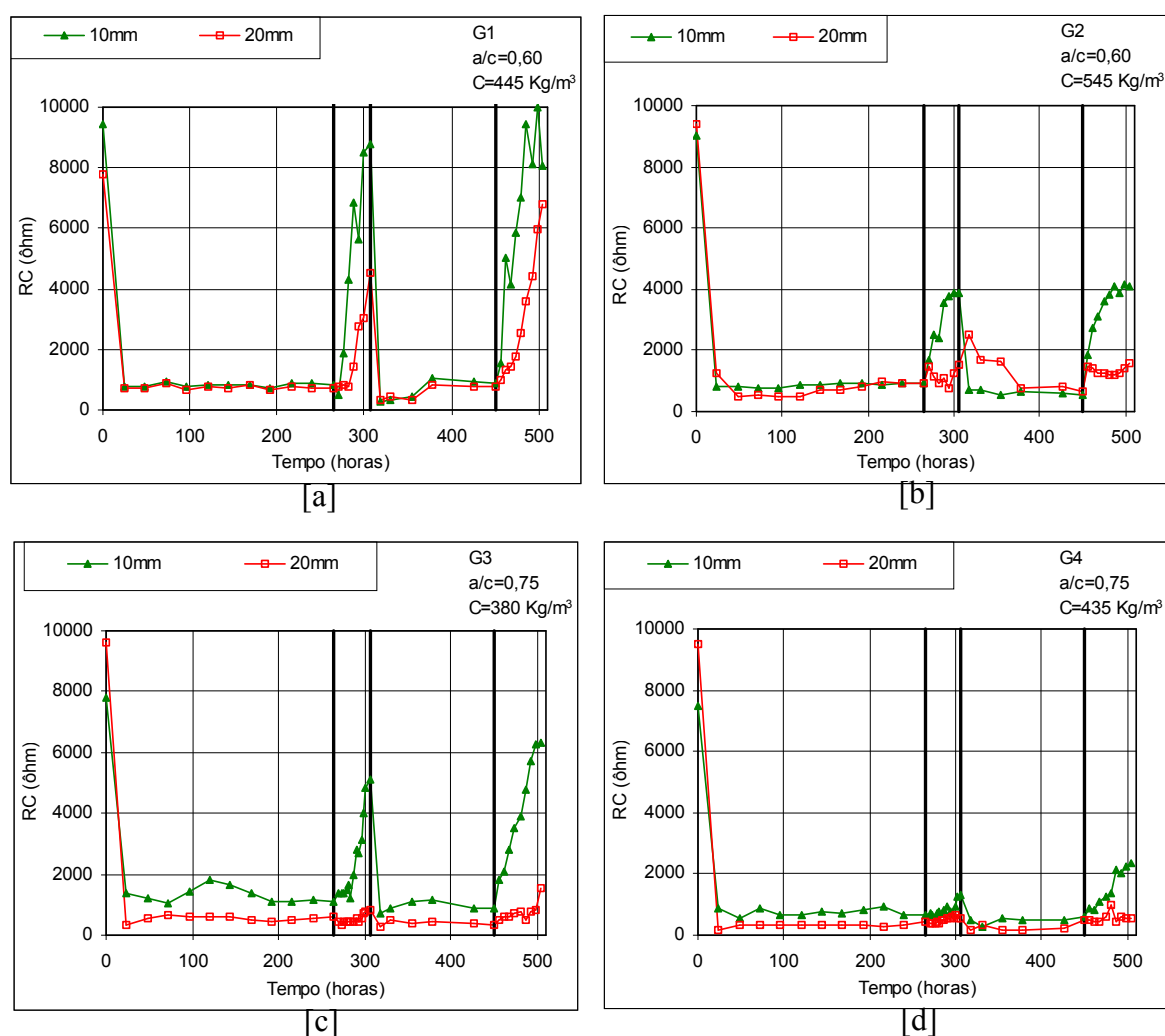


Figura 6.12 – Evolução da resistência ôhmica.

Em relação ao consumo de cimento, os grupos com maiores consumos de cimento (G2 e G4) apresentaram menores intervalos de variação de resistência ôhmica, entre 100 e 4000 Ω , enquanto que os grupo com maiores consumos de cimento variaram entre 100 e 10000 Ω . Correlacionando este resultado com conteúdo de umidade interno ao corpo-de-prova, observamos que os grupos com maiores consumos de cimento também apresentaram, durante todo o período de leituras, os maiores conteúdos de umidade e com menores intervalos de variações, de 14 a 10 g/Kg, enquanto os grupos com menores consumos de cimento apresentaram intervalo de variação entre 14 a 7 g/Kg. Quanto às leituras de umidade, tal fato também se confirma, exceto para o grupo G4, que apresenta valores da mesma ordem de grandeza que o G3.

Em função da relação água/cimento, os corpos-de-prova com maior relação água/cimento (0,75) apresentaram menor resistência ôhmica na secagem, que aqueles com relação água/cimento de 0,60, concordando com os resultados de todos os mecanismos utilizados para avaliar a movimentação e fixação de água.

Relacionando com os demais parâmetros eletroquímicos (potencial de corrosão e intensidade de corrosão) observamos boa correlação, uma vez que, apesar de as barras com cobrimento de 10 mm apresentarem sempre resistências ôhmicas maiores, quando o período era de umedecimento, os valores de resistência ôhmica para os dois cobrimentos é praticamente o mesmo.

6.3.2.4 – Intensidade Galvânica

As medidas de intensidade galvânica têm caráter complementar, para confirmação das observações feitas anteriormente a partir da técnica de resistência de polarização. Tais medidas têm caráter complementar, uma vez que é pouco utilizada para monitorar o processo de corrosão, quando este é induzido por carbonatação, sendo mais utilizada para o caso de cloretos, possivelmente pela maior resistividade do concreto promovida pelo processo de carbonatação.

A figura 6.13 apresenta a evolução da intensidade galvânica para os diversos grupos de estudo. A nomenclatura utilizada na legenda corresponde, primeiramente, a altura do cobrimento da armadura e, os códigos subsequentes, 1 ou 2, significam se as barras de aço carbono estão ligadas a 1 ou 2 eletrodos de aço inoxidável, ou seja, aumentando a área catódica. A intensidade galvânica se comportou de forma particular para cada grupo de estudo, não se observando tendência definida quanto à relação água/cimento e o consumo de cimento.

Como a intensidade galvânica é função da diferença de potencial entre o ânodo e o cátodo e da resistividade do concreto, adotaremos, para fins de análise dos resultados, o valor de potencial do cátodo (eletrodos de aço inoxidável) constante, para todos os eletrodos, e a resistência ôhmica como parâmetro para avaliar a resistividade do concreto.

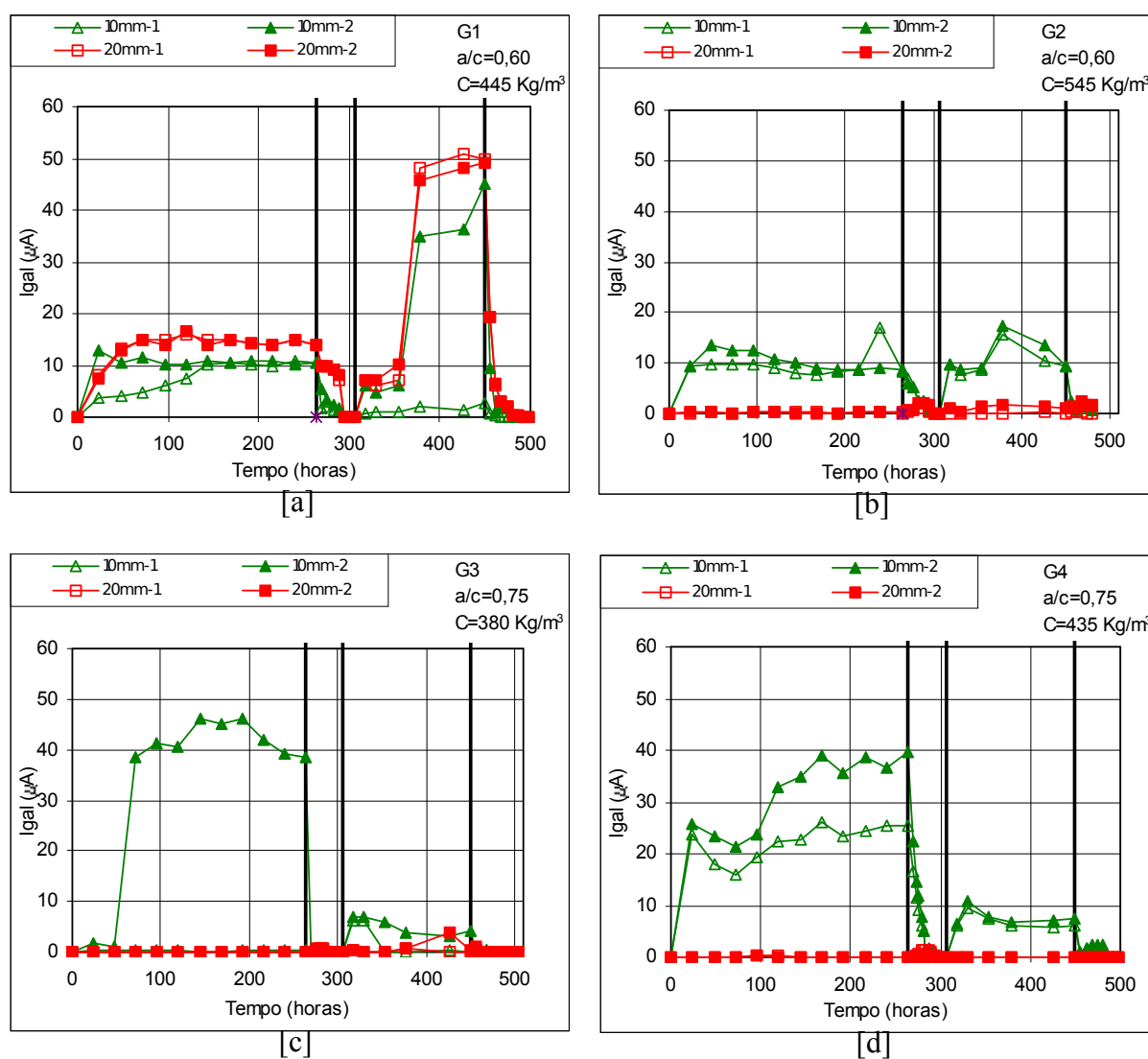


Figura 6.13 – Evolução da intensidade galvânica para os grupos de estudo.

Os valores de intensidade galvânica para o grupo G1 se mostraram com comportamento semelhante à intensidade de corrosão, merecendo destaque para o segundo período de umedecimento onde, a intensidade de corrosão e também a intensidade galvânica se mostraram maiores quando comparadas com o primeiro período, reafirmando as observações feitas para intensidade de corrosão. Já o grupo G2, para as barras com cobrimento de 10 mm, o comportamento de intensidade galvânica e intensidade de corrosão foram semelhantes, porém as barras com cobrimento de 20 mm não apresentaram intensidade galvânica, contrariando assim os resultados de intensidade de corrosão. Isto pode ser devido ao teor de umidade mais baixo, em relação aos demais, apesar de ter implicado em resistências ôhmicas baixas, ou melhor, da mesma ordem de grandeza dos demais grupos, não ter sido suficiente para influenciar na intensidade galvânica. Comparando estes dois grupos com mesma relação água/cimento, observamos que o grupo G2, com maior consumo de cimento, apresentou intensidades galvânicas inferiores ao grupo G1, observação feita também para a intensidade de corrosão, possivelmente pelo maior volume de água presente nos poros do grupo G1, mostrado pelos parâmetros para avaliar a movimentação e fixação de água.

As barras com cobrimento de 20 mm para a relação água/cimento de 0,75 não apresentaram valores de intensidade galvânica, indicando que estas barras realmente não entraram em processo de corrosão, como comentado anteriormente durante a discussão dos resultados de intensidade de corrosão. Comparando-se as duas relações água/cimento, não considerando as barras com 20 mm de cobrimento, observamos que os grupos com maior relação água/cimento apresentaram valores de intensidade galvânica superiores aos demais, no primeiro período de umedecimento, porém no segundo período tal observação se inverte.

Em relação ao aumento da área catódica, podemos observar que houve aumento mesmo que pequeno ou, permanência do valor com apenas um eletrodo, para todas as barras. O aumento da área catódica implica em aumento da intensidade galvânica, quando o processo de corrosão está sendo controlado pelas reações catódicas.

6.3.3 – Correlações entre Medidas Eletroquímicas e a Movimentação e Fixação de Água

Os gráficos abaixo relacionados foram obtidos utilizando apenas o período de secagem, com o intuito de observação de tendências, uma vez que, se acrescentarmos os valores referentes aos períodos de umedecimento, teremos grandes concentrações de pontos em uma mesma região. As correlações são apresentadas individualmente para cada parâmetro eletroquímico, e foram arranjadas em 3 figuras, as quais apresentam o parâmetro eletroquímico em questão, em função do teor de umidade, do conteúdo de umidade interno e das leituras no sensor de umidade, respectivamente.

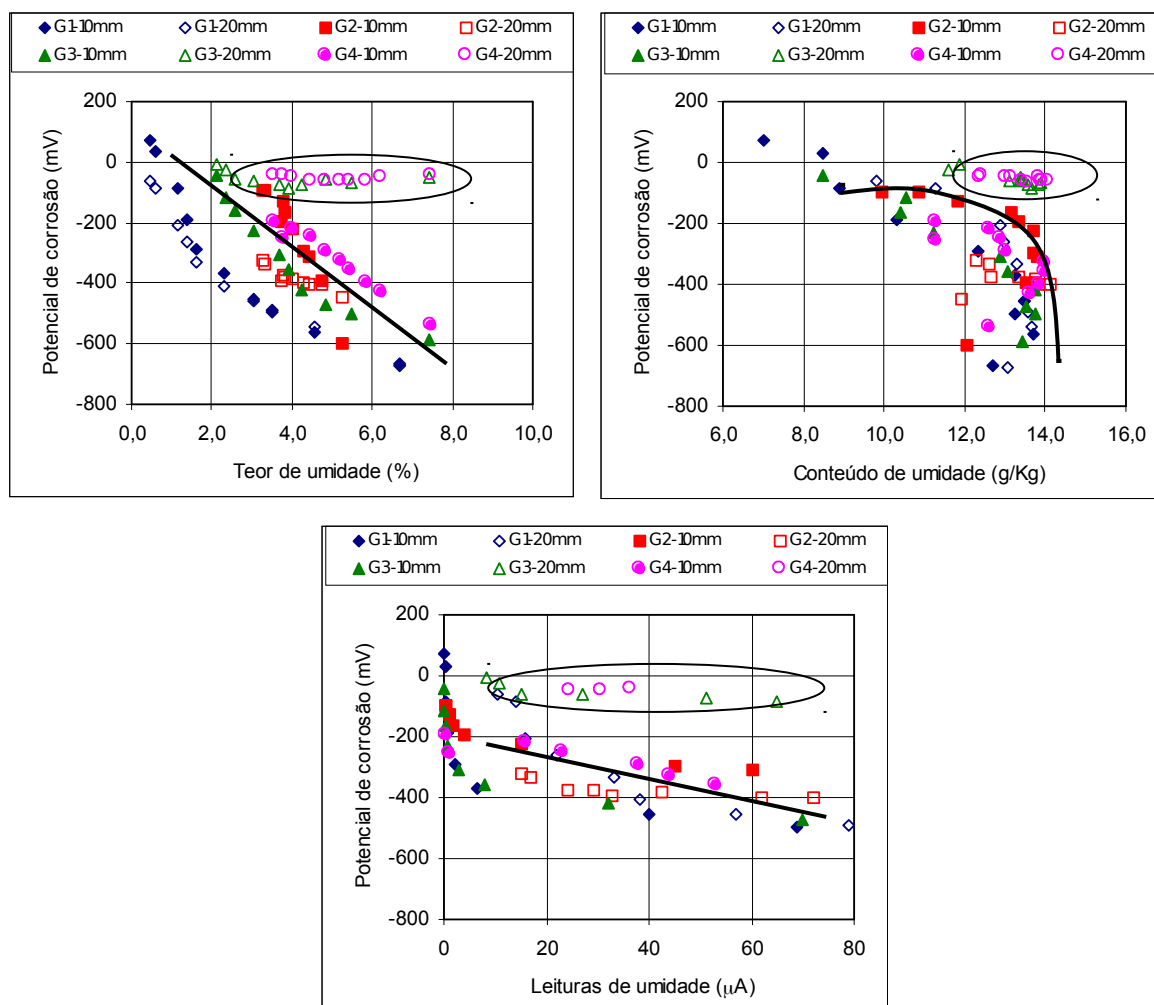


Figura 6.14 – Potencial de corrosão em função dos parâmetros de umidade

A figura 6.14 apresenta as correlações referentes ao potencial de corrosão. Podemos observar que o potencial de corrosão é inversamente proporcional aos parâmetros de umidade, ou seja, aumento no valor do parâmetro de umidade, implica em diminuição do potencial de corrosão. As curvas de tendência apresentadas nos gráfico são do tipo linear para o teor de umidade e leituras no sensor de umidade e, logarítmica para o conteúdo de umidade. Os pontos circulados correspondem às barras com 20 mm de cobrimento dos grupos G3 e G4, que não apresentaram processo de corrosão instalado.

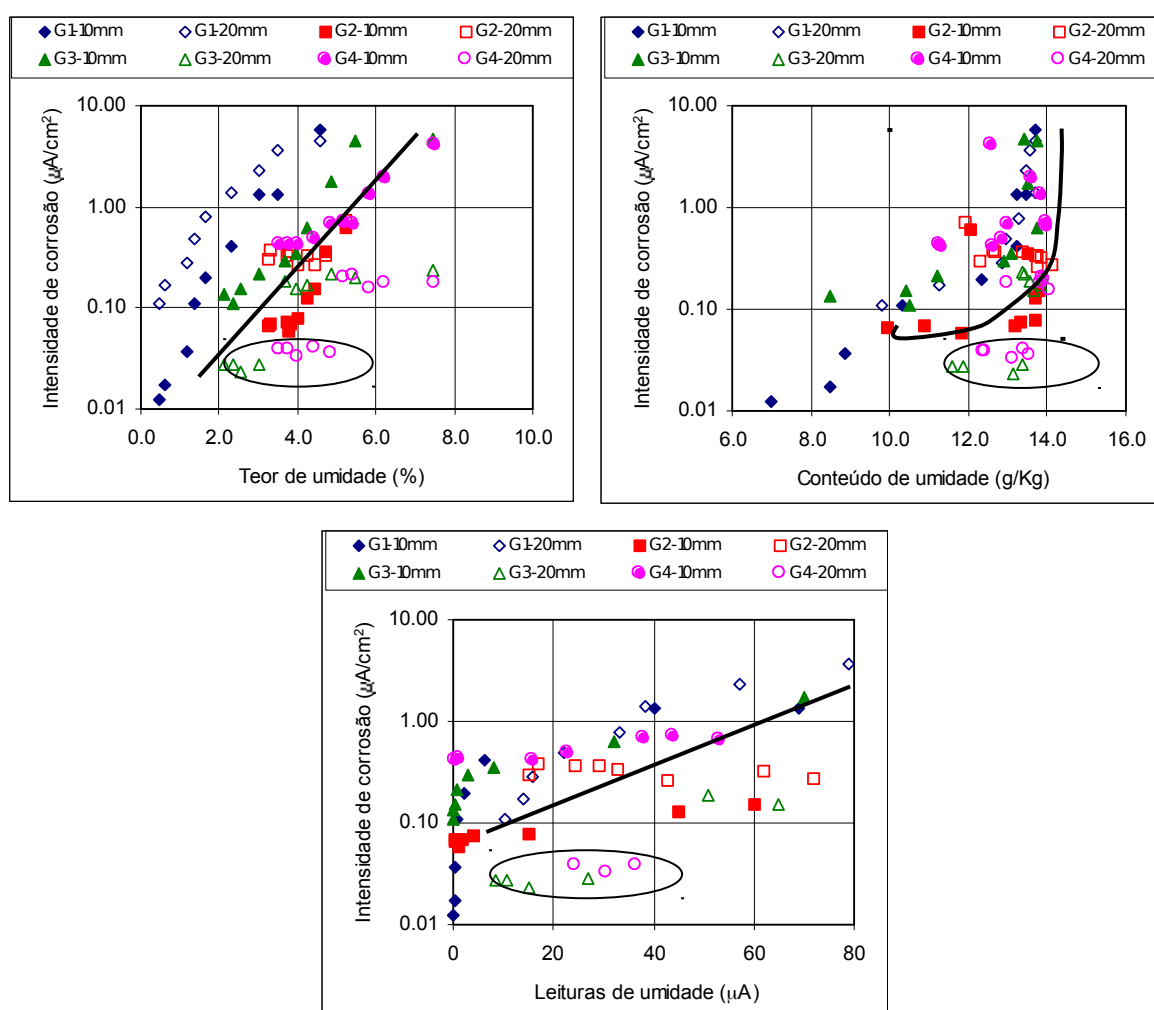


Figura 6.15 – Intensidade de corrosão em função dos parâmetros de umidade

A figura 6.15 apresenta a intensidade de corrosão como parâmetro eletroquímico em questão. Podemos observar linhas de tendência do tipo linear para a intensidade de corrosão em função do teor de umidade e das leituras de umidade no sensor, enquanto para o conteúdo de umidade a linha de tendência se apresentou do tipo exponencial.

A figura 6.16 apresenta a resistência ôhmica em função dos parâmetros de umidade. Podemos observar a tendência linear da resistência ôhmica em função do teor de umidade dos poros e do conteúdo de umidade interno e, tendência logarítmica para as leituras de umidade.

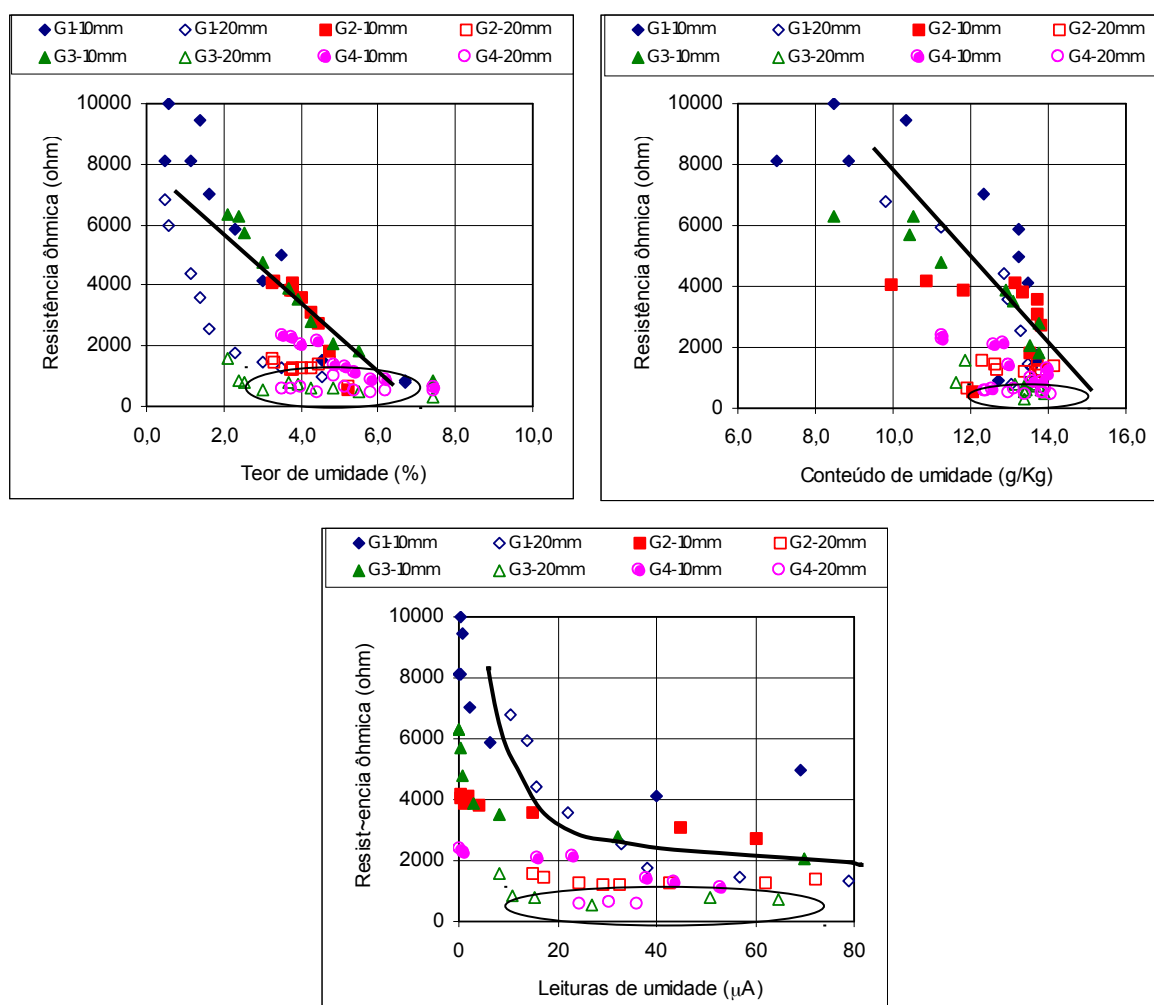


Figura 6.16 – Resistência ôhmica em função dos parâmetros de umidade

A partir das figuras acima apresentadas podemos observar que os parâmetros eletroquímicos apresentam relação direta, ou melhor, do tipo linear com o teor de umidade e as leituras do sensor de umidade, que se referem à água presente no corpo-de-prova, enquanto a relação com o conteúdo de umidade, que se refere ao vapor de água nos orifícios, a relação se torna indireta.

6.4 – PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO

A profundidade de carbonatação foi acompanhada através da aspersão de fenolftaleína em superfície interna do corpo-de-prova cilíndrico, através da fratura do mesmo. Após os corpos-

de-prova cilíndricos indicarem que a frente de carbonatação atingiu a altura de 20 mm, era feita a confirmação nos corpos-de-prova testemunho.

A figura 6.17 mostra as fatias dos corpos-de-prova de todos os grupo de estudo, nas quais foram aplicadas o indicador de fenolftaleína. A fenolftaleína em contato com o concreto não carbonatado, dá ao mesmo uma coloração vermelha, não havendo alteração de cor se o mesmo estiver carbonatado.

As medidas de profundidade de carbonatação foram feitas após 7, 24, 42 e 65 dias do início do ensaio de carbonatação acelerada. A medição da profundidade de carbonatação foi determinada pela média, de 4 medidas de profundidade de carbonatação, em cada fatia recém cortada do corpo-de-prova. Nota-se que o processo de carbonatação foi mais rápido para os corpos-de-prova com maior relação água/cimento (G3 e G4) e menor consumo de cimento (G1 e G3), respectivamente.

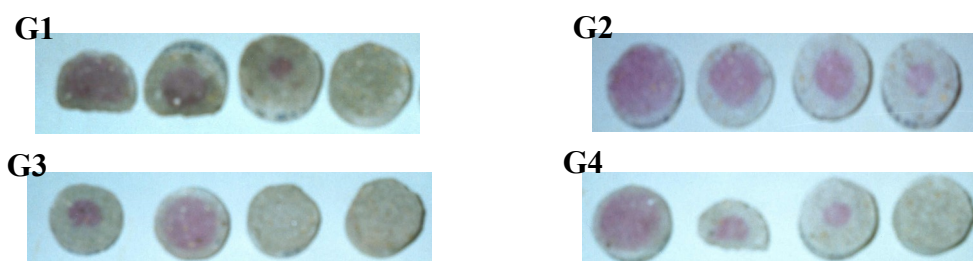


Figura 6.17 – Acompanhamento da frente de carbonatação nos corpos-de-prova cilíndricos

Podemos observar que em todos os grupos de estudo a frente de carbonatação atingiu a altura de 20mm, porém a margem de segurança para o grupo G2 com relação água/cimento de 0,60 e maior consumo de cimento foi menor. As medidas de profundidade de carbonatação feitas nas fatias apresentadas na figura acima podem ser conferidas através da figura 6.18.

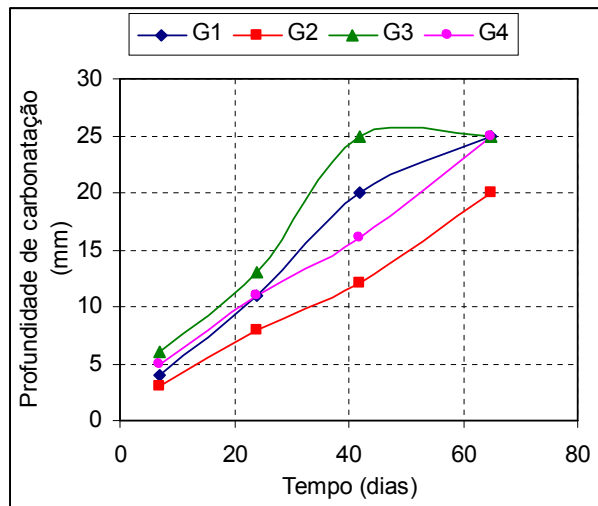
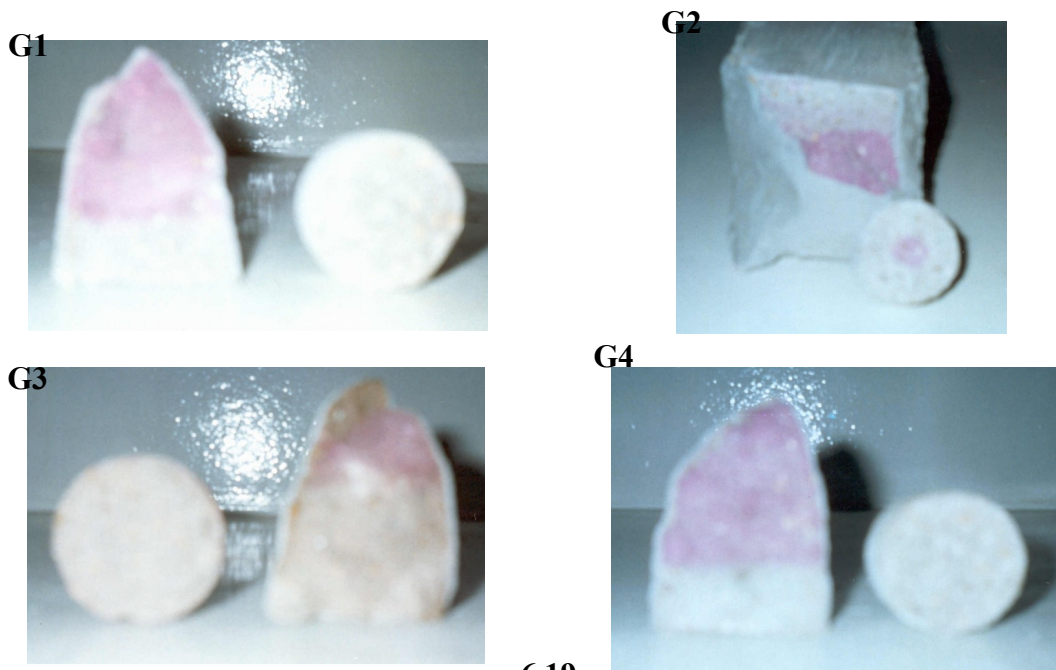


Figura 6.18 – Medidas de profundidade de carbonatação.

A figura 6.19 mostra a confirmação da altura da frente de carbonatação, feita nos corpos-de-prova testemunho. A frente de carbonatação após final do ensaio estava na seguinte altura para os grupos de estudo: G1-23mm; G2-20mm; G3-30mm; e G4-25mm.



Figura

6.19

Situação dos corpos-de-prova testemunho após término da carbonatação.

CAPÍTULO 7

CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1 – CONCLUSÕES

Com base na análise e discussão dos resultados, apresenta-se neste item as principais conclusões obtidas:

- A influência do teor de umidade na corrosão de armaduras ficou evidente, apresentando melhor relação com os parâmetros que avaliam a água internamente ao corpo-de-prova, ou seja, teor de umidade e leituras no sensor de umidade.
- O fator controlador da propagação da corrosão sob efeito de carbonatação é a resistividade, a qual por sua vez, depende do grau de umidade dos poros, bem como da porosidade.
- O comportamento da corrosão de armaduras, em relação aos períodos de umedecimento e secagem, se mostrou dinâmico, ou seja, os resultados obtidos em um período de umedecimento ou secagem, não se reproduz de forma idêntica em outro ciclo.
- Os grupos de estudo com maiores consumos de cimento são os que absorvem mais água, sendo este fato comprovado pelos ensaios de absorção por capilaridade e

absorção por imersão. No entanto, esta maior absorção não refletiu na intensidade de corrosão, afirmando os resultados encontrados por PESSÔA (2002).

- O consumo de cimento não apresentou influência, quanto à estrutura de poros e ao período de propagação da corrosão, nas dosagens com maior relação água/cimento ($a/c=0,75$).
- O conteúdo de umidade interno e o sensor de umidade se mostraram efetivos na avaliação da movimentação de água.
- A carbonatação é responsável por um efetivo refinamento de poros, avaliado pela porosimetria por dessorção de vapor de água.
- A técnica de porosimetria por dessorção de vapor de água se mostrou com potencialidade para análise da estrutura de poros na faixa de poros a que se aplica.

7.2 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A presente pesquisa evidenciou alguns aspectos que merecem estudos mais aprofundados, do ponto de vista do fenômeno avaliado e das metodologias aplicadas. Sendo assim, segere-se para trabalhos futuros:

- Estudo da influência do teor de umidade no mecanismo de corrosão das armaduras para outras relações água/cimento, além das estudadas;
- Estudo detalhado da influência da estrutura de poros nas propriedades de transporte de água;
- Avaliar a influência do consumo de cimento na corrosão de armaduras para relações água/cimento altas, da ordem de 0.75;
- Fazer uma análise comparativa entre a técnica de porosimetria por dessorção de vapor de água e a de porosimetria por intrusão de mercúrio;
- Estudar e desenvolver sensores para o monitoramento do processo de corrosão e também da movimentação de água.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. **NBR 7217**; Agregados - Determinação da composição granulométrica. 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. **NBR 7251**; Agregado em estado solto - Determinação da massa unitária. 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. **NBR 7810**; Agregado em estado compactado seco - Determinação da massa unitária. 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. **NBR 9776**; Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman. 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. **NBR 9777**; Agregados - Determinação da absorção de água em agregados miúdos. 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. **NBR 9778**; Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por imersão - Índice de vazios e massa específica. 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. **NBR 9779**; Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade. 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. **Projeto de Revisão da NBR 6118** – Projeto de Estruturas de Concreto, agosto de 2001.

ATKINS, P. W. “Físico-Química”. Volume 1. Tradução: Horácio Macedo. 6ª Edição. Rio de Janeiro, LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1997

ANDRADE, C.; **ALONSO**, C.; **SARRÍ**, J. “Corrosion rate evolution in concrete structures exposed to the atmosphere”. *Cement & Concrete Composites*, v. 24, P. 55-64, 2002.

ANDRADE, C.; **SARRÍA**, J.; **ALONSO**, C. “Relative humidity in the interior of concrete exposed to natural and artificial weathering”. *Cement and Concrete Research*, 1999, v.29, pp. 1249 – 1259

ANDRADE, C. “Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras”. Editora PINI, São Paulo, 104 p., 1992.

ANDRADE, C.; **GONZALEZ**, J. A. “Tendencias actuales en la investigación sobre corrosión de armaduras”. *Informes de la construcción*, v. 40, n. 398, p. 7-14, nov. Dic, 1988.

ANDRADE, C; **FELIU**, S. “Corrosión y protección metálicas”. Madrid, CSIC, 1991.

BASHEER, L.; **KROOP**, J.; **CLELAND**, D.J. “Assessment of durability of concrete from its permeation properties: a review”. *Construction and Building Materials*, 2001, v. 15, p. 93-103.

BAUER, E. “Avaliação Comparativa da Influência da Adição de Escória de Alto-Forno na Corrosão de Armaduras Através de Técnicas Eletroquímicas”. Tese de Doutorado, USP, São Paulo, 1995.

BAUER, E. **NEPOMUCENO**, A. A. **POZZAN**, E. “Caracterização da estrutura de poros em microestruturas carbonatadas, e sua relação com alguns mecanismos de transportes”. *Workdur – Workshop sobre Durabilidade das Construções*. São José dos Campos, SP, 29 e 30 de novembro de 2001. pág. 301 à 311.

CASTANHEIRA, A. P. A. F. “Estudo de um Sistema de Reparo mais Eficaz para uma Estrutura de Concreto Armado Contaminada por Cloretos”. Dissertação de Mestrado, UnB, Brasília, 1997.

CASTRO, P.; **MORENO**, E. I.; **GENESCÁ**, J. “Influence of marine micro-climates on carbonation or reinforced concrete buildings”. *Cement and Concrete Research*, 2000, v.30, pp 1565 – 1571

COSTA, E. C. “Física aplicada à construção – Conforto térmico”. 3ª Edição revisada e ampliada. Editora Edgard Blucher Ltda.

CHRISP, T. M.; McCARTER, W. J.; STARRS, G.; BASHEER, P. A. M.; BLEWETT, J. “Depth-related variation in conductivity to study cover-zone concrete during wetting and drying”. Cement and Concrete Composites, 2002, v.22, pp. 415 - 426.

CROCKFORD, H. D.; KNIGHT, S. B. “Fundamentos de físico-química”. Rio de Janeiro, livros técnicos e científicos, 1977.

DE LARRARD, F. “Concrete mixture proportioning: a scientific approach”. 421 p., New York, 1999.

DIAMOND, S. “Mercury porosimetry: an inappropriate method for the measurement of pore size distributions in cement-based materials” Cement and Concrete Research, vol. 01, pp. 1517-1525, 2000.

FEIJÃO, C. H. L. “Contribuição ao Estudo dos Sensores de Corrosão para Estruturas de Concreto Armado”. Dissertação de Mestrado, UnB, Brasília, 2000.

FERREIRA, R. C.; GONÇALVES, H. S.; FIGUEIREDO, E. P. & FRANCINETE JÚNIOR, P. “Permeabilidade e difusão do concreto aos gases – Correlação entre a técnica eletroquímica e o método de Figg”. Congresso Brasileiro de Cimento (CBC), 1999.

GENTIL, V. “Corrosão”. Rio de Janeiro, Guanabara, 1987.

GLASS, G. K. ;PAGE, C. L. ; SHORT, N. R. “Factors affecting the corrosion rate of steel in carbonated mortars”. Corrosion Science, v. 32, n. 12, p. 1283-1294, 1991.

GUIMARÃES, E. A. “Avaliação da capacidade protetora da resina de óleo de mamona contra a penetração de agentes agressivos no concreto”. Dissertação de Mestrado, UnB, Brasília, 1997.

HALL, Christopher. “Water movement in porous building materials – I. Unsaturated flow theory and its applications”. Building and Environment, vol. 12, p. 117-125. Pergamon Press 1977, Printed in Great Britain.

HALL, C. “Water sorptivity of mortars and concretes: a review”. Magazine of Concrete Research, 1989, vol. 41, Nº 147, p. 51-61

- HALL, C.** “Barrier performance of concrete: a review of fluid transport theory”. *Materials and Structures*, 1994, N° 27, p. 291-306
- HELENE, P.R.L.** “Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado”. São Paulo, 1993. 231p. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- KAZMIERCZAK, C. S.** “Contribuição para a análise da eficiência de películas aplicadas sobre estruturas de concreto armado com objetivo de proteção contra carbonatação”. Tese de Doutorado, USP, São Paulo, 1995.
- KJELSEN, K.O., ATASSI, E. H.** “Pore structure of cement silica fume systems. Presence of hollow-shell pores” *Cement and Concrete Research*, v. 29, P. 133-142, 1999.
- MEHTA, K. P. & MONTEIRO, P. J. M.** “Concreto: Estruturas, Propriedades e Materiais”. São Paulo, PINI, 1994.
- MONTEIRO, E. C. B.** “Estudo da capacidade de proteção de alguns tipos de cimento nacionais em relação a corrosão de armaduras sob ação conjunta de CO₂ e íons cloreto”. Dissertação de Mestrado, UnB, Brasília, 1996.
- MONTALVÃO, L.G.** “Sistema e metodologia para a avaliação polarográfica da corrosão das armaduras em estruturas de concreto”. Dissertação de Mestrado, UnB, Brasília, 1992.
- MOORE, W.J.** “Físico-Química”. São Paulo, Edgar Blücher, 1976.
- NEPOMUCENO, A. A.** “Comportamiento de los morteros de reparación frente a la carbonatación y a la penetración de cloruros en estructuras de hormado dañadas por corrosión de armaduras. Estudio mediante la técnica de resistencia de polarización”. Madrid, 1992. Tese (doutorado) – Universidade Politécnica de Madrid. 371p.
- NEVILLE, A. M.** “Propriedades do concreto”. Editora PINI, 2 Edição, São Paulo, 1997.
- NINCE, A. A.; CLÍMACO, J. C. T. S.** “Levantamento de dados sobre deterioração de estruturas na região centro-oeste do Brasil”. *International Congress on High-Performance Concrete, and Performance and Quality of Concrete Structures*. 05-07th june, 1996. Florianópolis, Brazil. Volume único, pág.414 à 424.
- PENÃ, M. DIAS; MUNTANER, A.R.** “Química física”. Madrid, Alhambra, 1978.

PESSÔA, P. O. A. “Avaliação da Influência do Consumo de Cimento na Corrosão de Armaduras em Estruturas de Concreto Carbonatadas”. Dissertação de Mestrado, UnB, Brasília, 2002.

RILEM RECOMMENDATIONS (1988). “Measurement of hardened concrete carbonation depth”. TC56-CPC-18.

RIVERO, R. “Arquitetura e Clima – Acondicionamento térmico natural”. Porto Alegre, RS, Editora da Universidade, 1995.

SANJUAN, M. A. B. “Cálculo Del período de iniciación de la corrosión de la armadura Del hormigón”. Tesis doctoral. Madrid, 1992.

SATO, N. M. N. “Análise da porosidade e de Propriedades de Transporte de Massa em Concretos”. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

TEIXEIRA, M. P. “Metodologias auxiliares para diagnóstico de patologias de corrosão em estruturas de concreto”. Dissertação de Mestrado, UnB, Brasília, 1998.

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

VASCONCELOS, K. L. “Avaliação comparativa da eficiência de inibidores de corrosão em armaduras de concreto”. Dissertação de Mestrado, UnB, Brasília, 1997.

WINSLOW, D.; **LIU**, D. “The pore structure on paste in concrete”. Cement and Concrete Research, v.20, p. 227-235, 1990.

ANEXOS

ANEXO A

ROTEIRO PARA O CÁLCULO DAS DOSAGENS DAS ARGAMASSAS UTILIZADAS

A.1. – DADOS INICIAIS

A dosagem é apresentada na seguinte forma, 1 : a : x, os quais são especificados na tabela A.1.:

Tabela A.1.: Especificação da Dosagem

Parâmetro	Definição	Valores	Observações
1	Corresponde a massa de cimento	1	Valor fixo
X	Relação água/cimento em massa, em Kg/Kg	0,60 0,75	Valores fixos. Ver item 3.3
A	Relação agregado miúdo seco/cimento em massa, em Kg/Kg	?	Valor a determinar

A.2. – PARÂMETROS DE MISTURA

Parâmetros de mistura são relações ou grandezas que balizamos com o intuito de obter propriedades desejáveis no concreto. A tabela A.2 apresenta os parâmetros de mistura e suas respectivas definições, para que possamos usá-las posteriormente para o cálculo das dosagens:

O termo p representa o agregado graúdo e o termo a o agregado miúdo. Na presente pesquisa não se utilizou agregado graúdo (ver item 3.4.3), portanto o termo m , corresponde apenas ao agregado miúdo.

Tabela A.2. – Parâmetros de Mistura

Símb	Especificação	Observação	Fórmula
x	Relação água/cimento	Muito importante devido a sua relação direta com a resistência e durabilidade	$x = a/c$
m	Relação agregado/cimento	—	$m = (a+p)/1$
A%	Relação água/materiais secos	Gerencia as propriedades no estado fresco (trabalhabilidade)	$A\% = (x \cdot 100) / (1+m)$
α	Teor de argamassa seca	Garante o afastamento entre os agregados. Influência na trabalhabilidade.	$\alpha = (1+a)/(1+m)$
C	Consumo de cimento	—	$C = 1000 / [(1/\gamma_c) + (a/\gamma_a) + (p/\gamma_p) + x]$

A.3. – FORMULAÇÃO PARA O CÁLCULO DAS DOSAGENS, A PARTIR DOS VALORES INICIALMENTE FIXADOS

O cálculo das dosagens pode ser resumido no cálculo do agregado miúdo, uma vez que os outros parâmetros são fixos. As dosagens para relação água/cimento 0,60, são as mesmas utilizados por PESSÔA (2002), portanto as demais dosagens foram calculadas de modo a obter uma argamassa com diferente relação água/cimento e as mesmas condições no estado fresco (trabalhabilidade) das utilizadas pelo referido autor.

A.3.1 – Cálculo das Dosagens com Menor Consumo de Cimento

O menor consumo de cimento foi escolhido de maneira que correspondesse a uma argamassa onde o volume de vazios do agregado fosse igual ao volume de pasta de cimento. O volume de vazios do agregado é:

$$VV_{ar} = CV.Vap_{ar} \quad \text{(Equação A.1)}$$

Onde:

$$CV = 1 - \frac{\gamma_{ar}}{\gamma_{0ar}} \quad \text{(Equação A.2)}$$

E:

$$Vap_{ar} = \frac{M_{ar}}{\gamma_{ar}} = \frac{C.a}{\gamma_{ar}} \quad \text{(Equação A.3)}$$

Portanto:

$$VV_{ar} = \frac{CV.C.a}{\gamma_a} \quad \text{(Equação A.4)}$$

Sendo:

CV = Coeficiente de vazios da areia

Vap_{ar} = Volume aparente da areia

γ_{ar} = massa unitária da areia no estado compactado seco (Kg/dm³)

γ_{0ar} = massa específica da areia (g/cm³)

Mar = quantidade de areia na argamassa. Considerando-se um consumo de cimento C (Kg)

Mar é dada por $Mar = a.C$

O volume total de pasta é dado pelo volume de cimento somado ao volume de água, ou seja:

$$VP = \frac{C}{\gamma_{cim}} + x.C \quad (\text{Equação A.5})$$

Onde:

γ_{cim} = massa específica do cimento (g/cm³)

x = relação água/cimento (Kg/Kg)

C = consumo de cimento (Kg/m³)

Igualando as equações A.5 e A.4, como foi definido anteriormente, chegamos a equação A.7 a qual nos dá o valor de a , que falta para a definição da dosagem, uma vez que os demais valores são fixos:

$$\frac{CV.C.a}{\gamma_{ar}} = \frac{C}{\gamma_{cim}} + x.C \quad (\text{Equação A.6})$$

Assim:

$$a = \frac{\gamma_{ar}}{CV} \left[\frac{1}{\gamma_{cim}} + x \right] \quad (\text{Equação A.7})$$

Com o valor de a calculado, é possível o cálculo do consumo de cimento onde o volume de pasta é igual ao volume de vazios:

$$C = \frac{1000}{\frac{1}{\gamma_{cim}} + \frac{a}{\gamma_{ar}} + x} \quad (\text{Equação A.8})$$

A.3.2 – Cálculo das Dosagens com Maior Consumo de Cimento

A dosagem com maior consumo de cimento, para a relação água/cimento=0,60, foi obtida acrescentando-se ao consumo inicial 100 Kg/m³, considerando-se que essa variação é grande (PESSÔA, 2002). Para obter a dosagem com relação água/cimento=0,75 e maior consumo de cimento, optou-se por manter as mesmas condições de trabalhabilidade que para a dosagem

com maior consumo de cimento da relação água/cimento=0,60, ou seja, fixar o $A\%$. A partir do exposto, o cálculo da quantidade de areia foi feito a partir da equação A.10, uma vez que todas as variáveis são conhecidas, exceto a :

$$A\% = \frac{x \cdot 100}{1 + a} \quad (\text{Equação A.9})$$

Isolando a , temos:

$$a = \frac{100 \cdot x}{A\%} - 1 \quad (\text{Equação A.10})$$

A partir daí calcula-se o consumo de cimento, conforme equação A8.

ANEXO B

RESULTADOS DO ENSAIO DE POROSIMETRIA POR DESSORÇÃO DE VAPOR DE ÁGUA

B.1 – DEFINIÇÕES DAS DENOMINAÇÕES UTILIADAS NAS TABELAS DE RESULTADOS

A nomenclatura utilizada na denominação das colunas, das tabelas referentes aos resultados dos ensaios de porosimetria por dessorção, tem o seguinte significado:

- Saturado → refere-se a massa da amostra quando a mesma está saturada;
- Seco → refere-se a massa da amostra quando a mesma se encontra no estado seco;
- Final do ensaio → refere-se a massa da amostra no final do ensaio, ou seja, após estabilização de massa quando mantido em recipiente com determinada umidade relativa;
- Sat.-Seco → massa de água na amostra no início do ensaio: Sat.-Seco = massa da amostra saturada - massa seca;
- Vol. de água na amostra (ml) → volume de água presente na amostra ao final do ensaio: Vol. de água na amostra (ml) = massa no final do ensaio – massa seca;

- Vol. de água perdida (ml) → volume de água perdido pela amostra ao final do ensaio:
Vol. de água perdida (ml) = massa saturada – massa ao final do ensaio;
- Vol. de água na amostra corrigido (ml) → Corrigido a partir da amostra padrão (item B.1.1);
- Vol. de água perdida corrigida (ml) → Corrigido a partir da amostra padrão (item B.1.1);
- Água na amostra (ml/g) = Vol. de água na amostra corrigido/massa seca da amostra padrão;
- Água perdida (ml/g) = Vol. de água perdida corrigida/massa seca da amostra padrão;

B.1.1 – Correções Feitas a Partir da Amostra Padrão

Definiu-se como amostra padrão, uma amostra referente ao grupo G1-não carbonatado com 10mm de cobrimento, tendo a mesma os seguintes dados:

Massa saturada → $M_{sat} = 2,5408\text{g}$

Massa seca → $M_{sec} = 2,3942\text{g}$

Massa de água na amostra no início do ensaio → $M_i = M_{sat} - M_{sec} = 0,1466\text{g}$

Toma-se como exemplo uma determinada amostra A, com os seguintes dados:

Massa saturada = $M_{sat}(A)$

Massa seca = $M_{sec}(A)$

Massa de água na amostra no início do ensaio = $M_i(A)$

Vol. de água na amostra = $V_a(A)$

Vol. de água perdida = $V_p(A)$

Faz-se as seguintes correções:

$$\text{Vol. de água na amostra corrigido (ml)} = \frac{M_i \times V_a(A)}{M_i(A)} \quad (\text{Equação B.1})$$

$$\text{Vol. de água perdida corrigida (ml))} = \frac{M_i \times V_p(A)}{M_i(A)} \quad (\text{Equação B.2})$$

B.2 – DEFINIÇÕES DAS DENOMINAÇÕES UTILIADAS NAS TABELAS PARA ELABORAÇÃO DO POROGRAMA

Os dados das tabelas para elaboração do porograma são apenas uma adequação dos dados das tabelas de resultados, sendo que a mesma contém apenas os resultados, após padronização dos mesmos, e também, somente aqueles que são realmente necessários para elaboração do porograma. É importante ressaltar que o ensaio foi realizado em duas amostras para cada cobrimento, grupo de estudo e situação (não-carbonatado ou carbonatado), portanto, para elaboração do porograma foi utilizada a média dos resultados entre as duas amostras.

Tabela B.1 – Resultados do ensaio de porosimetria por dessorção para G1-Não Carbonatado

Situação			Saturado	Seco	Final ensaio	Sat.- Seco	Vol. de água na amostra (ml)	Vol. de água perdida (ml)	Vol. de água na amostra corrigido (ml)	Vol. de água perdida (ml)	Água na Amostra (ml/g)	Água perdida (ml/g)
G1-não carbonatado	100%	23	2.5408	2.3942	2.5251	0.1466	0.1309	0.0157	0.1309	0.0157	0.0547	0.0066
		24	3.1813	2.9938	3.1515	0.1875	0.1577	0.0298	0.1233	0.0233	0.0515	0.0097
		19	3.2877	3.0987	3.2552	0.1890	0.1565	0.0325	0.1214	0.0252	0.0507	0.0105
		16	2.9286	2.7524	2.8986	0.1762	0.1462	0.0300	0.1216	0.0250	0.0508	0.0104
	98%	5	3.5973	3.3704	3.5398	0.2269	0.1694	0.0575	0.1094	0.0372	0.0457	0.0155
		27	3.3054	3.0965	3.2340	0.2089	0.1375	0.0714	0.0965	0.0501	0.0403	0.0209
		26	2.3892	2.2341	2.3487	0.1551	0.1146	0.0405	0.1083	0.0383	0.0452	0.0160
		7	4.1243	3.8644	4.0652	0.2599	0.2008	0.0591	0.1133	0.0333	0.0473	0.0139
	94%	14	2.9692	2.7757	2.8912	0.1935	0.1155	0.0780	0.0875	0.0591	0.0365	0.0247
		25	2.8733	2.6681	2.7800	0.2052	0.1119	0.0933	0.0799	0.0667	0.0334	0.0278
		27	2.1053	1.9829	2.0542	0.1224	0.0713	0.0511	0.0854	0.0612	0.0357	0.0256
		23	3.7505	3.5278	3.6735	0.2227	0.1457	0.0770	0.0959	0.0507	0.0401	0.0212
	86%	15	2.6084	2.4320	2.5078	0.1764	0.0758	0.1006	0.0630	0.0836	0.0263	0.0349
		8	3.4268	3.1968	3.2928	0.2300	0.0960	0.1340	0.0612	0.0854	0.0256	0.0357
		17	3.1451	2.9371	3.0287	0.2080	0.0916	0.1164	0.0646	0.0820	0.0270	0.0343
		21	2.447	2.2672	2.3289	0.1798	0.0617	0.1181	0.0503	0.0963	0.0210	0.0402
	75%	22	3.5653	3.3295	3.4238	0.2358	0.0943	0.1415	0.0586	0.0880	0.0245	0.0367
		19	3.3725	3.1671	3.2365	0.2054	0.0694	0.1360	0.0495	0.0971	0.0207	0.0405
		8	3.595	3.3596	3.4452	0.2354	0.0856	0.1498	0.0533	0.0933	0.0223	0.0390
		15	2.4046	2.2174	2.2763	0.1872	0.0589	0.1283	0.0461	0.1005	0.0193	0.0420
	59%	10	2.5159	2.3396	2.3805	0.1763	0.0409	0.1354	0.0340	0.1126	0.0142	0.0470
		6	3.7635	3.5328	3.5908	0.2307	0.0580	0.1727	0.0369	0.1097	0.0154	0.0458
		1	2.1731	2.0205	2.0551	0.1526	0.0346	0.1180	0.0332	0.1134	0.0139	0.0473
		10	2.2664	2.0956	2.1280	0.1708	0.0324	0.1384	0.0278	0.1188	0.0116	0.0496
	43%	21	2.939	2.7424	2.7839	0.1966	0.0415	0.1551	0.0309	0.1157	0.0129	0.0483
		16	2.9009	2.7079	2.7424	0.1930	0.0345	0.1585	0.0262	0.1204	0.0109	0.0503
		11	2.0929	1.9357	1.9636	0.1572	0.0279	0.1293	0.0260	0.1206	0.0109	0.0504
		4	2.877	2.6734	2.7128	0.2036	0.0394	0.1642	0.0284	0.1182	0.0118	0.0494
	33%	4	2.2708	2.1171	2.1423	0.1537	0.0252	0.1285	0.0240	0.1226	0.0100	0.0512
		9	3.5225	3.2822	3.3272	0.2403	0.0450	0.1953	0.0275	0.1191	0.0115	0.0498
		14	2.2641	2.0885	2.1185	0.1756	0.0300	0.1456	0.0250	0.1216	0.0105	0.0508
		25	2.4155	2.2431	2.2754	0.1724	0.0323	0.1401	0.0275	0.1191	0.0115	0.0498
	11%	12	2.862	2.6452	2.6663	0.2168	0.0211	0.1957	0.0143	0.1323	0.0060	0.0553
		1	2.7961	2.6058	2.6264	0.1903	0.0206	0.1697	0.0159	0.1307	0.0066	0.0546
		9	2.9526	2.7261	2.7534	0.2265	0.0273	0.1992	0.0177	0.1289	0.0074	0.0539
		20	2.5233	2.3215	2.3451	0.2018	0.0236	0.1782	0.0171	0.1295	0.0072	0.0541

Tabela B.2 – Tabela resumo para elaboração do porograma referente às amostras com 10mm de cobrimento e grupo G1-Não Carbonatado

10mm	UR (%)	Diâmetro de Poros ($10^{-3}\mu\text{m}$)	Água perdida (ml/g) Amostra 01	Água perdida (ml/g) Amostra 02	Acumulado médio perdida (ml/g)
	11	1,5	0,0553	0,0546	0,0549
	33	2,5	0,0498	0,0512	0,0505
	43	3,5	0,0483	0,0503	0,0493
	59	5	0,0470	0,0458	0,0464
	75	9	0,0367	0,0405	0,0386
	86	16	0,0349	0,0357	0,0353
	94	40	0,0278	0,0247	0,0263
	98	100	0,0155	0,0209	0,0182
	100	10000	0,0066	0,0097	0,0081

Tabela B.3 – Tabela resumo para elaboração do porograma referente às amostras com 20mm de cobertura e grupo G1-Não Carbonatado

20 mm	UR (%)	Diâmetro de Poros ($10^{-3}\mu\text{m}$)	Água perdida (ml/g) Amostra 01	Água perdida (ml/g) Amostra 02	Acumulado médio perdida (ml/g)
	11	1,5	0,0541	0,0539	0,0540
	33	2,5	0,0498	0,0498	0,0498
	43	3,5	0,0494	0,0494	0,0494
	59	5	0,0473	0,0473	0,0473
	75	9	0,0420	0,0390	0,0405
	86	16	0,0343	0,0343	0,0343
	94	40	0,0212	0,0212	0,0212
	98	100	0,0139	0,0139	0,0139
	100	10000	0,0104	0,0105	0,0105

Tabela B.4 – Resultados do ensaio de porosimetria por dessorção para G2-Não Carbonatado

Situação			Satura do	Seco	Final ensaio	Sat.- Seco	Vol. de água na amostra (ml)	Vol. de água perdida (ml)	Vol. de água na amostra corrigido (ml)	Vol. de água perdida (ml)	Água na Amostra (ml/g)	Água perdida (ml/g)	
G2-não carbonatado	água (100%)	10 mm	8	3.2262	3.0159	3.2202	0.2103	0.2043	0.0060	0.1424	0.0042	0.0595	0.0017
			14	2.9336	2.7850	2.9330	0.1486	0.1480	0.0006	0.1460	0.0006	0.0610	0.0002
		20 mm	2	3.5444	3.2616	3.5213	0.2828	0.2597	0.0231	0.1346	0.0120	0.0562	0.0050
			24	3.7329	3.4719	3.7224	0.2610	0.2505	0.0105	0.1407	0.0059	0.0588	0.0025
	K2SO4 (98%)	10mm	29	3.4713	3.2828	3.4524	0.1885	0.1696	0.0189	0.1319	0.0147	0.0551	0.0061
			21	2.8923	2.7139	2.8603	0.1784	0.1464	0.0320	0.1203	0.0263	0.0502	0.0110
		20mm	10	2.3411	2.1531	2.3053	0.1880	0.1522	0.0358	0.1187	0.0279	0.0496	0.0117
			17	3.6606	3.3915	3.6272	0.2691	0.2357	0.0334	0.1284	0.0182	0.0536	0.0076
	KNO3 (94%)	10mm	25	1.9570	1.8672	1.9375	0.0898	0.0703	0.0195	0.1148	0.0318	0.0479	0.0133
			11	2.8467	2.6426	2.7743	0.2041	0.1317	0.0724	0.0946	0.0520	0.0395	0.0217
		20mm	23	3.1348	2.9057	3.0672	0.2291	0.1615	0.0676	0.1033	0.0433	0.0432	0.0181
			13	3.4004	3.1154	3.3519	0.2850	0.2365	0.0485	0.1217	0.0249	0.0508	0.0104
	KCl (86%)	10mm	7	3.0433	2.8483	2.9460	0.1950	0.0977	0.0973	0.0735	0.0731	0.0307	0.0306
			27	2.3392	2.1733	2.2595	0.1659	0.0862	0.0797	0.0762	0.0704	0.0318	0.0294
		20mm	14	2.7394	2.5112	2.6296	0.2282	0.1184	0.1098	0.0761	0.0705	0.0318	0.0295
			6	2.7039	2.4873	2.5964	0.2166	0.1091	0.1075	0.0738	0.0728	0.0308	0.0304
	NaCl (75%)	10mm	6	3.8412	3.5841	3.7093	0.2571	0.1252	0.1319	0.0714	0.0752	0.0298	0.0314
			5	2.4894	2.3421	2.4093	0.1473	0.0672	0.0801	0.0669	0.0797	0.0279	0.0333
		20mm	3	3.0942	2.8604	2.9697	0.2338	0.1093	0.1245	0.0685	0.0781	0.0286	0.0326
			19	3.4606	3.1911	3.3161	0.2695	0.1250	0.1445	0.0680	0.0786	0.0284	0.0328
	NaBr (59%)	10mm	9	3.5651	3.3290	3.4070	0.2361	0.0780	0.1581	0.0484	0.0982	0.0202	0.0410
			4	3.5059	3.2523	3.3259	0.2536	0.0736	0.1800	0.0425	0.1041	0.0178	0.0435
		20mm	15	3.3205	3.0617	3.1460	0.2588	0.0843	0.1745	0.0478	0.0988	0.0199	0.0413
			16	3.3071	3.0558	3.1409	0.2513	0.0851	0.1662	0.0496	0.0970	0.0207	0.0405
	K2CO3 (43%)	10mm	17	2.8787	2.6709	2.7189	0.2078	0.0480	0.1598	0.0339	0.1127	0.0141	0.0471
			24	2.1441	2.0100	2.0420	0.1341	0.0320	0.1021	0.0350	0.1116	0.0146	0.0466
		20mm	25	3.0677	2.8444	2.9042	0.2233	0.0598	0.1635	0.0393	0.1073	0.0164	0.0448
			18	3.3050	3.0508	3.1173	0.2542	0.0665	0.1877	0.0384	0.1082	0.0160	0.0452
	MgCl2 (33%)	10mm	28	2.5012	2.3243	2.3584	0.1769	0.0341	0.1428	0.0283	0.1183	0.0118	0.0494
			26	1.6032	1.4988	1.5204	0.1044	0.0216	0.0828	0.0303	0.1163	0.0127	0.0486
		20mm	28	4.7330	4.3586	4.4560	0.3744	0.0974	0.2770	0.0381	0.1085	0.0159	0.0453
			26	2.9106	2.6868	2.7427	0.2238	0.0559	0.1679	0.0366	0.1100	0.0153	0.0459
	LiCl (11%)	10mm	2	2.7198	2.5217	2.5473	0.1981	0.0256	0.1725	0.0189	0.1277	0.0079	0.0533
			3	2.5305	2.3559	2.3783	0.1746	0.0224	0.1522	0.0188	0.1278	0.0079	0.0534
		20mm	22	4.0710	3.7651	3.8155	0.3059	0.0504	0.2555	0.0242	0.1224	0.0101	0.0511
			5	3.0620	2.8066	2.8462	0.2554	0.0396	0.2158	0.0227	0.1239	0.0095	0.0517

Tabela B.5 – Tabela resumo para elaboração do porograma referente às amostras com 10mm de cobertura e grupo G2-Não Carbonatado

10mm	UR (%)	Diâmetro de Poros ($10^{-3}\mu\text{m}$)	Água perdida (ml/g) Amostra 01	Água perdida (ml/g) Amostra 02	Acumulado médio perdida (ml/g)
	11	1,5	0,0533	0,0534	0,0533
	33	2,5	0,0486	0,0494	0,0490
	43	3,5	0,0466	0,0471	0,0469
	59	5	0,0435	0,0435	0,0435
	75	9	0,0314	0,0333	0,0324
	86	16	0,0294	0,0294	0,0294
	94	40	0,0133	0,0217	0,0175
	98	100	0,0110	0,0110	0,0110
	100	10000	0,0002	0,0017	0,0010

Tabela B.6 – Tabela resumo para elaboração do porograma referente às amostras com 20mm de cobertura e grupo G2-Não Carbonatado

20 mm	UR (%)	Diâmetro de Poros ($10^{-3}\mu\text{m}$)	Água perdida (ml/g) Amostra 01	Água perdida (ml/g) Amostra 02	Acumulado médio perdida (ml/g)
	11	1,5	0,0511	0,0517	0,0514
	33	2,5	0,0459	0,0459	0,0459
	43	3,5	0,0452	0,0452	0,0452
	59	5	0,0413	0,0413	0,0413
	75	9	0,0326	0,0328	0,0327
	86	16	0,0295	0,0295	0,0295
	94	40	0,0104	0,0104	0,0104
	98	100	0,0076	0,0076	0,0076
	100	10000	0,0025	0,0050	0,0037

Tabela B.7 – Resultados do ensaio de porosimetria por dessorção para G3-Não Carbonatado

			Situação	Saturado	Seco	Final ensaio	Sat.- Seco	Vol. de água na amostra (ml)	Vol. de água perdida (ml)	Vol. de água na amostra corrigido (ml)	Vol. de água perdida (ml)	Água na Amostra (ml/g)	Água perdida (ml/g)
G3-não carbonatado	água (100%)	10 mm	24	1.4640	1.4126	1.4636	0.0514	0.0510	0.0004	0.1455	0.0011	0.0608	0.0005
			13	1.3094	1.2685	1.3091	0.0409	0.0406	0.0003	0.1455	0.0011	0.0608	0.0004
		20 mm	19	2.7786	2.6069	2.7139	0.1717	0.1070	0.0647	0.0914	0.0552	0.0382	0.0231
			11	1.7574	1.6422	1.6925	0.1152	0.0503	0.0649	0.0640	0.0826	0.0267	0.0345
	K2SO4 (98%)	10mm	20	1.8471	1.7872	1.8455	0.0599	0.0583	0.0016	0.1427	0.0039	0.0596	0.0016
			3	2.3180	2.2228	2.3143	0.0952	0.0915	0.0037	0.1409	0.0057	0.0589	0.0024
		20mm	5	2.5670	2.3846	2.4646	0.1824	0.0800	0.1024	0.0643	0.0823	0.0269	0.0344
			13	2.0013	1.8645	1.9322	0.1368	0.0677	0.0691	0.0725	0.0741	0.0303	0.0309
	KNO3 (94%)	10mm	2	2.2551	2.1517	2.2352	0.1034	0.0835	0.0199	0.1184	0.0282	0.0494	0.0118
			8	1.7452	1.6566	1.7081	0.0886	0.0515	0.0371	0.0852	0.0614	0.0356	0.0256
		20mm	16	1.5829	1.4709	1.5132	0.1120	0.0423	0.0697	0.0554	0.0912	0.0231	0.0381
			7	2.0490	1.8882	1.9459	0.1608	0.0577	0.1031	0.0526	0.0940	0.0220	0.0393
	KCl (86%)	10mm	22	1.4359	1.3609	1.3839	0.0750	0.0230	0.0520	0.0450	0.1016	0.0188	0.0425
			5	1.5116	1.4261	1.4541	0.0855	0.0280	0.0575	0.0480	0.0986	0.0201	0.0412
		20mm	25	1.4556	1.3727	1.3977	0.0829	0.0250	0.0579	0.0442	0.1024	0.0185	0.0428
			18	2.0332	1.8884	1.9267	0.1448	0.0383	0.1065	0.0388	0.1078	0.0162	0.0450
	NaCl (75%)	10mm	1	1.2315	1.1633	1.1834	0.0682	0.0201	0.0481	0.0432	0.1034	0.0180	0.0432
			15	1.3254	1.2538	1.2746	0.0716	0.0208	0.0508	0.0426	0.1040	0.0178	0.0434
		20mm	4	3.0682	2.8437	2.8913	0.2245	0.0476	0.1769	0.0311	0.1155	0.0130	0.0482
			30	1.8186	1.6754	1.7168	0.1432	0.0414	0.1018	0.0424	0.1042	0.0177	0.0435
	NaBr (59%)	10mm	12	1.3705	1.3000	1.3166	0.0705	0.0166	0.0539	0.0345	0.1121	0.0144	0.0468
			7	2.7302	2.5606	2.5951	0.1696	0.0345	0.1351	0.0298	0.1168	0.0125	0.0488
		20mm	10	3.3867	3.1261	3.1602	0.2606	0.0341	0.2265	0.0192	0.1274	0.0080	0.0532
			3	2.6165	2.3933	2.4221	0.2232	0.0288	0.1944	0.0189	0.1277	0.0079	0.0533
	K2CO3 (43%)	10mm	10	1.9977	1.8498	1.8670	0.1479	0.0172	0.1307	0.0170	0.1296	0.0071	0.0541
			9	1.8042	1.6880	1.7027	0.1162	0.0147	0.1015	0.0185	0.1281	0.0077	0.0535
		20mm	12	1.7240	1.5766	1.5955	0.1474	0.0189	0.1285	0.0188	0.1278	0.0079	0.0534
			22	2.2216	2.0481	2.0670	0.1735	0.0189	0.1546	0.0160	0.1306	0.0067	0.0546
	MgCl2 (33%)	10mm	4	1.6253	1.4909	1.5061	0.1344	0.0152	0.1192	0.0166	0.1300	0.0069	0.0543
			26	1.4373	1.3316	1.3478	0.1057	0.0162	0.0895	0.0225	0.1241	0.0094	0.0518
		20mm	23	0.9032	0.8294	0.8387	0.0738	0.0093	0.0645	0.0185	0.1281	0.0077	0.0535
			9	3.2105	2.8933	2.9281	0.3172	0.0348	0.2824	0.0161	0.1305	0.0067	0.0545
	LiCl (11%)	10mm	18	2.2266	2.0454	2.0623	0.1812	0.0169	0.1643	0.0137	0.1329	0.0057	0.0555
			21	1.7600	1.6337	1.6454	0.1263	0.0117	0.1146	0.0136	0.1330	0.0057	0.0556
		20mm	6	2.7774	2.5316	2.5508	0.2458	0.0192	0.2266	0.0115	0.1351	0.0048	0.0564
			8	3.3047	3.0420	3.0654	0.2627	0.0234	0.2393	0.0131	0.1335	0.0055	0.0558

Tabela B.8 – Tabela resumo para elaboração do porograma referente às amostras com 10mm de cobertura e grupo G3-Não Carbonatado

10mm	UR (%)	Diâmetro de Poros ($10^{-3}\mu\text{m}$)	Água perdida (ml/g) Amostra 01	Água perdida (ml/g) Amostra 02	Acumulado médio perdida (ml/g)
	11	1,5	0,0555	0,0556	0,0555
	33	2,5	0,0543	0,0543	0,0543
	43	3,5	0,0535	0,0541	0,0538
	59	5	0,0468	0,0488	0,0478
	75	9	0,0432	0,0434	0,0433
	86	16	0,0412	0,0425	0,0418
	94	40	0,0118	0,0256	0,0187
	98	100	0,0016	0,0024	0,0020
	100	10000	0,0005	0,0004	0,0005

Tabela B.9 – Tabela resumo para elaboração do porograma referente às amostras com 20mm de cobrimento e grupo G3-Não Carbonatado

20 mm	UR (%)	Diâmetro de Poros ($10^{-3}\mu\text{m}$)	Água perdida (ml/g) Amostra 01	Água perdida (ml/g) Amostra 02	Acumulado médio perdida (ml/g)
	11	1,5	0,0564	0,0558	0,0561
	33	2,5	0,0545	0,0545	0,0545
	43	3,5	0,0546	0,0546	0,0546
	59	5	0,0532	0,0532	0,0532
	75	9	0,0482	0,0435	0,0459
	86	16	0,0428	0,0428	0,0428
	94	40	0,0393	0,0393	0,0393
	98	100	0,0344	0,0309	0,0327
	100	10000	0,0345	0,0231	0,0288

Tabela B.10 – Resultados do ensaio de porosimetria por dessorção para G4-Não Carbonatado

Situação			Saturado	Seco	Final ensaio	Sat.- Seco	Vol. de água na amostra (ml)	Vol. de água perdida (ml)	Vol. de água na amostra corrigido (ml)	Vol. de água perdida (ml)	Água na Amostra (ml/g)	Água perdida (ml/g)	
G4-não carbonatado	água (100%)	10 mm	8	2.8477	2.6483	2.8313	0.1994	0.1830	0.0164	0.1345	0.0121	0.0562	0.0050
			26	2.2451	2.0843	2.2256	0.1608	0.1413	0.0195	0.1288	0.0178	0.0538	0.0074
		20 mm	2	3.0607	2.8549	3.0331	0.2058	0.1782	0.0276	0.1269	0.0197	0.0530	0.0082
			21	3.3465	3.0668	3.2851	0.2797	0.2183	0.0614	0.1144	0.0322	0.0478	0.0134
	K2SO4 (98%)	10mm	10	3.6547	3.3984	3.6052	0.2563	0.2068	0.0495	0.1183	0.0283	0.0494	0.0118
			21	2.9742	2.7793	2.9327	0.1949	0.1534	0.0415	0.1154	0.0312	0.0482	0.0130
		20mm	24	3.4831	3.1967	3.3993	0.2864	0.2026	0.0838	0.1037	0.0429	0.0433	0.0179
			26	2.5902	2.3988	2.5453	0.1914	0.1465	0.0449	0.1122	0.0344	0.0469	0.0144
	KNO3 (94%)	10mm	17	2.5699	2.3964	2.5112	0.1735	0.1148	0.0587	0.0970	0.0496	0.0405	0.0207
			12	3.0452	2.8270	2.9397	0.2182	0.1127	0.1055	0.0757	0.0709	0.0316	0.0296
		20mm	6	2.9661	2.7134	2.8466	0.2527	0.1332	0.1195	0.0773	0.0693	0.0323	0.0290
			22	2.5197	2.3302	2.4417	0.1895	0.1115	0.0780	0.0863	0.0603	0.0360	0.0252
	KCl (86%)	10mm	1	4.2845	3.9335	4.0832	0.3510	0.1497	0.2013	0.0625	0.0841	0.0261	0.0351
			18	4.5102	4.1378	4.3026	0.3724	0.1648	0.2076	0.0649	0.0817	0.0271	0.0341
		20mm	23	2.8347	2.6047	2.6991	0.2300	0.0944	0.1356	0.0602	0.0864	0.0251	0.0361
			10	4.1458	3.7959	3.9279	0.3499	0.1320	0.2179	0.0553	0.0913	0.0231	0.0381
	NaCl (75%)	10mm	9	2.6552	2.4490	2.5259	0.2062	0.0769	0.1293	0.0547	0.0919	0.0228	0.0384
			3	2.6083	2.4254	2.4869	0.1829	0.0615	0.1214	0.0493	0.0973	0.0206	0.0406
		20mm	28	3.1619	2.9116	3.0011	0.2503	0.0895	0.1608	0.0524	0.0942	0.0219	0.0393
			13	3.8318	3.5240	3.6202	0.3078	0.0962	0.2116	0.0458	0.1008	0.0191	0.0421
	NaBr (59%)	10mm	5	2.6684	2.4506	2.5065	0.2178	0.0559	0.1619	0.0376	0.1090	0.0157	0.0455
			14	3.0126	2.8102	2.8668	0.2024	0.0566	0.1458	0.0410	0.1056	0.0171	0.0441
		20mm	3	4.4206	4.0747	4.1615	0.3459	0.0868	0.2591	0.0368	0.1098	0.0154	0.0459
			18	3.3821	3.1168	3.1837	0.2653	0.0669	0.1984	0.0370	0.1096	0.0154	0.0458
	K2CO3 (43%)	10mm	20	2.2670	2.0968	2.1339	0.1702	0.0371	0.1331	0.0320	0.1146	0.0133	0.0479
			2	3.1281	2.8764	2.9323	0.2517	0.0559	0.1958	0.0326	0.1140	0.0136	0.0476
		20mm	1	3.1745	2.8959	2.9500	0.2786	0.0541	0.2245	0.0285	0.1181	0.0119	0.0493
			9	3.6852	3.3781	3.4331	0.3071	0.0550	0.2521	0.0263	0.1203	0.0110	0.0503
	MgCl2 (33%)	10mm	28	3.0228	2.7704	2.8240	0.2524	0.0536	0.1988	0.0311	0.1155	0.0130	0.0482
			16	2.9444	2.7056	2.7526	0.2388	0.0470	0.1918	0.0289	0.1177	0.0121	0.0492
		20mm	11	3.1299	2.8447	2.8953	0.2852	0.0506	0.2346	0.0260	0.1206	0.0109	0.0504
			12	3.0590	2.7800	2.8304	0.2790	0.0504	0.2286	0.0265	0.1201	0.0111	0.0502
	LiCl (11%)	10mm	7	3.2229	2.9724	3.0103	0.2505	0.0379	0.2126	0.0222	0.1244	0.0093	0.0520
			24	3.1049	2.8343	2.8678	0.2706	0.0335	0.2371	0.0181	0.1285	0.0076	0.0537
		20mm	17	2.7273	2.4703	2.4997	0.2570	0.0294	0.2276	0.0168	0.1298	0.0070	0.0542
			27	3.7424	3.3917	3.4292	0.3507	0.0375	0.3132	0.0157	0.1309	0.0065	0.0547

Tabela B.11 – Tabela resumo para elaboração do porograma referente às amostras com 10mm de cobertura e grupo G4-Não Carbonatado

10mm	UR (%)	Diâmetro de Poros ($10^{-3}\mu\text{m}$)	Água perdida (ml/g) Amostra 01	Água perdida (ml/g) Amostra 02	Acumulado médio perdida (ml/g)
	11	1,5	0,0520	0,0537	0,0528
	33	2,5	0,0482	0,0482	0,0482
	43	3,5	0,0476	0,0479	0,0478
	59	5	0,0441	0,0455	0,0448
	75	9	0,0384	0,0406	0,0395
	86	16	0,0341	0,0351	0,0346
	94	40	0,0207	0,0296	0,0252
	98	100	0,0118	0,0130	0,0124
	100	10000	0,0050	0,0074	0,0062

Tabela B.12 – Tabela resumo para elaboração do porograma referente às amostras com 20mm de cobrimento e grupo G4-Não Carbonatado

20 mm	UR (%)	Diâmetro de Poros ($10^{-3}\mu\text{m}$)	Água perdida (ml/g) Amostra 01	Água perdida (ml/g) Amostra 02	Acumulado médio perdida (ml/g)
	11	1,5	0,0542	0,0547	0,0545
	33	2,5	0,0502	0,0504	0,0503
	43	3,5	0,0493	0,0503	0,0498
	59	5	0,0459	0,0458	0,0458
	75	9	0,0393	0,0421	0,0407
	86	16	0,0361	0,0381	0,0371
	94	40	0,0252	0,0290	0,0271
	98	100	0,0144	0,0179	0,0161
	100	10000	0,0082	0,0134	0,0108

Tabela B.13 – Resultados do ensaio de porosimetria por dessorção para G1 –Carbonatado

Situação				Saturado	Seco	Final ensaio	Sat.- Seco	Vol. de água na amostra (ml)	Vol. de água perdida (ml)	Vol. de água na amostra corrigido (ml)	Vol. de água perdida corrigido (ml)	Água na Amostra (ml/g)	Água perdida (ml/g)
G1-carbonatado	água (100%)	10 mm	1	2.5408	2.3942	2.4680	0.1466	0.0738	0.0728	0.0738	0.0728	0.0308	0.0304
			2	2.5475	2.3640	2.4636	0.1835	0.0996	0.0839	0.0796	0.0670	0.0332	0.0280
		20 mm	3	2.2608	2.0967	2.2019	0.1641	0.1052	0.0589	0.0940	0.0526	0.0393	0.0220
			4	2.5404	2.3733	2.4715	0.1671	0.0982	0.0689	0.0862	0.0604	0.0360	0.0252
	K2SO4 (98%)	10mm	5	3.9095	3.6487	3.7480	0.2608	0.0993	0.1615	0.0558	0.0908	0.0233	0.0379
			6	3.5028	3.2431	3.3248	0.2597	0.0817	0.1780	0.0461	0.1005	0.0193	0.0420
		20mm	7	2.8223	2.6365	2.7075	0.1858	0.0710	0.1148	0.0560	0.0906	0.0234	0.0378
			8	2.5349	2.3367	2.4017	0.1982	0.0650	0.1332	0.0481	0.0985	0.0201	0.0412
	KNO3 (94%)	10mm	9	3.8156	3.5475	3.6315	0.2681	0.0840	0.1841	0.0459	0.1007	0.0192	0.0420
			10	2.2136	2.0531	2.0918	0.1605	0.0387	0.1218	0.0353	0.1113	0.0148	0.0465
		20mm	11	3.2621	3.0280	3.0933	0.2341	0.0653	0.1688	0.0409	0.1057	0.0171	0.0442
			12	2.4673	2.2938	2.3502	0.1735	0.0564	0.1171	0.0477	0.0989	0.0199	0.0413
	KCl (86%)	10mm	13	3.6294	3.3721	3.4228	0.2573	0.0507	0.2066	0.0289	0.1177	0.0121	0.0492
			14	3.6831	3.4278	3.4792	0.2553	0.0514	0.2039	0.0295	0.1171	0.0123	0.0489
		20mm	15	2.9494	2.7235	2.7667	0.2259	0.0432	0.1827	0.0280	0.1186	0.0117	0.0495
			16	2.6789	2.4836	2.5210	0.1953	0.0374	0.1579	0.0281	0.1185	0.0117	0.0495
	NaCl (75%)	10mm	17	2.8874	2.6611	2.6930	0.2263	0.0319	0.1944	0.0207	0.1259	0.0086	0.0526
			18	3.1916	2.9579	2.9947	0.2337	0.0368	0.1969	0.0231	0.1235	0.0096	0.0516
		20mm	19	1.8161	1.6934	1.7121	0.1227	0.0187	0.1040	0.0223	0.1243	0.0093	0.0519
			20	2.2892	2.1239	2.1482	0.1653	0.0243	0.1410	0.0216	0.1250	0.0090	0.0522
	NaBr (59%)	10mm	21	2.1678	2.0053	2.0245	0.1625	0.0192	0.1433	0.0173	0.1293	0.0072	0.0540
			22	3.4525	3.2038	3.2352	0.2487	0.0314	0.2173	0.0185	0.1281	0.0077	0.0535
		20mm	23	2.5908	2.3977	2.4211	0.1931	0.0234	0.1697	0.0178	0.1288	0.0074	0.0538
			24	3.4008	3.1366	3.1639	0.2642	0.0273	0.2369	0.0151	0.1315	0.0063	0.0549
	K2CO3 (43%)	10mm	25	3.0352	2.8307	2.8532	0.2045	0.0225	0.1820	0.0161	0.1305	0.0067	0.0545
			26	3.0836	2.8538	2.8750	0.2298	0.0212	0.2086	0.0135	0.1331	0.0056	0.0556
		20mm	27	2.5066	2.3218	2.3389	0.1848	0.0171	0.1677	0.0136	0.1330	0.0057	0.0556
			28	2.6948	2.5051	2.5264	0.1897	0.0213	0.1684	0.0165	0.1301	0.0069	0.0544
	MgCl2 (33%)	10mm	29	3.5294	3.2755	3.3014	0.2539	0.0259	0.2280	0.0150	0.1316	0.0062	0.0550
			30	4.0947	3.7768	3.8062	0.3179	0.0294	0.2885	0.0136	0.1330	0.0057	0.0556
		20mm	31	2.3552	2.1811	2.1947	0.1741	0.0136	0.1605	0.0115	0.1351	0.0048	0.0564
			32	3.0182	2.7793	2.8003	0.2389	0.0210	0.2179	0.0129	0.1337	0.0054	0.0558
	LiCl (11%)	10mm	33	2.5849	2.3993	2.4099	0.1856	0.0106	0.1750	0.0084	0.1382	0.0035	0.0577
			34	2.6967	2.4982	2.5087	0.1985	0.0105	0.1880	0.0078	0.1388	0.0032	0.0580
		20mm	35	2.9519	2.7583	2.7682	0.1936	0.0099	0.1837	0.0075	0.1391	0.0031	0.0581
			36	2.3575	2.1624	2.1702	0.1951	0.0078	0.1873	0.0059	0.1407	0.0024	0.0588

Tabela B.14 – Tabela resumo para elaboração do porograma referente às amostras com 10mm de cobrimento e grupo G1- Carbonatado

10mm	UR (%)	Diâmetro de Poros ($10^{-3}\mu\text{m}$)	Água perdida (ml/g) Amostra 01	Água perdida (ml/g) Amostra 02	Acumulado médio perdida (ml/g)
	11	1,5	0,0577	0,0580	0,0579
	33	2,5	0,0550	0,0556	0,0553
	43	3,5	0,0545	0,0556	0,0550
	59	5	0,0535	0,0540	0,0537
	75	9	0,0526	0,0516	0,0521
	86	16	0,0492	0,0489	0,0490
	94	40	0,0465	0,0420	0,0443
	98	100	0,0420	0,0379	0,0399
	100	10000	0,0304	0,0280	0,0292

Tabela B.15 – Tabela resumo para elaboração do porograma referente às amostras com 20mm de cobrimento e grupo G1- Carbonatado

20 mm	UR (%)	Diâmetro de Poros ($10^{-3}\mu\text{m}$)	Água perdida (ml/g) Amostra 01	Água perdida (ml/g) Amostra 02	Acumulado médio perdida (ml/g)
	11	1,5	0,0588	0,0581	0,0584
	33	2,5	0,0558	0,0558	0,0558
	43	3,5	0,0544	0,0544	0,0544
	59	5	0,0538	0,0538	0,0538
	75	9	0,0522	0,0519	0,0521
	86	16	0,0495	0,0495	0,0495
	94	40	0,0413	0,0413	0,0413
	98	100	0,0412	0,0412	0,0412
	100	10000	0,0252	0,0220	0,0236

Tabela B.16 – Resultados do ensaio de porosimetria por dessorção para G2-Carbonatado

Situação				Saturado	Seco	Final ensaio	Sat.- Seco	Vol. de água na amostra (ml)	Vol. de água perdida(ml)	Vol. de água na amostra corrigido (ml)	Vol. de água perdida (ml)	Água na Amostra (ml/g)	Água perdida (ml/g)
G2-carbonatado	água (100%)	10 mm	5	3.7824	3.5292	3.7160	0.2532	0.1868	0.0664	0.1082	0.0384	0.0452	0.0161
			6	2.7793	2.6048	2.7467	0.1745	0.1419	0.0326	0.1192	0.0274	0.0498	0.0114
		20 mm	7	3.0291	2.7877	2.9888	0.2414	0.2011	0.0403	0.1221	0.0245	0.0510	0.0102
			8	3.0437	2.8167	3.0027	0.2270	0.1860	0.0410	0.1201	0.0265	0.0502	0.0111
	K2SO4 (98%)	10mm	9	2.6497	2.4990	2.5595	0.1507	0.0605	0.0902	0.0589	0.0877	0.0246	0.0366
			10	2.8821	2.7168	2.7894	0.1653	0.0726	0.0927	0.0644	0.0822	0.0269	0.0343
		20mm	11	3.1661	2.9375	3.0977	0.2286	0.1602	0.0684	0.1027	0.0439	0.0429	0.0183
			12	1.7995	1.6678	1.7456	0.1317	0.0778	0.0539	0.0866	0.0600	0.0362	0.0251
	KNO3 (94%)	10mm	13	3.0927	2.9006	2.9688	0.1921	0.0682	0.1239	0.0520	0.0946	0.0217	0.0395
			14	3.0927	2.9006	2.9688	0.1921	0.0682	0.1239	0.0520	0.0946	0.0217	0.0395
		20mm	15	2.6287	2.4405	2.5468	0.1882	0.1063	0.0819	0.0828	0.0638	0.0346	0.0266
			16	2.6287	2.4405	2.5468	0.1882	0.1063	0.0819	0.0828	0.0638	0.0346	0.0266
	KCl (86%)	10mm	1	1.9439	1.8269	1.8585	0.1170	0.0316	0.0854	0.0396	0.1070	0.0165	0.0447
			2	2.8199	2.6341	2.6851	0.1858	0.0510	0.1348	0.0402	0.1064	0.0168	0.0444
		20mm	3	2.5660	2.3808	2.4611	0.1852	0.0803	0.1049	0.0636	0.0830	0.0265	0.0347
			4	3.3049	3.0629	3.1727	0.2420	0.1098	0.1322	0.0665	0.0801	0.0278	0.0334
	NaCl (75%)	10mm	21	2.9939	2.7996	2.8445	0.1943	0.0449	0.1494	0.0339	0.1127	0.0141	0.0471
			22	3.3120	3.0828	3.1447	0.2292	0.0619	0.1673	0.0396	0.1070	0.0165	0.0447
		20mm	23	2.5304	2.3445	2.4102	0.1859	0.0657	0.1202	0.0518	0.0948	0.0216	0.0396
			24	3.3866	3.1303	3.2242	0.2563	0.0939	0.1624	0.0537	0.0929	0.0224	0.0388
	NaBr (59%)	10mm	25	2.9125	2.7181	2.7542	0.1944	0.0361	0.1583	0.0272	0.1194	0.0114	0.0499
			26	2.3573	2.1984	2.2250	0.1589	0.0266	0.1323	0.0245	0.1221	0.0103	0.0510
		20mm	27	3.2232	2.9795	3.0465	0.2437	0.0670	0.1767	0.0403	0.1063	0.0168	0.0444
			28	2.5354	2.3534	2.4004	0.1820	0.0470	0.1350	0.0379	0.1087	0.0158	0.0454
	K2CO3 (43%)	10mm	29	3.4456	3.2120	3.2504	0.2336	0.0384	0.1952	0.0241	0.1225	0.0101	0.0512
			30	3.4456	3.2120	3.2504	0.2336	0.0384	0.1952	0.0241	0.1225	0.0101	0.0512
		20mm	31	2.8240	2.6278	2.6694	0.1962	0.0416	0.1546	0.0311	0.1155	0.0130	0.0482
			32	2.8240	2.6278	2.6694	0.1962	0.0416	0.1546	0.0311	0.1155	0.0130	0.0482
	MgCl2 (33%)	10mm	17	3.6383	3.3983	3.4297	0.2400	0.0314	0.2086	0.0192	0.1274	0.0080	0.0532
			18	3.6383	3.3983	3.4297	0.2400	0.0314	0.2086	0.0192	0.1274	0.0080	0.0532
		20mm	19	2.9036	2.6881	2.7339	0.2155	0.0458	0.1697	0.0312	0.1154	0.0130	0.0482
			20	2.9036	2.6881	2.7339	0.2155	0.0458	0.1697	0.0312	0.1154	0.0130	0.0482
	LiCl (11%)	10mm	37	3.0983	2.8937	2.9128	0.2046	0.0191	0.1855	0.0137	0.1329	0.0057	0.0555
			38	3.0983	2.8937	2.9128	0.2046	0.0191	0.1855	0.0137	0.1329	0.0057	0.0555
		20mm	39	1.8740	1.7328	1.7485	0.1412	0.0157	0.1255	0.0163	0.1303	0.0068	0.0544
			40	1.8740	1.7328	1.7485	0.1412	0.0157	0.1255	0.0163	0.1303	0.0068	0.0544

Tabela B.17 – Tabela resumo para elaboração do porograma referente às amostras com 10mm de cobertura e grupo G2- Carbonatado

10mm	UR (%)	Diâmetro de Poros ($10^{-3}\mu\text{m}$)	Água perdida (ml/g) Amostra 01	Água perdida (ml/g) Amostra 02	Acumulado médio perdida (ml/g)
	11	1,5	0,0555	0,0555	0,0555
	33	2,5	0,0532	0,0532	0,0532
	43	3,5	0,0512	0,0512	0,0512
	59	5	0,0499	0,0510	0,0504
	75	9	0,0447	0,0471	0,0459
	86	16	0,0444	0,0447	0,0446
	94	40	0,0395	0,0395	0,0395
	98	100	0,0343	0,0366	0,0355
	100	10000	0,0114	0,0161	0,0137

Tabela B.18 – Tabela resumo para elaboração do porograma referente às amostras com 20mm de cobrimento e grupo G2- Carbonatado

20 mm	UR (%)	Diâmetro de Poros ($10^{-3}\mu\text{m}$)	Água perdida (ml/g) Amostra 01	Água perdida (ml/g) Amostra 02	Acumulado médio perdida (ml/g)
	11	1,5	0,0544	0,0544	0,0544
	33	2,5	0,0482	0,0482	0,0482
	43	3,5	0,0482	0,0482	0,0482
	59	5	0,0444	0,0454	0,0449
	75	9	0,0388	0,0396	0,0392
	86	16	0,0347	0,0334	0,0341
	94	40	0,0266	0,0266	0,0266
	98	100	0,0251	0,0251	0,0251
	100	10000	0,0102	0,0111	0,0106

Tabela B.19 – Resultados do ensaio de porosimetria por dessorção para G3-Carbonatado

Situação				Saturado	Seco	Final ensaio	Sat.- Seco	Vol. de água na amostra (ml)	Vol. de água perdida (ml)	Vol. de água na amostra corrigido (ml)	Vol. de água perdida (ml)	Água na Amostra (ml/g)	Água perdida (ml/g)
G3-carbonatado	água (100%)	10 mm	9	2.4418	2.2375	2.3396	0.2043	0.1021	0.1022	0.0733	0.0733	0.0306	0.0306
			10	1.7386	1.5994	1.6743	0.1392	0.0749	0.0643	0.0789	0.0677	0.0329	0.0283
		20 mm	11	2.1548	1.9826	2.0613	0.1722	0.0787	0.0935	0.0670	0.0796	0.0280	0.0332
			12	1.7861	1.6477	1.7102	0.1384	0.0625	0.0759	0.0662	0.0804	0.0277	0.0336
	K2SO4 (98%)	10mm	13	2.2286	2.0344	2.0844	0.1942	0.0500	0.1442	0.0377	0.1089	0.0158	0.0455
			14	1.6865	1.5550	1.5886	0.1315	0.0336	0.0979	0.0375	0.1091	0.0156	0.0456
		20mm	15	1.8109	1.6727	1.7100	0.1382	0.0373	0.1009	0.0396	0.1070	0.0165	0.0447
			16	1.3382	1.2381	1.2651	0.1001	0.0270	0.0731	0.0395	0.1071	0.0165	0.0447
	KNO3 (94%)	10mm	1	1.7779	1.6387	1.6671	0.1392	0.0284	0.1108	0.0299	0.1167	0.0125	0.0487
			2	1.3516	1.2482	1.2686	0.1034	0.0204	0.0830	0.0289	0.1177	0.0121	0.0492
		20mm	3	2.5726	2.3724	2.4230	0.2002	0.0506	0.1496	0.0371	0.1095	0.0155	0.0458
			4	2.1102	1.9442	1.9786	0.1660	0.0344	0.1316	0.0304	0.1162	0.0127	0.0485
	KCl (86%)	10mm	5	1.7288	1.5916	1.6128	0.1372	0.0212	0.1160	0.0227	0.1239	0.0095	0.0518
			6	1.7678	1.6349	1.6532	0.1329	0.0183	0.1146	0.0202	0.1264	0.0084	0.0528
		20mm	7	2.8724	2.6353	2.6720	0.2371	0.0367	0.2004	0.0227	0.1239	0.0095	0.0518
			8	1.4164	1.2971	1.3114	0.1193	0.0143	0.1050	0.0176	0.1290	0.0073	0.0539
	NaCl (75%)	10mm	25	1.3902	1.2610	1.2901	0.1292	0.0291	0.1001	0.0330	0.1136	0.0138	0.0474
			26	1.6275	1.5084	1.5191	0.1191	0.0107	0.1084	0.0132	0.1334	0.0055	0.0557
		20mm	27	1.5562	1.4292	1.4416	0.1270	0.0124	0.1146	0.0143	0.1323	0.0060	0.0553
			28	1.7061	1.5860	1.5978	0.1201	0.0118	0.1083	0.0144	0.1322	0.0060	0.0552
	NaBr (59%)	10mm	29	1.2907	1.1809	1.1880	0.1098	0.0071	0.1027	0.0095	0.1371	0.0040	0.0573
			30	1.8956	1.7383	1.7517	0.1573	0.0134	0.1439	0.0125	0.1341	0.0052	0.0560
		20mm	31	1.9226	1.7678	1.7801	0.1548	0.0123	0.1425	0.0116	0.1350	0.0049	0.0564
			32	2.2524	2.0827	2.0986	0.1697	0.0159	0.1538	0.0137	0.1329	0.0057	0.0555
	K2CO3 (43%)	10mm	17	1.9840	1.8274	1.8408	0.1566	0.0134	0.1432	0.0125	0.1341	0.0052	0.0560
			18	1.9840	1.8274	1.8408	0.1566	0.0134	0.1432	0.0125	0.1341	0.0052	0.0560
		20mm	19	2.5419	2.2988	2.3176	0.2431	0.0188	0.2243	0.0113	0.1353	0.0047	0.0565
			20	2.3082	2.1031	2.1197	0.2051	0.0166	0.1885	0.0119	0.1347	0.0050	0.0563
	MgCl2 (33%)	10mm	21	1.3445	1.2274	1.2348	0.1171	0.0074	0.1097	0.0093	0.1373	0.0039	0.0574
			22	1.2328	1.1345	1.1433	0.0983	0.0088	0.0895	0.0131	0.1335	0.0055	0.0557
		20mm	23	1.6832	1.5555	1.5653	0.1277	0.0098	0.1179	0.0113	0.1353	0.0047	0.0565
			24	1.6832	1.5555	1.5653	0.1277	0.0098	0.1179	0.0113	0.1353	0.0047	0.0565
	LiCl (11%)	10mm	41	1.7524	1.5943	1.6028	0.1581	0.0085	0.1496	0.0079	0.1387	0.0033	0.0579
			42	1.4185	1.3088	1.3141	0.1097	0.0053	0.1044	0.0071	0.1395	0.0030	0.0583
		20mm	43	1.9631	1.7614	1.7770	0.2017	0.0156	0.1861	0.0113	0.1353	0.0047	0.0565
			44	1.9631	1.7614	1.7770	0.2017	0.0156	0.1861	0.0113	0.1353	0.0047	0.0565

Tabela B.20 – Tabela resumo para elaboração do porograma referente às amostras com 10mm de cobrimento e grupo G3- Carbonatado

10mm	UR (%)	Diâmetro de Poros ($10^{-3}\mu\text{m}$)	Água perdida (ml/g) Amostra 01	Água perdida (ml/g) Amostra 02	Acumulado médio perdida (ml/g)
	11	1,5	0,0579	0,0583	0,0581
	33	2,5	0,0574	0,0574	0,0574
	43	3,5	0,0560	0,0560	0,0560
	59	5	0,0560	0,0560	0,0560
	75	9	0,0557	0,0557	0,0557
	86	16	0,0528	0,0518	0,0523
	94	40	0,0487	0,0492	0,0489
	98	100	0,0455	0,0456	0,0455
	100	10000	0,0283	0,0306	0,0295

Tabela B.21 – Tabela resumo para elaboração do porograma referente às amostras com 20mm de cobrimento e grupo G3- Carbonatado

20 mm	UR (%)	Diâmetro de Poros ($10^{-3}\mu\text{m}$)	Água perdida (ml/g) Amostra 01	Água perdida (ml/g) Amostra 02	Acumulado médio perdida (ml/g)
	11	1,5	0,0565	0,0565	0,0565
	33	2,5	0,0565	0,0565	0,0565
	43	3,5	0,0563	0,0565	0,0564
	59	5	0,0555	0,0564	0,0559
	75	9	0,0552	0,0553	0,0552
	86	16	0,0518	0,0539	0,0528
	94	40	0,0458	0,0485	0,0471
	98	100	0,0447	0,0447	0,0447
	100	10000	0,0332	0,0336	0,0334

Tabela B.22 – Resultados do ensaio de porosimetria por dessorção para G4-Carbonatado

Situação				Saturado	Seco	Final ensaio	Sat.- Seco	Vol. de água na amostra (ml)	Vol. de água perdida (ml)	Vol. de água na amostra corrigido (ml)	Vol. de água perdida (ml)	Água na Amostra (ml/g)	Água perdida (ml/g)
G4-carbonatado	água (100%)	10 mm	13	2.7489	2.5005	2.6504	0.2484	0.1499	0.0985	0.0885	0.0581	0.0370	0.0243
			14	2.5999	2.3811	2.4966	0.2188	0.1155	0.1033	0.0774	0.0692	0.0323	0.0289
		20 mm	15	2.7025	2.4664	2.5843	0.2361	0.1179	0.1182	0.0732	0.0734	0.0306	0.0307
			16	2.9533	2.7035	2.8357	0.2498	0.1322	0.1176	0.0776	0.0690	0.0324	0.0288
	K2SO4 (98%)	10mm	1	2.9784	2.7266	2.8015	0.2518	0.0749	0.1769	0.0436	0.1030	0.0182	0.0430
			2	2.4105	2.2178	2.2759	0.1927	0.0581	0.1346	0.0442	0.1024	0.0185	0.0428
		20mm	3	1.7456	1.5909	1.6376	0.1547	0.0467	0.1080	0.0443	0.1023	0.0185	0.0427
			4	2.6684	2.4526	2.5374	0.2158	0.0848	0.1310	0.0576	0.0890	0.0241	0.0372
	KNO3 (94%)	10mm	5	3.1093	2.8641	2.9328	0.2452	0.0687	0.1765	0.0411	0.1055	0.0172	0.0441
			6	4.3037	3.9605	4.0568	0.3432	0.0963	0.2469	0.0411	0.1055	0.0172	0.0441
		20mm	7	3.0231	2.7600	2.8354	0.2631	0.0754	0.1877	0.0420	0.1046	0.0175	0.0437
			8	2.1995	2.0222	2.0746	0.1773	0.0524	0.1249	0.0433	0.1033	0.0181	0.0431
	KCl (86%)	10mm	9	3.5322	3.2547	3.3107	0.2775	0.0560	0.2215	0.0296	0.1170	0.0124	0.0489
			10	3.3821	3.1102	3.1615	0.2719	0.0513	0.2206	0.0277	0.1189	0.0116	0.0497
		20mm	11	2.4801	2.2569	2.2984	0.2232	0.0415	0.1817	0.0273	0.1193	0.0114	0.0498
			12	1.0981	0.9984	1.0148	0.0997	0.0164	0.0833	0.0241	0.1225	0.0101	0.0512
	NaCl (75%)	10mm	29	2.1625	1.9965	2.0237	0.1660	0.0272	0.1388	0.0240	0.1226	0.0100	0.0512
			30	3.1059	2.8451	2.8921	0.2608	0.0470	0.2138	0.0264	0.1202	0.0110	0.0502
		20mm	31	2.6644	2.4360	2.4792	0.2284	0.0432	0.1852	0.0277	0.1189	0.0116	0.0496
			32	1.9533	1.7783	1.8038	0.1750	0.0255	0.1495	0.0214	0.1252	0.0089	0.0523
	NaBr (59%)	10mm	33	3.5690	3.2693	3.3042	0.2997	0.0349	0.2648	0.0171	0.1295	0.0071	0.0541
			34	3.5690	3.2693	3.3042	0.2997	0.0349	0.2648	0.0171	0.1295	0.0071	0.0541
		20mm	35	2.0261	1.8652	1.8812	0.1609	0.0160	0.1449	0.0146	0.1320	0.0061	0.0551
			36	3.2841	2.9923	3.0224	0.2918	0.0301	0.2617	0.0151	0.1315	0.0063	0.0549
	K2CO3 (43%)	10mm	21	1.8789	1.7188	1.7322	0.1601	0.0134	0.1467	0.0123	0.1343	0.0051	0.0561
			22	2.1058	1.9245	1.9409	0.1813	0.0164	0.1649	0.0133	0.1333	0.0055	0.0557
		20mm	23	1.8277	1.5317	1.5622	0.2960	0.0305	0.2655	0.0151	0.1315	0.0063	0.0549
			24	1.8738	1.6457	1.7072	0.2281	0.0615	0.1666	0.0395	0.1071	0.0165	0.0447
	MgCl2 (33%)	10mm	25	3.2739	3.0267	3.0483	0.2472	0.0216	0.2256	0.0128	0.1338	0.0054	0.0559
			26	3.6980	3.3843	3.4109	0.3137	0.0266	0.2871	0.0124	0.1342	0.0052	0.0560
		20mm	27	1.9747	1.7857	1.8016	0.1890	0.0159	0.1731	0.0123	0.1343	0.0052	0.0561
			28	2.6046	2.3877	2.4013	0.2169	0.0136	0.2033	0.0092	0.1374	0.0038	0.0574
	LiCl (11%)	10mm	45	2.8104	2.5850	2.5971	0.2254	0.0121	0.2133	0.0079	0.1387	0.0033	0.0579
			46	1.2600	1.1599	1.1644	0.1001	0.0045	0.0956	0.0066	0.1400	0.0028	0.0585
		20mm	47	2.3212	2.0990	2.1149	0.2222	0.0159	0.2063	0.0105	0.1361	0.0044	0.0568
			48	1.6026	1.4486	1.4551	0.1540	0.0065	0.1475	0.0062	0.1404	0.0026	0.0586

Tabela B.23 – Tabela resumo para elaboração do porograma referente às amostras com 10mm de cobertura e grupo G4- Carbonatado

10mm	UR (%)	Diâmetro de Poros ($10^{-3}\mu\text{m}$)	Água perdida (ml/g) Amostra 01	Água perdida (ml/g) Amostra 02	Acumulado médio perdida (ml/g)
	11	1,5	0,0579	0,0585	0,0582
	33	2,5	0,0559	0,0560	0,0560
	43	3,5	0,0557	0,0561	0,0559
	59	5	0,0541	0,0541	0,0541
	75	9	0,0502	0,0512	0,0507
	86	16	0,0489	0,0497	0,0493
	94	40	0,0441	0,0441	0,0441
	98	100	0,0428	0,0430	0,0429
	100	10000	0,0243	0,0289	0,0266

Tabela B.24 – Tabela resumo para elaboração do porograma referente às amostras com 20mm de cobrimento e grupo G4- Carbonatado

20 mm	UR (%)	Diâmetro de Poros ($10^{-3}\mu\text{m}$)	Água perdida (ml/g) Amostra 01	Água perdida (ml/g) Amostra 02	Acumulado médio perdida (ml/g)
	11	1,5	0,0568	0,0586	0,0577
	33	2,5	0,0561	0,0574	0,0567
	43	3,5	0,0549	0,0549	0,0549
	59	5	0,0549	0,0549	0,0549
	75	9	0,0523	0,0523	0,0523
	86	16	0,0498	0,0512	0,0505
	94	40	0,0431	0,0437	0,0434
	98	100	0,0372	0,0427	0,0400
	100	10000	0,0288	0,0307	0,0297

ANEXO C

RESULTADOS DO ENSAIO DE ABSORÇÃO CAPILAR

O ensaio de absorção capilar foi realizado em três corpos-de-prova, sendo que, o resultado final corresponde à média entre os três resultados encontrados para cada corpo-de-prova. O resultado de absorção capilar encontrado para cada grupo de estudo na situação não-carbonatado ou carbonatado corresponde ao valor em destaque nas tabelas. A área de contato do corpo-de-prova com a água para o cálculo da absorção capilar é 19,635 cm².

Tabela C.1 – Resultados do ensaio de absorção capilar para G1-Não Carbonatado

tempo	raiz tempo	1V			2V			3V			Média	
		Massa (g)	Variação de Massa	Abs.Cap. (g/cm ²)	Massa (g)	Variação de Massa	Abs.Cap. (g/cm ²)	Massa (g)	Variação de Massa	Abs.Cap. (g/cm ²)	Variação de Massa	Abs.Cap. (g/cm ²)
0	0,000	375,27	0,00	0,00	373,15	0,00	0,00	373,15	0,00	0,00	0,00	0,00
15	3,873	378,25	2,98	0,15	377,44	4,29	0,22	377,44	4,29	0,22	3,85	0,20
30	5,477	379,45	4,18	0,21	379,27	6,12	0,31	379,27	6,12	0,31	5,47	0,28
45	6,708	380,37	5,10	0,26	380,70	7,55	0,38	380,70	7,55	0,38	6,73	0,34
60	7,746	380,96	5,69	0,29	381,65	8,50	0,43	381,65	8,50	0,43	7,56	0,39
75	8,660	381,59	6,32	0,32	382,59	9,44	0,48	382,59	9,44	0,48	8,40	0,43
90	9,487	382,20	6,93	0,35	383,49	10,34	0,53	383,49	10,34	0,53	9,20	0,47
105	10,247	382,65	7,38	0,38	384,17	11,02	0,56	384,17	11,02	0,56	9,81	0,50
120	10,954	383,10	7,83	0,40	384,80	11,65	0,59	384,80	11,65	0,59	10,38	0,53
135	11,619	383,55	8,28	0,42	385,39	12,24	0,62	385,39	12,24	0,62	10,92	0,56
150	12,247	384,02	8,75	0,45	386,07	12,92	0,66	386,07	12,92	0,66	11,53	0,59
165	12,845	384,37	9,10	0,46	386,51	13,36	0,68	386,51	13,36	0,68	11,94	0,61
180	13,416	384,71	9,44	0,48	387,01	13,86	0,71	387,01	13,86	0,71	12,39	0,63
360	18,974	388,44	13,17	0,67	391,95	18,80	0,96	391,95	18,80	0,96	16,92	0,86
1440	37,947	399,64	24,37	1,24	404,38	31,23	1,59	404,38	31,23	1,59	28,94	1,47
2880	53,666	407,65	32,38	1,65	409,15	36,00	1,83	409,15	36,00	1,83	34,79	1,77
4320	65,727	411,75	36,48	1,86	409,87	36,72	1,87	409,87	36,72	1,87	36,64	1,87

Tabela C.2 – Resultados do ensaio de absorção capilar para G2-Não Carbonatado

tempo	raiz tempo	1V			2V			3V			Média	
		Massa (g)	Variação de Massa	Abs.Cap. (g/cm ²)	Massa (g)	Variação de Massa	Abs.Cap. (g/cm ²)	Massa (g)	Variação de Massa	Abs.Cap. (g/cm ²)	Variação de Massa	Abs.Cap. (g/cm ²)
0,00	0,000	382,86	0,00	0,00	385,30	0,00	0,00	395,17	0,00	0,00	0,00	0,00
15,00	3,873	386,21	3,35	0,17	388,37	3,07	0,16	398,14	2,97	0,15	3,13	0,16
30,00	5,477	387,40	4,54	0,23	389,53	4,23	0,22	399,15	3,98	0,20	4,25	0,22
45,00	6,708	388,40	5,54	0,28	390,51	5,21	0,27	399,96	4,79	0,24	5,18	0,26
60,00	7,746	389,07	6,21	0,32	391,19	5,89	0,30	400,57	5,40	0,28	5,83	0,30
75,00	8,660	389,73	6,87	0,35	391,85	6,55	0,33	401,12	5,95	0,30	6,46	0,33
90,00	9,487	390,37	7,51	0,38	392,48	7,18	0,37	401,71	6,54	0,33	7,08	0,36
105,00	10,247	391,08	8,22	0,42	393,11	7,81	0,40	402,13	6,96	0,35	7,66	0,39
120,00	10,954	391,38	8,52	0,43	393,60	8,30	0,42	402,58	7,41	0,38	8,08	0,41
135,00	11,619	392,12	9,26	0,47	394,07	8,77	0,45	403,03	7,86	0,40	8,63	0,44
150,00	12,247	392,59	9,73	0,50	394,55	9,25	0,47	403,49	8,32	0,42	9,10	0,46
165,00	12,845	392,94	10,08	0,51	394,90	9,60	0,49	403,80	8,63	0,44	9,44	0,48
180,00	13,416	393,29	10,43	0,53	395,26	9,96	0,51	404,12	8,95	0,46	9,78	0,50
360,00	18,974	397,28	14,42	0,73	399,32	14,02	0,71	407,90	12,73	0,65	13,72	0,70
1440,00	37,947	409,30	26,44	1,35	412,22	26,92	1,37	420,02	24,85	1,27	26,07	1,33
2880,00	53,666	417,70	34,84	1,77	421,34	36,04	1,84	428,93	33,76	1,72	34,88	1,78
4320,00	65,727	422,49	39,63	2,02	427,71	42,41	2,16	438,63	43,46	2,21	41,83	2,13

Tabela C.3 – Resultados do ensaio de absorção capilar para G3-Não Carbonatado

tempo	raiz tempo	1V			2V			3V			Média	
		Massa (g)	Varição de Massa	Abs.Cap. (g/cm ²)	Massa (g)	Varição de Massa	Abs.Cap. (g/cm ²)	Massa (g)	Varição de Massa	Abs.Cap. (g/cm ²)	Varição de Massa	Abs.Cap. (g/cm ²)
0,00	0,000	380,32	0,00	0,00	375,64	0,00	0,00	376,44	0,00	0,00	0,00	0,00
15,00	3,873	384,48	4,16	0,21	379,36	3,72	0,19	379,40	2,96	0,15	3,61	0,18
30,00	5,477	386,19	5,87	0,30	381,07	5,43	0,28	380,75	4,31	0,22	5,20	0,27
45,00	6,708	387,57	7,25	0,37	382,57	6,93	0,35	381,90	5,46	0,28	6,55	0,33
60,00	7,746	388,46	8,14	0,41	382,56	6,92	0,35	382,66	6,22	0,32	7,09	0,36
75,00	8,660	389,35	9,03	0,46	384,58	8,94	0,46	383,46	7,02	0,36	8,33	0,42
90,00	9,487	390,24	9,92	0,51	385,53	9,89	0,50	384,19	7,75	0,39	9,19	0,47
105,00	10,247	390,86	10,54	0,54	386,20	10,56	0,54	384,73	8,29	0,42	9,80	0,50
120,00	10,954	391,53	11,21	0,57	386,92	11,28	0,57	385,35	8,91	0,45	10,47	0,53
135,00	11,619	392,12	11,80	0,60	387,54	11,90	0,61	385,88	9,44	0,48	11,05	0,56
150,00	12,247	392,72	12,40	0,63	388,16	12,52	0,64	386,46	10,02	0,51	11,65	0,59
165,00	12,845	393,17	12,85	0,65	388,62	12,98	0,66	386,83	10,39	0,53	12,07	0,61
180,00	13,416	393,63	13,31	0,68	389,10	13,46	0,69	387,28	10,84	0,55	12,54	0,64
360,00	18,974	398,47	18,15	0,92	394,11	18,47	0,94	391,78	15,34	0,78	17,32	0,88
1440,00	37,947	411,61	31,29	1,59	408,48	32,84	1,67	406,17	29,73	1,51	31,29	1,59
2880,00	53,666	417,56	37,24	1,90	413,49	37,85	1,93	414,23	37,79	1,92	37,63	1,92
4320,00	65,727	418,07	37,75	1,92	413,76	38,12	1,94	414,71	38,27	1,95	38,05	1,94

Tabela C.4 – Resultados do ensaio de absorção capilar para G4-Não Carbonatado

tempo	raiz tempo	1V			2V			3V			Média	
		Massa (g)	Varição de Massa	Abs.Cap. (g/cm ²)	Massa (g)	Varição de Massa	Abs.Cap. (g/cm ²)	Massa (g)	Varição de Massa	Abs.Cap. (g/cm ²)	Varição de Massa	Abs.Cap. (g/cm ²)
0,00	0,000	367,66	0,00	0,00	379,51	0,00	0,00	376,32	0,00	0,00	0,00	0,00
15,00	3,873	370,95	3,29	0,17	382,85	3,34	0,17	379,47	3,15	0,16	3,26	0,17
30,00	5,477	372,51	4,85	0,25	384,64	5,13	0,26	381,04	4,72	0,24	4,90	0,25
45,00	6,708	373,81	6,15	0,31	386,09	6,58	0,34	382,32	6,00	0,31	6,24	0,32
60,00	7,746	374,62	6,96	0,35	387,04	7,53	0,38	383,16	6,84	0,35	7,11	0,36
75,00	8,660	375,47	7,81	0,40	388,00	8,49	0,43	384,05	7,73	0,39	8,01	0,41
90,00	9,487	376,26	8,60	0,44	388,86	9,35	0,48	384,80	8,48	0,43	8,81	0,45
105,00	10,247	376,88	9,22	0,47	389,58	10,07	0,51	385,45	9,13	0,46	9,47	0,48
120,00	10,954	377,51	9,85	0,50	390,28	10,77	0,55	386,07	9,75	0,50	10,12	0,52
135,00	11,619	378,08	10,42	0,53	391,02	11,51	0,59	386,81	10,49	0,53	10,81	0,55
150,00	12,247	378,67	11,01	0,56	391,69	12,18	0,62	387,45	11,13	0,57	11,44	0,58
165,00	12,845	379,08	11,42	0,58	392,15	12,64	0,64	387,88	11,56	0,59	11,87	0,60
180,00	13,416	379,54	11,88	0,61	392,65	13,14	0,67	388,38	12,06	0,61	12,36	0,63
360,00	18,974	384,36	16,70	0,85	397,71	18,20	0,93	393,01	16,69	0,85	17,20	0,88
1440,00	37,947	397,72	30,06	1,53	411,56	32,05	1,63	405,93	29,61	1,51	30,57	1,56
2880,00	53,666	406,43	38,77	1,97	419,94	40,43	2,06	414,53	38,21	1,95	39,14	1,99
4320,00	65,727	410,67	43,01	2,19	421,14	41,63	2,12	419,16	42,84	2,18	42,49	2,16

Tabela C.5 – Resultados do ensaio de absorção capilar para G1- Carbonatado

tempo	raiz tempo	4V			5V			6V			Média	
		Massa (g)	Varição de Massa	Abs.Cap. (g/cm ²)	Massa (g)	Varição de Massa	Abs.Cap. (g/cm ²)	Massa (g)	Varição de Massa	Abs.Cap. (g/cm ²)	Varição de Massa	Abs.Cap. (g/cm ²)
0,00	0,000	373,59	0,00	0,00	379,52	0,00	0,00	393,93	0,00	0,00	0,00	0,00
15,00	3,873	378,92	5,33	0,27	383,99	4,47	0,23	397,88	3,95	0,20	4,58	0,23
30,00	5,477	383,96	10,37	0,53	387,37	7,85	0,40	401,14	7,21	0,37	8,48	0,43
45,00	6,708	386,13	12,54	0,64	388,95	9,43	0,48	402,68	8,75	0,45	10,24	0,52
60,00	7,746	388,60	15,01	0,76	390,73	11,21	0,57	403,93	10,00	0,51	12,07	0,61
75,00	8,660	389,98	16,39	0,83	391,75	12,23	0,62	404,82	10,89	0,55	13,17	0,67
90,00	9,487	391,20	17,61	0,90	392,69	13,17	0,67	405,74	11,81	0,60	14,20	0,72
105,00	10,247	392,87	19,28	0,98	393,85	14,33	0,73	406,80	12,87	0,66	15,49	0,79
120,00	10,954	394,13	20,54	1,05	394,95	15,43	0,79	407,92	13,99	0,71	16,65	0,85
135,00	11,619	395,15	21,56	1,10	395,69	16,17	0,82	408,69	14,76	0,75	17,50	0,89
150,00	12,247	396,16	22,57	1,15	396,52	17,00	0,87	409,59	15,66	0,80	18,41	0,94
165,00	12,845	397,15	23,56	1,20	397,12	17,60	0,90	410,23	16,30	0,83	19,15	0,98
180,00	13,416	397,77	24,18	1,23	397,88	18,36	0,94	410,98	17,05	0,87	19,86	1,01
360,00	18,974	406,95	33,36	1,70	407,83	28,31	1,44	421,60	27,67	1,41	29,78	1,52
1440,00	37,947	407,63	34,04	1,73	412,69	33,17	1,69	428,35	34,42	1,75	33,88	1,73
2880,00	53,666	407,84	34,25	1,74	412,93	33,41	1,70	428,57	34,64	1,76	34,10	1,74
4320,00	65,727	408,17	34,58	1,76	413,21	33,69	1,72	428,78	34,85	1,77	34,37	1,75

Tabela C.6 – Resultados do ensaio de absorção capilar para G2- Carbonatado

tempo	raiz tempo	4V			5V			6V			Média	
		Massa (g)	Variação de Massa	Abs.Cap. (g/cm ²)	Massa (g)	Variação de Massa	Abs.Cap. (g/cm ²)	Massa (g)	Variação de Massa	Abs.Cap. (g/cm ²)	Variação de Massa	Abs.Cap. (g/cm ²)
0,00	0,000	401,30	0,00	0,00	401,78	0,00	0,00	398,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15,00	3,873	402,86	1,56	0,08	404,23	2,45	0,12	400,56	2,56	0,13	2,19	0,11
30,00	5,477	404,50	3,20	0,16	406,71	4,93	0,25	402,80	4,80	0,24	4,31	0,22
45,00	6,708	405,36	4,06	0,21	407,15	5,37	0,27	403,77	5,77	0,29	5,07	0,26
60,00	7,746	406,21	4,91	0,25	408,42	6,64	0,34	404,65	6,65	0,34	6,07	0,31
75,00	8,660	406,86	5,56	0,28	409,00	7,22	0,37	405,12	7,12	0,36	6,63	0,34
90,00	9,487	407,17	5,87	0,30	409,49	7,71	0,39	405,74	7,74	0,39	7,11	0,36
105,00	10,247	407,56	6,26	0,32	410,02	8,24	0,42	406,63	8,63	0,44	7,71	0,39
120,00	10,954	408,31	7,01	0,36	410,77	8,99	0,46	407,05	9,05	0,46	8,35	0,43
135,00	11,619	408,66	7,36	0,37	411,08	9,30	0,47	407,52	9,52	0,48	8,73	0,44
150,00	12,247	409,15	7,85	0,40	411,71	9,93	0,51	407,98	9,98	0,51	9,25	0,47
165,00	12,845	409,52	8,22	0,42	412,00	10,22	0,52	408,23	10,23	0,52	9,56	0,49
180,00	13,416	409,83	8,53	0,43	412,39	10,61	0,54	408,75	10,75	0,55	9,96	0,51
360,00	18,974	414,48	13,18	0,67	417,42	15,64	0,80	414,24	16,24	0,83	15,02	0,76
1440,00	37,947	426,20	24,90	1,27	430,35	28,57	1,46	428,57	30,57	1,56	28,01	1,43
2880,00	53,666	434,34	33,04	1,68	435,70	33,92	1,73	432,06	34,06	1,73	33,67	1,71
4320,00	65,727	434,81	33,51	1,71	435,98	34,20	1,74	432,28	34,28	1,75	34,00	1,74

Tabela C.7 – Resultados do ensaio de absorção capilar para G3- Carbonatado

tempo	raiz tempo	4V			5V			6V			Média	
		Massa (g)	Variação de Massa	Abs.Cap. (g/cm ²)	Massa (g)	Variação de Massa	Abs.Cap. (g/cm ²)	Massa (g)	Variação de Massa	Abs.Cap. (g/cm ²)	Variação de Massa	Abs.Cap. (g/cm ²)
0,00	0,000	391,77	0,00	0,00	386,57	0,00	0,00	392,94	0,00	0,00	0,00	0,00
15,00	3,873	395,64	3,87	0,20	388,65	2,08	0,11	395,56	2,62	0,13	2,86	0,15
30,00	5,477	398,76	6,99	0,36	391,99	5,42	0,28	398,90	5,96	0,30	6,12	0,31
45,00	6,708	399,35	7,58	0,39	392,56	5,99	0,31	399,98	7,04	0,36	6,87	0,35
60,00	7,746	401,65	9,88	0,50	394,41	7,84	0,40	400,85	7,91	0,40	8,54	0,44
75,00	8,660	402,56	10,79	0,55	395,03	8,46	0,43	401,56	8,62	0,44	9,29	0,47
90,00	9,487	403,28	11,51	0,59	395,87	9,30	0,47	402,03	9,09	0,46	9,97	0,51
105,00	10,247	404,33	12,56	0,64	396,53	9,96	0,51	402,87	9,93	0,51	10,82	0,55
120,00	10,954	405,19	13,42	0,68	397,66	11,09	0,56	403,44	10,50	0,53	11,67	0,59
135,00	11,619	405,98	14,21	0,72	398,12	11,55	0,59	404,00	11,06	0,56	12,27	0,63
150,00	12,247	406,57	14,80	0,75	398,97	12,40	0,63	404,47	11,53	0,59	12,91	0,66
165,00	12,845	407,01	15,24	0,78	399,55	12,98	0,66	404,72	11,78	0,60	13,33	0,68
180,00	13,416	407,66	15,89	0,81	400,07	13,50	0,69	405,04	12,10	0,62	13,83	0,70
360,00	18,974	415,86	24,09	1,23	408,19	21,62	1,10	412,28	19,34	0,98	21,68	1,10
1440,00	37,947	424,00	32,23	1,64	419,58	33,01	1,68	424,23	31,29	1,59	32,18	1,64
2880,00	53,666	424,25	32,48	1,65	419,88	33,31	1,70	424,61	31,67	1,61	32,49	1,65
4320,00	65,727	424,43	32,66	1,66	420,10	33,53	1,71	424,84	31,90	1,62	32,70	1,67

Tabela C.8 – Resultados do ensaio de absorção capilar para G4- Carbonatado

tempo	raiz tempo	4V			5V			6V			Média	
		Massa (g)	Variação de Massa	Abs.Cap. (g/cm ²)	Massa (g)	Variação de Massa	Abs.Cap. (g/cm ²)	Massa (g)	Variação de Massa	Abs.Cap. (g/cm ²)	Variação de Massa	Abs.Cap. (g/cm ²)
0,00	0,000	389,27	0,00	0,00	392,45	0,00	0,00	385,23	0,00	0,00	0,00	0,00
15,00	3,873	393,56	4,29	0,22	397,56	5,11	0,26	390,23	5,00	0,25	4,80	0,24
30,00	5,477	397,86	8,59	0,44	401,49	9,04	0,46	393,42	8,19	0,42	8,61	0,44
45,00	6,708	398,96	9,69	0,49	403,23	10,78	0,55	395,65	10,42	0,53	10,30	0,52
60,00	7,746	401,22	11,95	0,61	405,06	12,61	0,64	396,44	11,21	0,57	11,92	0,61
75,00	8,660	402,46	13,19	0,67	406,52	14,07	0,72	397,48	12,25	0,62	13,17	0,67
90,00	9,487	403,33	14,06	0,72	407,32	14,87	0,76	398,35	13,12	0,67	14,02	0,71
105,00	10,247	404,65	15,38	0,78	408,56	16,11	0,82	399,56	14,33	0,73	15,27	0,78
120,00	10,954	405,85	16,58	0,84	410,07	17,62	0,90	400,72	15,49	0,79	16,56	0,84
135,00	11,619	406,77	17,50	0,89	411,48	19,03	0,97	401,23	16,00	0,81	17,51	0,89
150,00	12,247	407,65	18,38	0,94	412,02	19,57	1,00	402,45	17,22	0,88	18,39	0,94
165,00	12,845	408,33	19,06	0,97	412,82	20,37	1,04	403,23	18,00	0,92	19,14	0,97
180,00	13,416	409,13	19,86	1,01	413,68	21,23	1,08	403,98	18,75	0,95	19,95	1,02
360,00	18,974	419,00	29,73	1,51	424,27	31,82	1,62	415,01	29,78	1,52	30,44	1,55
1440,00	37,947	425,34	36,07	1,84	429,17	36,72	1,87	422,28	37,05	1,89	36,61	1,86
2880,00	53,666	425,00	35,73	1,82	429,30	36,85	1,88	422,47	37,24	1,90	36,61	1,86
4320,00	65,727	425,66	36,39	1,85	429,46	37,01	1,88	422,70	37,47	1,91	36,96	1,88

ANEXO D

RESULTADOS DO ENSAIO DE ABSORÇÃO POR IMERSÃO

O ensaio de absorção por imersão foi realizado em três corpos-de-prova, sendo que, o resultado final corresponde à média entre os três resultados encontrados para cada corpo-de-prova. O resultado de absorção por imersão encontrado para cada grupo de estudo na situação não-carbonatado ou carbonatado corresponde ao valor em destaque nas tabelas.

Tabela D.1 – Resultados do ensaio de absorção por imersão para G1-Não Carbonatado

tempo (min)	raiz tempo	1V		2V		3V		Média
		Massa (g)	Abs. Imersão	Massa (g)	Abs. Imersão	Massa (g)	Abs. Imersão	Abs. Imersão
0,00	0,000	375,97	0,00	373,62	0,00	373,62	0,00	0,00
30,00	5,477	383,86	2,10	383,89	2,75	383,89	2,75	2,53
60,00	7,746	387,61	3,10	387,72	3,77	387,72	3,77	3,55
75,00	8,660	389,48	3,59	389,55	4,26	389,55	4,26	4,04
90,00	9,487	391,50	4,13	391,60	4,81	391,60	4,81	4,59
105,00	10,247	393,12	4,56	393,18	5,24	393,18	5,24	5,01
120,00	10,954	394,44	4,91	394,45	5,58	394,45	5,58	5,35
135,00	11,619	395,56	5,21	395,59	5,88	395,59	5,88	5,66
150,00	12,247	396,53	5,47	396,49	6,12	396,49	6,12	5,90
165,00	12,845	402,14	6,96	400,40	7,17	400,40	7,17	7,10
180,00	13,416	405,02	7,73	402,17	7,64	402,17	7,64	7,67
360,00	18,974	406,51	8,12	402,99	7,86	402,99	7,86	7,95
480,00	21,909	407,93	8,50	403,81	8,08	403,81	8,08	8,22
1440,00	37,947	410,58	9,21	408,56	9,35	408,56	9,35	9,30
2880,00	53,666	410,74	9,25	408,72	9,39	408,72	9,39	9,35
4320,00	65,727	410,77	9,26	408,72	9,39	408,72	9,39	9,35

Tabela D.2 – Resultados do ensaio de absorção por imersão para G2-Não Carbonatado

tempo (min)	raiz tempo	1V		2V		3V		Média
		Massa (g)	Abs. Imersão	Massa (g)	Abs. Imersão	Massa (g)	Abs. Imersão	Abs. Imersão
0,00	0,000	385,19	0,00	387,64	0,00	397,11	0,00	0,00
30,00	5,477	391,87	1,73	396,32	2,24	405,26	2,05	2,01
60,00	7,746	395,34	2,64	400,43	3,30	409,62	3,15	3,03
75,00	8,660	397,12	3,10	402,64	3,87	411,93	3,73	3,57
90,00	9,487	399,15	3,62	405,18	4,52	414,51	4,38	4,18
105,00	10,247	400,90	4,08	407,29	5,07	416,69	4,93	4,69
120,00	10,954	402,24	4,43	408,79	5,46	418,43	5,37	5,08
135,00	11,619	403,36	4,72	410,00	5,77	419,80	5,71	5,40
150,00	12,247	404,27	4,95	410,95	6,01	420,90	5,99	5,65
165,00	12,845	413,74	7,41	418,80	8,04	430,02	8,29	7,91
180,00	13,416	417,97	8,51	422,37	8,96	433,80	9,24	8,90
360,00	18,974	419,88	9,01	424,07	9,40	435,48	9,66	9,36
480,00	21,909	421,59	9,45	425,62	9,80	436,97	10,04	9,76
1440,00	37,947	425,53	10,47	427,70	10,33	438,90	10,52	10,44
2880,00	53,666	425,72	10,52	427,90	10,39	439,09	10,57	10,49
4320,00	65,727	425,76	10,53	427,96	10,40	439,22	10,60	10,51

Tabela D.3 – Resultados do ensaio de absorção por imersão para G3-Não Carbonatado

tempo (min)	raiz tempo	1V		2V		3V		Média
		Massa (g)	Abs. Imersão	Massa (g)	Abs. Imersão	Massa (g)	Abs. Imersão	Abs. Imersão
0,00	0,000	381,30	0,00	377,01	0,00	377,67	0,00	0,00
30,00	5,477	394,31	3,41	390,76	3,65	390,38	3,37	3,47
60,00	7,746	398,75	4,58	396,38	5,14	396,82	5,07	4,93
75,00	8,660	400,36	5,00	398,46	5,69	400,16	5,95	5,55
90,00	9,487	401,82	5,38	399,93	6,08	402,70	6,63	6,03
105,00	10,247	402,97	5,68	401,18	6,41	404,33	7,06	6,38
120,00	10,954	403,95	5,94	402,20	6,68	405,65	7,41	6,68
135,00	11,619	404,83	6,17	403,11	6,92	406,82	7,72	6,94
150,00	12,247	405,60	6,37	403,91	7,14	407,88	8,00	7,17
165,00	12,845	410,75	7,72	408,38	8,32	412,34	9,18	8,41
180,00	13,416	412,93	8,30	410,49	8,88	414,01	9,62	8,93
360,00	18,974	413,99	8,57	411,68	9,20	414,10	9,65	9,14
480,00	21,909	415,02	8,84	412,64	9,45	414,22	9,68	9,32
1440,00	37,947	417,94	9,61	413,55	9,69	414,44	9,74	9,68
2880,00	53,666	418,08	9,65	413,71	9,73	414,59	9,78	9,72
4320,00	65,727	418,13	9,66	413,77	9,75	414,70	9,80	9,74

Tabela D.4 – Resultados do ensaio de absorção por imersão para G4-Não Carbonatado

tempo (min)	raiz tempo	1V		2V		3V		Média
		Massa (g)	Abs. Imersão	Massa (g)	Abs. Imersão	Massa (g)	Abs. Imersão	Abs. Imersão
0,00	0,000	369,49	0,00	381,16	0,00	377,81	0,00	0,00
30,00	5,477	376,53	1,91	391,72	2,77	387,79	2,64	2,44
60,00	7,746	379,62	2,74	396,61	4,05	392,31	3,84	3,54
75,00	8,660	381,34	3,21	399,10	4,71	394,46	4,41	4,11
90,00	9,487	383,31	3,74	401,24	5,27	396,63	4,98	4,66
105,00	10,247	385,12	4,23	402,71	5,65	398,41	5,45	5,11
120,00	10,954	386,67	4,65	403,91	5,97	399,82	5,83	5,48
135,00	11,619	388,03	5,02	404,89	6,23	401,06	6,15	5,80
150,00	12,247	389,14	5,32	405,78	6,46	402,16	6,45	6,07
165,00	12,845	397,23	7,51	413,32	8,44	410,05	8,53	8,16
180,00	13,416	401,71	8,72	416,64	9,31	413,70	9,50	9,18
360,00	18,974	403,92	9,32	418,40	9,77	415,62	10,01	9,70
480,00	21,909	405,95	9,87	420,01	10,19	417,37	10,47	10,18
1440,00	37,947	411,30	11,32	421,06	10,47	420,16	11,21	11,00
2880,00	53,666	411,51	11,37	421,23	10,51	420,32	11,25	11,05
4320,00	65,727	411,57	11,39	421,28	10,53	420,43	11,28	11,07

Tabela D.5 – Resultados do ensaio de absorção por imersão para G1-Carbonatado

tempo (min)	raiz tempo	4V		5V		6V		Média
		Massa (g)	Abs. Imersão	Massa (g)	Abs. Imersão	Massa (g)	Abs. Imersão	Abs. Imersão
0,00	0,000	372,02	0,00	378,15	0,00	392,34	0,00	0,00
30,00	5,477	387,41	4,14	390,46	3,26	405,15	3,27	3,26
60,00	7,746	393,94	5,89	395,52	4,59	410,80	4,71	4,65
90,00	9,487	398,51	7,12	399,18	5,56	414,95	5,76	5,66
120,00	10,954	401,95	8,05	402,08	6,33	418,14	6,58	6,45
150,00	12,247	404,09	8,62	403,97	6,83	420,15	7,09	6,96
180,00	13,416	405,85	9,09	405,97	7,36	422,35	7,65	7,50
210,00	14,491	406,34	9,23	408,12	7,93	424,69	8,25	8,09
240,00	15,492	406,42	9,25	409,38	8,26	425,90	8,55	8,41
480,00	21,909	406,68	9,32	411,66	8,86	426,08	8,60	8,73
1440,00	37,947	406,90	9,38	411,65	8,86	426,65	8,74	8,80
2880,00	53,666	407,02	9,41	411,75	8,89	426,98	8,83	8,86
4320,00	65,727	407,98	9,67	412,16	8,99	427,08	8,85	8,92

Tabela D.6 – Resultados do ensaio de absorção por imersão para G2-Carbonatado

tempo (min)	raiz tempo	4V		5V		6V		Média
		Massa (g)	Abs. Imersão	Massa (g)	Abs. Imersão	Massa (g)	Abs. Imersão	Abs. Imersão
0,00	0,000	398,85	0,00	399,32	0,00	395,47	0,00	0,00
30,00	5,477	406,90	2,02	407,97	2,17	404,80	2,36	2,18
60,00	7,746	411,00	3,05	412,41	3,28	408,74	3,36	3,23
90,00	9,487	413,45	3,66	414,73	3,86	411,09	3,95	3,82
120,00	10,954	415,12	4,08	416,31	4,25	412,78	4,38	4,24
150,00	12,247	416,16	4,34	417,30	4,50	413,88	4,66	4,50
180,00	13,416	417,36	4,64	418,40	4,78	415,09	4,96	4,79
210,00	14,491	418,60	4,95	419,57	5,07	416,37	5,28	5,10
240,00	15,492	419,26	5,12	420,19	5,23	417,08	5,46	5,27
480,00	21,909	433,18	8,61	434,40	8,78	430,74	8,92	8,77
1440,00	37,947	433,89	8,79	434,98	8,93	431,28	9,06	8,92
2880,00	53,666	434,06	8,83	435,22	8,99	431,47	9,10	8,97
4320,00	65,727	435,01	9,07	436,23	9,24	432,12	9,27	9,19

Tabela D.7 – Resultados do ensaio de absorção por imersão para G3-Carbonatado

tempo (min)	raiz tempo	4V		5V		6V		Média
		Massa (g)	Abs. Imersão	Massa (g)	Abs. Imersão	Massa (g)	Abs. Imersão	Abs. Imersão
0,00	0,000	390,25	0,00	385,15	0,00	391,07	0,00	0,00
30,00	5,477	403,95	3,51	397,26	3,14	401,57	2,68	3,11
60,00	7,746	408,50	4,68	402,10	4,40	405,27	3,63	4,24
90,00	9,487	411,50	5,45	405,25	5,22	407,99	4,33	5,00
120,00	10,954	413,59	5,98	407,57	5,82	409,99	4,84	5,55
150,00	12,247	415,02	6,35	409,15	6,23	411,35	5,19	5,92
180,00	13,416	416,52	6,73	410,86	6,68	412,85	5,57	6,33
210,00	14,491	418,10	7,14	412,68	7,15	414,52	6,00	6,76
240,00	15,492	418,92	7,35	413,64	7,40	415,44	6,23	6,99
480,00	21,909	423,33	8,48	419,07	8,81	423,60	8,32	8,53
1440,00	37,947	423,69	8,57	419,44	8,90	423,98	8,42	8,63
2880,00	53,666	423,84	8,61	419,58	8,94	424,16	8,46	8,67
4320,00	65,727	424,35	8,74	420,12	9,08	424,87	8,64	8,82

Tabela D.8 – Resultados do ensaio de absorção por imersão para G4-Carbonatado

tempo (min)	raiz tempo	4V		5V		6V		Média
		Massa (g)	Abs. Imersão	Massa (g)	Abs. Imersão	Massa (g)	Abs. Imersão	Abs. Imersão
0,00	0,000	387,61	0,00	390,73	0,00	383,61	0,00	0,00
30,00	5,477	401,92	3,69	406,16	3,95	398,25	3,82	3,82
60,00	7,746	406,58	4,89	411,18	5,23	402,88	5,02	5,05
90,00	9,487	409,82	5,73	414,74	6,14	406,61	6,00	5,96
120,00	10,954	412,28	6,36	417,47	6,84	409,55	6,76	6,66
150,00	12,247	413,87	6,77	419,17	7,28	411,45	7,26	7,10
180,00	13,416	415,62	7,23	421,02	7,75	413,65	7,83	7,60
210,00	14,491	417,44	7,70	422,96	8,25	415,98	8,44	8,13
240,00	15,492	418,49	7,97	424,02	8,52	417,27	8,77	8,42
480,00	21,909	424,40	9,49	428,13	9,57	421,47	9,87	9,64
1440,00	37,947	424,73	9,58	428,45	9,65	421,82	9,96	9,73
2880,00	53,666	425,01	9,65	428,69	9,72	421,98	10,00	9,79
4320,00	65,727	425,35	9,74	429,53	9,93	422,35	10,10	9,92

ANEXO E

LEITURAS DE CONTEÚDO DE UMIDADE INTERNO AOS CORPOS-DE-PROVA

Tabela E.1 – Determinação do conteúdo de umidade para o grupo G1

Série: Grupo G1		PLANILHA DE RESULTADOS					
Data de moldagem: 29/07/02							
CP: único							
Leitura	Tempo (horas)	10mm			20mm		
		T	UR	Cont. Umidade	T	UR	Cont. Umidade
1	0	20,6	67,4	10,27	20,6	61,0	9,29
2	24	18,9	88,4	12,29	18,4	88,2	11,87
3	48	18,2	88,1	11,70	18,3	90,7	12,13
4	72	18,1	90,6	11,95	18,1	91,2	12,03
5	96	18,3	91,7	12,26	18,2	91,6	12,16
6	120	18,6	90,0	12,28	18,1	90,9	11,99
7	144	18,6	90,0	12,28	18,1	90,9	11,99
8	168	18,6	88,9	12,13	18,7	88,5	12,15
9	192	18,6	90,0	12,28	18,1	90,9	11,99
10	216	18,3	91,3	12,21	18,2	92,0	12,22
11	240	18,6	90,0	12,28	18,1	90,9	11,99
12	264	18,6	90,5	12,34	18,3	90,7	12,13
13	270	20,4	92,5	13,93	20,4	93,5	14,08
14	276	19,8	93,2	13,61	19,6	94,0	13,54
15	282	20,1	92,4	13,67	20,1	93,4	13,81
16	288	19,3	88,0	12,49	19,5	93,0	13,39
17	294	19,4	84,0	12,01	19,5	92,0	13,24
18	300	19,8	82,6	12,06	20,0	88,0	12,93
19	306	21,0	70,7	11,02	20,1	84,0	12,42
20	318	19,4	83,2	11,89	19,5	87,6	12,61
21	330	19,7	86,0	12,47	19,0	89,4	12,52
22	354	18,9	89,3	12,42	19,0	90,7	12,69
23	378	18,5	91,3	12,37	18,5	92,0	12,47
24	426	18,9	92,3	12,83	19,0	93,1	13,03
25	450	19,1	90,1	12,70	19,1	92,7	13,07
26	456	20,5	90,6	13,72	19,8	93,7	13,68
27	462	20	90,0	13,23	19,8	92,9	13,56
28	468	19,9	92,3	13,47	19,5	93,6	13,47
29	474	19,7	91,3	13,23	19,5	95,2	13,70
30	480	19,6	85,7	12,34	19,6	92,4	13,30
31	486	20	70,2	10,31	19,9	88,9	12,97
32	492	19,6	61,6	8,87	19,8	88,2	12,87
33	498	20,5	56,0	8,48	19,8	77,1	11,26
34	504	20,6	45,9	6,99	20,0	66,8	9,82

Tabela E.2 – Determinação do conteúdo de umidade para o grupo G2

Série: Grupo G2		PLANILHA DE RESULTADOS					
Data de moldagem: 05/08/02							
CP: único							
Leitura	Tempo (horas)	10mm			20mm		
		T	UR	Cont. Umidade	T	UR	Cont. Umidade
1	0	20,6	53,0	8,07	20,6	43,3	6,60
2	24	18,2	86,0	11,42	18,2	88,0	11,69
3	48	18,1	85,6	11,29	18,0	88,5	11,59
4	72	18,0	88,3	11,57	18,0	88,3	11,57
5	96	18,1	89,2	11,77	18,2	87,8	11,66
6	120	18,1	88,1	11,62	18,1	87,2	11,50
7	144	18,3	88,6	11,85	18,4	87,5	11,78
8	168	18,1	89,5	11,81	18,1	88,6	11,69
9	192	18,4	88,7	11,93	18,4	88,9	11,97
10	216	18,3	88,6	11,85	18,1	88,6	11,69
11	240	18,1	89,5	11,81	18,4	88,9	11,97
12	264	18,4	88,7	11,93	18,4	88,9	11,97
13	270	19,8	93,3	13,62	19,9	93,9	13,71
14	276	19,6	94,8	13,65	19,5	94,4	13,59
15	282	19,9	89,3	13,04	20,1	92,3	13,65
16	288	19,3	88,7	12,59	19,3	91,4	12,98
17	294	19,2	83,8	11,81	19,3	93,4	13,26
18	300	19,5	80,6	11,61	19,6	90,3	13,00
19	306	19,9	74,1	10,82	20,6	79,6	12,13
20	318	19,2	69,6	9,81	19,3	77,8	11,04
21	330	18,7	84,0	11,53	18,8	81,7	11,29
22	354	18,6	84,2	11,48	18,8	81,5	11,26
23	378	18,4	83,2	11,20	18,6	80,3	10,95
24	426	18,2	86,0	11,42	18,2	88,0	11,68
25	450	19,0	86,0	12,04	19,0	85,0	11,90
26	456	19,9	92,7	13,53	19,9	93,9	13,70
27	462	19,6	95,9	13,81	19,8	96,7	14,12
28	468	19,6	95,3	13,72	19,6	96,1	13,83
29	474	19,6	95,2	13,70	19,6	95,6	13,76
30	480	19,4	93,2	13,32	19,7	94,8	13,74
31	486	19,7	90,8	13,16	19,7	92,2	13,36
32	492	19,8	80,9	11,81	20,0	86,1	12,65
33	498	19,5	75,5	10,87	19,6	87,5	12,60
34	504	19,8	68,0	9,93	19,7	85,8	12,30

Tabela E.3 – Determinação do conteúdo de umidade para o grupo G3

Série: Grupo G3		PLANILHA DE RESULTADOS					
Data de moldagem: 07/08/02							
CP: único							
Leitura	Tempo (horas)	10mm			20mm		
		T	UR	Cont. Umidade	T	UR	Cont. Umidade
1	0	20,5	59,1	8,95	20,6	51,8	7,89
2	24	18,5	88,6	12,04	18,5	90,0	12,19
3	48	18,7	89,0	12,22	18,5	89,8	12,17
4	72	18,5	90,8	12,30	18,4	91,9	12,37
5	96	18,6	90,8	12,39	18,3	91,2	12,19
6	120	18,4	91,7	12,34	18,3	91,6	12,25
7	144	18,5	91,2	12,36	18,4	91,0	12,25
8	168	18,3	91,6	12,25	18,3	91,4	12,22
9	192	18,5	88,6	12,01	18,3	90,5	12,10
10	216	18,5	91,2	12,36	18,2	91,8	12,19
11	240	18,1	90,8	11,97	18,0	92,1	12,07
12	264	18,8	81,1	11,21	18,4	91,3	12,29
13	270	19,6	94,0	13,53	19,7	94,3	13,67
14	273	20,6	90,2	13,75	20,3	91,5	13,70
15	276	20,0	91,1	13,39	20,3	92,0	13,77
16	279	20,0	89,1	13,10	20,2	92,6	13,78
17	281	20,1	85,2	12,60	20,4	91,3	13,75
18	284	20,5	80,1	12,14	20,5	90,3	13,68
19	287	19,5	86,9	12,51	20,2	92,7	13,79
20	290	18,3	86,9	11,62	19,2	92,3	13,01
21	293	20,6	70,1	10,68	20,0	87,5	12,86
22	296	19,4	75,1	10,73	19,4	90,3	12,91
23	299	20,3	72,9	10,91	20,1	89,4	13,22
24	301	19,9	69,6	10,16	20,1	89,0	13,16
25	306	19,8	72,7	10,61	20,0	88,4	12,99
26	318	19,6	90,5	13,03	19,8	91,1	13,30
27	330	18,9	90,0	12,51	19,1	93,8	13,22
28	354	18,9	91,8	12,68	19,1	94,3	13,29
29	378	18,8	92,5	12,78	18,9	94,4	13,13
30	426	19,3	93,6	13,29	19,5	94,2	13,56
31	450	19,5	93,2	13,42	19,1	94,9	13,38
32	456	19,7	94,9	13,76	19,9	95,2	13,89
33	462	19,1	95,9	13,52	18,9	96,6	13,43
34	468	19,6	95,5	13,75	19,7	95,4	13,83
35	474	18,9	94,1	13,08	19,4	95,5	13,65
36	480	18,8	93,3	12,89	19,3	95,5	13,56
37	486	19,5	78,0	11,23	19,9	91,7	13,38
38	492	20,7	61,5	10,42	20,1	88,8	13,13
39	498	18,8	79,6	10,52	19,2	82,3	11,60
40	504	19,6	59,0	8,49	19,4	83,0	11,87

Tabela E.4 – Determinação do conteúdo de umidade para o grupo G4

Série: Grupo G4		PLANILHA DE RESULTADOS					
Data de moldagem: 9/8/2002							
CP: único							
Leitura	Tempo (horas)	10mm			20mm		
		T	UR	Cont. Umidade	T	UR	Cont. Umidade
1	0	20,5	51,9	7,86	20,6	57,3	8,73
2	24	18,5	84,9	11,50	18,6	85,8	11,70
3	48	18,3	86,6	11,58	18,4	90,2	12,14
4	72	18,4	88,9	11,97	18,4	91,9	12,37
5	96	18,1	89,1	11,75	18,3	92,2	12,33
6	120	18,5	89,7	12,15	18,1	92,3	12,17
7	144	18,1	90,9	11,99	18,2	92,3	12,25
8	168	18,2	88,9	11,81	18,3	91,0	12,17
9	192	18,1	89,7	11,83	18,1	89,8	11,84
10	216	17,7	89,1	10,87	18,0	92,2	12,07
11	240	17,6	89,8	10,96	17,9	92,1	12,06
12	264	18,2	88,9	11,81	18,3	91,0	12,17
13	270	20,5	91,0	13,79	20,2	93,4	13,90
14	273	20,2	93,0	13,83	20,0	93,8	13,79
15	276	20,0	92,4	13,58	20,2	93,4	13,90
16	279	20,2	92,4	13,75	20,5	93,6	14,18
17	281	20,1	87,6	12,95	20,6	92,4	14,08
18	284	20,5	84,0	12,73	20,7	92,2	14,13
19	287	19,8	91,7	13,20	20,0	93,1	13,69
20	290	19,4	92,1	13,17	19,7	93,6	13,57
21	293	19,6	87,3	12,57	19,7	91,6	13,28
22	296	19,6	85,0	12,24	19,7	91,0	13,19
23	299	19,8	82,0	11,97	20,1	93,9	13,88
24	301	20,0	80,3	11,80	20,0	92,3	13,56
25	306	19,9	83,2	12,14	20,1	94,6	13,99
26	318	19,5	93,2	13,42	19,5	93,0	13,39
27	330	18,8	93,2	12,88	19,0	92,4	12,93
28	354	18,6	89,8	12,24	18,5	90,5	12,26
29	378	18,6	92,5	12,61	18,8	92,6	12,80
30	426	18,7	91,1	12,50	18,8	92,1	12,72
31	450	19,2	89,3	12,59	19,3	91,6	13,00
32	456	19,9	93,2	13,61	19,9	94,8	13,84
33	462	19,4	96,9	13,85	19,7	97,1	14,08
34	468	19,8	95,8	13,98	19,7	95,9	13,90
35	474	19,7	96,5	13,99	19,7	96,2	13,94
36	480	18,9	93,5	13,00	19,4	95,0	13,58
37	486	19,4	90,0	12,87	19,6	93,2	13,42
38	492	19,7	87,0	12,61	19,8	90,1	13,15
39	498	19,4	78,9	11,28	19,6	86,2	12,41
40	504	19,3	78,9	11,29	19,4	86,6	12,38

ANEXO F

LEITURAS NO SENSOR DE UMIDADE

Tabela F.1 –Leituras no sensor de umidade para o grupo G1

Leitura	Tempo (horas)	Corrente (microA)			
		1/2	3/4	5/6	7/8
1	0	0	0	0	0
2	24	706	598	93	420
3	48	660	690	91	470
4	72	600	667	92	471
5	96	553	624	90	450
6	120	562	613	85	446
7	144	553	600	88	437
8	168	515	610	90	445
9	192	515	550	90	425
10	216	478	530	92	230
11	240	498	545	102	256
12	264	512	530	103	254
13	270	500	158	188	118
14	276	24	192	118	80
15	282	11	65	86	64
16	288	3,4	45	65	51
17	294	1,4	33	50	45
18	300	0,7	27	42	42
19	306	0,4	21	34	32
20	318	234	338	671	210
21	330	230	380	780	270
22	354	238	394	797	284
23	378	240	395	803	297
24	426	232	393	799	290
25	450	229	394	800	300
26	456	116	161	210	142
27	462	69	79	84	72
28	468	40	57	73	61
29	474	6,4	38,2	50,8	47,5
30	480	2,1	33	50,2	47,3
31	486	0,8	22	35	38
32	492	0,4	15,7	25,1	32
33	498	0,2	14	28,2	36,5
34	504	0,1	10,5	17,4	25,4

Tabela F.2 –Leituras no sensor de umidade para o grupo G2

Leitura	Tempo (horas)	Corrente (microA)			
		1/2	3/4	5/6	7/8
1	0	0	0	0	0
2	24	285,5	345	253,4	74,5
3	48	230	345	269	198
4	72	204	280	225	219
5	96	186	237	240	208
6	120	174	211	192	206
7	144	169	199	187,4	210
8	168	163	195	185	215
9	192	110	152	165	200
10	216	132	165	170	210
11	240	140	160	165	216
12	264	156	159	159	215
13	270	73	82	116	176
14	276	37	52	82	143
15	282	19	38	67	132
16	288	5,2	30	54	94
17	294	2,6	25	46	102
18	300	1,4	22	43	97
19	306	0,8	19	38	89
20	318	183	222	287	439
21	330	190	220	217	406
22	354	183	215	324	522
23	378	187	270	420	700
24	426	187	266	360	720
25	450	177	243	331	671
26	456	95	109	151	307
27	462	60	72	94	177
28	468	45	62	84	151
29	474	15,1	42,6	62	124,3
30	480	4,1	32,7	53	104,2
31	486	1,9	29,3	49,3	100
32	492	1	24,2	44	92,2
33	498	0,4	17,1	35,3	81,2
34	504	0,2	15,1	34	76

Tabela F.3 –Leituras no sensor de umidade para o grupo G3

Leitura	Tempo (horas)	Corrente (microA)			
		1/2	3/4	5/6	7/8
1	0	0	0	0	0
2	24	328	350	450	460
3	48	338	397	459	470
4	72	348	411	464	480
5	96	320	385	463	500
6	120	293,5	365	457	502
7	144	273,8	356	458	503
8	168	244	328	453	501
9	192	225,7	326	450	500
10	216	183,1	306	467	498
11	240	175,4	295	460	500
12	264	163	288,4	469	500
13	270	85,5	222	411	414
14	273	54	190	357	332
15	276	38	172	316	256
16	279	27,5	147	275	228
17	281	20	121	238	204
18	284	14,5	103	217	151
19	287	10	83	190	135
20	290	7,6	62	148	122
21	293	6	52	136	115
22	296	3	41	116	102
23	299	0,6	23	76	98
24	301	1,4	31	93	95
25	306	0,3	20	77	93,2
26	318	191	371	354	130
27	330	175	350	430	530
28	354	160	332	452	585
29	378	142	343	490	640
30	426	150	352	528	720
31	450	150	357	540	738
32	456	125	196	284	414
33	462	70	121	201	332
34	468	32	84	146	256
35	474	8,1	64,8	127,1	228
36	480	2,9	51	115	204
37	486	0,8	27	84	151
38	492	0,3	15,2	65,2	112
39	498	0,1	10,7	51,5	95,2
40	504	0	8,4	36,9	77,4

Tabela F.4 –Leituras no sensor de umidade para o grupo G4

Leitura	Tempo (dias)	Corrente (microA)			
		1/2	3/4	5/6	7/8
1	0	0	0	0	0
2	24	210	251	560	540
3	48	151	260	543	660
4	72	164	232	547	580
5	96	155	435	541	590
6	120	148	460	567	605
7	144	150	495	583	603
8	168	145	511	575	598
9	192	143	534	560	597
10	216	150	535	580	570
11	240	148	510	580	585
12	264	147	423	590	588
13	270	108	451	532	586
14	273	82	560	480	570
15	276	53	532	456	567
16	279	43,9	535	347	565
17	281	38	460	273	546
18	284	23	445	290	515
19	287	16	411	276	524
20	290	7	434	224	531
21	293	4	435	168	475
22	296	2	345	150	550
23	299	1	230	131	530
24	301	0,4	26	59	155
25	306	0,,2	43	95	199
26	318	159	83	524	540
27	330	210	410	560	660
28	354	151	714	543	227
29	378	164	647	547	202
30	426	155	662	541	236
31	450	148	684	567	232
32	456	108	321	332	118
33	462	82	330	252	114
34	468	53	270	171	104
35	474	43,9	206,8	122,2	103,4
36	480	38	119	79	120
37	486	23	131	94,8	95
38	492	16	30,6	59,4	86,2
39	498	1	36,4	46,5	79,3
40	504	0,2	24,5	34,6	33

ANEXO G

TEOR DE UMIDADE

Tabela G.1 – Teor umidade para o grupo G1

Série: Grupo G1		PLANILHA DE TEOR DE UMIDADE	
Data de moldagem: 29/07/02			
CP: único			
Leitura	Tempo (horas)	Massa (g)	Teor de umidade (%)
1	0	7301,7	0,00
2	24	7750,3	6,14
3	48	7783,6	6,60
4	72	7783,9	6,60
5	96	7790	6,69
6	120	7791,4	6,71
7	144	7791,4	6,71
8	168	7795,3	6,76
9	192	7796,5	6,78
10	216	7796,6	6,78
11	240	7796,9	6,78
12	264	7797,2	6,79
13	270	7621	4,37
14	276	7558,6	3,52
15	282	7521	3,00
16	288	7479,6	2,44
17	294	7436,9	1,85
18	300	7420,6	1,63
19	306	7400,5	1,35
20	318	7611	4,24
21	330	7785,7	6,63
22	354	7787,1	6,65
23	378	7788,5	6,67
24	426	7790,4	6,69
25	450	7790,6	6,70
26	456	7634,8	4,56
27	462	7557	3,50
28	468	7522,6	3,03
29	474	7469	2,29
30	480	7421	1,63
31	486	7403	1,39
32	492	7387	1,17
33	498	7345	0,59
34	504	7336	0,47

Tabela G.2 –Teor umidade para o grupo G2

Série: Grupo G2		PLANILHA DE TEOR DE UMIDADE	
Data de moldagem: 05/08/02			
CP: único			
Leitura	Tempo (horas)	Massa (g)	Teor de umidade (%)
1	0	7082,6	0,00
2	24	7255,4	2,44
3	48	7311,4	3,23
4	72	7319,5	3,34
5	96	7324,2	3,41
6	120	7328,4	3,47
7	144	7336,3	3,58
8	168	7346,1	3,72
9	192	7346,6	3,73
10	216	7346,8	3,73
11	240	7347,1	3,73
12	264	7347,1	3,73
13	270	7306,7	3,16
14	276	7284,7	2,85
15	282	7280,2	2,79
16	288	7269,3	2,64
17	294	7263,5	2,55
18	300	7257,7	2,47
19	306	7254,3	2,42
20	318	7281,1	2,80
21	330	7308,6	3,19
22	354	7340,1	3,64
23	378	7373,5	4,11
24	426	7431,5	4,93
25	450	7453,4	5,24
26	456	7417,7	4,73
27	462	7397,1	4,44
28	468	7384,6	4,26
29	474	7367,4	4,02
30	480	7347	3,73
31	486	7352	3,80
32	492	7349	3,76
33	498	7316	3,30
34	504	7313	3,25

Tabela G.3 –Teor umidade para o grupo G3

Série: Grupo G3		PLANILHA DE TEOR DE UMIDADE	
Data de moldagem: 07/08/02			
CP: único			
Leitura	Tempo (horas)	Massa (g)	Teor de umidade(%)
1	0	6876,1	0,00
2	24	7143,7	3,89
3	48	7259,6	5,58
4	72	7314	6,37
5	96	7340,4	6,75
6	120	7358,4	7,01
7	144	7370,8	7,19
8	168	7375,4	7,26
9	192	7378,8	7,31
10	216	7389	7,46
11	240	7389,6	7,47
12	264	7392,2	7,51
13	270	7314,3	6,37
14	273	7283,7	5,93
15	276	7265,4	5,66
16	279	7245,9	5,38
17	281	7217,7	4,97
18	284	7210	4,86
19	287	7197,3	4,67
20	290	7183,3	4,47
21	293	7170,8	4,29
22	296	7154,6	4,05
23	299	7124,9	3,62
24	301	7098,1	3,23
25	306	7075,7	2,90
26	318	7149,4	3,97
27	330	7240,8	5,30
28	354	7308,2	6,28
29	378	7359,9	7,04
30	426	7384	7,39
31	450	7387	7,43
32	456	7253,1	5,48
33	462	7210	4,86
34	468	7168,8	4,26
35	474	7147	3,94
36	480	7130	3,69
37	486	7084	3,02
38	492	7052	2,56
39	498	7039	2,37
40	504	7022	2,12

Tabela G.4 – Teor umidade para o grupo G4

Série: Grupo G4		PLANILHA DE TEOR DE UMIDADE	
Data de moldagem: 9/8/2002			
CP: único			
Leitura	Tempo (horas)	Massa (g)	Teor de umidade (%)
1	0	7343,3	0,00
2	24	7659,9	4,31
3	48	7800,3	6,22
4	72	7852,1	6,93
5	96	7879,4	7,30
6	120	7896,1	7,53
7	144	7904,7	7,65
8	168	7909,5	7,71
9	192	7915,5	7,79
10	216	7926,2	7,94
11	240	7929,4	7,98
12	264	7932,5	8,02
13	270	7891,1	7,46
14	273	7859,5	7,03
15	276	7841,8	6,79
16	279	7820	6,49
17	281	7802,4	6,25
18	284	7792,2	6,11
19	287	7779	5,93
20	290	7758,7	5,66
21	293	7755	5,61
22	296	7729,9	5,26
23	299	7726,9	5,22
24	301	7700,4	4,86
25	306	7674,3	4,51
26	318	7712,7	5,03
27	330	7752	5,57
28	354	7788,8	6,07
29	378	7822,4	6,52
30	426	7877,2	7,27
31	450	7893	7,49
32	456	7801,2	6,24
33	462	7772,7	5,85
34	468	7741	5,42
35	474	7724,1	5,19
36	480	7700	4,86
37	486	7670	4,45
38	492	7639	4,03
39	498	7621	3,78
40	504	7603	3,54

ANEXO H

RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA DE POLARIZAÇÃO E MEDIDAS DE INTENSIDADE GALVÂNICA

Os resultados apresentados nas tabelas seguintes referem-se a média dos valores encontrados para as duas barras com mesmo revestimento para cada grupo de estudo, sendo que, os mesmos foram utilizados na elaboração dos gráficos mostrados no item 6 – Apresentação e Discussão dos Resultados.

Tabela H.1 – Resultados do ensaio de resistência de polarização para o grupo G1

ENSAIO DE RESISTÊNCIA DE POLARIZAÇÃO														
Série: Grupo G1		PLANILHA DE RESULTADOS MÉDIOS												
Data de moldagem: 29/07/02														
CP: único														
Leitura	Tempo (horas)	Eo (mV)			RC (ohm)		i corr (µA/cm²)				i gal (µA/)			
		Potencial limite	10mm	20mm	10mm	20mm	Limites de i corr (microA/cm2)		10mm	20mm	10mm-1	10mm-2	20mm-1	20mm-2
1	0	-275	-102	-127	9455,88	7797,07	0,1	0,2	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
2	24	-275	-554	-576	783,41	703,56	0,1	0,2	0,40	0,99	3,60	13,00	8,00	7,50
3	48	-275	-610	-585	797,30	706,38	0,1	0,2	0,45	0,55	4,15	10,60	13,10	13,00
4	72	-275	-591	-618	966,72	871,16	0,1	0,2	0,40	0,82	4,60	11,60	15,00	15,00
5	96	-275	-588	-623	760,00	679,56	0,1	0,2	0,38	0,94	6,10	10,25	15,00	14,00
6	120	-275	-581	-623	846,48	758,11	0,1	0,2	0,44	0,81	7,35	10,05	16,00	16,50
7	144	-275	-579	-635	816,86	694,19	0,1	0,2	0,37	0,85	10,25	10,75	15,00	14,00
8	168	-275	-589	-639	848,40	809,88	0,1	0,2	0,44	0,78	10,50	10,50	15,00	15,00
9	192	-275	-597	-641	705,39	668,52	0,1	0,2	0,32	0,59	10,25	10,90	14,40	14,40
10	216	-275	-578	-547	882,76	798,17	0,1	0,2	0,35	0,63	9,95	10,70	13,90	13,90
11	240	-275	-596	-637	857,54	724,03	0,1	0,2	0,34	0,77	10,70	10,10	15,00	15,00
12	264	-275	-597	-639	844,88	706,89	0,1	0,2	0,40	0,67	10,50	10,50	14,00	14,00
13	270	-275	-578	-547	496,00	782,00	0,1	0,2	1,40	0,63	1,55	5,30	10,00	10,00
14	276	-275	-565	-516	1903,41	827,33	0,1	0,2	0,67	1,56	2,00	3,55	10,00	10,00
15	282	-275	-516	-511	4319,46	778,81	0,1	0,2	0,39	1,07	1,50	2,25	9,00	9,00
16	288	-275	-383	-470	6870,10	1456,56	0,1	0,2	0,24	0,71	1,50	1,60	7,00	8,00
17	294	-275	-330	-358	5645,16	2763,97	0,1	0,2	0,10	0,37	0,15	0,15	0,10	0,10
18	300	-275	-251	-308	8486,77	3062,40	0,1	0,2	0,12	0,28	0,15	0,15	0,10	0,10
19	306	-275	-200	-242	8764,40	4529,47	0,1	0,2	0,05	0,24	0,00	0,00	0,00	0,00
20	318	-275	-496	-515	302,46	310,15	0,1	0,2	7,48	4,11	0,60	6,00	7,00	7,00
21	330	-275	-577	-603	354,27	443,64	0,1	0,2	8,88	7,36	1,00	4,65	6,20	7,00
22	354	-275	-614	-632	466,67	313,31	0,1	0,2	15,58	7,27	0,90	6,10	7,00	10,20
23	378	-275	-638	-649	1069,52	825,27	0,1	0,2	20,97	11,27	1,90	35,05	48,00	45,60
24	426	-275	-657	-663	946,76	772,87	0,1	0,2	17,89	10,27	1,20	36,25	51,00	48,00
25	450	-275	-666	-672	882,74	791,64	0,1	0,2	19,91	13,74	2,75	45,15	50,00	49,20
26	456	-275	-562	-541	1546,88	986,09	0,1	0,2	5,84	4,50	0,60	9,40	19,30	19,30
27	462	-275	-496	-492	5000,00	1308,53	0,1	0,2	1,35	3,60	0,20	1,05	6,20	6,50
28	468	-275	-452	-457	4121,62	1454,80	0,1	0,2	1,33	2,30	0,15	2,15	3,10	3,00
29	474	-275	-370	-408	5864,12	1748,51	0,1	0,2	0,42	1,37	0,15	1,80	2,00	2,20
30	480	-275	-288	-332	7033,33	2567,55	0,1	0,2	0,20	0,78	0,00	0,00	0,40	0,50
31	486	-275	-189	-264	9457,99	3571,43	0,1	0,2	0,11	0,48	0,00	0,00	0,20	0,20
32	492	-275	-85	-208	8127,34	4415,75	0,1	0,2	0,04	0,28	0,00	0,00	0,00	0,00
33	498	-275	33	-86	9982,79	5953,82	0,1	0,2	0,02	0,17	0,00	0,00	0,00	0,00
34	504	-275	72	-60	8091,11	6798,85	0,1	0,2	0,01	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabela H.2 – Resultados do ensaio de resistência de polarização para o grupo G2

ENSAIO DE RESISTÊNCIA DE POLARIZAÇÃO														
Série: Grupo G2		PLANILHA DE RESULTADOS MÉDIOS												
Data de moldagem: 05/08/02														
CP: único														
Leitura	Tempo (horas)	Eo (mV)			RC (ohm)		i corr (µA/cm²)				i gal (µA/)			
		Potencial limite	10mm	20mm	10mm	20mm	Limites de i corr (microA/cm2)		10mm	20mm	10mm-1	10mm-2	20mm-1	20mm-2
1	0	-275	-59	-8	9039,08	9386,67	0,1	0,2	0,02	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
2	24	-275	-507	-469	824,04	1245,42	0,1	0,2	0,39	0,38	9,35	9,45	0,10	0,20
3	48	-275	-539	-502	843,11	482,37	0,1	0,2	0,38	0,41	9,60	13,60	0,20	0,20
4	72	-275	-545	-483	757,19	529,95	0,1	0,2	0,41	0,41	9,60	12,60	0,10	0,10
5	96	-275	-552	-466	766,85	504,31	0,1	0,2	0,50	0,39	9,60	12,60	0,20	0,20
6	120	-275	-605	-471	860,37	492,48	0,1	0,2	0,47	0,42	8,85	10,60	0,20	0,20
7	144	-275	-609	-462	889,10	726,92	0,1	0,2	0,46	0,30	8,10	10,10	0,20	0,10
8	168	-275	-616	-477	919,80	702,48	0,1	0,2	0,46	0,31	7,60	9,10	0,20	0,10
9	192	-275	-597	-481	955,18	845,07	0,1	0,2	0,26	0,43	8,35	8,60	0,10	0,10
10	216	-275	-601	-485	875,31	970,59	0,1	0,2	0,15	0,35	8,60	8,60	0,20	0,20
11	240	-275	-598	-482	909,60	946,97	0,1	0,2	0,39	0,39	17,00	9,10	0,20	0,20
12	264	-275	-603	-491	938,08	933,33	0,1	0,2	0,38	0,35	8,35	8,60	0,10	0,20
13	270	-275	-421	-391	1693,64	1479,29	0,1	0,2	0,19	0,25	7,00	5,90	0,40	0,70
14	276	-275	-347	-410	2497,39	1170,43	0,1	0,2	0,05	0,17	5,20	5,10	0,80	0,80
15	282	-275	-310	-384	2423,47	911,33	0,1	0,2	0,04	0,14	2,60	2,60	1,00	2,10
16	288	-275	-244	-355	3554,79	1117,82	0,1	0,2	0,07	0,11	2,55	2,60	0,90	2,00
17	294	-275	-221	-285	3783,71	746,27	0,1	0,2	0,07	0,11	0,55	0,65	0,20	1,80
18	300	-275	-209	-328	3862,14	1284,15	0,1	0,2	0,06	0,12	0,20	0,15	0,10	0,10
19	306	-275	-230	-330	3879,81	1522,31	0,1	0,2	0,06	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00
20	318	-275	-579	-375	728,65	2500,00	0,1	0,2	1,66	0,58	9,55	9,75	0,10	1,20
21	330	-275	-616	-444	725,44	1680,00	0,1	0,2	1,57	0,92	7,65	8,65	0,10	0,50
22	354	-275	-639	-470	524,88	1656,35	0,1	0,2	0,59	1,04	8,70	9,05	0,10	1,50
23	378	-275	-626	-463	661,88	753,77	0,1	0,2	0,80	1,09	15,70	17,30	0,10	1,70
24	426	-275	-635	-452	616,48	794,60	0,1	0,2	0,60	0,81	10,45	13,50	0,20	1,50
25	450	-275	-601	-449	528,08	671,14	0,1	0,2	0,61	0,72	9,30	9,30	0,10	1,00
26	456	-275	-394	-402	1844,53	1478,60	0,1	0,2	0,35	0,33	2,15	2,30	0,20	1,50
27	462	-275	-312	-403	2714,39	1412,21	0,1	0,2	0,15	0,27	0,60	1,30	0,20	0,90
28	468	-275	-296	-401	3106,70	1258,00	0,1	0,2	0,13	0,32	1,35	1,15	0,20	2,30
29	474	-275	-222	-384	3579,90	1255,23	0,1	0,2	0,08	0,27	1,05	0,95	0,10	1,70
30	480	-275	-195	-395	3826,10	1196,58	0,1	0,2	0,07	0,33	0,55	0,65	0,10	1,90
31	486	-275	-164	-378	4092,01	1208,79	0,1	0,2	0,07	0,37	0,25	0,25	0,10	1,50
32	492	-275	-127	-376	3864,87	1258,43	0,1	0,2	0,06	0,37	0,00	0,00	0,00	0,00
33	498	-275	-95	-336	4162,95	1442,79	0,1	0,2	0,07	0,37	0,00	0,00	0,00	0,00
34	504	-275	-94	-324	4079,98	1580,25	0,1	0,2	0,07	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabela H.3 – Resultados do ensaio de resistência de polarização para o grupo G3

ENSAIO DE RESISTÊNCIA DE POLARIZAÇÃO														
Série: Grupo G3		PLANILHA DE RESULTADOS MÉDIOS												
Data de moldagem: 07/08/02														
CP: único														
Leitura	Tempo (horas)	Eo (mV)			RC (ohm)		i corr (µA/cm²)				i gal (µA/)			
		Potencial limite	10mm	20mm	10mm	20mm	Limites de i corr (microA/cm2)		10mm	20mm	10mm-1	10mm-2	20mm-1	20mm-2
1	0	-275	-129	-24	7787,68	9595,27	0,1	0,2	0,02	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00
2	24	-275	-591	-99	1398,05	343,43	0,1	0,2	2,00	0,04	0,30	1,75	0,00	0,00
3	48	-275	-618	-146	1206,20	526,29	0,1	0,2	1,28	0,02	0,50	1,20	0,15	0,10
4	72	-275	-620	-62	1049,23	673,93	0,1	0,2	1,73	0,08	0,25	38,60	0,10	0,15
5	96	-275	-639	-64	1417,56	609,34	0,1	0,2	2,30	0,18	0,30	41,10	0,10	0,10
6	120	-275	-636	-40	1797,34	582,36	0,1	0,2	3,11	0,11	0,20	40,55	0,10	0,10
7	144	-275	-639	-45	1672,70	612,82	0,1	0,2	3,09	0,12	0,00	46,15	0,10	0,05
8	168	-275	-640	-40	1358,06	521,12	0,1	0,2	2,12	0,11	0,10	45,00	0,15	0,05
9	192	-275	-645	-27	1122,93	449,11	0,1	0,2	2,74	0,10	0,20	46,15	0,05	0,05
10	216	-275	-657	-55	1096,14	469,32	0,1	0,2	2,32	0,11	0,20	41,85	0,10	0,10
11	240	-275	-660	-65	1160,94	561,17	0,1	0,2	2,37	0,13	0,20	39,30	0,10	0,10
12	264	-275	-665	-57	1092,44	621,73	0,1	0,2	2,11	0,10	0,20	38,50	0,10	0,10
13	270	-275	-571	-62	1397,19	460,24	0,1	0,2	1,81	0,11	0,20	0,20	0,10	0,10
14	273	-275	-544	-60	1362,97	340,04	0,1	0,2	1,78	0,13	0,30	0,30	0,10	0,10
15	276	-275	-528	-86	1384,90	414,62	0,1	0,2	1,40	0,12	0,20	0,20	0,10	0,60
16	279	-275	-504	-108	1465,32	432,37	0,1	0,2	1,48	0,11	0,20	0,20	0,15	0,75
17	281	-275	-466	-100	1660,12	443,28	0,1	0,2	1,04	0,09	0,10	0,10	0,10	0,70
18	284	-275	-451	-112	1226,24	460,88	0,1	0,2	1,09	0,09	0,05	0,05	0,05	0,75
19	287	-275	-414	-142	1993,12	465,01	0,1	0,2	1,02	0,10	0,30	0,30	0,10	0,15
20	290	-275	-379	-136	2806,17	558,38	0,1	0,2	0,53	0,11	0,10	0,05	0,00	0,00
21	293	-275	-344	-142	2673,35	421,91	0,1	0,2	0,35	0,10	0,05	0,05	0,10	0,15
22	296	-275	-300	-136	3146,17	550,38	0,1	0,2	0,29	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00
23	299	-275	-264	-117	4000,84	687,00	0,1	0,2	0,24	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00
24	301	-275	-221	-122	4811,60	766,49	0,1	0,2	0,28	0,16	0,00	0,00	0,00	0,00
25	306	-275	-185	-112	5122,63	814,26	0,1	0,2	0,29	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00
26	318	-275	-523	-90	717,80	269,13	0,1	0,2	5,14	0,06	6,20	7,05	0,25	0,25
27	330	-275	-568	-72	879,65	518,08	0,1	0,2	5,55	0,07	6,20	6,85	0,05	0,05
28	354	-275	-579	-66	1097,10	391,67	0,1	0,2	4,47	0,11	0,15	6,05	0,10	0,10
29	378	-275	-585	-60	1152,84	413,80	0,1	0,2	4,37	0,18	0,15	3,80	0,80	0,80
30	426	-275	-593	-56	901,75	375,32	0,1	0,2	4,28	0,25	0,20	3,15	0,15	3,65
31	450	-275	-587	-50	859,59	318,01	0,1	0,2	4,63	0,23	0,15	4,30	0,05	0,20
32	456	-275	-500	-66	1816,48	495,52	0,1	0,2	4,47	0,20	0,05	0,10	0,40	1,00
33	462	-275	-472	-56	2066,23	598,96	0,1	0,2	1,75	0,22	0,20	0,20	0,05	0,00
34	468	-275	-420	-75	2785,03	603,33	0,1	0,2	0,62	0,17	0,20	0,20	0,00	0,05
35	474	-275	-356	-84	3529,44	702,09	0,1	0,2	0,35	0,15	0,10	0,10	0,00	0,00
36	480	-275	-309	-73	3884,01	770,47	0,1	0,2	0,29	0,19	0,00	0,00	0,00	0,00
37	486	-275	-229	-63	4778,81	520,60	0,1	0,2	0,21	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00
38	492	-275	-162	-58	5722,22	795,62	0,1	0,2	0,15	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
39	498	-275	-117	-27	6283,47	845,17	0,1	0,2	0,11	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00
40	504	-275	-42	-9	6312,63	1558,44	0,1	0,2	0,14	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabela H.4 – Resultados do ensaio de resistência de polarização para o grupo G4

ENSAIO DE RESISTÊNCIA DE POLARIZAÇÃO														
Série: Grupo G4		PLANILHA DE RESULTADOS MÉDIOS												
Data de moldagem: 9/8/2002														
CP: único														
Leitura	Tempo (horas)	Eo (mV)			RC (ohm)		i corr (µA/cm ²)				i gal (µA)			
		Potencial limite	10mm	20mm	10mm	20mm	Limites de i corr (microA/cm2)		10mm	20mm	10mm-1	10mm-2	20mm-1	20mm-2
1	0	-275	-70	-59	7501,46	9526,33	0,1	0,2	0,02	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
2	24	-275	-520	-97	878,30	180,61	0,1	0,2	1,62	0,01	23,70	25,70	0,00	0,00
3	48	-275	-560	-71	536,59	324,47	0,1	0,2	1,71	0,07	18,10	23,50	0,10	0,10
4	72	-275	-549	-62	879,83	343,55	0,1	0,2	1,99	0,08	16,10	21,50	0,10	0,10
5	96	-275	-595	-66	652,59	322,51	0,1	0,2	2,40	0,06	19,30	23,80	0,20	0,25
6	120	-275	-585	-60	667,28	339,72	0,1	0,2	2,12	0,09	22,40	32,75	0,25	0,10
7	144	-275	-585	-61	751,37	316,11	0,1	0,2	2,45	0,10	22,85	34,80	0,10	0,10
8	168	-275	-593	-57	685,99	306,50	0,1	0,2	2,22	0,07	26,05	39,15	0,15	0,15
9	192	-275	-593	-57	797,96	340,39	0,1	0,2	2,37	0,03	23,40	35,50	0,15	0,05
10	216	-275	-612	-62	927,48	296,24	0,1	0,2	2,37	0,10	24,50	38,55	0,10	0,10
11	240	-275	-617	-66	669,80	313,62	0,1	0,2	2,28	0,10	25,50	36,50	0,05	0,10
12	264	-275	-626	-73	662,48	456,34	0,1	0,2	2,95	0,08	25,50	39,80	0,05	0,15
13	270	-275	-546	-30	699,71	406,23	0,1	0,2	1,76	0,08	16,50	22,40	0,10	0,15
14	273	-275	-515	-5	682,62	367,56	0,1	0,2	0,89	0,08	11,50	14,50	0,50	0,20
15	276	-275	-491	4	614,28	383,35	0,1	0,2	0,63	0,10	9,05	11,70	0,80	0,20
16	279	-275	-472	-77	736,61	453,31	0,1	0,2	0,53	0,08	6,25	7,70	1,45	0,15
17	281	-275	-437	-88	792,05	382,67	0,1	0,2	0,65	0,14	5,00	5,25	1,30	0,15
18	284	-275	-407	-95	737,22	490,91	0,1	0,2	0,59	0,10	0,85	0,90	1,20	0,15
19	287	-275	-387	-105	835,09	491,30	0,1	0,2	0,64	0,09	0,95	1,55	1,20	0,20
20	290	-275	-361	-110	919,55	573,37	0,1	0,2	0,57	0,11	0,50	1,00	0,85	0,20
21	293	-275	-334	-96	772,85	548,33	0,1	0,2	0,55	0,09	1,05	1,05	0,45	0,20
22	296	-275	-337	-124	689,88	617,59	0,1	0,2	0,52	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00
23	299	-275	-285	-118	947,11	651,93	0,1	0,2	0,48	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00
24	301	-275	-307	-113	1248,49	533,95	0,1	0,2	0,46	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00
25	306	-275	-291	-109	1337,92	560,10	0,1	0,2	0,22	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00
26	318	-275	-421	-69	471,10	175,83	0,1	0,2	3,12	0,04	5,95	6,30	0,00	0,05
27	330	-275	-468	-61	263,87	310,34	0,1	0,2	3,44	0,02	9,65	10,85	0,00	0,00
28	354	-275	-506	-52	571,29	159,26	0,1	0,2	4,00	0,02	7,50	7,80	0,05	0,05
29	378	-275	-516	-49	472,15	165,77	0,1	0,2	4,25	0,03	6,00	6,75	0,05	0,10
30	426	-275	-514	-48	471,20	192,41	0,1	0,2	4,09	0,17	5,90	7,25	0,05	0,05
31	450	-275	-537	-46	602,48	509,45	0,1	0,2	4,14	0,18	6,10	7,50	0,05	0,05
32	456	-275	-428	-49	854,53	511,33	0,1	0,2	1,94	0,18	0,95	1,15	0,15	0,15
33	462	-275	-397	-60	842,55	429,24	0,1	0,2	1,33	0,15	1,65	1,80	0,00	0,10
34	468	-275	-357	-63	1100,00	464,16	0,1	0,2	0,67	0,21	2,10	2,35	0,05	0,15
35	474	-275	-327	-62	1259,11	589,34	0,1	0,2	0,71	0,20	1,55	2,25	0,05	0,00
36	480	-275	-293	-65	1369,56	977,45	0,1	0,2	0,69	0,03	2,00	2,30	0,00	0,15
37	486	-275	-247	-61	2125,73	438,86	0,1	0,2	0,49	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00
38	492	-275	-218	-50	2038,15	626,73	0,1	0,2	0,42	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00
39	498	-275	-252	-41	2226,23	544,93	0,1	0,2	0,43	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00
40	504	-275	-196	-46	2337,92	572,45	0,1	0,2	0,42	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00