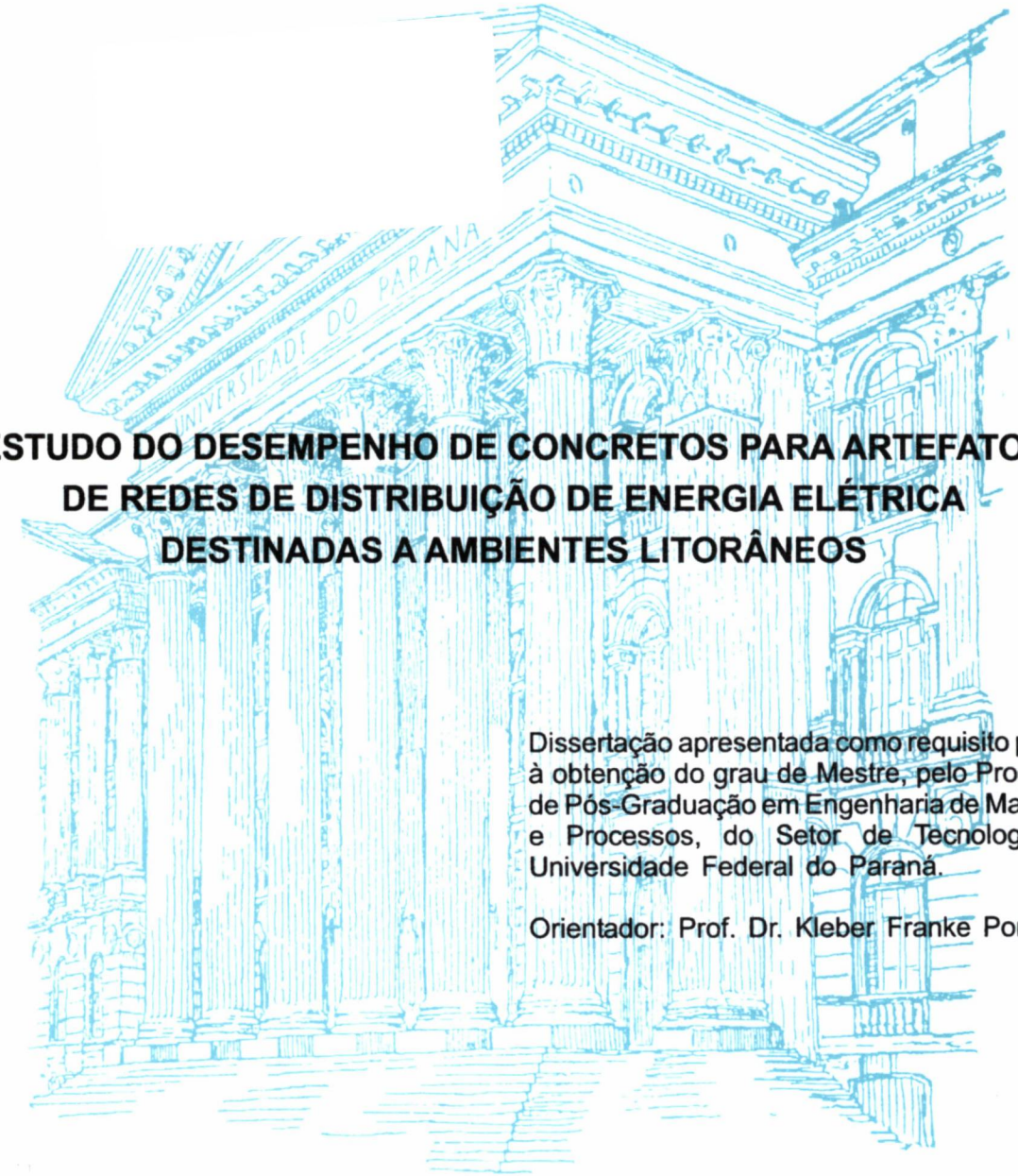
ALEX JOUKOSKI



ESTUDO DO DESEMPENHO DE CONCRETOS PARA ARTEFATOS DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DESTINADAS A AMBIENTES LITORÂNEOS

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais e Processos, do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Kleber Franke Portella

CURITIBA

2003

ALEX JOUKOSKI

ESTUDO DO DESEMPENHO DE CONCRETOS PARA ARTEFATOS DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DESTINADAS A AMBIENTES LITORÂNEOS

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais e Processos, do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Kleber Franke Portella

CURITIBA
2003

UFPR

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
Programa Interdisciplinar de Pós-Graduação em Engenharia - PIPE
Setor de Tecnologia

RELATÓRIO DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Aos dezoito dias do mês de dezembro de 2003, no auditório do CHPAR no Centro Politécnico - UFPR, foi instalada pelo Prof. Dr. Oscar Felippe von Meien, coordenador do PIPE – Programa de Pós-Graduação em Engenharia, a Banca Examinadora para a qüinquagésima quinta defesa de mestrado área de concentração: Engenharia e Ciência de Materiais. Estiveram presentes no Ato, além do coordenador do Curso de Pós-Graduação, professores, alunos e visitantes. A Banca Examinadora, atendendo determinação do Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia, ficou constituída pelos professores doutores Almir Sales (UFSCar), Carlos Mario Garcia (LACTEC), Kleber Franke Portella (LACTEC). Às 9:00 horas, a banca iniciou os trabalhos, convidando o (o) candidato (o) **Alex Joukoski** fazer a apresentação da dissertação de mestrado intitulada "**Estudo do Desempenho de Concretos para Artefatos de Redes de Distribuição de Energia Elétrica Destinadas a Ambientes Litorâneos** ." Encerrada a apresentação, iniciou-se a fase de argüição pelos membros participantes.

Tendo em vista a dissertação e a argüição, a banca atribuiu as seguintes notas: Prof. Dr. Almir Sales, Nota: 10,0, Prof. Dr. Carlos Mario Garcia, Nota: 10,0. A média obtida: 10,0, resulta na APROVAÇÃO do candidato, (de acordo com a determinação dos Artigos 61,62,63,64 da Resolução 38/96 de 14.06.96), e corresponde ao conceito A/B/C/D.

Curitiba, 18 de dezembro de 2003.

Prof. Dr. Almir Sales

Prof. Dr. Carlos Mario Garcia

Prof. Dr. Kleber Franke Portella

TERMO DE APROVAÇÃO

ALEX JOUKOSKI

ESTUDO DO DESEMPENHO DE CONCRETOS PARA ARTEFATOS DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DESTINADAS A AMBIENTES LITORÂNEOS

Dissertação aprovada como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais e Processos, do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Orientador: **Prof. Dr. Kleber Franke Portella**
Departamento de Materiais, LACTEC / UFPR

Prof. Dr. Almir Sales
Departamento de Engenharia Civil, UFSCar

Prof. Dr. Carlos Mario Garcia
Departamento de Materiais, LACTEC / UFPR

Curitiba, 18 de dezembro de 2003

Dedico este trabalho aos meus amados pais,
Arnaldo e Eleni, que sempre me apoiaram nos
momentos em que mais foi preciso.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Arnaldo e Eleni, por todo o incentivo e aprendizado transmitidos ao longo de minha vida, pela honestidade e idoneidade legadas à minha personalidade e pelo ombro amigo sempre disponível.

Sou grato às minhas queridas irmãs, Jandira e Ana Paula, pelas constantes palavras de estímulo e pelas demonstrações de afeto e carinho, e ao meu irmão Luis Arnaldo, pelas manifestações de consideração e respeito.

Aos meus sobrinhos, Matheus e Renata, agradeço pelos instantes de descontração e alegria.

Ao meu orientador, colega de trabalho, chefe e, acima de tudo, amigo, Dr. Kleber Franke Portella, por todos os ensinamentos transmitidos, por sua paciência e dedicação. E pelo incentivo durante todo o desenvolvimento deste trabalho, por meio das máximas "se fosse fácil, qualquer um fazia" e "jovem, coragem"!

Sou grato ao Prof. Dr. Carlos Mario García, pelas suas importantíssimas colaborações ao conteúdo desta dissertação, e ao Dr. Almir Sales, excelente profissional, por seu apoio e por suas valiosas dicas.

Aos membros das bancas examinadoras (qualificação e defesa), meus agradecimentos pela inestimável colaboração para o aperfeiçoamento do conteúdo desta dissertação.

Gratidão à Universidade Federal do Paraná - UFPR, e em especial ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais e Processos - PIPE, representado pelo seu corpo administrativo e docente, pela oportunidade oferecida e pela contribuição ao desenvolvimento científico da nação.

Ao Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento - LACTEC, no qual iniciei minha vida profissional, agradeço por toda a confiança em mim depositada, e pela disponibilização de recursos e infra-estrutura, sem os quais a concretização deste trabalho não teria sido possível.

Agradeço à Empresa Energética de Sergipe - ENERGIPE, pela parceria e suporte durante o desenvolvimento dos estudos de laboratório e de campo, e à Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, pelo apoio e incentivo à pesquisa.

Ao estimado amigo e colega de trabalho, Dr. Vitoldo Swinka Filho, expresso o meu agradecimento por ter-me incentivado e contribuído para a descoberta do gosto pela pesquisa. E ao Prof. Renê Robert, por seus importantes ensinamentos.

Aos colegas, estagiários e pós-graduandos do Laboratório Central de Pesquisa e Desenvolvimento - LAC, agradeço pelo auxílio e companheirismo, bem como pelos momentos de descontração em festas, churrascadas, rodízios de pizza, partidas de boliche, arremessos de bumerangue e rodadas de karaokê.

À equipe do Laboratório de Materiais e Estruturas - LAME, sou grato pelo auxílio nas análises, dosagens e ensaios realizados no desenvolvimento experimental do estudo.

A todos aqueles que ajudaram, direta ou indiretamente, na elaboração deste trabalho, mas que por esquecimento ou desatenção não foram por mim citados nestas páginas, o meu muito obrigado.

E, sobretudo, sou eternamente grato ao bondoso Deus, onipresente, pela saúde física e equilíbrio espiritual concedidos durante a realização deste trabalho, bem como pelas intermináveis graças alcançadas por intermédio de Cristo e de Maria, Sua gloriosa Mãe.

Feci quod potui, faciant meliora potentes...

"Tudo tem seu tempo e até certas manifestações mais vigorosas e originais entram em voga ou saem de moda. Mas a sabedoria tem uma vantagem: é eterna."

Baltasar Gracián (1601-1658)

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS ..... **xi**

LISTA DE FIGURAS ..... **xiii**

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS ..... **xviii**

LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES ..... **xx**

RESUMO ..... **xxi**

ABSTRACT ..... **xxii**

1. INTRODUÇÃO **2**

1.1. CARACTERÍSTICAS DA PESQUISA 4
1.2. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA DE PESQUISA 4
1.3. FORMULAÇÃO DOS ITENS DE PESQUISA 6
1.4. PUBLICAÇÕES RESULTANTES DO ESTUDO 7
1.4.1. Artigos em congressos nacionais e internacionais 7
1.4.2. Artigos em periódicos 8
1.4.3. Monografia de especialização 8
1.4.4. Relatórios técnicos e documentos de divulgação restrita 8
1.5. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO 9

2. REVISÃO DA LITERATURA **12**

2.1. O CIMENTO PORTLAND 12
2.2. O CONCRETO 18
2.2.1. O concreto armado 18
2.3. DURABILIDADE DO CONCRETO 19
2.3.1. O uso de adições e aditivos no concreto 20
2.3.1.1. Adições minerais 20
2.3.1.2. Aditivos para concreto[,] 23
2.3.2. Macro e microestrutura do concreto 24
2.3.2.1. Poros[33] 24
2.3.2.1.1. As "peles" do concreto[33] 26
2.3.2.1.2. Água contida nos poros[33] 27
2.3.3. Integridade da superfície externa 28
2.3.3.1. Fissuras 28
2.3.3.2. Reação álcali-agregado (RAA) 30
2.3.4. Influência de agentes externos na degradação do concreto 30
2.3.4.1. Dióxido de carbono[33] 30
2.3.4.2. O ambiente litorâneo e o íon cloreto 31
2.3.4.3. Íons sulfato 36
2.3.4.4. Contaminantes da água de amassamento 37
2.3.4.5. A influência da temperatura no processo de cura 37
2.4. CORROSÃO DA ARMADURA E DEGRADAÇÃO DO CONCRETO 38
2.4.1. Corrosão da armadura de aço 39
2.4.2. Mecanismo de corrosão[33] 40
2.4.3. O fenômeno da passividade da armadura metálica 41
2.5. TÉCNICAS ELETROQUÍMICAS PARA DETECÇÃO E MONITORAMENTO DA CORROSÃO 44

2.5.1. Técnica dos Potenciais de Corrosão 47
2.5.1.1. Princípios da técnica 48
2.5.1.2. Equipamentos 49
2.5.1.3. Procedimentos 49
2.5.1.4. Critérios de avaliação da corrosão 53
2.5.1.5. Vantagens e desvantagens da técnica 55
2.5.1.5.1. Vantagens 55
2.5.1.5.2. Desvantagens 56
2.5.2. Técnica de Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIS) 58
2.5.2.1. Histórico da técnica 58
2.5.2.2. Princípios da técnica 59
2.5.2.3. Circuito equivalente 61
2.5.2.4. Aplicação da técnica 66
2.5.2.5. Apresentação dos resultados 71
2.5.2.5.1. Diagrama de Nyquist 71
2.5.2.5.2. Diagrama de Bode 74
2.5.2.6. Critérios de avaliação da corrosão 78
2.5.2.7. Vantagens e desvantagens da técnica 79
2.5.2.7.1. Vantagens 79
2.5.2.7.2. Desvantagens 80
2.6. CONSIDERAÇÕES SOBRE ALGUMAS TÉCNICAS ANALÍTICAS EMPREGADAS NO ESTUDO 81
2.6.1. Análise térmica 81
2.6.2. Difratometria de raios X (DRX) 82
2.6.3. Microscopia eletrônica de varredura (MEV) 84

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL 87

3.1. CARACTERIZAÇÃO DOS INSUMOS 87
3.1.1. Aglomerantes 87
3.1.1.1. Caracterização físico-química 88
3.1.1.1.1. Análise por FRX 90
3.1.1.1.2. Análise por DRX 90
3.1.1.1.3. Análise térmica 91
3.1.2. Agregados 92
3.1.2.1. Análise petrográfica 93
3.1.2.2. Reatividade potencial 94
3.1.3. Barras de aço 95
3.1.4. Sílica ativa 96
3.1.5. Resina epóxi 96
3.1.6. Aditivo superplastificante 96
3.2. PREPARATIVOS PARA AS DOSAGENS 97
3.2.1. Barras metálicas para cp's prismáticos 97
3.2.2. Fôrmas para cp´s destinados a ensaios eletroquímicos 99
3.2.3. Proporcionamento dos agregados graúdos 100
3.2.4. Determinação da porcentagem ótima de areia 100
3.3. CONFECÇÃO DOS CONCRETOS PARA ESTUDO 101
3.3.1. Determinação da umidade dos agregados 102
3.3.2. Estudos de dosagem 102
3.3.2.1. Dosagens preliminares 103
3.3.2.2. Dosagens complementares 104
3.3.2.3. Dosagens piloto 104
3.3.3. Preparo dos concretos 105
3.3.4. Ensaios nos concretos frescos 107

3.4. CONFECÇÃO DE CP'S 108
3.4.1. Moldagem dos cp's 108
3.4.1.1. Cp's prismáticos destinados a ensaios eletroquímicos 109
3.4.2. Cura dos cp's 111
3.5. ENSAIOS FÍSICOS E MECÂNICOS NOS CP'S 111
3.5.1. Resistência à compressão axial 111
3.5.1.1. Envelhecimento em solução salina 112
3.5.2. Ensaio de permeabilidade 113
3.5.3. Radiografia industrial 114
3.6. ANÁLISES EM AMOSTRAS EXTRAÍDAS DOS CP'S 114
3.6.1. Massa específica, absorção de água e índice de vazios 114
3.6.2. Análise por MEV 115
3.6.3. Análise por DRX 116
3.6.4. Análise térmica 116
3.7. ENSAIOS ELETROQUÍMICOS 117
3.7.1. Envelhecimento acelerado de cp's 117
3.7.2. Análise por EIS 119
3.7.2.1. Potencial de corrosão 122
3.7.2.2. Procedimento de ensaio 122
3.7.2.3. Interpretação dos dados 124
3.8. ATIVIDADES DE CAMPO 124
3.8.1. Inspeção na rede instalada em Aracaju[8] 124
3.8.2. Visitas técnicas a fabricantes locais 126
3.8.3. Confecção e ensaio de postes e cruzetas 126
3.8.4. Instalação e acompanhamento do desempenho dos artefatos em campo 129

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES 133

4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS INSUMOS 133
4.1.1. Cimentos 133
4.1.1.1. Análise por FRX 135
4.1.1.2. Análise por DRX 136
4.1.1.3. Análise térmica 137
4.1.1.4. Outros resultados 139
4.1.2. Agregados 140
4.1.2.1. Agregados miúdos 140
4.1.2.1.1. Análise petrográfica 141
4.1.2.2. Agregados graúdos 142
4.1.2.2.1. Análise petrográfica 144
4.1.2.3. Reatividade potencial 145
4.1.3. Sílica ativa 146
4.1.4. Resina epóxi 148
4.1.5. Aditivo superplastificante 149
4.2. ESTUDOS DE DOSAGEM 149
4.3. ENSAIOS EM CP'S E AMOSTRAS DE CONCRETOS ENDURECIDOS 153
4.3.1. Resistência à compressão 153
4.3.2. Permeabilidade 156
4.3.3. Massa específica, absorção de água e índice de vazios 158
4.3.4. Análise por MEV 160
4.3.5. Análise por DRX 169
4.3.5.1. Concretos com cimento CPII-F 32 169
4.3.5.2. Concretos com cimento CPII-Z 32 170
4.3.5.3. Concretos com cimento CPV-ARI RS 171
4.3.6. Análise térmica 172

4.3.6.1. Concretos com cimento CPII-F 32 173
4.3.6.2. Concretos com cimento CPII-Z 32 174
4.3.6.3. Concretos com cimento CPV-ARI RS 175
4.3.7. Radiografia industrial 177
4.4. ENSAIOS ELETROQUÍMICOS 178
4.4.1. Potencial de corrosão 178
4.4.1.1. Dosagens preliminares 178
4.4.1.1.1. Espessura de cobrimento de 10 mm 180
4.4.1.1.2. Espessura de cobrimento de 15 mm 181
4.4.1.1.3. Espessuras de cobrimento de 25 e 30 mm 182
4.4.1.2. Dosagens complementares 184
4.4.1.3. Observações adicionais 185
4.4.2. Análise por EIS 186
4.4.2.1. Diagramas de Nyquist e Bode 186
4.4.2.1.1. Dosagens preliminares 188
4.4.2.1.2. Dosagens complementares 200
4.4.2.2. Circuito elétrico equivalente e *fitting* dos dados 201
4.5. ESTUDOS DE CAMPO 205
4.5.1. Inspeção na rede instalada na orla de Aracaju 205
4.5.2. Agressividade ambiental e corrosividade atmosférica 209
4.5.3. Análise do processo de fabricação de postes em Aracaju 211
4.5.4. Fabricação, ensaio e instalação de postes em Sergipe 214
4.5.5. Acompanhamento do desempenho dos artefatos em campo 219
5. CONCLUSÕES 222
5.1. SUGESTÕES PARA CONTINUIDADE DOS ESTUDOS 227
REFERÊNCIAS 229

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - COMPOSTOS PRINCIPAIS DO CIMENTO PORTLAND 12
TABELA 2 - TEORES DE CLÍNQUER E DE ADIÇÃO DOS CIMENTOS PORTLAND 16
TABELA 3 - COMPOSIÇÃO MÉDIA DOS CIMENTOS PORTLAND SEGUNDO A *ASTM* 18
TABELA 4 - VOLUME DE POROS EM PASTAS DE CIMENTO COM DIFERENTES FATORES A/C 24
TABELA 5 - PRINCIPAIS PATOLOGIAS E TEMPO DE APARECIMENTO DAS FISSURAS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO 29
TABELA 6 - RECOMENDAÇÕES DE COBRIMENTOS MÍNIMOS DE PEÇAS ESTRUTURAIS DE CONCRETO, SEGUNDO A NBR 6118/80[52] 36
TABELA 7 - PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DE CORROSÃO EM FUNÇÃO DO POTENCIAL, PARA O ELETRODO ESC 53
TABELA 8 - PROBABILIDADE DE CORROSÃO EM FUNÇÃO DO POTENCIAL, PARA O ELETRODO ECS 54
TABELA 9 - ANÁLISES QUÍMICAS, E SUAS RESPECTIVAS NORMAS, REALIZADAS NOS CIMENTOS 88
TABELA 10 - ANÁLISES FÍSICAS, E SUAS RESPECTIVAS NORMAS, REALIZADAS NOS CIMENTOS 89
TABELA 11 - ANÁLISES, E SUAS RESPECTIVAS NORMAS, REALIZADAS NOS AGREGADOS MIÚDOS 92
TABELA 12 - ANÁLISES, E SUAS RESPECTIVAS NORMAS, REALIZADAS NOS AGREGADOS GRAÚDOS 93
TABELA 13 - SEQÜÊNCIA DE COLOCAÇÃO DOS MATERIAIS NA BETONEIRA 106
TABELA 14 - TEMPO DE MISTURA DOS CONCRETOS 106
TABELA 15 - ENSAIOS (E SUAS RESPECTIVAS NORMAS) REALIZADOS NOS CONCRETOS FRESCOS 107
TABELA 16 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS CIMENTOS UTILIZADOS NAS DOSAGENS 134
TABELA 17 - RESULTADOS DAS ANÁLISES FÍSICAS REALIZADAS NOS CIMENTOS 135
TABELA 18 - RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CIMENTOS 135
TABELA 19 - RESULTADOS DA ANÁLISE DOS CIMENTOS POR FRX, EM % 136
TABELA 20 - DIÂMETRO MÉDIO DOS GRÃOS DE CIMENTO 139
TABELA 21 - RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS MIÚDOS 140
TABELA 22 - RESULTADOS DA ANÁLISE MINERALÓGICA NOS AGREGADOS MIÚDOS 142
TABELA 23 - RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS GRAÚDOS 143
TABELA 24 - RESULTADOS DA ANÁLISE MINERALÓGICA NOS AGREGADOS GRAÚDOS 144
TABELA 25 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA E PROPRIEDADES FÍSICAS DA SÍLICA ATIVA 147
TABELA 26 - DADOS TÉCNICOS DA RESINA EPÓXI, DE ACORDO COM ESPECIFICAÇÕES DO FABRICANTE 149
TABELA 27 - RESULTADOS DAS ANÁLISES EFETUADAS NO ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE 149
TABELA 28 - DADOS SOBRE OS CONCRETOS OBTIDOS NA ETAPA DE DOSAGENS PRELIMINARES E RESULTADOS DOS ENSAIOS NAS MISTURAS FRESCAS 151
TABELA 29 - DADOS SOBRE OS CONCRETOS OBTIDOS NA ETAPA DE DOSAGENS COMPLEMENTARES E RESULTADOS DOS ENSAIOS NAS MISTURAS FRESCAS 152
TABELA 30 - DADOS SOBRE OS CONCRETOS OBTIDOS NA ETAPA DE DOSAGENS PILOTO E RESULTADOS DOS ENSAIOS NAS MISTURAS FRESCAS 153
TABELA 31 - COEFICIENTES DE PERMEABILIDADE DOS CONCRETOS DAS ETAPAS DE DOSAGENS PRELIMINARES E COMPLEMENTARES 157
TABELA 32 - MASSA ESPECÍFICA E ÍNDICE DE VAZIOS DOS CONCRETOS DA ETAPA PRELIMINAR DE DOSAGEM 158
TABELA 33 - MASSA ESPECÍFICA E ÍNDICE DE VAZIOS DOS CONCRETOS DAS ETAPAS DE DOSAGENS COMPLEMENTARES E PILOTO 159

TABELA 34 - TEOR DE CLORETOS DE AMOSTRAS DE CONCRETO EXTRAÍDAS DE POSTES INSTALADOS NA ORLA DE ARACAJU 208
TABELA 35 - IRREGULARIDADES NA PRODUÇÃO DE ARTEFATOS PARA RDE'S 213
TABELA 36 - QUANTIDADE DE MATERIAIS USADOS NAS DOSAGENS EM ARACAJU 215
TABELA 37 - RESULTADOS DOS ENSAIOS E TESTES NOS POSTES FABRICADOS EM ARACAJU 217
TABELA 38 - RESULTADOS DOS ENSAIOS E TESTES NAS CRUZETAS FABRICADAS EM ARACAJU 218
TABELA 39 - MASSA ESPECÍFICA, ÍNDICE DE VAZIOS E ABSORÇÃO DOS CONCRETOS PRODUZIDOS EM ARACAJU 218

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - EVOLUÇÃO DA RESISTÊNCIA DOS COMPOSTOS DE CIMENTO PORTLAND 14
FIGURA 2 - DISTRIBUIÇÃO DO TAMANHO DE POROS NO CONCRETO 25
FIGURA 3 - PERFIL TÍPICO DA CONCENTRAÇÃO DE CLORETOS AO LONGO DO COBRIMENTO DE CONCRETO 35
FIGURA 4 - ESQUEMA DO PROCESSO DE CORROSÃO DAS BARRAS METÁLICAS 40
FIGURA 5 - CURVA DE POLARIZAÇÃO, MOSTRANDO A DIMINUIÇÃO DA CORRENTE CAUSADA POR PASSIVAÇÃO DA SUPERFÍCIE METÁLICA 42
FIGURA 6 - DIAGRAMA DE POURBAIX PARA O FERRO 42
FIGURA 7 - CURVAS DE POLARIZAÇÃO COM AS REAÇÕES DE OXIDAÇÃO DO METAL E REDUÇÃO DO OXIGÊNIO 43
FIGURA 8 - CURVA DE POLARIZAÇÃO ANÓDICA (A) E AUMENTO DA CORRENTE POR RUPTURA DA PASSIVIDADE (B) 44
FIGURA 9 - ESQUEMA USUAL DE MEDIÇÃO DO POTENCIAL DE CORROSÃO 50
FIGURA 10 - APARELHO PORTÁTIL PARA MEDIDA DO POTENCIAL DE CORROSÃO 51
FIGURA 11 - EXEMPLOS DE MAPEAMENTO DE POTENCIAIS SOBRE LAJES DE CONCRETO ARMADO 52
FIGURA 12 - ESQUEMA PARA DETERMINAÇÃO DOS LIMITES DE POTENCIAL PARA O ELETRODO ECS 54
FIGURA 13 - CIRCUITO EQUIVALENTE DE RANDLES 62
FIGURA 14 - MODELO DE CORROSÃO DE METAL IMERSO EM ELETRÓLITO 62
FIGURA 15 - INTERFACES EM UM SISTEMA METAL-FILME-SOLUÇÃO 64
FIGURA 16 - CIRCUITO EQUIVALENTE PROPOSTO PARA O CASO DO CONCRETO ARMADO 65
FIGURA 17 - OUTRAS CONFIGURAÇÕES DE CIRCUITOS ELÉTRICOS EQUIVALENTES PARA MODELAGEM DO SISTEMA AÇO-CONCRETO 66
FIGURA 18 - CIRCUITO UTILIZANDO UM SISTEMA DE DOIS ELETRODOS PARA MEDIDA DE IMPEDÂNCIA 67
FIGURA 19 - CONFIGURAÇÃO DE SISTEMA DE TRÊS ELETRODOS UTILIZADO PARA MEDIDA DE IMPEDÂNCIA, POR MEIO DE ANALISADOR DE ESPECTRO 69
FIGURA 20 - ESQUEMA ILUSTRATIVO DO PROCESSO DE MEDIDA E OBTENÇÃO DE DADOS DE IMPEDÂNCIA NOS DOMÍNIOS DE TEMPO E DE FREQÜÊNCIA 69
FIGURA 21 - DIAGRAMA DE BLOCOS PARA INSTRUMENTAÇÃO DA IMPEDÂNCIA 70
FIGURA 22 - DIAGRAMA DE NYQUIST, COM SEU CIRCUITO EQUIVALENTE, MOSTRANDO O EFEITO DA IMPEDÂNCIA DIFUSIONAL 72
FIGURA 23 - VARIAÇÕES NA CURVA DO DIAGRAMA DE NYQUIST 74
FIGURA 24 - DIAGRAMA DE BODE DO TIPO LOG $|Z|$ *VERSUS* LOG ω 75
FIGURA 25 - DIAGRAMA DE BODE DO TIPO ϕ *VERSUS* LOG ω 76
FIGURA 26 - ESQUEMA DA INTERAÇÃO DE UM FEIXE DE RAIOS X COM ÁTOMOS 83
FIGURA 27 - DIFRATOGRAMA DE RAIOS X CORRESPONDENTE À FASE ETRINGITA, JUNTO COM O PADRÃO DE ETRINGITA DO *ICDD* (LINHAS PRETAS) 84
FIGURA 28 - EQUIPAMENTOS USADOS NA ANÁLISE DE CIMENTOS: A) GRANULÔMETRO À LASER; B) BET 90
FIGURA 29 - EQUIPAMENTOS USADOS NA ANÁLISE DE CIMENTOS: A) DRX; B) DTA/TGA 91
FIGURA 30 - ENSAIO DE REATIVIDADE POTENCIAL: A) CP'S PRISMÁTICOS; B) BANHO PARA ENVELHECIMENTO; C) RELÓGIO COMPARADOR USADO NA MEDIDA DA EXPANSÃO 94
FIGURA 31 - BARRAS DE AÇO PREPARADAS PARA SEREM INCLUÍDAS NOS CP'S PRISMÁTICOS 99
FIGURA 32 - FÔRMA DE MADEIRA PARA CONFECÇÃO DE CP'S PRISMÁTICOS 99
FIGURA 33 - DISPOSIÇÃO DAS BARRAS DE AÇO NA FÔRMA DE MADEIRA 101
FIGURA 34 - PLANILHA UTILIZADA NOS ESTUDOS DE DOSAGEM DOS CONCRETOS 103
FIGURA 35 - ENSAIOS NOS CONCRETOS FRESCOS: A) *SLUMP*; B) MASSA UNITÁRIA; C) TEOR DE AR INCORPORADO 107

FIGURA 36 - MOLDAGEM DOS CP'S CILÍNDRICOS DE CONCRETO: A) ADENSAMENTO; B) CURA INICIAL; C) DESMOLDAGEM; D) CP PRONTO 109
FIGURA 37 - MOLDAGEM DOS CP'S PRISMÁTICOS DE CONCRETO ARMADO 109
FIGURA 38 - DESENHO ESQUEMÁTICO DO CP PRISMÁTICO DE CONCRETO ARMADO 110
FIGURA 39 - CP'S PRISMÁTICOS DE CONCRETO ARMADO PRONTOS 110
FIGURA 40 - A) CÂMARA ÚMIDA; B) MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAIOS 112
FIGURA 41 - ENVELHECIMENTO DOS CP'S CILÍNDRICOS EM SOLUÇÃO SALINA 113
FIGURA 42 - A) PREPARO DOS CP'S; B) SISTEMA DE ENSAIO DE PERMEABILIDADE 113
FIGURA 43 - A) LUPA ESTEREOSCÓPICA; B) MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA 116
FIGURA 44 - ESQUEMA ILUSTRATIVO DA CÉLULA DE ENVELHECIMENTO 119
FIGURA 45 - CÉLULA DE ENVELHECIMENTO: A) MONTADA; B) EM VISTA EXPLODIDA 119
FIGURA 46 - A) EQUIPAMENTO UTILIZADO NAS MEDIDAS POR EIS; B) TELA DO *SOFTWARE* FRA 120
FIGURA 47 - ESQUEMA DE CONEXÃO DOS ELETRODOS 121
FIGURA 48 - A) GAIOLA DE FARADAY; B) SISTEMA DE MEDIDAS POR EIS MONTADO 122
FIGURA 49 - ESQUEMA MOSTRANDO OS POTENCIAIS DC E AC 123
FIGURA 50 - A) RETIRADA DE POSTE PARA REALIZAÇÃO DE ENSAIOS; B) POSTE EM ESTADO AVANÇADO DE DEGRADAÇÃO 126
FIGURA 51 - FABRICAÇÃO DE ARTEFATOS DE CONCRETO ARMADO PARA ESTUDO: A) MISTURA; B) LANÇAMENTO; C) DESFORMA; D) IÇAMENTO 128
FIGURA 52 - ENSAIO DE POSTE FABRICADO COM CONCRETO ESTUDADO EM LABORATÓRIO: A) ENGASTAMENTO; B) CARREGAMENTO; C) DETALHE DO DINAMÔMETRO 129
FIGURA 53 - A) VISTA DA EEC CONSTRUÍDA NA PRAIA DA CAUEIRA; B) INSTALAÇÃO DE POSTE NO INTERIOR DA EEC 130
FIGURA 54 - DIFRATOGRAMAS DE RAIOS X DOS CIMENTOS, COM IDENTIFICAÇÃO DE FASES PELOS PADRÕES DO *ICDD* 137
FIGURA 55 - TERMOGRAMAS DOS CIMENTOS UTILIZADOS NAS DOSAGENS: A) CPII-F 32 (PARANÁ); B) CPII-F 32 (SERGIPE); C) CPII-Z 32 (PARANÁ); D) CPV-ARI RS (PARANÁ) 138
FIGURA 56 - CURVAS GRANULOMÉTRICAS DOS AGREGADOS MIÚDOS PROCEDENTES DE: A) CURITIBA (AREIA FINA); B) ARACAJU (AREIA MUITO FINA) 141
FIGURA 57 - CURVAS GRANULOMÉTRICAS DOS AGREGADOS GRAÚDOS: A) BRITA - PR; B) BRITA - SE; C) PEDRISCO - PR; D) PEDRISCO - SE 143
FIGURA 58 - REATIVIDADE POTENCIAL DOS MATERIAIS ADQUIRIDOS NO PARANÁ 145
FIGURA 59 - REATIVIDADE POTENCIAL DOS MATERIAIS ADQUIRIDOS EM SERGIPE: A) AGREGADO MIÚDO; B) AGREGADO GRAÚDO 146
FIGURA 60 - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS GRÃOS DE SÍLICA ATIVA 148
FIGURA 61 - DIFRATOGRAMA DE RAIOS X DA SÍLICA ATIVA 148
FIGURA 62 - GRÁFICOS PARA DETERMINAÇÃO DA PROPORÇÃO IDEAL DE AGREGADOS GRAÚDOS: A) DOSAGENS COMPLEMENTARES; B) DOSAGENS PILOTO 150
FIGURA 63 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DOS CONCRETOS DAS DOSAGENS PRELIMINARES: A) APÓS CURA EM CÂMARA ÚMIDA; B) APÓS ENVELHECIMENTO EM SOLUÇÃO SALINA 154
FIGURA 64 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DOS CONCRETOS DAS DOSAGENS COMPLEMENTARES: A) APÓS CURA EM CÂMARA ÚMIDA; B) APÓS ENVELHECIMENTO EM SOLUÇÃO SALINA 155
FIGURA 65 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS DAS DOSAGENS PILOTO 156
FIGURA 66 - ABSORÇÃO DOS CONCRETOS ESTUDADOS: A) DOSAGEM PRELIMINARES; B) DOSAGENS COMPLEMENTARES E PILOTO 160
FIGURA 67 - IMAGENS E ANÁLISE ELEMENTAR, POR MEV E EDS, DA SUPERFÍCIE DE FRATURA DE AMOSTRA COM CIMENTO CPV-ARI RS, APÓS ENVELHECIMENTO ARTIFICIAL 161
FIGURA 68 - MICROGRAFIAS E ANÁLISE ELEMENTAR, POR MEV E EDS, DA SUPERFÍCIE DE FRATURA DE AMOSTRA COM CIMENTO CPV-ARI RS, APÓS ENVELHECIMENTO NATURAL NA EEC 162

FIGURA 69 - MICROGRAFIA E ANÁLISE ELEMENTAR, POR MEV E EDS, DA SUPERFÍCIE DE FRATURA DE AMOSTRA COM CIMENTO CPV-ARI RS, APÓS ENVELHECIMENTO NATURAL NA EEC 163
FIGURA 70 - MICROGRAFIA E ANÁLISE ELEMENTAR DA SUPERFÍCIE DE FRATURA DE AMOSTRA COM CIMENTO CPII-F 32, APÓS ENVELHECIMENTO EM LABORATÓRIO 164
FIGURA 71 - MICROGRAFIA E ANÁLISE ELEMENTAR DA SUPERFÍCIE DE FRATURA DE AMOSTRA COM CIMENTO CPII-F 32, APÓS ENVELHECIMENTO NATURAL 165
FIGURA 72 - MICROGRAFIA E ANÁLISE ELEMENTAR DA SUPERFÍCIE DE FRATURA DE AMOSTRA COM CIMENTO CPII-F 32 E 8% DE SÍLICA ATIVA, APÓS ENVELH. ARTIFICIAL 166
FIGURA 73 - MICROGRAFIA E ANÁLISE ELEMENTAR DA SUPERFÍCIE DE FRATURA DE AMOSTRA COM CIMENTO CPII-F 32 E 8% DE SÍLICA ATIVA, APÓS ENVELHECIMENTO NATURAL 167
FIGURA 74 - DIFRATOGRAMAS DO CONCRETO PRODUZIDO COM 292 KG/M^3 DE CIMENTO CPII-F 32, OBTIDOS APÓS CURA POR: 43 H (A), 67 H (B), 139 H (C), 175 H (D), 213 H (E), 305 H (F), 355 H (G), 28 DIAS (H), 69 DIAS (I) E 98 DIAS (J) 169
FIGURA 75 - DIFRATOGRAMA E RESPECTIVA IDENTIFICAÇÃO DE FASES, DO CONCRETO PRODUZIDO COM 292 KG/M^3 DE CIMENTO CPII-F 32, OBTIDOS APÓS 43 HORAS DE CURA 170
FIGURA 76 - DIFRATOGRAMAS DO CONCRETO PRODUZIDO COM 347 KG/M^3 DE CIMENTO CPII-F 32, OBTIDOS APÓS CURA POR: 74 H (A), 125 H (B), 158 H (C), 253 H (D), 406 H (E), 32 DIAS (F), 96 DIAS (G) E 160 DIAS (H) 170
FIGURA 77 - DIFRATOGRAMAS DO CONCRETO PRODUZIDO COM 288 KG/M^3 DE CIMENTO CPII-Z 32, OBTIDOS APÓS CURA POR: 30 H (A), 53 H (B), 80 H (C), 102 H (D), 192 H (E), 340 H (F), 29 DIAS (G) E 90 DIAS (H) 171
FIGURA 78 - DIFRATOGRAMAS DO CONCRETO PRODUZIDO COM 345 KG/M^3 DE CIMENTO CPII-Z 32, OBTIDOS APÓS CURA POR: 31 H (A), 46 H (B), 74 H (C), 170 H (D), 223 H (E), 367 H (F), 29 DIAS (G) E 91 DIAS (H) 171
FIGURA 79 - DIFRATOGRAMAS DO CONCRETO PRODUZIDO COM 292 KG/M^3 DE CIMENTO CPV-ARI RS, OBTIDOS APÓS CURA POR: 28 H (A), 48 H (B), 125 H (C), 150 H (D), 166 H (E), 312 H (F), 29 DIAS (G) E 90 DIAS (H) 172
FIGURA 80 - DIFRATOGRAMAS DO CONCRETO PRODUZIDO COM 344 KG/M^3 DE CIMENTO CPV-ARI RS, OBTIDOS APÓS CURA POR: 28 H (A), 96 H (B), 120 H (C), 144 H (D), 263 H (E), 336 H (F), 32 DIAS (G) E 90 DIAS (H) 172
FIGURA 81 - TERMOGRAMAS DAS AMOSTRAS DE CONCRETO FABRICADO COM 292 KG/M^3 DE CIMENTO CPII-F 32, APÓS CURA POR: A) 43 H; B) 672 H 174
FIGURA 82 - TERMOGRAMAS DAS AMOSTRAS DE CONCRETO FABRICADO COM 347 KG/M^3 DE CIMENTO CPII-F 32, APÓS CURA POR: A) 86 H; B) 326 H 174
FIGURA 83 - TERMOGRAMAS DAS AMOSTRAS DE CONCRETO FABRICADO COM 288 KG/M^3 DE CIMENTO CPII-Z 32, APÓS CURA POR: A) 30 H; B) 383 H 175
FIGURA 84 - TERMOGRAMAS DAS AMOSTRAS DE CONCRETO FABRICADO COM 345 KG/M^3 DE CIMENTO CPII-Z 32, APÓS CURA POR: A) 46 H; B) 407 H 175
FIGURA 85 - TERMOGRAMAS DAS AMOSTRAS DE CONCRETO FABRICADO COM 292 KG/M^3 DE CIMENTO CPV-ARI RS, APÓS CURA POR: A) 28 H; B) 359 H 176
FIGURA 86 - TERMOGRAMAS DAS AMOSTRAS DE CONCRETO FABRICADO COM 344 KG/M^3 DE CIMENTO CPV-ARI RS, APÓS CURA POR: A) 28 H; B) 263 H 176
FIGURA 87 - IMAGENS, POR RADIOGRAFIA INDUSTRIAL, DE CP'S PRISMÁTICOS DE CONCRETO ARMADO 177
FIGURA 88 - GRÁFICOS DE POTENCIAL DE CORROSÃO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE ENVELHECIMENTO, DOS CONCRETOS DAS DOSAGENS PRELIMINARES: A) CPII-F 32 A 292 KG/M^3; B) CPII-F 32 A 347 KG/M^3; C) CPII-Z 32 A 288 KG/M^3; D) CPII-Z 32 A 345 KG/M^3; E) CPV-ARI RS A 292 KG/M^3; F) CPV-ARI RS A 344 KG/M^3 179
FIGURA 89 - GRÁFICO DE POTENCIAL DE CORROSÃO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE ENVELHECIMENTO, DOS CP'S COM ESPESSURA DE COBRIMENTO DE 10 MM 180

FIGURA 90 - GRÁFICO DE POTENCIAL DE CORROSÃO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE ENVELHECIMENTO, DOS CP'S COM ESPESSURA DE COBRIMENTO DE 15 MM 181
FIGURA 91 - DETALHE DA TRINCA SURGIDA NO CP COM CIMENTO CPII-Z 32 E CONSUMO DE 288 KG/M^3 182
FIGURA 92 - GRÁFICO DE POTENCIAL DE CORROSÃO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE ENVELHECIMENTO, DOS CP'S COM ESPESSURA DE COBRIMENTO DE 25 MM 183
FIGURA 93 - GRÁFICO DE POTENCIAL DE CORROSÃO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE ENVELHECIMENTO, DOS CP'S COM ESPESSURA DE COBRIMENTO DE 30 MM 184
FIGURA 94 - GRÁFICO DE POTENCIAL DE CORROSÃO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE ENVELHECIMENTO, DOS CONCRETOS CONFECCIONADOS NA ETAPA DE DOSAGENS COMPLEMENTARES 185
FIGURA 95 - CRISTALIZAÇÃO DE SAL NA SUPERFÍCIE DOS CP'S, COM AS RESPECTIVAS MICROGRAFIAS OBTIDAS POR MEV E ESPECTRO DA ANÁLISE POR EDS 186
FIGURA 96 - DIAGRAMAS DE NYQUIST E BODE: CPII-F 32, 292 KG/M^3, 10 MM 189
FIGURA 97 - DIAGRAMAS DE NYQUIST E BODE: CPII-F 32, 292 KG/M^3, 15 MM 191
FIGURA 98 - DIAGRAMAS DE NYQUIST E BODE: CPII-F 32, 292 KG/M^3, 25 MM 191
FIGURA 99 - DIAGRAMAS DE NYQUIST E BODE: CPII-F 32, 292 KG/M^3, 30 MM 191
FIGURA 100 - DIAGRAMAS DE NYQUIST E BODE: CPII-F 32, 347 KG/M^3, 10 MM 192
FIGURA 101 - DIAGRAMAS DE NYQUIST E BODE: CPII-F 32, 347 KG/M^3, 15 MM 192
FIGURA 102 - DIAGRAMAS DE NYQUIST E BODE: CPII-F 32, 347 KG/M^3, 25 MM 193
FIGURA 103 - DIAGRAMAS DE NYQUIST E BODE: CPII-F 32, 347 KG/M^3, 30 MM 193
FIGURA 104 - DIAGRAMAS DE NYQUIST E BODE: CPII-Z 32, 288 KG/M^3, 10 MM 194
FIGURA 105 - DIAGRAMAS DE NYQUIST E BODE: CPII-Z 32, 288 KG/M^3, 15 MM 194
FIGURA 106 - DIAGRAMAS DE NYQUIST E BODE: CPII-Z 32, 288 KG/M^3, 25 MM 195
FIGURA 107 - DIAGRAMAS DE NYQUIST E BODE: CPII-Z 32, 288 KG/M^3, 30 MM 195
FIGURA 108 - DIAGRAMAS DE NYQUIST E BODE: CPII-Z 32, 345 KG/M^3, 10 MM 196
FIGURA 109 - DIAGRAMAS DE NYQUIST E BODE: CPII-Z 32, 345 KG/M^3, 15 MM 196
FIGURA 110 - DIAGRAMAS DE NYQUIST E BODE: CPII-Z 32, 345 KG/M^3, 25 MM 197
FIGURA 111 - DIAGRAMAS DE NYQUIST E BODE: CPII-Z 32, 345 KG/M^3, 30 MM 197
FIGURA 112 - DIAGRAMAS DE NYQUIST E BODE: CPV-ARI RS, 292 KG/M^3, 10 MM 198
FIGURA 113 - DIAGRAMAS DE NYQUIST E BODE: CPV-ARI RS, 292 KG/M^3, 15 MM 198
FIGURA 114 - DIAGRAMAS DE NYQUIST E BODE: CPV-ARI RS, 292 KG/M^3, 25 MM 198
FIGURA 115 - DIAGRAMAS DE NYQUIST E BODE: CPV-ARI RS, 292 KG/M^3, 30 MM 199
FIGURA 116 - DIAGRAMAS DE NYQUIST E BODE: CPV-ARI RS, 344 KG/M^3, 10 MM 199
FIGURA 117 - DIAGRAMAS DE NYQUIST E BODE: CPV-ARI RS, 344 KG/M^3, 15 MM 199
FIGURA 118 - DIAGRAMAS DE NYQUIST E BODE: CPV-ARI RS, 344 KG/M^3, 25 MM 200
FIGURA 119 - DIAGRAMAS DE NYQUIST E BODE: CPV-ARI RS, 344 KG/M^3, 30 MM 200
FIGURA 120 - DIAGRAMAS DE NYQUIST E BODE DO CP CONTENDO SÍLICA ATIVA 201
FIGURA 121 - DIAGRAMAS DE NYQUIST E BODE DO CP CONTENDO RESINA EPÓXI 201
FIGURA 122 - CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE UTILIZADO NO *FITTING* DOS DADOS EXPERIMENTAIS 202
FIGURA 123 - *FITTING* DOS DADOS DA MEDIDA DE IMPEDÂNCIA AOS 28 DIAS DO CP CONFECCIONADO COM 292 KG/M^3 DE CIMENTO CPII-F 32 E COBRIMENTO DE 25 MM 203
FIGURA 124 - *FITTING* DOS DADOS DA MEDIDA DE IMPEDÂNCIA AOS 37 DIAS DO CP CONFECCIONADO COM 292 KG/M^3 DE CIMENTO CPII-F 32 E COBRIMENTO DE 25 MM 204
FIGURA 125 - VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS DO MODELO EM FUNÇÃO DO ENVELHECIMENTO: A) RESISTÊNCIA DE POLARIZAÇÃO; B) CONSTANTE DE WARBURG 205
FIGURA 126 - ARTEFATOS DE CONCRETO DEGRADADOS, NA ORLA DE ARACAJU 206
FIGURA 127 - CORROSÃO APARENTE DIFERENCIAL ENTRE AS FACES DOS POSTES 207
FIGURA 128 - ANÁLISE DO PH DO CONCRETO, COM O USO DE FENOLFTALEÍNA 208

FIGURA 129 - INFORMAÇÕES CLIMÁTICAS PARA ARACAJU/SE, NO ANO DE 2002: PRECIPITAÇÃO (MM), UMIDADE RELATIVA (%), TEMPERATURA (°C) E INSOLAÇÃO (H) 209
FIGURA 130 - VARIAÇÃO DO TEOR DE CLORETOS NA ATMOSFERA DA EEC, EM 2002 210
FIGURA 131 - FOTOS MOSTRANDO ALGUMAS DAS IRREGULARIDADES CONSTATADAS NA PRODUÇÃO DE ARTEFATOS DE CONCRETO NO ESTADO DE SERGIPE 214
FIGURA 132 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS CONFECCIONADOS EM ARACAJU 216
FIGURA 133 - IDENTIFICAÇÃO DOS ARTEFATOS INSTALADOS NA EEC 219
FIGURA 134 - A) VARIAÇÃO DO POTENCIAL DE CORROSÃO DOS POSTES INSTALADOS NA EEC; B) APARÊNCIA DO POSTE 232 220

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

1:m - relação cimento/agregados
ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRACO - Associação Brasileira de Corrosão
a/c - fator água-cimento
AC - corrente alternada
ACI - *American Concrete Institute*
ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica
ASTM - *American Society for Testing and Materials*
BC - baixo calor de hidratação
BET - análise de superfície específica por adsorção de nitrogênio
C_2S - silicato dicálcico
C_3S - silicato tricálcico
C_3A - aluminato tricálcico
C_4AF - ferro-aluminato tetracálcico
CAD - concreto de alto desempenho
CAR - concreto de alta resistência
CAPCIS - *Corrosion & Protection Centre Industrial Services*
CH - hidróxido de cálcio
CIRSOC - *Centro de Investig. de Reglam. Nacion. de Seguridad de Obras Civiles*
Cl^- - íon cloreto
cp - corpo-de-prova
CPI - cimento Portland comum
CPI-S - cimento Portland comum com adição
CPII - cimento Portland composto
CPII-E - cimento Portland composto com escória
CPII-F - cimento Portland composto com filer
CPII-Z - cimento Portland composto com pozolana
CPIII - cimento Portland de alto-forno
CPIV - cimento Portland pozolânico
CPV-ARI - cimento Portland de alta resistência inicial
CPV-ARI RS- cimento Portland de alta resistência inicial, resistente a sulfatos
CSH - silicato de cálcio hidratado
CuKα - radiação de cobre por energia de 1ª ionização
DC - corrente contínua
DN - diâmetro nominal
DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DTA - análise térmica diferencial
DTG - análise termogravimétrica diferencial
DRX - difratometria de raios X
ECS - eletrodo de calomelano saturado
EDS - espectroscopia de energia dispersiva de raios X
EEC - estação experimental de corrosão
EIS - espectroscopia de impedância eletroquímica

EN - normalização européia
ENERGIPE - Empresa Energética de Sergipe S/A
ESC - eletrodo de cobre/sulfato de cobre
FFT - transformada de Fourier
FHWA - *Federal Highway Administration*
FRA - analisador de resposta de freqüência
FRX - fluorescência de raios X
ICDD - *International Centre for Diffraction Data*
INT - Instituto Nacional de Tecnologia
IUPAC - *International Union of Pure and Applied Chemistry*
LACTEC - Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento
LAME - Laboratório de Materiais e Estruturas
MEV - microscopia eletrônica de varredura
N - normal
Na_2O eq - equivalente alcalino
NBR - norma brasileira
NBRI - *National Building Research Institute*
PIPE - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais e Processos
PR - Paraná
PRODASE - Companhia de Processamento de Dados de Sergipe
PVC - cloreto de polivinila
RAA - reação álcali-agregado
RDE - rede de distribuição de energia
RS - resistente a sulfatos
rms - *root mean square*
S.A. - sílica ativa
SE - Sergipe
SO_4^{2-} - íon sulfato
S.P. - superplastificante
SSS - saturado superfície seca
TFA - analisador de função de transferência
TGA - análise termogravimétrica
UFPR - Universidade Federal do Paraná
XX - vinte

LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES

° - grau
°C - grau Celsius
°C/min - grau Celsius por minuto
± - mais ou menos
% - por cento
Å - angstrom
β_a - constante de Tafel anódica
β_c - constante de Tafel catódica
ΔE - variação de potencial
ΔI - variação de corrente
ϕ - ângulo de fase
$\phi_{máx}$ - ângulo de fase máximo
µm - micrometro
ω - freqüência angular
Ω - ohm
$\Omega.m$ - ohm-metro
$\Omega.m^2$ - ohm-metro quadrado
A - ampere
B - constante de Stern-Geary
C - capacitância
C_{dl} - capac. da dupla camada elétrica
C_f - capacitância da interface
cm - centímetro
cm^2 - centímetro quadrado
cm^2/g - centímetro quadrado por grama
CPE_C - elemento de fase constante
daN - decanewton
$D_{máx}$ - dimensão máxima característica
E - potencial
E_{corr} - potencial de corrosão
f - freqüência
g - grama
g/cm^3 - grama por centímetro cúbico
g/kg - grama por quilograma
g/l - grama por litro
h - hora
Hz - hertz
I - corrente
i_{corr} - taxa de corrosão
J/g - joule por grama
K - coeficiente de permeabilidade
kg - quilograma
kg/dm^3 - quilograma por decímetro cúbico
kg/l - quilograma por litro
kg/m^3 - quilograma por metro cúbico
kgf - quilograma-força
kgf/s - quilograma-força por segundo
kHz - quilohertz
kV - quilovolt
log - logaritmo (base 10)
m - metro
m^2/g - metro quadrado por grama
mA - miliampere
mg/l - miligrama por litro
mHz - milihertz
min - minuto
mm - milímetro
MPa - megapascal
mV - milivolt
n° - número
nA - nanoampere
pH - potencial hidrogeniônico
ppm - partes por milhão
R - resistência
R_Ω - resistência ôhmica
R_C - resist. solução externa do concreto
R_p - resistência de polarização
R_S - resist. da solução dentro dos poros
R_t - resist. à transferência de carga
rad/s - radiano por segundo
S_W - constante de Warburg
t - tempo de exposição
tf - tonelada-força
UK - unidade Krebs
V_C - tensão de saída do gerador
V_G - tensão do amplificador
x - espessura da zona carbonatada
X - reatância
X_C - reatância capacitiva
X_L - reatância indutiva
X_R - reatância resistiva
Z - impedância
Z' - impedância real
Z'' - impedância imaginária
Z_C - imped. da célula de corrosão
Z_d - impedância difusional
Z_W - impedância Warburg

RESUMO

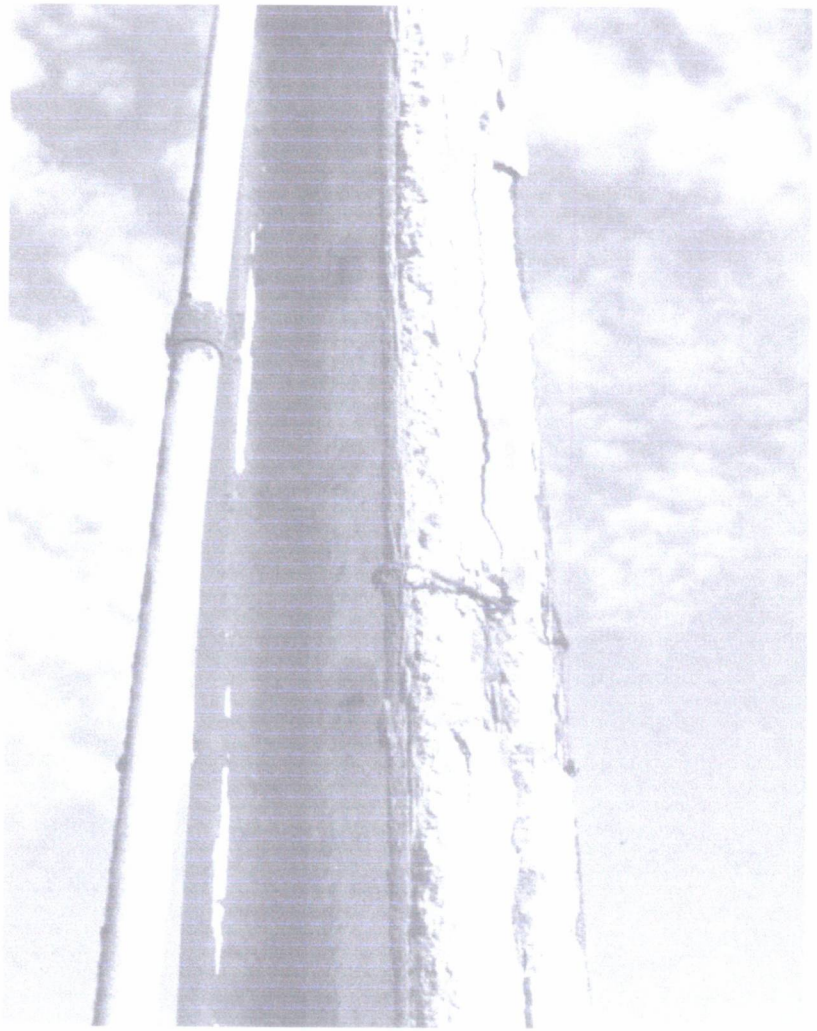
Estruturas de concreto armado construídas em regiões litorâneas são, constantemente, atacadas por agentes ambientais agressivos. O íon cloreto é conhecido como um dos mais agressivos destes elementos, causando, entre outros danos, corrosão da armadura de aço e degradação do concreto. Por isso, o objetivo deste trabalho foi determinar a influência do tipo de cimento, do consumo de cimento e de adições, bem como da espessura de cobrimento de concreto, na resistência mecânica e durabilidade de artefatos de concreto armado submetidos a envelhecimento artificial acelerado, em laboratório, por solução de 3,4% de cloreto de sódio (NaCl) e ao envelhecimento natural pela exposição à atmosfera costeira da cidade de Aracaju, no nordeste do Brasil. Vários corpos-de-prova (cp's) foram confeccionados com diferentes dosagens de concreto, usando cimentos Portland dos tipos CPII-F 32 (composto com fíler), CPII-Z 32 (composto com pozolana) e CPV-ARI RS (alta resistência inicial, resistente a sulfatos), com consumos da ordem de 290 e 350 kg/m^3, e com espessuras de cobrimento de 10, 15, 25 e 30 mm. Traços de concreto contendo adição de sílica ativa e resina epóxi também foram testados. A avaliação do comportamento dos concretos foi baseada nos resultados de análises físicas em amostras de cada material, ensaios mecânicos em cp's cilíndricos de concreto e testes eletroquímicos – potencial de corrosão e espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS) – em pequenos cp's prismáticos de concreto armado. Os resultados foram apresentados para cada combinação de tipo e consumo de cimento, em termos do tempo de envelhecimento. Análises adicionais dos concretos foram realizadas, por meio das técnicas de difratometria de raios X (DRX), microscopia eletrônica de varredura (MEV), análise térmica, dentre outras. Após determinações da agressividade ambiental e do nível de corrosividade atmosférica, artefatos de concreto (postes e cruzetas) foram produzidos com as composições estudadas em laboratório, os quais foram então instalados em uma estação de corrosão construída na praia da Caueira, no sul do Estado de Sergipe. A sua performance foi avaliada por inspeções visuais periódicas e por medidas em campo do potencial de corrosão, cujos resultados foram comparados com os dados obtidos de um poste padrão confeccionado com concreto comum. As medidas do potencial de corrosão mostraram que os concretos feitos com cimento CPV-ARI RS, assim como a mistura contendo sílica ativa, apresentaram os melhores resultados, com maior tempo necessário para aparecimento de alterações elétricas nos cp's ou de defeitos superficiais nos postes de concreto. As amostras de laboratório confeccionadas com cimento CPII-Z 32 e consumo de 288 kg/m^3 exibiram a pior durabilidade, com alguns cp's apresentando fissuras após 110 dias de envelhecimento. Ainda, o poste padrão instalado na estação de corrosão foi o que demonstrou desempenho inferior.

Palavras-chave: Corrosão da armadura de aço, degradação do concreto, espectroscopia de impedância eletroquímica, íon cloreto, postes.

ABSTRACT

Reinforced concrete structures constructed in coastal zones have constantly been threatened by environmental damaging agents. The chloride ion is known as one of the most aggressive of these elements, causing, among other damages, corrosion of the steel reinforcement and degradation of concrete. Hence, the goal of this work was to determinate the influence of the cement type, cement content and admixtures, as well as of the concrete cover thickness, in the mechanical resistance and durability of reinforced concrete elements exposed to lab accelerated artificial aging by a 3,4% sodium chloride (NaCl) solution and natural aging by exposure to Aracaju's coastal environment, in Northeastern Brazil. Many specimens were cast with different concrete mixtures, using CPII-F 32 (filler-modified), CPII-Z 32 (pozzolan-modified) and CPV-ARI RS (high-early-strength, with sulfur resistance) Portland cements, with contents of about 290 and 350 kg/m^3, and with concrete cover thicknesses of 10, 15, 25 and 30 mm. Concrete mixtures containing silica fume admixture and epoxi resin were also tested. The evaluation of the concrete behavior was taken from the results of physical analysis of samples, mechanical tests of cylindrical concrete specimens and electrochemical tests – corrosion potential and electrochemical impedance spectroscopy (EIS) – of small prismatic reinforced concrete specimens. The results were presented for each combination of cement type and content, in terms of the aging time. Additional analysis of concretes were performed, by x-ray diffratometry (XRD), scanning electron microscopy (SEM), thermal analysis and other techniques. After determinations of environmental agressivity and atmosphere corrosivity level, utility poles and crossarms were produced with the concrete mixtures studied in lab and then were installed in a corrosion station constructed at Caueira's Beach, in the south of Sergipe state. It's performance was evaluated by periodical inspections and corrosion potential field measurements, and the results were compared with the data gathered from a standard pole made with regular concrete. The half-cell potential measurements showed that concretes made with CPV-ARI RS cement, as well as the mixture containing silica fume, presented the best results, with longer periods necessary to produce electrical change in the specimens or show surface defects in the concrete poles. The lab samples made with CPII-Z 32 cement and cement content of 288 kg/m^3 displayed the worst durability, with some specimens showing fracture after 110 days of aging. Also, the standard pole installed in the corrosion station showed the poorest performance.

Keywords: *Chloride ion, corrosion of steel reinforcement, degradation of concrete, electrochemical impedance spectroscopy, utility poles.*



1 NTRODUÇÃO

1. INTRODUÇÃO

O concreto adquiriu, no decorrer do século XX, a condição de material mais utilizado pela Engenharia mundial, e nos dias de hoje se apresenta aplicado a inúmeras obras civis localizadas em ambientes e situações diversas, de forma que, praticamente, não há lugar onde não exista alguma construção ou estrutura de concreto[1].

O concreto surgiu com o desejo de se criar um material que fosse como uma "pedra artificial", resistente, econômico e durável como as rochas naturais, e que apresentasse como principal vantagem a possibilidade de ser moldado em dimensões e formatos variados. Entretanto, como qualquer outro material existente na face da Terra, o concreto também se degrada sob a ação de agentes agressivos[2].

Imaginava-se, até o início do século passado, que a produção de concretos com altas resistências mecânicas implicava em durabilidade por tempo ilimitado. Com o passar dos tempos, viu-se que esta afirmação estava completamente errônea. Assim, atualmente, se reconhece que a exposição do concreto a ambientes variados faz com que seja necessário um estudo criterioso da durabilidade deste material, levando-se em consideração a agressividade inerente a cada um destes meios[3].

Dentre os ambientes naturais não poluídos, o mais agressivo é a atmosfera marinha. Regiões litorâneas, justamente por sua proximidade com o mar, são locais onde a construção de estruturas de concreto armado deve ser cuidadosamente planejada. Este critério deve-se, principalmente, à presença de sais corrosivos, tanto na água do mar como na atmosfera circundante (maresia). Os mais agressivos destes sais são aqueles à base de cloreto[4].

O concreto, apesar de ser um material que oferece excelente resistência à compressão, a qual pode chegar a valores da ordem de 125 MPa aos 28 dias[5], não é resistente quando solicitado por esforços trativos. Sua resistência à tração dificilmente atinge 10% desta última[3]. A inclusão de barras de aço, ou armaduras, no interior de peças de concreto veio contornar essa limitação. Mas, também, trouxe consigo um inconveniente: as armaduras, como qualquer material metálico, sofrem corrosão. E, no

caso do concreto armado, os danos provenientes de processos corrosivos nos vergalhões são muito mais sérios, pois afetam em muito o desempenho e a durabilidade de estruturas produzidas com concreto[2].

A corrosão da armadura de aço provocada pela presença de íons cloreto é a causa principal de falhas e acidentes em peças estruturais e artefatos pré-moldados de concreto armado situados em regiões litorâneas. Algumas destas estruturas são tão prematuramente deterioradas, a ponto de perderem sua função estrutural em cerca de um décimo do tempo recomendado pelas normas correspondentes[6].

A principal, e também mais fácil, solução para problemas como este reside na elaboração de concretos menos permeáveis, que apresentem boa resistência e, mais importante, melhor durabilidade. A proteção das armaduras, por métodos catódicos ou revestimentos anticorrosivos, também é uma opção válida. Entretanto, em estruturas onde estes cuidados não foram previamente tomados, é necessária a detecção de ocorrência de qualquer atividade corrosiva antes que os efeitos oriundos da mesma possam ser catastróficos[2].

Diversos pesquisadores, em todo o mundo, vêm dedicando seu tempo à implementação de técnicas para detecção e avaliação da corrosão no concreto armado. Estudos bastante importantes têm sido realizados no campo das técnicas elétricas e eletroquímicas. Dentre estas técnicas, uma que vem demonstrando bons resultados é a espectroscopia de impedância eletroquímica[7].

A aplicação desta técnica, infelizmente ainda não consolidada para inspeções de campo, é um dos objetos de estudo desta dissertação. No decorrer deste texto, serão abordadas outras técnicas elétricas/eletroquímicas aplicáveis ao concreto armado, porém, a ênfase será dada à impedância. Ao final, será demonstrado, experimentalmente, que esta técnica é efetivamente útil e precisa na detecção e no monitoramento da corrosão das armaduras metálicas inseridas no concreto.

1.1. CARACTERÍSTICAS DA PESQUISA

Esta dissertação de mestrado foi realizada no Programa Interdisciplinar de Pós-Graduação em Engenharia (PIPE), atualmente denominado Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais e Processos, vinculado ao Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná (UFPR), e graças à parceria com o Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC), tendo como objetivo básico o desenvolvimento do projeto de pesquisa intitulado "Avaliação da degradação, corrosão e sistemas de impermeabilização de estruturas de concreto armado"[8], proposto por este à Empresa Energética de Sergipe S/A (ENERGIPE). O projeto citado faz parte do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor Elétrico Brasileiro, estabelecido pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) em cumprimento à lei nº 9991, de 24/07/2000[9], que dispõe sobre a realização de investimentos em pesquisa e desenvolvimento e em eficiência energética por parte das empresas concessionárias, permissionárias e autorizadas do setor de energia elétrica.

No ano de 2002, o projeto foi estendido por mais um ano, e passou a ser mais abrangente, com o título "Estudo da degradação de materiais utilizados na rede de distribuição de energia instalada na orla de Aracaju"[10]. Nesta segunda etapa do projeto, foram desenvolvidos estudos complementares em relação a estruturas de concreto armado, de forma a ser possível a avaliação dos resultados de campo dos testes implementados na primeira fase.

1.2. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA DE PESQUISA

O projeto de pesquisa que embasou o desenvolvimento deste trabalho de pós-graduação foi realizado com os objetivos principais de se estudar a agressividade ambiental da região litorânea nas redondezas da cidade de Aracaju e de se propor materiais e técnicas de proteção ou aumento da durabilidade de estruturas de concreto armado (principalmente postes e cruzetas) expostas a tal atmosfera[8].

Por meio de visitas técnicas realizadas em diversos locais da região metropolitana de Aracaju, foi possível constatar que a corrosão das armaduras e a degradação do concreto reduzem enormemente o tempo de serviço dos artefatos. Apesar da normalização brasileira exigir uma vida útil mínima de 35 anos, na costa da capital sergipana foram verificados postes com apenas 5 anos de instalação já, praticamente, inutilizáveis[6].

As condições atmosféricas do Estado de Sergipe, caracterizadas pela elevada temperatura média anual, aliadas à salinidade excessiva do ar e à predominância de ventos que sopram do mar, fazem da orla de Aracaju um dos locais mais propícios à degradação e à corrosão de materiais de engenharia, sejam eles cerâmicos, metálicos, poliméricos ou compósitos[10].

Em inspeções feitas nos principais fornecedores de artefatos de concreto da região metropolitana de Aracaju, verificou-se que o uso de materiais de baixa qualidade, a mão-de-obra sem treinamento adequado e a aplicação de métodos de fabricação desatualizados ou inadequados são alguns dos fatores que contribuem para a obtenção de produtos impróprios para instalação em zonas agressivas[11].

A produção de postes e cruzetas sem o uso de critérios que visem à qualidade dos produtos, com desobediência aos requisitos estabelecidos em normas vigentes, ou até mesmo sem seguir o bom-senso, terá, como conseqüência invariável, a instalação de estruturas com pouca durabilidade e pequena vida útil, as quais poderão, inclusive, se tornarem fontes de perigo a transeuntes ou a operários que executam a manutenção de redes de distribuição de energia (RDE's), caso venham a apresentar perda brusca de resistência ou estabilidade mecânica que possa provocar o seu colapso[6].

Especificamente em relação ao concreto utilizado na moldagem de postes e cruzetas, destacam-se o uso, pelos fabricantes, de baixos consumos de cimento e a utilização de cimentos incompatíveis com a agressividade a que os produtos estarão expostos. Ainda, a inobservância aos requisitos de norma relativos à espessura mínima de cobrimento também é outro fator que implica em redução da sua durabilidade[11].

1.3. FORMULAÇÃO DOS ITENS DE PESQUISA

O objetivo deste trabalho foi a determinação da influência do tipo de cimento, do consumo de cimento e de adições, bem como da espessura de cobrimento de concreto, na resistência mecânica e durabilidade de artefatos de concreto armado submetidos a envelhecimento artificial acelerado, em laboratório, por solução de 3,4% de cloreto de sódio (NaCl) e ao envelhecimento natural pela exposição à atmosfera costeira da cidade de Aracaju, no nordeste do Brasil.

Com base neste objetivo e nas explicações descritas no item 1.2, o projeto de pesquisa citado no item 1.1 foi idealizado e desenvolvido conforme segue:

Foram realizados levantamentos em campo a fim de se avaliar a agressividade ambiental de local específico da região costeira de Aracaju, por meio da determinação do teor de cloretos na atmosfera, taxa de sulfatação e teor de partículas sedimentáveis. Dados mensais de temperatura média, umidade relativa, pluviometria e insolação para a região foram obtidos mediante solicitação à Companhia de Processamento de Dados de Sergipe.

Também se realizaram inspeções do processo de fabricação e da qualidade dos artefatos prontos, por meio de visitas técnicas a fábricas situadas na região metropolitana de Aracaju, com o objetivo de se elencar as principais falhas cometidas na produção de postes e cruzetas.

Após a aquisição e caracterização de materiais, originários das regiões de Curitiba e Aracaju, procederam-se aos estudos de dosagem e confecção dos concretos a serem avaliados, com o intuito de se investigar a influência de alguns fatores na resistência e durabilidade dos materiais, tais como:

- **tipo de cimento**: foram utilizados três tipos diferentes de aglomerante, dois deles (CPII-Z 32 e CPV-ARI RS) um pouco incomuns de serem encontrados em Sergipe;
- **consumo de cimento**: para cada tipo de cimento, dois consumos foram utilizados, sendo um deles similar ao adotado pela maioria dos fabricantes

de artefatos;

- **espessura de cobrimento**: corpos-de-prova de quatro espessuras de cobrimento diferentes, destinados a ensaios eletroquímicos, foram moldados para cada combinação de tipo e consumo de cimento; e
- **utilização de adição mineral e aditivo industrializado**: concretos contendo sílica ativa e resina epóxi foram confeccionados e avaliados comparativamente aos demais traços produzidos sem qualquer adição.

Com base nos resultados obtidos nos estudos de dosagem, particularmente em relação ao desempenho mecânico e durabilidade, foram especificados dois traços de concreto, os quais foram utilizados na fabricação de postes e cruzetas destinados a ensaio de elasticidade e ruptura e à instalação, em campo, para acompanhamento periódico ao longo do seu envelhecimento natural.

A descrição do procedimento experimental encontra-se detalhada no Capítulo 3.

1.4. PUBLICAÇÕES RESULTANTES DO ESTUDO

Uma pesquisa ou estudo, por mais interessantes ou inovadoras que sejam suas conclusões, pode ser de pouca valia se os seus resultados não forem divulgados no meio técnico-científico e/ou transferidos ao mercado. O projeto de pesquisa que embasou a elaboração desta dissertação gerou diversos relatórios técnicos e trabalhos publicados, conforme relação a seguir:

1.4.1. Artigos em congressos nacionais e internacionais

- GARCIA, C. M.; JOUKOSKI, A.; PORTELLA, K. F.; BARON, O.; NOGUEIRA, J. R. G.; AZEVEDO, V. A. L. Corrosão de concreto armado utilizando a técnica de espectroscopia de impedância eletroquímica. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE ELETROQUÍMICA E ELETROANALÍTICA, 12., 2001, Gramado. **Anais...** Porto Alegre, UFRGS, 2001, p. 153-155. 1 CD-ROM.[12]

- JOUKOSKI, A.; PORTELLA, K. F.; GARCIA, C. M.; SALES, A.; CANTÃO, M. P.; BARON, O.; AZEVEDO, V. A. L. Desempenho elétrico de concreto armado com cimento Portland composto com pozolana, CPII-Z 32, em função do envelhecimento por íons cloreto. Parte I, Estudo da corrosão da armadura. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 43., 2001, Foz do Iguaçu. **Apresentação dos trabalhos...** São Paulo, IBRACON, 2001, p. III-020. 1 CD-ROM.[6]

- JOUKOSKI, A.; PORTELLA, K. F.; GARCIA, C. M.; SALES, A.; PAULA, J. F. Estudo do processo de fabricação de postes de concreto armado destinados a redes de distribuição elétrica: principais falhas, suas conseqüências e correções. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 44., 2002, Belo Horizonte. **Apresentação dos trabalhos...** São Paulo, IBRACON, 2002, p. II-010. 1 CD-ROM.[11]

- PORTELLA, K. F.; JOUKOSKI, A.; GARCIA, C. M.; BARON, O.; PAULA, J. F. Corrosion of concrete reinforcement: influence of cement type and cement content. In: INTERNATION CORROSION CONGRESS, 15., 2002, Granada (SPA). **Proceedings...** ICC, 2002, v. 5, n. A, # 462.[13]

- JOUKOSKI, A.; PORTELLA, K. F.; GARCIA, C. M.; SALES, A.; BARON, O.; PAULA, J. F. Study of the influence of cement type, cement content and concrete cover thickness on the resistance and durability of concretes subjected to chloride ion aging. In: ACI INTERNATIONAL CONFERENCE, 5., 2002, Cancún (MEX). **Innovations in design with emphasis on seismic, wind, and environmental loading; quality control and innovations in material/hot-weather concreting**. Farmington Hills, ACI International, 2002, v. SP-209, p. 279-296.[14]

1.4.2. Artigos em periódicos

- JOUKOSKI, A.; PORTELLA, K. F.; BARON, O.; GARCIA, C. M.; VERGÉS, G. R.; SALES, A.; PAULA, J. F. The influence of cement type and admixture on life span of reinforced concrete utility poles subjected to the high salinity environment of Northeastern Brazil, studied by corrosion potential testing. **Cerâmica**. *Trabalho completo submetido (2003)*.[15]

1.4.3. Monografia de especialização

- JOUKOSKI, A. **Aplicação da técnica de espectroscopia de impedância eletroquímica para detecção e monitoramento da corrosão em armaduras metálicas inseridas em concreto**. Curitiba, 2001. Monografia (Especialização) - Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.[2]

1.4.4. Relatórios técnicos e documentos de divulgação restrita

- PORTELLA, K. F.; GARCIA, C. M.; CANTÃO, M. P.; SALES, A.; RIBEIRO, C.; JOUKOSKI, A.; CARON, L. E.; STEFFEN, R. D.; BARON, O.; PAULA, J. F. **Avaliação da degradação, corrosão e sistemas de impermeabilização de**

estruturas de concreto armado - Relatório final de projeto. Curitiba, LACTEC, 2001. Relatório AMAT 1815/2001[8]

- GARCIA, C. M.; PORTELLA, K. F.; VERGÉS, G. R.; FREIRE, K. R. R.; JOUKOSKI, A.; BARON, O.; MOTTA, H. N.; PAULA, J. F. **Estudo da degradação de materiais utilizados na rede de distribuição de energia instalada na orla de Aracaju. Relatório final.** Curitiba, LACTEC, 2003. Relatório AMAT 4082/2003.[10]
- PORTELLA, K. F.; JOUKOSKI, A. **Questionário para cadastro geral de fornecedores**. Curitiba, LACTEC, 2000. Documento AMAT.[16]

1.5. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Para atender aos objetivos propostos, este trabalho foi estruturado em cinco capítulos, sendo esta Introdução o primeiro deles.

O segundo capítulo contém a revisão da literatura, com algumas explanações sobre o concreto e sua durabilidade. Também são abordados aspectos sobre a corrosão da armadura inserida no concreto, bem como as técnicas elétricas e eletroquímicas disponíveis para a detecção e o monitoramento desse fenômeno. Uma revisão mais aprofundada é feita em relação às técnicas de potencial de corrosão e espectroscopia de impedância eletroquímica, as quais foram empregadas neste trabalho.

No terceiro capítulo, é descrita a metodologia experimental empregada para caracterização e avaliação da qualidade dos insumos utilizados na dosagem dos concretos, bem como do desempenho das misturas confeccionadas. Também, constam neste capítulo as informações acerca da fabricação e instalação de postes, produzidos com concretos estudados em laboratório, em estação de corrosão implantada no litoral do Estado de Sergipe.

O quarto capítulo inicia-se com a apresentação dos resultados da caracterização físico-química dos materiais empregados na fabricação dos concretos. A avaliação da resistência mecânica, propriedades físicas e desempenho eletroquímico dos concretos confeccionados em laboratório também é abordada. Posteriormente, apresentam-se as informações mais importantes coletadas em visitas técnicas realizadas a fabricantes de artefatos da região metropolitana de Aracaju. Ao final do

capítulo, são realizados comentários sobre o desempenho dos artefatos submetidos a envelhecimento natural no litoral sergipano.

No quinto e último capítulo, são apresentadas as conclusões do trabalho e comentários adicionais sobre os resultados. Também, são sugeridas idéias para continuidade dos estudos.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2. REVISÃO DA LITERATURA

Nesta revisão são abordados alguns aspectos teóricos a respeito do concreto de cimento Portland e sua durabilidade. A corrosão da armadura de aço e algumas técnicas para sua detecção e monitoramento também são discutidas.

2.1. O CIMENTO PORTLAND

A composição típica de um cimento Portland é dada pela mistura de óxidos de cálcio, silício, alumínio e ferro, bem como outros constituintes em menor proporção (expressos como: MgO, Na_2O, K_2O, SO_3, Mn_2O_3, TiO_2, etc.). A variação da composição básica destes óxidos e a forma de preparação do concreto (processo de cura, tipos e dimensões dos agregados, uso de adições minerais, etc.) são o que torna a estrutura mais ou menos resistente a determinados meios e esforços[3].

Os compostos mais importantes do cimento Portland são citados na Tabela 1[3]. A coluna referente à abreviação indica a nomenclatura pela qual os compostos são usualmente denominados pelos engenheiros e pesquisadores. C é entendido como óxido de cálcio, S como sílica, A como alumina e F como óxido de ferro[1].

TABELA 1 - COMPOSTOS PRINCIPAIS DO CIMENTO PORTLAND

FASE	FÓRMULA	ABREVIAÇÃO
Silicato tricálcico	$3CaO.SiO_2$	C_3S
Silicato dicálcico	$2CaO.SiO_2$	C_2S
Aluminato tricálcico	$3CaO.Al_2O_3$	C_3A
Ferro-aluminato tetracálcico	$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$	C_4AF

- Silicato tricálcico (C_3S): também conhecido como alita, é o componente principal do cimento, presente normalmente em teores acima de 50%. É responsável pelo desenvolvimento da resistência do material nas primeiras idades, e tem grande contribuição na resistência final. Confere ao cimento certa resistência a ataque por sulfatos, e desenvolve moderado

calor de hidratação (da ordem de 500 J/g). A hidratação do C_3S é dependente da presença de C_3A e do gesso[17].

- Silicato dicálcico (C_2S): em relação à composição percentual, é o segundo componente do cimento, com teores que podem variar de 10% a 60%, dependendo do tipo do aglomerante. Por reagir mais lentamente que o C_3S, é responsável pelo contínuo ganho de resistência nas idades avançadas, além de contribuir, consideravelmente, na resistência final do material. Também confere resistência aos sulfatos, e apresenta baixo desprendimento de calor durante a hidratação (aproximadamente 250 J/g)[17]. Também é conhecido como belita.
- Aluminato tricálcico (C_3A): presente no cimento em teores na faixa de 3% a 10%, contribui para o ganho de resistência nas idades iniciais. Por outro lado, pouco influi na resistência final do cimento. Não é resistente ao ataque por sulfatos, o que propicia a formação de produtos expansivos, como a etringita por exemplo. Como reage muito rapidamente quando em contato com a água, o C_3A desenvolve bastante calor de hidratação (900 J/g). Por isso, para estender-se o tempo de pega do aglomerante, faz-se necessária a adição de gesso, ainda no processo de fabricação do cimento[17].
- Ferro-aluminato tetracálcico (C_4AF): este componente apresenta-se no cimento Portland em concentrações na faixa de 5% a 10%. Reage lentamente com a água e, por isso, possui pequena contribuição no desenvolvimento da resistência mecânica dos materiais cimentícios. Apresenta baixa liberação de calor durante a cura (em torno de 300 J/g), além de boa resistência química frente aos sulfatos[17]. É também conhecido como ferrita.

Os teores relativos de cada componente podem ser determinados pela

utilização das equações de Bogue, as quais são citadas em diversos trabalhos[1, 3].

A hidratação do cimento Portland forma produtos menos solúveis em água do que no cimento originalmente seco, com liberação de energia e aumento na resistência mecânica final[18]. O diagrama da Figura 1 ilustra, esquematicamente, o aumento da resistência com a hidratação das principais fases constituintes do cimento[3].

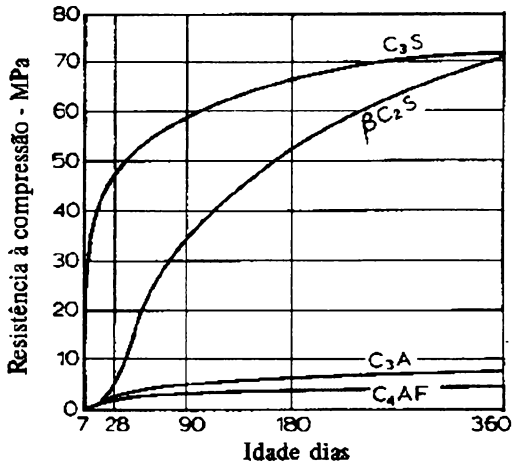


FIGURA 1 - EVOLUÇÃO DA RESISTÊNCIA DOS COMPOSTOS DE CIMENTO PORTLAND

As normas brasileiras vigentes prevêem a existência de vários tipos de cimento Portland, cada um de uso recomendado para situações específicas:

- Cimento Portland comum (CPI): é um tipo de cimento Portland sem quaisquer adições além do gesso, o qual é utilizado como retardador de pega. É adequado para uso em construções de concreto em geral, onde não se requer propriedades especiais do material, e quando não há exposição a agentes agressivos (sulfatos, cloretos, etc.)[19]. Também, é oferecido ao mercado o cimento Portland comum com adições (CPI-S), com 5% de material pozolânico. É regulamentado pela NBR 5732/91[20].
- Cimento Portland composto (CPII): possui adição, em teores especificados pela NBR 11578/91[21], de escória granulada de alto-forno (CPII-E), pozolana (CPII-Z) ou fíler carbonático (CPII-F). Em geral, é indicado em estruturas com grande volume de concretagem, onde seja

necessário um desprendimento de calor moderadamente lento, ou onde possam ocorrer ataques por sulfatos. O cimento CPII-E combina, com bons resultados, um baixo calor de hidratação com o aumento de resistência do cimento Portland comum. O fíler no cimento CPII-F tem mais função de enchimento, porém promove melhoria das propriedades do aglomerante, tornando-o recomendado para aplicações gerais. A adição de pozolana ao cimento CPII-Z promove a obtenção de concretos com menor permeabilidade[22].

- Cimento Portland de alto-forno (CPIII): contém adição de escória em teores acima dos utilizados no cimento CPII-E. Os concretos produzidos com esse cimento apresentam baixa permeabilidade e baixo calor de hidratação, além de serem indicados para situações onde os agregados apresentam-se potencialmente reativos[22]. A norma brasileira correspondente a este cimento é a NBR 5735/91[23].
- Cimento Portland pozolânico (CPIV): regulamentado pela NBR 5736/91[24], este cimento possui adição de materiais pozolânicos em teores acima dos utilizados no cimento CPII-Z. É especialmente indicado para obras expostas à ação de água corrente e ambientes agressivos, bem como obras que envolvam grandes volumes de concreto, em razão do baixo calor de hidratação. Promove ao concreto uma menor permeabilidade e resistência mecânica superior à dos materiais produzidos com cimento Portland comum, nas idades avançadas[22].
- Cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI): este cimento apresenta um ganho de resistência maior nas primeiras idades, em razão de sua hidratação mais rápida. É recomendado para produção de artefatos pré-moldados e estruturas pré-fabricadas de concreto, possibilitando uma desforma mais rápida. O desenvolvimento dessa propriedade é conseguido pela utilização de uma dosagem diferente de calcário e argila,

na produção do clínquer, e pela moagem do cimento até uma finura maior[22]. No entanto, como alta resistência inicial significa grande desprendimento de calor de hidratação, o cimento CPV-ARI não deve ser usado em concreto massa ou em peças estruturais com grandes dimensões[3]. A norma NBR 5733/91[25] estipula as propriedades requeridas para este tipo de cimento.

Os cinco tipos de cimento descritos acima são os principais e mais utilizados na construção civil brasileira. Na Tabela 2 são informados os teores de clínquer e de adição para cada tipo[26].

TABELA 2 - TEORES DE CLÍNQUER E DE ADIÇÃO DOS CIMENTOS PORTLAND

TIPO DE CIMENTO	CLÍNQUER + GESSO (%)	ESCÓRIA (%)	POZOLANA (%)	FÍLER (%)
CPI	100	0	0	0
CPI-S	95 a 99	1 a 5	1 a 5	1 a 5
CPII-E	56 a 94	6 a 34	0	0 a 10
CPII-Z	76 a 94	0	6 a 14	0 a 10
CPII-F	90 a 94	0	0	6 a 10
CPIII	25 a 65	35 a 70	0	0 a 5
CPIV	45 a 85	0	15 a 50	0 a 5
CPV-ARI	95 a 100	0	0	0 a 5

Existem ainda outros tipos, como o cimento Portland branco (que pode ser estrutural ou não-estrutural)[27] e o cimento Portland destinado à cimentação de poços petrolíferos[28].

Alguns dos tipos de cimento citados podem oferecer propriedades adicionais, como uma maior resistência aos meios agressivos sulfatados (redes de esgoto, água do mar, solos sulfatados), ou taxas lentas de evolução de calor durante a cura[29].

De acordo com a NBR 5737/92[30], qualquer um dos cinco tipos básicos de cimento pode ser considerado resistente aos sulfatos (identificados pela sigla RS), desde que obedeçam a pelo menos uma das seguintes condições[29, 30]:

- teor de C_3A do clínquer e teor de adições carbonáticas de, no máximo, 8% e 5% em massa, respectivamente;
- cimentos do tipo alto-forno que contiverem entre 60% e 70% de escória granulada de alto-forno, em massa;
- cimentos do tipo pozolânico que contiverem entre 25% e 40% de material pozolânico, em massa;
- cimentos que tiverem antecedentes de resultados de ensaios de longa duração ou de obras que comprovem resistência aos sulfatos.

Os cimentos Portland de baixo calor de hidratação (identificados pela sigla BC), de acordo com a NBR 13116/94[31], geram até 260 J/g e 300 J/g aos 3 e 7 dias de hidratação, respectivamente, e podem ser qualquer um dos tipos básicos[29, 31].

Para efeito de verificação de conformidade, os cimentos Portland também são identificados quanto à sua classe de resistência, a qual se refere à resistência característica à compressão aos 28 dias, expressa em MPa. Com exceção dos tipos CPIV e CPV-ARI, o qual não entra nesta classificação, os cimentos podem ser das classes 25, 32 ou 40. O tipo CPIV só admite classes 25 e 32[26].

Segundo TAYLOR (1990)[32], a *American Society for Testing and Materials* (*ASTM*) relaciona os tipos de cimento de acordo com a utilização sendo, basicamente: tipo I – usado normalmente em construções onde não se requer propriedades especiais do concreto; tipos II e V – usados em condições especiais, como por exemplo, em meio agressivo contendo sulfato; tipo III – condições em que seja necessária resistência antecipada; e tipo IV – exigência de baixo calor de hidratação.

As composições percentuais médias para os cimentos regulamentados pela *ASTM* são indicadas na Tabela 3[33].

TABELA 3 - COMPOSIÇÃO MÉDIA DOS CIMENTOS PORTLAND SEGUNDO A *ASTM*

TIPO DE CIMENTO	C_3S (%)	C_2S (%)	C_3A (%)	C_4AF (%)
I	50	24	11	8
II	42	33	5	13
III	60	13	9	8
IV	26	50	5	12
V	40	40	4	9

2.2. O CONCRETO

O concreto é um dos materiais compostos mais antigos que se conhece. Apesar do cimento Portland ter sido patenteado em 1824, na Antigüidade já se utilizavam materiais constituídos de pedaços de rochas e solos moídos, e que endureciam sob a ação da água, na construção de templos e monumentos[29, 34]. Pode ser definido como uma mistura, em proporções adequadas, de aglomerante hidráulico (cimento), agregado graúdo (pedra brita), agregado miúdo (areia), água e, em muitos casos, aditivos ou adições minerais, de tal forma a se produzir uma massa compacta, consistente, plástica e que endurece em função do tempo[32, 35].

O concreto é um material intrinsecamente poroso, face à impossibilidade de preenchimento total dos vazios entre os agregados e a pasta de cimento. Os vazios são decorrentes do uso de água na massa em quantidade superior à necessária para a hidratação do aglomerante hidráulico, e cujo excesso ao evaporar, deixa cavidades, em virtude da diminuição dos volumes absolutos de cimento e água que intervêm nas reações químicas após a hidratação do cimento e também da inevitável incorporação de ar à massa de concreto[36]. Dentre outros fatores, a utilização de certos tipos de aditivos também pode gerar uma quantidade maior de vazios.

2.2.1. O concreto armado

O termo concreto armado refere-se, invariavelmente, a um material composto de duas fases principais: o concreto propriamente dito e a armadura.

A armadura metálica é constituída de barras de aço (vergalhões), com dimensões e bitolas variadas, criteriosamente, dispostas no interior do concreto. Após o endurecimento (cura) do concreto, o que se obtém é um material de excelente resistência mecânica, tanto à compressão quanto à tração, e de boa durabilidade, salvo se não forem tomados cuidados especiais durante a sua fabricação ou se inexistir manutenção periódica do mesmo[2].

2.3. DURABILIDADE DO CONCRETO

O concreto é hoje um dos materiais mais largamente utilizados em todo o mundo, em razão das inúmeras vantagens propiciadas pelo seu uso. Devido à sua capacidade de resistência mecânica, foi idealizado e admitido como dotado de durabilidade por período de tempo ilimitado. Durante décadas, este enfoque direcionou e concentrou o seu desenvolvimento tecnológico para a obtenção de resistências à compressão cada vez maiores, alimentado pelo paradigma de que concreto resistente é concreto durável[3].

Contudo, ao contrário do que a grande maioria das pessoas possa pensar, nem todas as propriedades da chamada "pedra artificial" permanecem inalteradas com o passar do tempo. O concreto, como qualquer outro material, sofre também degradação devido à ação de agentes agressivos, podendo inclusive perder todas as propriedades de resistência e durabilidade que contribuíram para torná-lo entre os leigos, por muito tempo, um material aparentemente indestrutível[2].

A durabilidade do concreto é definida, de acordo com o Comitê 201 do *American Concrete Institute* (*ACI*), como a sua capacidade de resistir à ação das intempéries, ataques químicos, abrasão ou qualquer outro processo de deterioração. Já COLLEPARDI, citado por CUNHA, TINOCO & CARASEK (2003)[37], a define como sendo a capacidade que a estrutura possui de manter suas características estruturais e funcionais originais, pelo tempo de vida útil esperado, nas condições de exposição para as quais foi projetada.

Apesar de certos problemas das obras de concreto serem tão antigos quanto o próprio material, o interesse pelo estudo e por um conhecimento mais profundo dos mecanismos que levam à sua deterioração vem crescendo, gradativamente, ao longo das últimas décadas[2, 3]. Estes estudos buscam, cada vez mais, alcançar um nível de qualidade tal que permita que sejam projetadas estruturas mais duradouras[37].

O tipo de cimento, os critérios de fabricação e a composição básica do concreto são apenas alguns dos fatores que contribuem para que sejam produzidas estruturas mais ou menos resistentes a degradação química, corrosão e esforços mecânicos[32, 35].

Sob aspectos de durabilidade da estrutura, a porosidade aberta e a distribuição dimensional dos poros são os parâmetros mais importantes relacionados ao transporte de líquidos e gases e troca de substâncias dissolvidas no material, enquanto que a distribuição geométrica dos poros influi, particularmente, sobre o tipo e a velocidade dos mecanismos de transporte e sobre os mecanismos de fixação em relação à água[38].

2.3.1. O uso de adições e aditivos no concreto

O emprego de adições minerais e aditivos industrializados confere melhorias significativas nas propriedades do concreto, tanto nas reações ocorridas em seu estado fresco, quanto em seu comportamento mecânico e de durabilidade depois de endurecido.

2.3.1.1. Adições minerais

A utilização de adições minerais no concreto tem proporcionado melhorias. Segundo ALMEIDA, citado por CUNHA, TINOCO & CARASEK (2003)[37], algumas destas adições já eram conhecidas desde antes de Cristo e, com elas, os gregos e romanos construíram obras que perduram até os nossos dias. Porém, a escassez de

produtos naturais que possuíssem propriedades pozolânicas fez com que, ao longo do tempo, seu emprego caísse em desuso na maior parte do mundo, durante um certo período. Só vários anos mais tarde foram descobertas propriedades pozolânicas em produtos obtidos artificialmente.

Pozolanas são materiais naturais ou artificiais na forma de pó que, por si só têm pouco ou nenhum valor cimentício, mas quando finamente divididas e na presença de água, reagem com os componentes do cimento, formando compostos com propriedades aglomerantes. Quando puros, estes materiais permanecem inertes[33]. As pozolanas naturais são originárias de terras diatomáceas, tufos de cinzas vulcânicas ou de outros materiais semelhantes. Já as artificiais podem ser obtidas pela precipitação mecânica ou eletrostática dos gases de exaustão de usinas termelétricas alimentadas por carvão mineral, resultando nas chamadas cinzas volantes (*fly-ashes*); por meio de resíduos da produção de ligas metálicas ou, ainda; por queima controlada de minerais argilosos. Sílica ativa, cinza volante, argila calcinada, cinza de casca de arroz e os finos de britagem ou "pó de pedra" são exemplos de pozolanas artificiais que apresentam excelentes propriedades cimentantes[37].

As partículas de cinza volante são esféricas, o que é uma vantagem do ponto de vista de demanda de água. Este tipo de adição contém grande quantidade de partículas menores do que 1 μm[8].

Conforme demonstrado por FREIRE (1981)[39], a adição de cinza de casca de arroz, tratada a uma temperatura entre 550°C e 1100°C e com alto teor de sílica, vem promovendo resultados interessantes em termos de durabilidade de concretos.

Outra importante adição mineral é a escória de alto-forno. Este material consiste em um subproduto da fusão de minério de ferro que forma-se a partir de suas impurezas, dos fundentes adicionados e das cinzas dos combustíveis[37]. Descoberta no século passado, a escória de alto-forno necessita apenas de uma pequena ativação alcalina para garantir sua propriedade hidráulica, a qual é conseguida por resfriamento rápido do produto até se obter um material vítreo, não cristalizado. A escória é

constituída, basicamente, por cal, alumina e sílica, todos constituintes do cimento Portland[8].

Com a utilização de adições minerais, é possível alterar algumas características dos concretos, melhorando o seu desempenho em situações onde apenas o uso dos cimentos disponíveis não garante resistência ou durabilidade adequadas[3, 33].

As adições minerais, consideradas essenciais na obtenção de concretos com maiores resistências, também comprovam sua eficiência em relação a uma maior expectativa de vida útil das estruturas. Experiências desenvolvidas em laboratório, assim como algumas experiências práticas, comprovaram os benefícios causados pela utilização destas adições nas diversas propriedades do concreto. Por se tratarem de materiais extremamente finos, as adições proporcionam uma diminuição do volume de vazios, contribuindo assim para uma menor porosidade, menor permeabilidade e, conseqüentemente, maiores resistências mecânicas. Essa característica impermeabilizante dificulta a penetração de agentes deletérios oriundos de águas e solos, como é o caso dos íons cloreto e sulfato. Como são utilizados, muitas vezes, em substituição ao cimento Portland (até 70% do consumo), estes materiais podem proporcionar ganhos econômicos significativos. E como a hidratação do cimento provoca reações exotérmicas, as adições geram uma redução do calor de hidratação, que é um dos principais responsáveis pelo surgimento de fissuras no concreto e muito importante em se tratando de estruturas de grandes volumes[37].

No estado fresco, estes produtos conferem ao concreto uma maior trabalhabilidade bem como uma diminuição da segregação. Para se alcançar altas resistências, os concretos com adições minerais precisam manter uma baixa relação água/aglomerante e, para isso, deverão ser empregados aditivos plastificantes. Outras vantagens podem ser consideradas quanto ao uso de adições minerais com vistas à durabilidade, como por exemplo, inibição da reação álcali-agregado, minimizando as expansões deletérias provocadas por este fenômeno; melhoria das características da zona de transição pasta-agregado; redução do fenômeno de exsudação, propiciando

concretagens mais seguras e minimizando a ocorrência de nichos ou "brocas". Algumas adições impedem que o agregado graúdo se solte quando a superfície do concreto estiver sendo submetida à abrasão e erosão, o que favorece sua utilização em pisos industriais, pavimentos e estruturas hidráulicas[37].

2.3.1.2. Aditivos para concreto[40, 41]

Os aditivos são produtos químicos adicionados ao concreto com o objetivo de se alterar as propriedades, seja da mistura fresca ou do material endurecido. Os principais aditivos utilizados no Brasil são os aceleradores, retardadores, incorporadores de ar, plastificantes e superplastificantes (e seus derivados, como plastificantes aceleradores e superplastificantes retardadores).

Como o próprio nome já diz, os aditivos aceleradores têm como principal objetivo acelerar o processo de endurecimento do concreto, enquanto os retardadores adiam essa reação.

Os aditivos plastificantes são muito utilizados no Brasil. Reduzem a quantidade necessária de água e melhoram a trabalhabilidade da mistura fresca, facilitando o seu acabamento e adensamento. Além disso, melhoram as condições de transporte até a obra pois reduzem a perda de consistência ao longo do tempo.

Já os aditivos superplastificantes são relativamente novos, pois surgiram a partir da década de 70. Com eles, foi possível avançar na tecnologia do material e dosar concretos de alta resistência (CAR) e concretos de alto desempenho (CAD). Esses aditivos permitem elaborar concretos com baixíssimo teor de água – pode-se reduzir em até 30% a quantidade de água no concreto – com o conseqüente aumento de sua resistência.

Os aditivos incorporadores de ar, por sua vez, promovem a introdução de microbolhas de ar na mistura fresca, com o objetivo de melhorar a trabalhabilidade do concreto, aumentar a durabilidade, diminuir a permeabilidade e a segregação, deixando o concreto mais coeso e homogêneo. Os incorporadores de ar reduzem ainda

a exsudação.

2.3.2. Macro e microestrutura do concreto

Em qualquer concreto, os parâmetros que determinam a maioria dos processos químicos e físicos com respeito à durabilidade são a estrutura dos poros e o teor de água[33].

2.3.2.1. Poros[33]

Dependendo do fator água/cimento (a/c) da pasta, diferentes porcentagens em volume de poros são obtidas, conforme descrito na Tabela 4[33].

TABELA 4 - VOLUME DE POROS EM PASTAS DE CIMENTO COM DIFERENTES FATORES A/C

A/C	VOLUME DE POROS (%)
0,4	23,3
0,5	34,5
0,6	42,1
0,8	53,4

A determinação do teor, em volume de poros, é feita forçando-se a penetração de algum fluido (hélio, nitrogênio, etc.) à pasta de cimento[8].

Os poros influenciam na entrada e transporte de substâncias químicas no interior do concreto. Neste caso, dois parâmetros são considerados importantes: os poros comunicantes, os quais têm possibilidade de transportar líquidos e substâncias nocivas (porosidade relevante) e a distribuição do tamanho dos mesmos, cuja influência diz respeito ao tipo e à taxa dos mecanismos de transporte e de ligação, em relação à água.

De acordo com a origem e característica, os poros são descritos como:

- poros de compactação;
- poros devidos ao ar incorporado;

- poros capilares; e
- poros de gel.

O tamanho dos poros dentro da pasta de cimento cobre uma faixa de diversas ordens de grandeza. Expressos em termos de suas dimensões, os poros podem ser classificados conforme esquema da Figura 2[10].

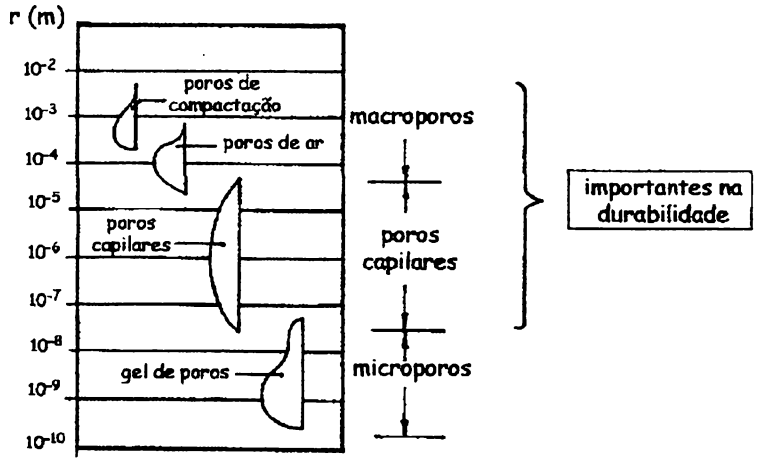


FIGURA 2 - DISTRIBUIÇÃO DO TAMANHO DE POROS NO CONCRETO

Em geral, a resistência do concreto às influências químicas e físicas ambientais é, consideravelmente, reduzida com o aumento da quantidade de poros capilares.

A permeabilidade está determinada pela estrutura de poros, pressões hidráulicas e pelo teor de água no interior dos mesmos. Por sua vez, a permeabilidade controla a penetração das substâncias gasosas e dissolvidas. A velocidade de transporte depende do mecanismo envolvido. As ligações químicas neste processo dependem da composição química dos cimentos e das características dos agregados. Além do a/c, a porosidade do meio depende da qualidade do concreto, tipo e tempo de cura, incorporação de ar e outros fatores.

Com relação à pressão hidráulica, a permeabilidade será mais acentuada quanto maior o diâmetro dos poros capilares e sua interconectividade. Esta relação

pode ser dependente do a/c.

Em levantamentos realizados no LACTEC por PORTELLA et al. (2001)[8], detectou-se que cerca de 15% das amostras de postes e cruzetas (de fabricantes do Estado do Paraná) analisadas apresentavam teores de absorção de água superiores ao recomendado na norma NBR 8451/98[42], utilizando-se as metodologias da NBR 6124/80[43] e da NBR 9778/87[44], ou seja, os valores médios de absorção de água das amostras ficaram acima de 6% ou um dos corpos-de-prova (cp's) analisados apresentou valor de absorção superior a 7,5%. Os resultados também demonstraram que a metodologia da NBR 9778/87[44] é mais efetiva, devido ao processo de fervura dos cp's. O valor obtido pela metodologia desta norma é cerca de 1,33 vezes o valor resultante obtido pela NBR 6124/80[43]. Assim, se uma amostra apresenta, pelo método desta última, teor de absorção de água de 5%, pela NBR 9778/87[44] este valor resulta próximo de 6,65%.

Poros comunicantes podem ser observados por técnicas analíticas diferentes: adsorção/dessorção de um gás pelo interior do concreto; porosimetria de mercúrio; microscopia eletrônica de varredura; e, dependendo do tamanho do vazio resultante, por tomografia computadorizada de raios X ou radiografia industrial[8].

2.3.2.1.1. As "peles" do concreto[33]

Analisando-se, detalhadamente, uma estrutura de concreto descobre-se que esta não é homogênea. A partir da interface ar|concreto ou molde|concreto encontra-se uma estrutura típica denominada "pele do concreto", com espessura entre 0,1 e 0,3 mm. Ao longo desta interface pode haver variação nas relações cimento/agregados e água/cimento, promovendo a formação de gradientes microestruturais na porosidade da mesma. A espessura da "pele" está determinada pela disponibilidade de água durante o processo de hidratação ou cura. Se a umidade relativa do concreto cai a valores da ordem de 80%, obtém-se uma estrutura de poros com diâmetros maiores do que aqueles obtidos a 100% de umidade relativa. Isto indica que também haverá

gradientes de porosidades ao longo da espessura da "pele".

Ao redor da armadura e dos agregados é formada uma película dupla de transição, com espessura da ordem de 1 μm. Diretamente sobre essas superfícies forma-se uma película delgada de $Ca(OH)_2$ e dentro desta, os cristais de silicato de cálcio hidratado (fórmula aproximada: $3CaO.2SiO_2.3H_2O$), também denominado abreviadamente de CSH. Na película adjacente à película de CSH crescem grandes cristais hexagonais de $Ca(OH)_2$, abreviado como CH.

Outras interfaces químicas podem ser geradas no interior da estrutura de concreto; assim por exemplo, na superfície das barras da armadura, óxido de ferro reage com o hidróxido de cálcio para formar ferrito de cálcio, o qual forma parte da camada passivante (que protege o aço contra a corrosão posterior), segundo a reação dada pela Equação 1:

$$2Fe(OH)_3 + Ca(OH)_2 \rightarrow CaO.Fe_2O_3 + 4H_2O \qquad \text{EQUAÇÃO 1}$$

Interfaces normalmente prejudiciais ao meio podem ser geradas a partir do processo de fabricação do concreto, independentemente do tipo e consumo de cimento, tais como a segregação e a sedimentação. Estas interfaces são normalmente decorrentes do teor de água da dosagem, do processo de vibração e da cura do concreto.

2.3.2.1.2. Água contida nos poros[33]

As moléculas de vapor de água, presentes na estrutura dos poros, são adsorvidas nas paredes dos mesmos. A espessura do filme de água resultante depende do grau de umidade dentro do poro.

O concreto apresenta, em geral, maior teor de água do que o ar que o rodeia. Isto se deve ao pequeno raio dos microporos. O processo de adsorção no interior dos microporos leva ao seu preenchimento, por condensação capilar. Se a umidade aumenta, os poros maiores são preenchidos com água, reduzindo-se, assim, o espaço

disponível para a difusão e permeabilidade dos gases pelo interior dos mesmos.

A permeabilidade da estrutura de concreto pode favorecer a percolação de água e, conseqüentemente, o arraste de materiais constituintes do concreto, seja por dissolução dos sais, seja por lixiviação.

2.3.3. Integridade da superfície externa

Para que o concreto armado mantenha suas excelentes propriedades é necessário que a sua superfície externa esteja íntegra. Algumas das principais causas de deterioração estão descritas na seqüência, sendo basicamente: fissuras e fenômenos associados à formação de gelo e degelo, além de outros ataques físicos, químicos e biológicos[8].

2.3.3.1. Fissuras

As fissuras são produzidas quando as tensões de tração aplicadas ultrapassam a capacidade de carga do concreto. Esta capacidade varia com a idade e com a velocidade de aplicação da tensão. As principais patologias para a geração das fissuras e o tempo de aparecimento das mesmas estão demonstrados, esquematicamente, na Tabela 5[33].

Na prática, é impossível conseguir que uma estrutura de concreto armado esteja livre de fissuras. Além disso, é aceito que alguns tipos de fissuras induzidas pelas cargas ou deformações impostas durante as condições normais de uso podem não ter conseqüências perigosas. Os parâmetros mais importantes para determinar se uma fissura é ou não nociva, são: o projeto da estrutura, a seleção da composição do concreto e a qualidade da cura[33].

TABELA 5 - PRINCIPAIS PATOLOGIAS E TEMPO DE APARECIMENTO DAS FISSURAS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO

CAUSAS PRINCIPAIS	TEMPO DE APARECIMENTO DAS FISSURAS
Cargas em condições de serviço	
Reação álcali-agregado	
Corrosão	
Retração de secagem	
Retração por aquecimento prematuro	
Contração plástica	
Acomodação plástica	
	HORA | DIA | SEMANA | MÊS | ANO | 50 ANOS

A norma brasileira NBR 8451/98[42], no item 5.2.3, recomenda que os postes submetidos a uma tração igual à resistência nominal não devem apresentar trincas ou fissuras, exceto as "capilares". Trincas também são verificadas como conseqüência da corrosão da armadura, mas, normalmente, apresentam cor de ferrugem e se encontram mais abertas.

O congelamento da água no interior dos poros da estrutura de concreto ocasiona um aumento de até 9%, em volume. Se os poros estiverem completamente preenchidos com água, tal fenômeno poderá ocasionar rachaduras da estrutura. Fenômeno similar poderá ser observado caso o agregado não seja resistente ao congelamento[33].

Ar incorporado à estrutura poderá minimizar as conseqüências do congelamento, por aumentar os espaços para a expansão. O uso de sais de degelo tem efeitos nocivos, sendo que o choque térmico ocasionado durante a fusão do gelo provoca tensões internas suficientes para fissurar a camada superficial do concreto[8].

A durabilidade depende da agressividade química ou física ambiental, da permeabilidade e da quantidade de defeitos existentes[45]. Uma estrutura de concreto apropriadamente projetada é bastante durável, com vida média prevista entre 50 e 100 anos e com necessidade de pouco serviço de manutenção[32, 35, 45]. A NBR 8451/98[42]

recomenda um tempo mínimo de vida útil de postes de concreto armado de 35 anos.

2.3.3.2. Reação álcali-agregado (RAA)

São reações possíveis de ocorrerem entre os íons hidroxila contidos no interior dos poros e certos tipos de sílica dos agregados, resultando em tensões internas que podem causar expansões e fissuras. TAYLOR (1990)[32] descreve como condições necessárias para ocorrer RAA, em concreto feito com cimento Portland, uma quantidade excessiva de óxidos alcalinos no cimento, um constituinte reativo no agregado (quartzo se suficientemente tracionado ou microcristalino, tridimita, cristobalita e vidros, entre outras formas amorfas) e suprimento de água. Se o teor de equivalente alcalino (Na_2O eq = Na_2O + 0,66 K_2O) no concreto é inferior a 4 kg/m^3 é incomum ocorrer RAA.

Fissuras ocasionadas por reações expansivas e do tipo RAA podem ser verificadas por microscopia eletrônica de varredura[8]. Uma particularidade destas últimas é que, macroscopicamente, são vistas na superfície da estrutura como "fissuras na forma de mapa"[46].

2.3.4. Influência de agentes externos na degradação do concreto

Dentre os elementos externos que podem causar ou acelerar a degradação do concreto, pode-se citar o dióxido de carbono e os íons cloreto e sulfato como os mais agressivos. A temperatura durante a cura e a presença de contaminantes na água de amassamento também são fatores importantes no que diz respeito à durabilidade do material.

2.3.4.1. Dióxido de carbono[33]

A barreira imposta pelo concreto à corrosão do aço em uma estrutura é caracterizada tanto pelo alto pH, necessário para manter passiva a superfície do aço,

quanto pela proteção física ao ingresso de substâncias presentes no meio externo.

Existem agentes externos acidificantes, que podem difundir pelos poros de uma argamassa ou concreto e reagir com os componentes alcalinos ali presentes. É o caso do dióxido de carbono (CO_2) da atmosfera e de gases tais como o dióxido de enxofre (SO_2) dos ambientes contaminados. O CO_2 reage com os constituintes alcalinos segundo a Equação 2:

$$CO_2 + Ca(OH)_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O \qquad \text{EQUAÇÃO 2}$$

resultando em uma zona carbonatada que vai penetrando gradualmente no concreto, reduzindo o pH da zona afetada a valores menores que 9.

A velocidade de carbonatação depende de vários fatores. Tem-se observado que a espessura (x) da zona carbonatada é função do tempo de exposição (t), da qualidade do concreto (tipo e consumo de cimento, a/c) e do ambiente (temperatura, umidade relativa) segundo a Equação 3:

$$x = k.\sqrt{t} \qquad \text{EQUAÇÃO 3}$$

Quando se especifica a qualidade adequada de argamassa ou concreto para uma determinada condição de serviço e caso seja mantida a espessura de cobrimento recomendada, a frente de carbonatação não deve atingir a superfície da armadura e, conseqüentemente, não afetar a passividade do aço, durante a vida útil prevista para a estrutura.

A carbonatação é facilmente detectada por inspeção visual e pela aplicação de solução indicadora de fenolftaleína. A fenolftaleína alcoólica altera a cor (de transparente para rosa e vermelho) em pH superior a 8,3. Pela reação de carbonatação ou outra que venha a reduzir o pH do interior do concreto (abaixo do ponto de viragem do indicador), não haverá alteração de cor do indicador, o qual permanecerá incolor[8].

2.3.4.2. O ambiente litorâneo e o íon cloreto

O meio ambiente marinho constitui o mais agressivo de todos os meios naturais não poluídos para as estruturas de concreto armado nele expostas, direta ou

indiretamente, desde a atmosfera até as partes submersas ou enterradas, em virtude das propriedades químicas da água do mar que são determinadas pelos seus componentes salinos dissolvidos. Os sais dissolvidos tornam a água do mar um excelente eletrólito, condição necessária para o desenvolvimento de corrosão eletroquímica. Estes sais também podem ser facilmente transportados a distâncias relativamente grandes a partir da arrebentação, seja por respingos ou pela névoa salina (maresia). De todos os elementos agressivos que podem degradar o concreto e corroer a armadura de estruturas situadas em ambientes litorâneos, o íon cloreto (Cl^-) pode ser considerado como um dos mais importantes[4].

De acordo com a proposta da norma européia EN 206-1[47], a agressividade dos ambientes marinhos é classificada como nível 4. A situação mais crítica de agressividade prevista por esta norma é representada pelo nível 5.

Em se tratando da localização da estrutura em relação à distância da água, bem como da posição relativa ao nível do mar, as estruturas de concreto apresentam diferentes zonas de exposição marinha, cada uma com suas próprias características e riscos, e que podem ser classificadas em: zona de atmosfera marinha, zona de respingos, zona de variação entre marés, zona submersa e zona enterrada. Os modos de deterioração da estrutura de concreto armado são peculiares a cada zona de exposição, que podem não ser uniformes ao longo da estrutura e cujas formas mais importantes são a deterioração física e química do concreto e a corrosão da armadura[4].

Os riscos de corrosão aumentam e são mais sérios quando estão presentes no meio íons despassivantes, capazes de romper a película de óxidos passivantes. Os íons Cl^-, quando presentes em quantidades importantes, podem causar a despassivação do aço inclusive em um meio de alto pH, como é o caso do concreto não carbonatado[8].

Estes cloretos, além daqueles oriundos do próprio ambiente onde a estrutura está instalada, podem advir de diversas outras fontes, tais como de agregados e água de amassamento já contaminados, do uso de aditivos aceleradores de pega à base de cloreto de cálcio, ou de fontes externas como sais de degelo aplicados a pavimentos[48].

Durante o serviço da estrutura, os íons cloreto que provêm de fontes externas podem difundir rapidamente na cobertura de concreto e atingir a armadura em um período de tempo muito mais curto que o correspondente à vida útil projetada da mesma[6].

A corrosão da armadura de aço devida à contaminação do concreto por cloretos apresenta-se localizadamente, na forma de pites, em um processo que, geralmente, tem início após a destruição da camada de óxidos protetora e passiva da superfície do aço[8].

A quantidade de cloreto requerida para iniciar a corrosão depende do pH da solução contida nos poros do concreto. Têm-se realizado muitos trabalhos orientados a determinar a concentração limite de cloreto a partir da qual se produz corrosão, mas não se tem chegado a uma conclusão comum. Diferentes países têm adotado valores limites distintos para suas recomendações e normas. Como exemplo cabe citar as recomendações do *CIRSOC*[49], que limitam o conteúdo máximo de cloreto nos componentes da mistura (água, agregados e aditivos):

- estruturas de concreto simples: $Cl^- < 2000$ ppm;
- estruturas de concreto armado convencional: $Cl^- < 1000$ ppm; e
- estruturas de concreto protendido: $Cl^- < 150$ ppm.

De acordo com PAGE & TREADWAY (1982)[50], as recomendações britânicas fixam os limites de risco de corrosão para concretos fabricados com cimento Portland comum, em:

- baixo risco: $Cl^- < 0,4\%$, em peso de cimento;
- risco intermédio: $0,4\% < Cl^- < 1\%$, em peso de cimento;
- alto risco: $Cl^- > 1\%$, em peso de cimento.

Como conteúdo nos aditivos, o código britânico fixa os limites em 0,2% de cloreto, em peso de cimento resistente a sulfatos, e em 0,4% de cloreto, em peso de cimento Portland comum.

Segundo a *Federal Highway Administration* (*FHWA*), o valor limite é dado por uma relação entre o peso de cloreto e o peso de cimento igual a 0,20%[51]. Já a norma brasileira NBR 6118/80[52], válida até 29/03/2004, estipula um teor máximo de cloretos de 500 mg/l, em relação ao peso de água de amassamento. Para os traços de concreto normalmente utilizados no Brasil, este limite passa a ser da ordem de 0,02% do peso de cimento, sendo, portanto, mais exigente que a normalização estrangeira[53].

Estes valores tampouco se podem tomar de maneira absoluta porque existem outros fatores que influenciam na agressividade dos íons Cl^-, como: a etapa de introdução dos cloretos na estrutura, conforme mencionado anteriormente, a composição do cimento (por exemplo, os cimentos resistentes a sulfatos admitem um nível menor de cloretos), a qualidade dos materiais, as condições de cura e de exposição do concreto, etc[8].

O transporte dos íons Cl^-, na maioria dos casos, se dá por difusão iônica, gerada pela sua diferença de concentração no concreto. Pode ocorrer também migração dos íons, pela ação do campo gerado pela corrente elétrica do processo eletroquímico ou por ação de campos elétricos externos, como por exemplo, ao se empregar a técnica de proteção catódica para o controle da corrosão[8].

A absorção se dá na camada superficial onde, geralmente, ocorrem ciclos de molhagem e secagem do cobrimento pela ação da água da chuva e umidade. No interior do concreto o mecanismo se dá por difusão iônica. Um perfil típico da concentração de cloretos ao longo do cobrimento de concreto, desde a superfície até a armadura, em uma estrutura impregnada de contaminantes do meio externo, é mostrado na Figura 3[54].

Na camada mais externa, onde predomina a absorção, a curva é crescente desde a superfície por causa das lavagens ocasionais por ação das intempéries, até um limite máximo. Na zona de difusão, a partir do valor limite, a concentração tende a diminuir com a profundidade, devido à impregnação de contaminantes[54].

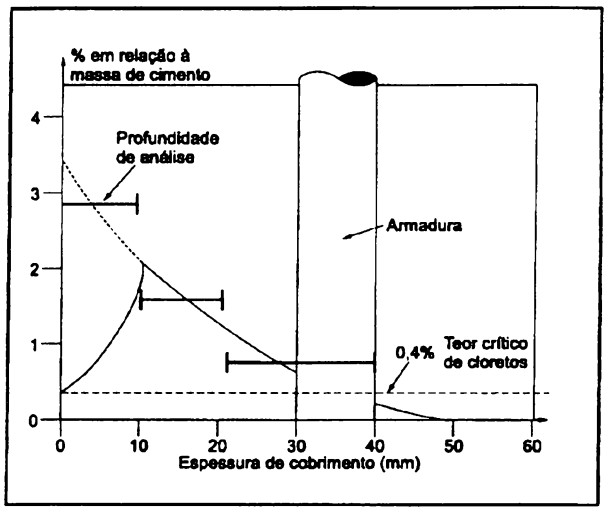


FIGURA 3 - PERFIL TÍPICO DA CONCENTRAÇÃO DE CLORETOS AO LONGO DO COBRIMENTO DE CONCRETO

No concreto, os íons Cl^- podem coexistir em três formas: quimicamente ligados ao aluminato tricálcico, ou sal de Friedel (fórmula: $3CaO.Al_2O_3.CaCl_2.10H_2O$); adsorvidos na superfície dos poros; e sob a forma de íons livres. Estas três formas tendem ao equilíbrio, sendo o íon livre o mais prejudicial à estrutura, em virtude da corrosão do aço[3].

A velocidade de corrosão das armaduras é, sensivelmente, aumentada em estruturas de concreto carbonatadas e sujeitas à ação de cloretos. Além disso, a carbonatação faz diminuir o valor crítico do teor de cloretos necessário para a corrosão, por aumentar a quantidade de cloreto livre do complexo cloro-aluminato, só estável a valores altos de pH[33].

Finalmente, se deve lembrar da necessidade da presença de oxigênio e umidade para que uma corrosão atinja velocidades perigosas. Em grandes profundidades do mar ou em meios muito secos, a corrosão não pode progredir mesmo quando se ultrapassem os valores limites de cloreto[8].

Outro fator fundamental, em se tratando de corrosão de estruturas de concreto armado por influência de agentes externos, principalmente cloretos, é a espessura da camada de concreto sobre a armadura. A NBR 6118/80[52] recomenda

espessuras mínimas de cobrimento de acordo com a região de exposição ao risco de corrosão e o tipo de concreto, conforme Tabela 6.

TABELA 6 - RECOMENDAÇÕES DE COBRIMENTOS MÍNIMOS DE PEÇAS ESTRUTURAIS DE CONCRETO, SEGUNDO A NBR 6118/80[52]

TIPO DE CONCRETO	REGIÃO DE LOCALIZAÇÃO	COBRIMENTO
Concreto revestido com argamassa de espessura mínima de 1 cm	lajes no interior de edifícios	0,5 cm
	paredes no interior de edifícios	1,0 cm
	lajes e paredes ao ar livre	1,5 cm
	vigas, pilares e arcos no interior de edifícios	1,5 cm
	vigas, pilares e arcos ao ar livre	2,0 cm
Concreto aparente	no interior de edifícios	2,0 cm
	ao ar livre	2,5 cm
Concreto em contato com o solo	..	3,0 cm
Concreto em meio fortemente agressivo		4,0 cm

2.3.4.3. Íons sulfato

Soluções contendo íons sulfato são, também, meios agressivos ao concreto, causando perda de resistência, expansões volumétricas, trincas e degradação. Expansões lineares próximas de 0,5% foram verificadas em argamassas colocadas em presença de solução contendo 1,8% de sulfato de sódio, em poucas semanas[35]. Os íons sulfato reagem com o C_3A e, havendo suficiente quantidade de água, dão lugar à etringita, fortemente hidratada, muito volumosa e expansiva. A presença deste material, cuja fórmula química é $3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.31H_2O$, pode provocar fissuração do concreto, facilitando posterior penetração de agentes agressivos[8].

Outros estudos mostram a dependência da expansão observada em cp's de concreto com o a/c e o teor de C_3A[45]. Os cimentos com baixos teores de C_3A são mais resistentes ao ataque por sulfatos, sendo que o limite aceito na Europa é de 3% de aluminato tricálcico[3]. A identificação de fases químicas na estrutura de concreto é de igual importância, sendo a técnica de difratometria de raios X uma excelente ferramenta de apoio[8].

2.3.4.4. Contaminantes da água de amassamento

A ação de substâncias ácidas dissolvidas na água de amassamento provoca a transformação dos compostos de cálcio (hidróxidos, silicatos, aluminatos, entre outros) em sais mais ou menos solúveis de cálcio, do ácido reagente. O efeito imediato é a perda da capacidade ligante do cimento[35].

Para estruturas de concreto expostas às águas e solos úmidos, alguns ensaios físico-químicos na água são recomendados, tais como[8]:

- sólidos fixos (não evaporáveis);
- pH;
- dureza;
- O_2 dissolvido, pelo método de $KMnO_4$;
- teores de CO_2;
- Mg^{2+}, NH_4^+, SO_4^{2-}, NO_3^-, S^{2-} e Cl^-; caso haja suspeita da presença de qualquer outro íon agressivo, como por exemplo fluoreto, será necessário considerá-lo nas análises; entre outros.

2.3.4.5. A influência da temperatura no processo de cura

Elevadas temperaturas no processo de cura modificam a microestrutura das pastas de cimento, isto é, alteram a composição e a estrutura dos hidratos, a concentração iônica, a distribuição dos tamanhos dos poros e geram microtrincas, podendo favorecer ao ingresso de substâncias nocivas ao meio, tais como os íons Cl^- e SO_4^{2-} em regiões de alta agressividade[46].

Amostras de concreto de cimento Portland submetidas a temperaturas de cura entre 20°C e 70°C apresentaram valores em resistência mecânica à compressão variados, chegando a ser, aproximadamente, 17% menores para aquelas submetidas a temperaturas mais altas e 15% menores para as mais baixas que a ambiente[46, 55]. GALVÃO et al. (2002)[56] apresentam resultados de potencial de corrosão de concretos

fabricados e curados a diferentes temperaturas. Os autores concluem que os melhores desempenhos, quanto à durabilidade, são obtidos para as misturas preparadas a 10°C, em comparação a concretagens realizadas à temperatura ambiente e a 60°C.

Tais resultados são importantes do ponto de vista da fabricação das estruturas de concreto nas regiões de clima tropical. Além da temperatura ambiente média elevada (superior a 25°C), há em muitos casos levantados, a agravante do emprego de cimentos especiais, tal como o de alta resistência inicial, e a falta de condições de cura adequadas para manter a umidade necessária à estrutura[8].

Há ainda outros agentes externos, inclusive biológicos, que podem degradar as estruturas de concreto, tais como fungos e bactérias sulfato-redutoras[8]. A presença dos primeiros é bastante comum em regiões quentes e úmidas.

2.4. CORROSÃO DA ARMADURA E DEGRADAÇÃO DO CONCRETO

A corrosão das armaduras de aço pode ser considerada uma das principais causas da deterioração do concreto armado. Diversos fatores podem ser apontados como responsáveis pela ocorrência desta manifestação patológica: deficiências de projeto, espessura de cobrimento insuficiente, especificações e características inadequadas do concreto e de seus materiais constituintes, falhas de execução e manutenção e a ação agressiva do meio ambiente no qual a estrutura está inserida[35].

Devido ao elevado número de estruturas afetadas, a corrosão das armaduras tem sido um grande problema na construção civil. Em estudos recentes, alguns autores pesquisaram a incidência de patologias em estruturas de concreto no Estado de Pernambuco, chegando à conclusão de que aquela é a causadora da maior parte dos danos nas estruturas de concreto, sendo responsável por, aproximadamente, 62% das manifestações patológicas registradas nas edificações[57]. A ocorrência da corrosão de armaduras nas estruturas de concreto armado diminui, significativamente, a vida útil das edificações, trazendo conseqüências negativas para a estabilidade, funcionalidade e estética das estruturas.

A corrosão da armadura é um problema crítico, que pode comprometer, severamente, a segurança e a capacidade de serviço das estruturas, além de diminuir o valor patrimonial da edificação e envolver grandes montantes financeiros para a sua recuperação[58].

Por isso, a importância da corrosão abrange razões econômicas, técnicas, sociais e, até, jurídicas. A deterioração de inúmeras obras civis e públicas devido à corrosão das armaduras é um fato presente e que desafia de forma urgente toda a comunidade técnico-científica mundial, em virtude de ser este um dos problemas mais sérios, custosos e difíceis de serem resolvidos[59].

Para se corrigir problemas em estruturas causados pela corrosão das armaduras, é necessário que sejam seguidos critérios técnicos e econômicos bastante confiáveis e precisos, pois é um tanto complexo o estabelecimento de um diagnóstico correto, bem como a especificação dos materiais e técnicas a serem utilizados nos serviços de reparo, recuperação ou reforço (caso necessário) da estrutura avariada[60].

O diagnóstico de uma estrutura corroída não é simples, nem mesmo imediato. Esta dificuldade é devida em grande parte à existência de uma vasta e complexa gama de mecanismos de deterioração que intervêm no processo corrosivo, muitas vezes até de forma simultânea[58].

2.4.1. Corrosão da armadura de aço

O aço para concreto armado não apresenta, oficialmente, requerimentos particulares com respeito à corrosão. Uma das normas nacionais que trata dos materiais metálicos para concreto é a NBR 7480/96[61] – Barras e fios de aço destinados a armaduras para concreto armado.

Os aços utilizados em estruturas tensionadas apresentam maiores exigências quanto à composição e aos tratamentos térmicos, particularmente, aqueles relacionados com a susceptibilidade à fragilização por hidrogênio, já que o aço menos resistente é só temperado e revenido. O aço perlítico laminado a quente mostra melhor

desempenho; no entanto, o mais resistente é o aço laminado a frio e revenido[8].

A maior complicação da corrosão de armaduras em concreto está no fato de que os produtos da corrosão do aço, os quais são uma gama variada de óxidos e hidróxidos de ferro, apresentam-se com volumes entre três e dez vezes superiores ao volume original do aço não corroído, o que pode gerar tensões internas trativas que podem variar de 15 a 40 MPa[54].

Essas tensões quase sempre ocasionam a fissuração do concreto, uma vez que ele é um material de baixa resistência à tração. As fissuras, então, tornam-se um caminho preferencial por onde os agentes agressivos penetram ainda mais facilmente no concreto até atingirem as armaduras. Desta forma, o processo corrosivo torna-se mais intenso, caracterizando um círculo vicioso[2].

2.4.2. Mecanismo de corrosão[33]

A corrosão é um processo espontâneo pelo qual a maioria dos metais em contato com o meio ambiente apresenta a tendência de voltar ao estado de minério (óxido, sais) em que são encontrados na natureza. Assim, por exemplo, uma barra de aço da armadura em processo de corrosão, após ter sido submetida a intemperismo, pode ser visualizada, esquematicamente, na Figura 4[33].

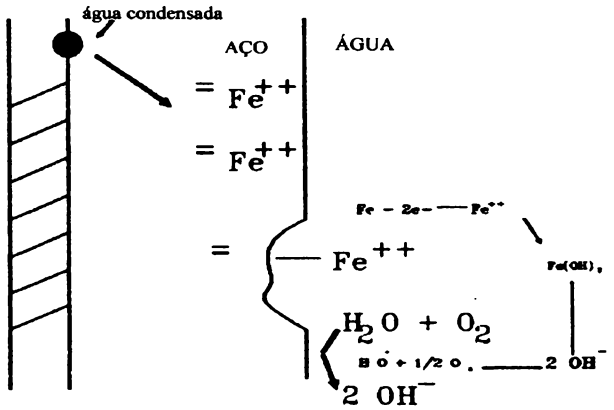


FIGURA 4 - ESQUEMA DO PROCESSO DE CORROSÃO DAS BARRAS METÁLICAS

Em virtude do intemperismo, forma-se na barra uma delgada película de água, por condensação da umidade ambiente. O ferro (Fe) do aço se dissolve dentro desta película e reage com o oxigênio do ar formando hidróxidos e óxidos de ferro. Estes processos são ditos eletroquímicos porque deles participam espécies químicas (o Fe, a água e o oxigênio do ar) e elétrons. Isto significa que se pode alterar o processo de corrosão modificando-se as características químicas e elétricas dos sistemas, e explica também o porquê de eventuais variações de velocidade do fenômeno.

2.4.3. O fenômeno da passividade da armadura metálica

As armaduras das estruturas de concreto armado, são originalmente passivas devido à elevada alcalinidade do concreto, cujo pH encontra-se geralmente acima de 12,5. Nestas condições as armaduras mantêm-se protegidas por uma fina película de óxidos, e a corrosão é muito pequena[62].

Neste ínterim, interessam as reações representadas pelas Equações 4 e 5, que levam à formação de uma película de óxidos muito delgada, transparente e protetora e que dificulta a continuação do processo de dissolução, ou seja, forma-se um filme passivante[33].

$$3\ Fe + 4\ H_2O \rightarrow Fe_3O_4 + 8\ H^+ + 8\ e^- \qquad \text{EQUAÇÃO 4}$$

$$2\ Fe_3O_4 + H_2O \rightarrow 3\ Fe_2O_3 + 2\ H^+ + 2\ e^- \qquad \text{EQUAÇÃO 5}$$

A modificação do potencial de um eletrodo ou sistema eletroquímico, em razão de variações de concentração, sobretensão ou resistência elétrica, é denominada polarização. Os fenômenos de polarização promovem a aproximação dos potenciais das áreas anódicas e catódicas e produzem aumento da resistência, limitando a velocidade do processo corrosivo[63].

As modificações no potencial de eletrodo resultante da polarização provocam mudança no valor deste potencial, alterando o equilíbrio eletroquímico e fazendo com que o potencial anódico se desloque no sentido catódico, e vice-versa. A

representação gráfica da variação do potencial em função da corrente é conhecida como curva de polarização, ou diagrama de Evans[63].

O fenômeno da passivação se apresenta, numa curva de polarização, como uma diminuição da densidade da corrente[8], como esquematizado na Figura 5[33].

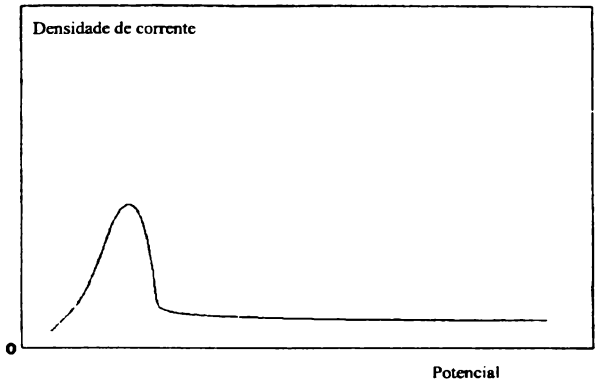


FIGURA 5 - CURVA DE POLARIZAÇÃO, MOSTRANDO A DIMINUIÇÃO DA CORRENTE CAUSADA POR PASSIVAÇÃO DA SUPERFÍCIE METÁLICA

Diagramas esquemáticos do comportamento de diversos materiais metálicos em função do potencial do metal e da alcalinidade do meio (pH) foram desenvolvidos pelo corrosionista belga Marcel Pourbaix. Na Figura 6 é mostrado o diagrama correspondente ao ferro[33].

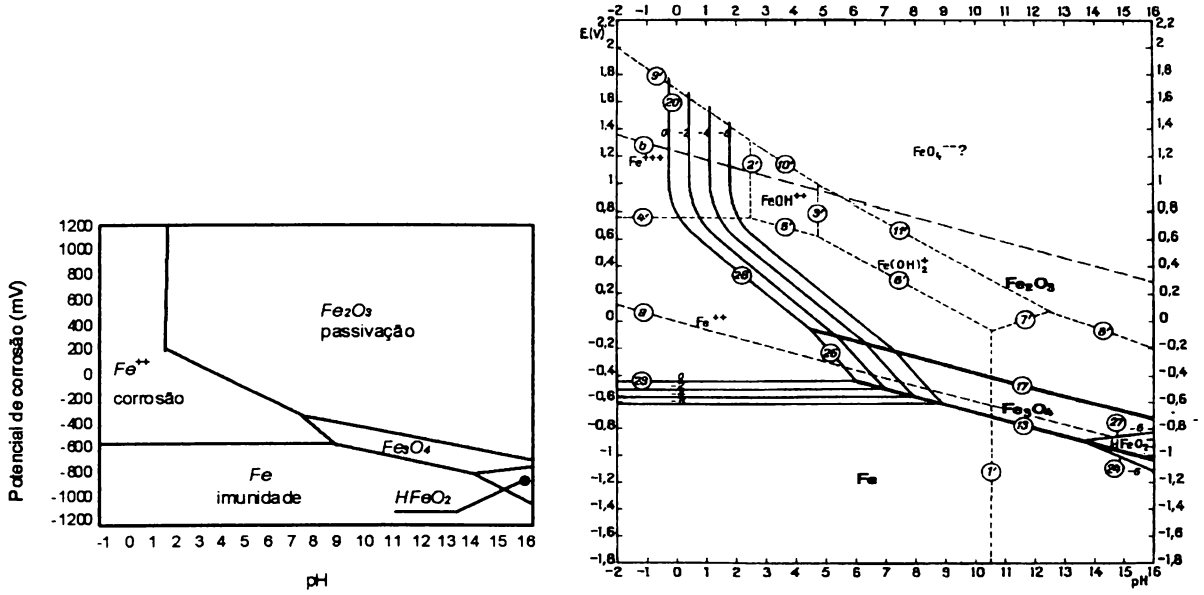


FIGURA 6 - DIAGRAMA DE POURBAIX PARA O FERRO

Em um concreto com pH alcalino, o potencial do aço no interior do material está entre +100 mV e –400 mV, medido com respeito a um eletrodo de referência de cobre/sulfato de cobre (ou $Cu|CuSO_4$) em solução aquosa. Nestas condições analíticas verifica-se, pelas curvas do diagrama da Figura 6, que o aço está em uma condição estável, ou seja, de passividade[54]. Na Figura 4 são mostradas duas reações, a de oxidação do ferro e a de redução do oxigênio. Na Figura 7 estão representadas as curvas de polarização de ambos os processos[33].

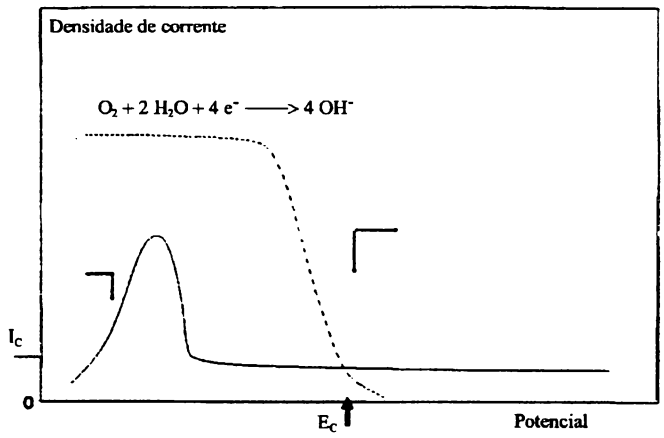


FIGURA 7 - CURVAS DE POLARIZAÇÃO COM AS REAÇÕES DE OXIDAÇÃO DO METAL E REDUÇÃO DO OXIGÊNIO

Pode-se perceber que as curvas se cortam, determinando um potencial e uma corrente. Dito de outro modo, as reações que ocorrem sobre o eletrodo definem espontaneamente o potencial de corrosão (E_{corr}). Para esse valor de potencial, a velocidade do processo de oxidação (anódico) é igual à do processo de redução (catódico) e é, precisamente, o que se denomina velocidade de corrosão e que se mede como corrente ou densidade de corrente de corrosão[8].

A alteração do pH do interior de uma estrutura de concreto armado, em conseqüência, por exemplo, da penetração de cloretos do ambiente, carbonatação ou lixiviação, ocasiona instabilidade do filme passivante, e ocorre então o fenômeno de despassivação da armadura[62].

A despassivação determina o fim do período de iniciação da corrosão, que é

o período no qual as substâncias agressivas penetram avançando, progressivamente, até a armadura[64]. HELENE (1993)[65] coloca que a duração da fase de iniciação deve corresponder à estimativa da vida útil de projeto da estrutura quanto à corrosão das barras de aço. Esta despassivação pode ocorrer pela presença de cloretos no concreto. Uma vez despassivada, dá-se início a fase de propagação, e já se observam as manifestações típicas do fenômeno da corrosão.

O fenômeno de ruptura da passividade se manifesta na curva de polarização do sistema por um aumento brusco da corrente na região de potenciais de passividade, como mostra a Figura 8. Neste comportamento eletroquímico se baseiam alguns dos métodos de controle da corrosão[33].

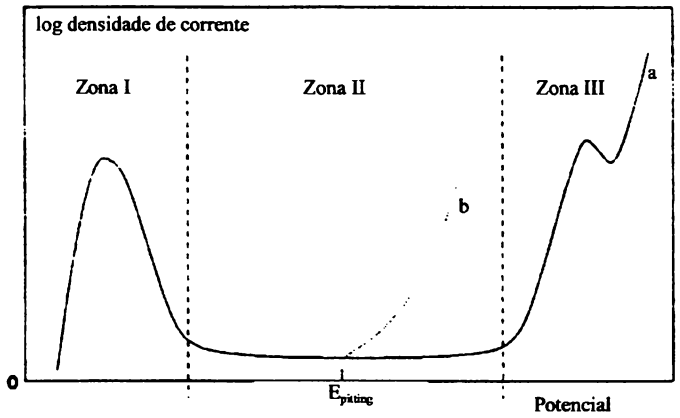


FIGURA 8 - CURVA DE POLARIZAÇÃO ANÓDICA (A) E AUMENTO DA CORRENTE POR RUPTURA DA PASSIVIDADE (B)

2.5. TÉCNICAS ELETROQUÍMICAS PARA DETECÇÃO E MONITORAMENTO DA CORROSÃO

Nas inspeções de estruturas de concreto armado muitas são as técnicas envolvidas na detecção, identificação, avaliação, caracterização e monitoramento da atividade corrosiva[54]. O leque de opções é realmente grande, partindo desde métodos expeditos em campo (inspeção visual, análise da carbonatação do concreto e da oxidação do aço pelo uso de indicadores, etc.), passando por análises físico-químicas

variadas e chegando a técnicas eletroquímicas que, por sua vez, podem ser simples ou complexas. A permeabilidade do concreto é um outro parâmetro que vem sendo correlacionado com a resistividade elétrica medida[66].

A avaliação, propriamente dita, da corrosão de armaduras metálicas inseridas em concreto deve ser realizada, preferencialmente, pelo emprego de técnicas elétricas ou eletroquímicas, face à natureza do fenômeno corrosivo[54].

Os primeiros trabalhos aplicando técnicas elétricas em pasta de cimento hidratada remetem à década de 1920. Desde esse tempo muitos trabalhos foram publicados sobre condutividade do cimento e/ou concreto[67].

Dentre as técnicas elétricas e eletroquímicas disponíveis, as mais comumente aplicáveis ao estudo da corrosão do aço das armaduras são as seguintes[54]:

- resistência elétrica;
- potencial de corrosão;
- ruído eletroquímico;
- curvas de polarização;
- resistência de polarização linear;
- espectroscopia de impedância eletroquímica.

A técnica de resistência de polarização mostra uma boa correlação entre a velocidade de corrosão e a resistividade elétrica do concreto. Contudo, as medidas da resistência de polarização estão limitadas em alguns aspectos[68]:

- são realizadas muitas vezes a uma freqüência fixa ou sobre uma faixa muito limitada de freqüência, sendo os dados interpretados em termos de condução iônica através de uma malha de capilares com água;
- as freqüências do campo elétrico alternado aplicado são, usualmente, limitadas às baixas freqüências, entre 100 Hz e 10 kHz, principalmente para evitar problemas gerados pela polarização dos eletrodos; e
- a resposta macroscópica do concreto a um campo elétrico alternado está,

normalmente, representada por um modelo puramente resistivo, dando muito pouca atenção à existência de possíveis fenômenos de polarização em relação ao volume do concreto.

O potencial de corrosão é outra técnica que vem sendo empregada na avaliação do estado quanto à corrosão das armaduras no concreto. Os valores obtidos são indicativos, principalmente, quando eles são extremos, seja porque indicam corrosão avançada (valores de potencial muito positivos) ou ausência de corrosão (valores muito negativos), conforme ilustrado na Figura 6. Este valor está relacionado com a curva de polarização do aço em meio alcalino (Figura 7), indicando situação de ausência de corrosão (potenciais catódicos em relação ao potencial de equilíbrio para uma barra de aço nesse meio), corrosão ativa, passividade ou transpassividade, correspondendo nestes três últimos casos a potenciais anódicos em relação ao potencial de equilíbrio para uma barra de aço nesse meio[33]. A norma ASTM C876-91[69] estabelece a forma de medição e os valores de potencial no qual se apresentam as situações mencionadas, com relação ao eletrodo de cobre/sulfato de cobre. Estes valores podem ser convertidos para a escala adequada a cada caso.

Uma técnica adequada para estudar o concreto armado é a espectroscopia de impedância eletroquímica. Nesta técnica, aplica-se um sinal alternado de baixa amplitude, da ordem de alguns milivolts, variando-se a freqüência (f) deste sinal para obter-se o módulo e a fase da impedância em cada valor de f utilizado. Como resposta representam-se os dados, dentre outras formas, em diagramas de logaritmo do módulo e ângulo *versus* logaritmo da freqüência (diagramas de Bode). Estes dados podem ser convertidos em diagramas do tipo Nyquist (ou diagramas de Argand), representando a parte real da impedância em função da parte imaginária. Destes diagramas derivam-se interpretações físicas com a ajuda de circuitos elétricos, chamados de circuitos equivalentes. A intuição física permite associar os fenômenos físicos específicos, tais como a microestrutura do material em estudo e os processos que acontecem nos

eletrodos (reações eletroquímicas)[8].

Os dados obtidos das medidas de impedância mostram, normalmente, mais de uma constante de tempo, correspondendo às regiões de alta, média e baixa freqüências. As regiões de alta e média freqüências correspondem a valores, em geral, maiores que 100 Hz, sendo que as de baixa freqüência correspondem aos valores menores[8].

A resposta na alta freqüência está relacionada com as propriedades em volume do concreto ou interfaciais; a de baixa freqüência a fenômenos de eletrodos; e no caso das freqüências intermediárias, existem dúvidas sobre qual ou quais fenômenos estão sendo observados[70, 71].

Das técnicas citadas, a de potencial de corrosão e a de espectroscopia de impedância eletroquímica foram empregadas no desenvolvimento experimental desta dissertação, e serão estudadas com maior detalhe a seguir.

2.5.1. Técnica dos Potenciais de Corrosão

O levantamento de potenciais de corrosão constitui-se no procedimento de campo mais utilizado para monitorar estruturas de concreto armado com vistas à corrosão de armaduras[72].

Os primeiros registros de utilização da técnica de potenciais de corrosão datam de 1957, nos Estados Unidos, quando STRATFULL, citado por CASCUDO (1997)[54], tentou estudar a corrosão do aço no concreto de tabuleiros de pontes e viadutos na Califórnia, sendo esta corrosão, na maior parte das vezes, baseada na utilização de sais de degelo sobre os pavimentos. Nos anos setenta, as medidas de potencial passaram a ter uma aplicação mais geral e acentuada nas estruturas de concreto, principal e notadamente, pelo "mapeamento de potenciais", permitindo, de forma não-destrutiva, a identificação de áreas com corrosão.

Na década de setenta, VAN DAVEER (1975)[73] estabeleceu faixas empíricas de potenciais associadas ao risco de corrosão, a partir de um extensivo

trabalho no qual quase 500 tabuleiros de pontes contaminados com cloretos foram inspecionados. Estes critérios foram incorporados à normalização da *ASTM* em 1977, regulamentando a técnica de potenciais de corrosão para uso em concreto armado.

Atualmente no Brasil, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e a Associação Brasileira de Corrosão (ABRACO) estão trabalhando na normalização da referida técnica em âmbito nacional.

2.5.1.1. Princípios da técnica

A técnica consiste, basicamente, na medida dos potenciais de corrosão em cp's ou estruturas de concreto e seu posterior registro.

Os potenciais de eletrodo (também chamados de potenciais eletroquímicos ou mais comumente de potenciais de corrosão) dos metais no concreto são parâmetros termodinâmicos que dependem de inúmeras variáveis, tanto da armadura como do concreto. Seus valores numéricos indicam o balanço entre a reação anódica e a catódica, entretanto não fornecem informações quantitativas, isto é, não é possível extrair informações sobre a velocidade de corrosão real da armadura[74].

A rigor o que se tem é o registro, em determinados locais da estrutura, de uma diferença de potencial verificada entre duas semicélulas: a semicélula aço/concreto (eletrólito) e a semicélula estável que é o eletrodo de referência. Neste caso, pode-se dizer que o eletrodo de referência exerce o papel de detectar a presença das linhas de corrente que se verificam quando há um processo eletroquímico de corrosão nas armaduras. Desta forma, nos locais por onde passam essas linhas de corrente (entre as regiões anódicas e catódicas) os potenciais registrados por um voltímetro tendem a serem mais eletronegativos do que nos locais passivados e sem corrosão. Esses locais com característica de maior eletronegatividade indicam, portanto, a presença de zonas ativas de corrosão nas barras[54].

2.5.1.2. Equipamentos

O equipamento para medida dos potenciais eletroquímicos consiste basicamente de:

- voltímetro de alta impedância de entrada (maior que 10 MΩ), com resolução de milivolts;
- eletrodo de referência (os mais utilizados são o de cobre/sulfato de cobre e o de calomelano saturado); e
- esponja de elevada condutividade (esponja umedecida em uma solução, destinada a melhorar a condutividade elétrica entre o eletrodo de referência e a superfície do concreto).

Segundo DAWSON (1983)[75], o eletrodo de $Cu/CuSO_4$ (ESC) não deve ser usado para concreto armado, pelo fato do mesmo conter uma solução ácida que pode penetrar nos poros do concreto e estimular o processo corrosivo. Ainda segundo ele, o eletrodo de calomelano saturado (ECS) deve ser preferido. Este eletrodo, segundo CASCUDO (1997)[54], consiste de mercúrio coberto por uma pasta de cloreto mercuroso (Hg_2Cl_2), imerso num eletrólito contendo íons de cloreto, normalmente uma solução saturada de cloreto de potássio (KCl). O ECS também é representado por $Hg,Hg_2Cl_2(s)/KCl(aq.)$.

Entretanto o ESC é o eletrodo descrito pela ASTM C876-91[69] e é, segundo alguns autores[54, 73], o mais utilizado na prática.

2.5.1.3. Procedimentos

A obtenção dos potenciais eletroquímicos no concreto pode ser realizada de diversas maneiras. A mais usual delas, denominada por CASCUDO (1997)[54] de dispositivo convencional, consiste na ligação do pólo negativo do voltímetro ao eletrodo de referência e na conexão do pólo positivo do aparelho a um ponto da

armadura. Neste sistema, é necessário expor parte dessa armadura, a fim de que se possa fazer a devida conexão elétrica.

O eletrodo de referência é móvel e pode ser colocado em diversos locais da superfície do concreto, enquanto que o voltímetro registra os diferentes potenciais de acordo com a posição do referido eletrodo e com as condições da armadura no interior do concreto (se em estado ativo de corrosão ou se passivada).

A esponja de alta condutividade, previamente descrita, torna-se bastante importante, pelo fato de ser necessário se estabelecer um meio condutor entre a extremidade do eletrodo de referência (placa porosa) e a superfície do concreto. Um esquema deste dispositivo pode ser visto na Figura 9[54].

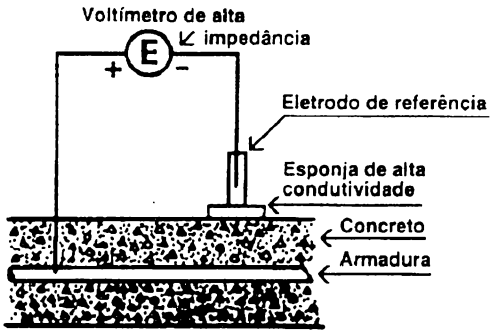


FIGURA 9 - ESQUEMA USUAL DE MEDIÇÃO DO POTENCIAL DE CORROSÃO

Uma inovação que já está sendo aplicada a esta técnica é a utilização de uma espuma condutora à base de carbono acoplada à placa porosa do eletrodo[76]. Por não necessitar de umidade para que o contato elétrico se estabeleça, esta esponja não propicia alteração das condições naturais de resistividade do concreto durante a medida.

Outras maneiras de se medir o potencial de corrosão da armadura no concreto são descritas na literatura[54, 77, 78]. Existem também sistemas portáteis de medição do potencial de semicélula, como o mostrado na Figura 10[79].

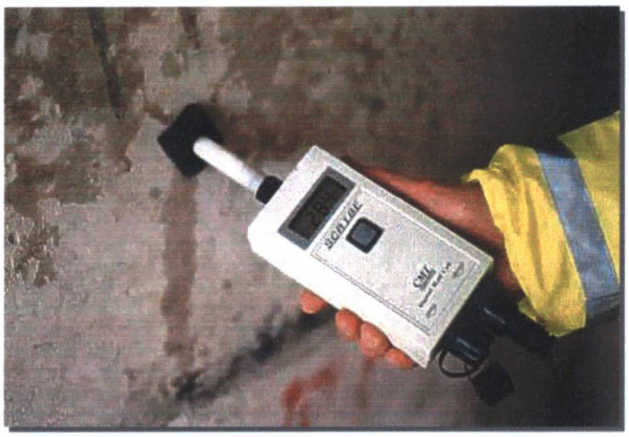


FIGURA 10 - APARELHO PORTÁTIL PARA MEDIDA DO POTENCIAL DE CORROSÃO

A técnica de potenciais de corrosão presta-se a fornecer diversas informações relacionadas ao processo corrosivo, entre elas[54]:

- informações qualitativas sobre o estado superficial da armadura (estado passivo ou ativo de corrosão);
- indicação do instante em que ocorre mudança do estado passivo para o ativo de corrosão da armadura, ou vice-versa, pela súbita mudança dos valores de potencial, em monitoramentos periódicos ao longo do tempo; e
- delimitações de áreas comprometidas da estrutura (mapeamento de potenciais), pelo traçado das linhas equipotenciais[80]. Nesse ínterim, valores mais eletronegativos de potencial referem-se a zonas anódicas das armaduras ou da estrutura e valores menos eletronegativos a zonas catódicas ou passivadas.

Entretanto, por ser uma técnica eletroquímica, a medida de potencial pode ser influenciada por uma vasta gama de fatores que tendem a falsear os resultados obtidos. Dentre estas variáveis pode-se citar[2]:

- teor de umidade do concreto, bem como a existência de gradientes de umidade;
- presença de frentes de carbonatação e sua profundidade;

- concentração de cloretos no concreto;
- qualidade do concreto (a/c, consumo de cimento, porosidade, acabamento superficial, permeabilidade);
- espessura de cobrimento; e
- presença de eventuais correntes de fuga na estrutura.

A forma mais relatada na literatura técnica para apresentação dos resultados de um levantamento de potenciais eletroquímicos é a construção de linhas equipotenciais sobre a estrutura de concreto armado, na conhecida prática de mapeamento de potenciais. Para a confecção dos mapas, recomenda-se que, antes que as medidas sejam realizadas, se trace uma malha quadriculada sobre a estrutura de concreto, de forma que as leituras dos potenciais sejam tomadas a intervalos eqüidistantes[77]. Na Figura 11 são apresentados exemplos destes mapas[54, 77].

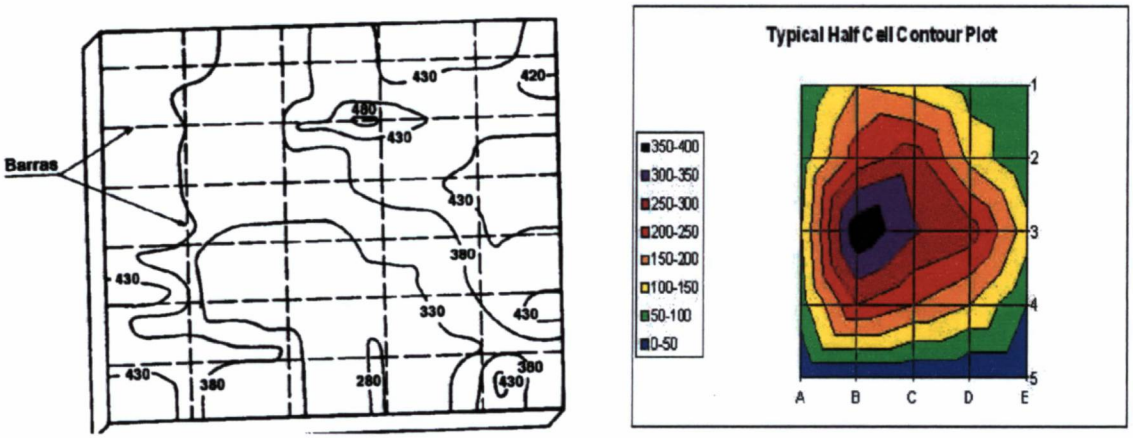


FIGURA 11 - EXEMPLOS DE MAPEAMENTO DE POTENCIAIS SOBRE LAJES DE CONCRETO ARMADO

Pela utilização do mapeamento de potenciais é possível identificar as zonas mais corroídas (anódicas) e as menos ou nada corroídas (catódicas), o que serve de base para a execução de reparos nas armaduras e no concreto.

Há várias vantagens em se realizar o acompanhamento dos valores de potencial de corrosão ao longo do tempo. Este procedimento permite evidenciar a

sensibilidade da técnica em registrar mudanças no processo eletroquímico de corrosão (devidas às alterações significativas dos potenciais), o que pode ser muito interessante para o monitoramento de estruturas, tendo-se em mente que as medidas devem ser feitas sempre nos mesmos locais previamente determinados[2]. É em investigações laboratoriais, no entanto, que o registro do potencial *versus* tempo tem se mostrado particularmente útil[54].

2.5.1.4. Critérios de avaliação da corrosão

A norma ASTM C876-91[69] indica, em seu apêndice, parâmetros de orientação para avaliação da probabilidade de corrosão em estruturas de concreto armado, de acordo com o potencial medido em relação ao eletrodo ESC. Estes valores, transcritos na Tabela 7, são extensivamente empregados, nacional e internacionalmente, como padrões de referência[69].

TABELA 7 - PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DE CORROSÃO EM FUNÇÃO DO POTENCIAL, PARA O ELETRODO ESC

POTENCIAL MEDIDO EM RELAÇÃO AO ELETRODO ESC	PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DE ATIVIDADE CORROSIVA
Mais positivo (maior) que –200 mV	Menor que 10%
Entre –200 mV e –350 mV	Incerta
Mais negativo (menor) que –350 mV	Maior que 90%

Os valores citados referem-se aos potenciais de redução, conforme recomendações realizadas na 17ª Conferência da *International Union of Pure and Applied Chemistry* (*IUPAC*)[54].

WOLYNEC & ESCALANTE (1980)[81] informam que o potencial de redução do eletrodo ESC, com relação ao eletrodo padrão de hidrogênio, é igual a +316 mV. GENTIL (1982)[82] fornece +241 mV como o potencial de redução do eletrodo ECS em relação ao de hidrogênio.

Com base nestes valores, podem-se obter os limites estabelecidos pela

ASTM C876-91[69] equivalentemente ao eletrodo ECS, por meio de simples cálculos matemáticos baseados no esquema da Figura 12[2].

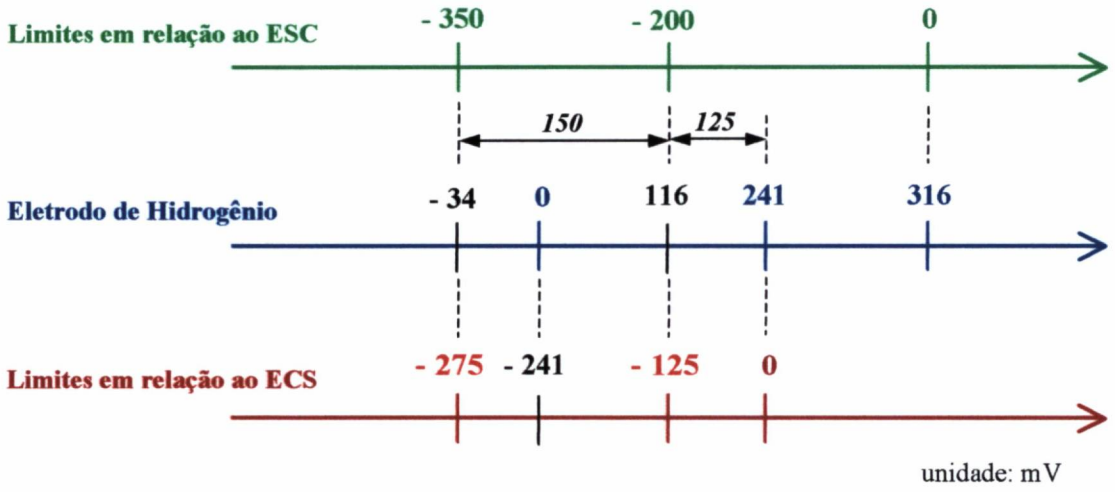


FIGURA 12 - ESQUEMA PARA DETERMINAÇÃO DOS LIMITES DE POTENCIAL PARA O ELETRODO ECS

Desta forma, os valores de referência para se determinar a probabilidade de corrosão, em relação ao eletrodo ECS, são os mostrados na Tabela 8[2].

TABELA 8 - PROBABILIDADE DE CORROSÃO EM FUNÇÃO DO POTENCIAL, PARA O ELETRODO ECS

POTENCIAL MEDIDO EM RELAÇÃO AO ELETRODO ECS	PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DE ATIVIDADE CORROSIVA
Mais positivo (maior) que –125 mV	Menor que 10%
Entre –125 mV e –275 mV	Incerta
Mais negativo (menor) que –275 mV	Maior que 90%

NOTA: Tabela elaborada a partir de dados da norma ASTM C876-91[69].

Para efeitos práticos, pode-se considerar que para valores de potencial maiores que –125 mV, a chance de estar ocorrendo atividade corrosiva é muito pequena, senão praticamente nula; pode-se dizer que nesta região, o metal encontra-se num estado passivo (presença de camada de óxido passivante, protetora). Para valores intermediários a –125 e –275 mV, nada se pode afirmar a respeito da corrosão, no

sentido de ela estar acontecendo ou não; um cp que apresente potencial de corrosão situado neste intervalo pode tanto apresentar recuperação de sua camada passivante, como avançar para o desenvolvimento de uma corrosão ativa. Finalmente, para potenciais menores que –275 mV, certamente existe atividade corrosiva nas barras de aço; tanto quanto menor que –275 mV for este valor, mais intenso deve ser o grau de corrosão sofrido pela armadura[2].

À parte a técnica de potenciais de corrosão ser adequada para indicar alterações no estado corrosivo da armadura, vários pesquisadores[72, 74, 75, 80] criticam os critérios propostos por VAN DAVEER (1975)[73] e incluídos na ASTM C876-91[69], apesar de serem largamente utilizados. Essas críticas quase sempre se baseiam na imensa gama de variáveis proporcionadas pelo concreto (resistividade, espessura de cobrimento da armadura, ocorrência de carbonatação, presença de cloretos, teor de umidade, etc.), as quais podem influenciar, decisivamente, as leituras de potencial.

As críticas mais duras são de ELSENER et al. (1990)[83], que dizem que a identificação da corrosão em concreto em função de um valor de potencial fixo (-350 mV ESC), "não existe".

Segundo a maioria desses autores, alguns deles embasados em experimentos laboratoriais, os critérios da ASTM C876-91[69] são mais indicados para casos de corrosão causada pela ação de íons cloreto no concreto armado.

2.5.1.5. Vantagens e desvantagens da técnica

CASCUDO (1997)[54] fornece uma lista contendo uma série de vantagens e desvantagens desta técnica, a maior parte delas concordando com a opinião de outros pesquisadores.

2.5.1.5.1. Vantagens

- É útil na identificação de áreas potencialmente anódicas, com grande

risco de corrosão, servindo-se para a delimitação de áreas comprometidas. Também, podem ser identificadas as zonas passivas, com pouca probabilidade de apresentarem atividade corrosiva[75];

- permite observar a evolução das áreas anódicas com o passar do tempo, por meio do monitoramento (mapeamento) periódico da extensão destas áreas[2];
- é uma técnica sensível para detectar alterações na superfície da armadura (despassivação, por exemplo) pela mudança súbita dos valores de potencial monitorados ao longo do tempo[72];
- pode-se estudar os gradientes de potencial em trechos adjacentes da estrutura com o intuito de se ter uma indicação da intensidade do processo corrosivo[54];
- é uma técnica não destrutiva, além de poder ser utilizada *in situ* descomplicadamente[73];
- pode-se lançar mão do mapeamento de potenciais para se planejar reparos em uma estrutura, uma vez que este procedimento serve para identificar zonas teoricamente comprometidas, antes mesmo da ocorrência de qualquer anomalia aparente[84];
- as medidas de potencial de corrosão são ferramentas bastante importantes para a adequada previsão, implantação, manutenção e controle de sistemas de proteção catódica aplicados a estruturas de concreto armado[84]; e
- é uma técnica que apresenta execução de medições relativamente rápida e fácil, além de necessitar de equipamentos simples e de custo não elevado[54].

2.5.1.5.2. Desvantagens

- Sua utilização torna-se inadequada para se avaliar a cinética do processo

eletroquímico, em virtude da técnica não fornecer dados quantitativos da taxa de corrosão[74];

- a técnica indica apenas zonas prováveis de corrosão na estrutura[80];
- apresenta limitações em casos onde o cobrimento de concreto tiver elevada resistividade elétrica, como em casos em que a camada superficial de concreto for isolante (como camadas extremamente secas ou carbonatadas) ou contiver membranas ou revestimentos aplicados (pintura, resinas poliméricas, impermeabilizantes betuminosos, etc.)[83, 85];
- as leituras de potencial podem apresentar-se com desvio bastante grande no caso de medições de estruturas com espessuras de cobrimento elevadas ou heterogêneas ou ainda com resistividade elevada[83];
- os resultados obtidos da técnica variam bastante com a umidade do concreto. Regiões mais úmidas tendem a apresentar valores mais negativos de potencial, enquanto que pontos mais secos, valores mais positivos[84];
- a presença de cloretos ou carbonatação na estrutura pode influir nos valores de potencial de corrosão medidos. O cloreto tende a tornar o potencial mais negativo, enquanto que a carbonatação tende a torná-lo mais positivo[54];
- os valores de potencial de corrosão também podem ser acentuadamente distorcidos pela existência de correntes de fuga nas estruturas de concreto armado[84];
- a interpretação dos resultados fornecidos por esta técnica deve ser cuidadosa, em virtude da enorme gama de variáveis que podem influenciar as medidas de potencial em estruturas de concreto armado. Por isso, tanto as medidas como sua interpretação devem ser realizadas criteriosamente por especialistas ou profissionais experientes ou credenciados[74, 83];

- os critérios de Van Daveer não têm aplicação imediata para uma corrosão cuja causa primordial não tenha sido pela ação de cloretos. Assim, uma corrosão devida, eminentemente, à carbonatação, por exemplo, não deve ser avaliada com base nestes critérios[74];
- a técnica de potenciais de corrosão mostra grande dificuldade na identificação da morfologia do ataque corrosivo (corrosão generalizada, por pite)[54], apesar de alguns autores afirmarem que tal possibilidade existe[83];
- esta técnica não se aplica a estruturas com armaduras de aço galvanizado ou revestidas com epóxi, em virtude de ainda não ser bem conhecida a influência destes revestimentos nas medidas de potencial[85]; e
- é necessário que sempre exista continuidade elétrica nas armaduras, para que se possa obter resultados precisos do potencial de corrosão[78].

2.5.2. Técnica de Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIS)

A aplicação da técnica de EIS em sistemas aço-concreto fornece importantes informações acerca da corrosão das barras metálicas, inclusive sobre a cinética do processo corrosivo.

2.5.2.1. Histórico da técnica

Apesar da técnica de EIS já ser conhecida há muito tempo no âmbito da eletroquímica básica, apenas recentemente é que o seu uso no estudo da corrosão foi intensificado[86].

Os pioneiros do emprego da técnica de impedância eletroquímica no estudo da corrosão de armaduras em concreto, em 1981, foram os ingleses HLADKY et al., citados por CASCUDO (1997)[54]. Depois deles, durante essas últimas duas décadas, vários outros estudiosos, cientistas e grupos de pesquisa do mundo todo têm se

utilizado deste método para a obtenção de dados relativos à atividade corrosiva nas armaduras, principalmente, no que diz respeito a taxas de corrosão.

No Brasil, os primeiros registros de utilização da impedância para o estudo da corrosão de armaduras são atribuídos a VILELA, pesquisador do Instituto Nacional de Tecnologia (INT) citado por MIRANDA et al. (1990)[87], em estudos que datam do final dos anos oitenta. Cada vez mais esta técnica vem se consolidando no país, tendo grande aceitação no meio científico, principalmente, devido à sua confiabilidade.

2.5.2.2. Princípios da técnica

Segundo CASCUDO (1997)[54], a impedância de um circuito elétrico representa o nível de dificuldade que um sinal elétrico (que pode ser um potencial elétrico ou uma corrente elétrica) enviado a esse circuito encontra ao percorrê-lo. Trata-se, na verdade, de uma combinação de elementos passivos de um circuito elétrico, a saber: resistência, capacitância e indutância. Quando uma diferença de potencial (também chamada de tensão ou voltagem) alternada é aplicada a um circuito, a corrente elétrica resultante pode ser facilmente determinada pela utilização da Lei de Ohm ($V = I \cdot R$), com a substituição da resistência R pela impedância Z de cada elemento passivo em questão. Essas impedâncias podem ser expressas das seguintes formas[54]:

$$Z_R = R \qquad \text{EQUAÇÃO 6}$$

$$Z_C = \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C} \qquad \text{EQUAÇÃO 7}$$

$$Z_L = j \cdot \omega \cdot L \qquad \text{EQUAÇÃO 8}$$

onde:

Z_R: impedância resistiva;

Z_C: impedância capacitiva;

Z_L: impedância indutiva;

R: resistência;

$j = \sqrt{-1}$ (número complexo);

ω: freqüência angular ($\omega = 2.\pi.f$);

C: capacitância ($C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot A/l$, no caso de capacitor de placas paralelas);

L: indutância;

f: freqüência;

ε_0: permissividade elétrica no vácuo;

ε_r: permissividade elétrica relativa;

A: área das placas do capacitor; e

l: distância entre as placas do capacitor.

Com esta notação é possível se representar qualquer reatância (ou a impedância Z de uma combinação de reatâncias) como um vetor em um plano real-imaginário, também conhecido como diagrama de Argand[80].

Também, pode-se modelar a interface aço|concreto do sistema concreto armado por uma combinação de elementos passivos de um circuito elétrico. A análise da impedância, determinada pela relação entre os sinais emitidos (potencial) e recebidos (corrente), fornece importantes informações a respeito da corrosão, inclusive sobre a cinética do processo corrosivo[54].

O princípio básico da técnica de EIS consiste em aplicar um sinal alternado senoidal de pequena amplitude (+10 a +20 mV) a um eletrodo (que no caso é a armadura metálica em análise) inserido num eletrólito (que no caso é o concreto). Compara-se, então, a "perturbação" inicial (aplicada) com a resposta do eletrodo, pela medida da mudança de fase dos componentes de corrente e tensão e pela medida de suas amplitudes. Isto pode ser feito nos domínios de tempo ou nos domínios de freqüência, utilizando-se um analisador de espectro ou um analisador de resposta de freqüência, respectivamente[54, 75, 78].

CASCUDO (1997)[54] salienta que esta "perturbação" inicial é uma "perturbação" de potencial (ΔE), do tipo senoidal, que deve ser imposta no estado estacionário do sistema (estado com corrente I e potencial E definidos) e a resposta do eletrodo é uma corrente (ΔI), também senoidal, porém com uma diferença de fase ϕ em relação ao sinal aplicado. Portanto, a impedância (Z) mede a relação entre ΔE e ΔI[74].

Pode-se também proceder por meio do processo inverso, ou seja, aplicando-se uma corrente e obtendo-se um sinal na forma de potencial.

Matematicamente, o módulo da impedância (Z) é definido pela Equação 9, enquanto que o ângulo de fase da impedância (ϕ), pela Equação 10[88].

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \qquad \text{EQUAÇÃO 9}$$

$$\phi = \text{arctg}\frac{X_L - X_C}{R} \qquad \text{EQUAÇÃO 10}$$

Como a mudança de fase e a amplitude são fatores dependentes da freqüência (ω), os dados de impedância para o aço inserido no concreto são obtidos sob um largo intervalo de freqüências (entre 100 MHz e 1 mHz)[75].

2.5.2.3. Circuito equivalente

Com o intuito de se analisar a variação da impedância de uma célula eletroquímica com a freqüência (ω), é praxe no meio científico considerar-se um circuito equivalente hipotético, isto é, uma combinação de elementos de circuito que se comporte de maneira similar ao eletrodo de corrosão[89].

Vários circuitos equivalentes foram propostos, nestes últimos vinte anos, por diversos pesquisadores ou grupos de pesquisa. Um dos primeiros circuitos sugeridos, e talvez o mais conhecido, é o de autoria de RANDLES apud CASCUDO (1997)[54], o qual está representado na Figura 13.

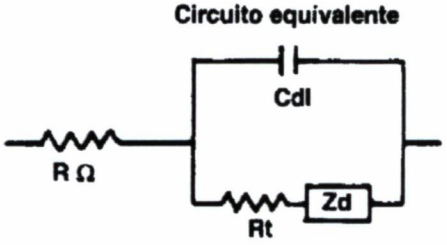


FIGURA 13 - CIRCUITO EQUIVALENTE DE RANDLES

Neste circuito, R_Ω representa a resistência da solução e do filme do produto de corrosão – ou, segundo SAGUÉS (1987)[90], a resistência ôhmica do eletrólito entre o ponto sensitivo de tensão do eletrodo de referência e a interface eletrodo-eletrólito. A interface de corrosão é representada por três variáveis: C_{dl}, que é a capacitância da dupla camada elétrica resultante de íons e moléculas de água adsorvidos, devido à diferença de potencial entre o eletrodo de corrosão e a solução (ou eletrólito); R_t, que é a resistência à transferência de carga, a qual determina a taxa da reação de corrosão e é uma medida da transferência de cargas elétricas através da superfície do eletrodo; e Z_d é o termo relativo à impedância difusional.

FILDES, CHEN & ZHAN (1995)[91] ilustram a correlação do circuito equivalente simplificado (que não considera a impedância difusional) de Randles com um modelo de corrosão em um metal imerso num eletrólito, como pode ser visto na Figura 14[91].

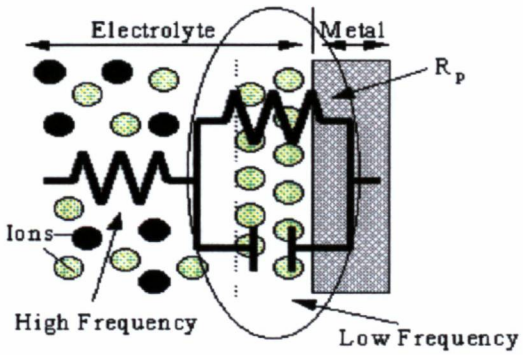


FIGURA 14 - MODELO DE CORROSÃO DE METAL IMERSO EM ELETRÓLITO

Em sistemas corrosivos controlados por ativação, R_t é medida pela técnica de resistência de polarização, já citada. Desta forma, R_t é então equivalente à resistência de polarização R_p, de modo que, substituindo-se R_p por R_t na equação de Stern-Geary (Equação 11), obtém-se a corrente de corrosão (I_{corr}), a qual permite a obtenção da taxa de corrosão esperada[89, 92].

$$I_{corr} = \frac{\beta_a \cdot \beta_c}{2{,}3 \cdot (\beta_a + \beta_c)} \cdot \frac{\Delta I}{\Delta E} = B \cdot \frac{\Delta I}{\Delta E} = \frac{B}{R_p} \qquad \text{EQUAÇÃO 11}$$

onde:

β_a e β_c : constantes de Tafel anódica e catódica, respectivamente;

ΔI : corrente aplicada ou variação da corrente;

ΔE : variação do potencial ou potencial aplicado.

B : constante de Stern-Geary;

R_p : resistência de polarização;

Conforme pode ser deduzido na Equação 11, a constante de Stern-Geary pode ser obtida das constantes de Tafel, que por sua vez podem ser determinadas experimentalmente (por métodos gráficos, matemáticos ou computacionais) ou podem ser retiradas da literatura para o sistema em questão[93].

GONZÁLEZ et al. (1985)[86] concluem que os valores de R_p obtidos a partir da equação de Stern-Geary constituem uma boa aproximação, mas não são exatos. Também, deve ser levado em conta que esta equação é deduzida a partir da suposição de existência de um sobrepotencial de ativação. Por esta razão, a constante B deve ser determinada experimentalmente, tomando-se valores entre 26 e 52 mV[94].

FELIU et al. (1998)[95] indicam a importância da difusão no cálculo de R_p, mostrando que não são obtidos valores exatos quando se utiliza técnicas habituais que não a EIS.

Deve-se, também, levar em conta que a corrosão das armaduras ocorre

geralmente com o metal no estado passivo, indicando que o mesmo encontra-se coberto por uma camada de óxido. Neste caso, tem-se:

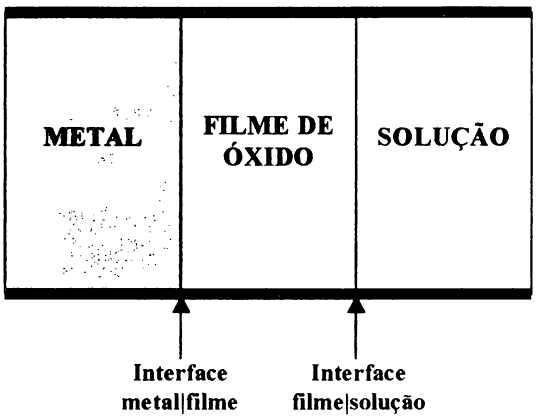


FIGURA 15 - INTERFACES EM UM SISTEMA METAL-FILME-SOLUÇÃO

$$E = \eta_{m/f} + \eta_f + \eta_{f/s} + E_0 \qquad \text{EQUAÇÃO 12}$$

onde $\eta_{m/f}$ é o sobrepotencial da interface metal|filme, η_f é o sobrepotencial através do filme, $\eta_{f/s}$ é o sobrepotencial da interface filme|solução, e E_0 é uma constante que depende apenas do eletrodo de referência.

A dependência entre $\eta_{m/f}$ e a corrente segue uma relação de Tafel, no entanto $\eta_{f/s}$ e E_0 podem ser considerados constantes (e iguais ao potencial de Flade, E_F)[96] nas situações de alta concentração de hidroxilas (OH^-), como no concreto[97].

A relação entre hf e a corrente depende do modelo escolhido para descrever o filme. Portanto, a utilização de uma relação simples de Tafel para relacionar potencial e corrente em um eletrodo sob processo corrosivo não é exata.

CASCUDO (1997)[54] ressalta ainda que, na prática, situações onde a taxa de corrosão é controlada, unicamente, por ativação, raramente ocorrem; quase sempre se têm variações no sistema em função de efeitos de concentração (difusão). Desta forma, para que esta influência seja contemplada no estudo, é necessário que se inclua no circuito equivalente o elemento relativo à impedância difusional Z_d (ou impedância Warburg, Z_W), em série com R_t. De acordo com vários autores, esta impedância

difusional descreve a impedância da concentração e dos processos relacionados com difusão, isto é, ela é resultante das limitações do transporte de massa[89, 90].

Especificamente para o caso do concreto armado, diversos pesquisadores têm proposto um circuito equivalente (Figura 16[54]) com base no circuito de Randles[80, 78, 92].

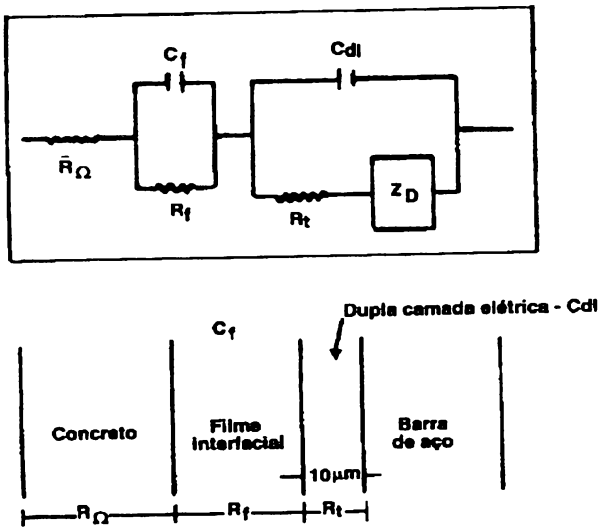


FIGURA 16 - CIRCUITO EQUIVALENTE PROPOSTO PARA O CASO DO CONCRETO ARMADO

Existe uma correspondência entre os elementos deste circuito e as partes do concreto e interface, a saber:

- R_Ω: resistência do concreto ($\Omega.cm^2$);
- R_f: resistência da interface ($\Omega.cm^2$); associada à presença de um filme na interface aço-concreto;
- R_t: resistência de transferência de carga na dupla camada elétrica ($\Omega.cm^2$);
- C_f: capacitância da interface ($F.cm^{-2}$);
- C_{dl}: capacitância da dupla camada ($F.cm^{-2}$);
- Z_d: impedância difusional ($\Omega.cm^2$).

Outras configurações de circuitos equivalentes foram estudadas por GARCIA et al. (2003)[98], os quais obtiveram resultados interessantes de *fitting* (ajuste) dos dados experimentais. Exemplos destes modelos podem ser vistos na Figura 17.

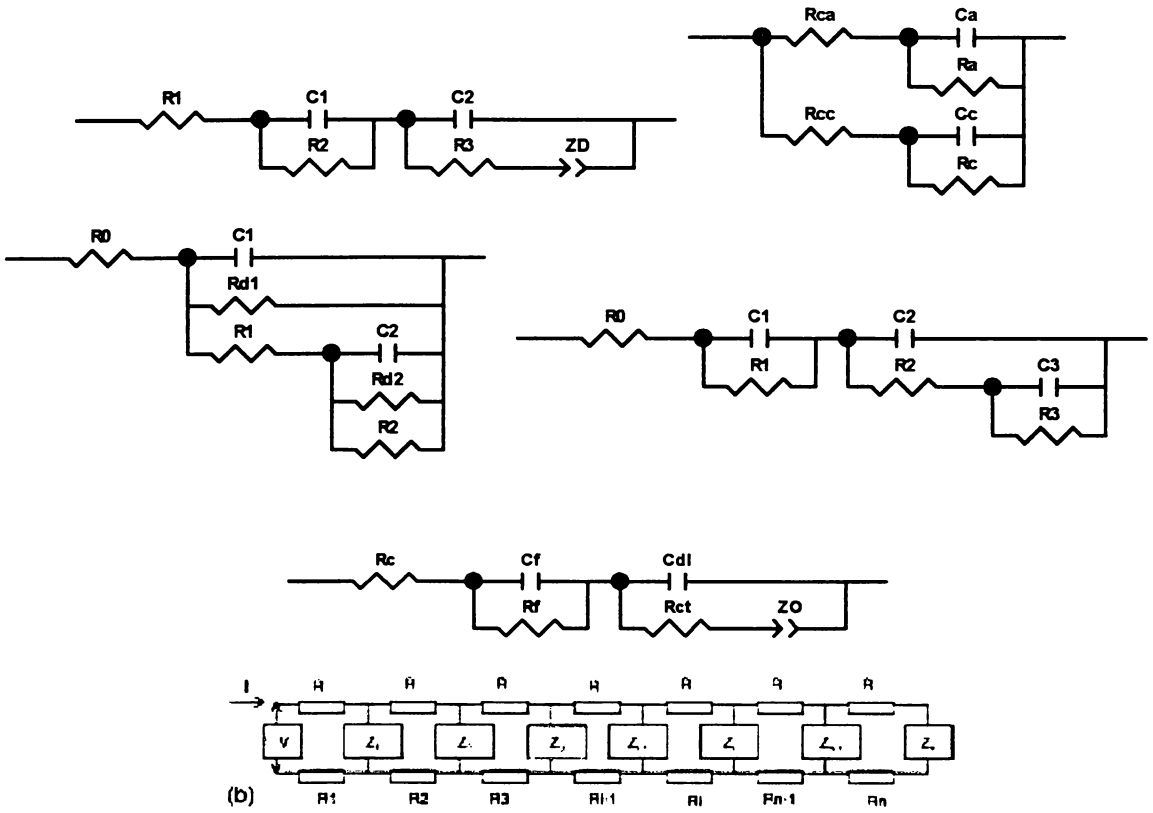


FIGURA 17 - OUTRAS CONFIGURAÇÕES DE CIRCUITOS ELÉTRICOS EQUIVALENTES PARA MODELAGEM DO SISTEMA AÇO-CONCRETO

2.5.2.4. Aplicação da técnica

As medidas de impedância podem ser realizadas pela utilização de um dispositivo de dois eletrodos de planos idênticos ou utilizando-se um potenciostato associado a um sistema de três eletrodos[54]. Muitos pesquisadores e profissionais envolvidos no estudo ou monitoramento da corrosão utilizam-se do sistema de dois eletrodos, em face de algumas vantagens de ordem prática por ele apresentadas[89]. Contudo, em se tratando do concreto armado, ANDRADE & CASTELO (1984)[99] são

categóricos ao recomendar o uso do sistema de três eletrodos.

As técnicas mais recentes para medição da impedância, por meio da utilização digital de sinais (técnica de correlação digital), permitem obter dados com elevada precisão. O equipamento primordial a ser utilizado nestas técnicas é o analisador de função de transferência (TFA), talvez mais conhecido como analisador de resposta de freqüência (FRA). Os FRA's utilizam técnicas digitais de geração de onda para a produção de sinais de baixa freqüência, com amplitude e freqüência estáveis. Esses analisadores possuem correlatores digitais que comparam o sinal emitido e o sinal recebido da célula de corrosão e calculam o módulo e o ângulo de fase da impedância[89].

Na utilização da técnica de correlação digital, há várias opções de configuração de equipamento. A Figura 18[54] mostra um tipo de arranjo, que é o preferido por alguns pesquisadores[89], no qual utiliza-se um amplificador de alta impedância de entrada para a amplificação do sinal que vem da célula de corrosão.

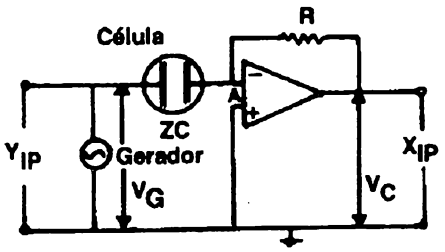


FIGURA 18 - CIRCUITO UTILIZANDO UM SISTEMA DE DOIS ELETRODOS PARA MEDIDA DE IMPEDÂNCIA

O FRA, neste caso, fornece dados da relação entre as tensões de saída do gerador (V_G) e do amplificador (V_C), e como a impedância de entrada do amplificador (R) é conhecida, pode-se calcular a impedância da célula de corrosão em análise (Z_C) por meio da Equação 13, obtida da Lei de Ohm.

$$Z_C = \frac{V_G}{V_C} \cdot R \qquad \text{EQUAÇÃO 13}$$

Além de poderem ser realizadas nos domínios de freqüência, as medidas de impedância também se podem fazer nos domínios de tempo, pela utilização de um analisador de espectro[99]. Neste método, uma onda contendo vários componentes de freqüência é aplicada ao sistema em teste e é então analisada. Segundo CASCUDO (1997)[54], em geral, as formas de onda mais adequadas são ruídos "pseudo-aleatórios" gerados digitalmente. De modo diferente das outras técnicas mencionadas, em que se aplica uma varredura de freqüência seqüencial (para cada tempo apenas uma freqüência é aplicada) ao sistema, nas medidas nos domínios de tempo aplicam-se freqüências simultâneas e obtêm-se, por correlação, respostas de tempo que são então transformadas matematicamente (utilizando-se transformada de Fourier, FFT) em resposta de freqüência.

Ao contrário das técnicas de medida nos domínios de freqüência, onde uma varredura de freqüência completa pode levar várias horas, ao se realizar as medições nos domínios de tempo se consegue um tempo de medida consideravelmente menor, justamente pelo fato da resposta do sistema de corrosão ser efetivamente medida para um número simultâneo de freqüências[89].

Uma configuração entre as possíveis de serem utilizadas para as medidas de impedância nos domínios de tempo pode ser vista na Figura 19[54].

O analisador de espectro possui, internamente, uma fonte de ruído, e tem dois canais (A e B). Uma vez que a variação de freqüência para o caso do concreto vai de 20 kHz a 16 mHz, este equipamento deve cobrir, com certa folga, esta faixa de variação[99]. Para executar as operações de transformada de Fourier, o analisador de espectro possui um microcomputador interno.

O potenciostato é o equipamento que coordena o sistema de eletrodos (que, no caso da Figura 19, são três). Ele atua como amplificador, uma vez que possui uma resistência variável externa que permite a transformação da corrente em voltagem. A saída do potenciostato é ligada ao canal A do analisador[99].

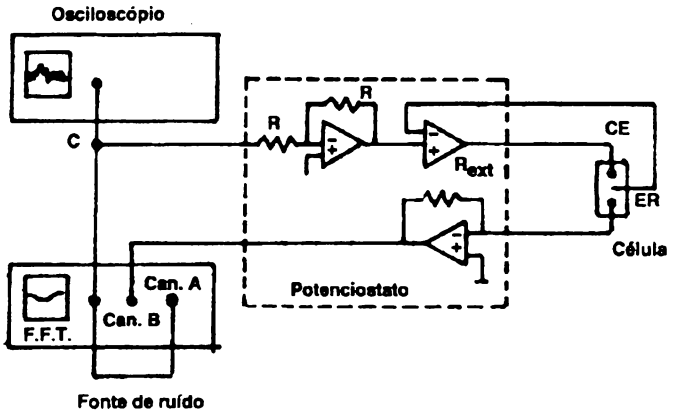


FIGURA 19 - CONFIGURAÇÃO DE SISTEMA DE TRÊS ELETRODOS UTILIZADO PARA MEDIDA DE IMPEDÂNCIA, POR MEIO DE ANALISADOR DE ESPECTRO

O osciloscópio é utilizado para monitoração do sinal gerado pelo analisador, garantindo o suprimento de uma amplitude inferior a 20 mV, pelo canal B do analisador de espectro, à entrada externa do potenciostato (ponto C)[99].

A Figura 20 mostra um esquema, de autoria de MCKENZIE (1987)[78] e reproduzido por CASCUDO (1997)[54], no qual é mostrado, resumidamente, o processo de obtenção dos dados de impedância, tanto para as medidas nos domínios de tempo quanto para as medidas nos domínios de freqüência.

DAWSON (1983)[75] fornece uma versão ainda mais global e, ao mesmo tempo, sintética deste esquema, conforme pode ser visto na Figura 21[54].

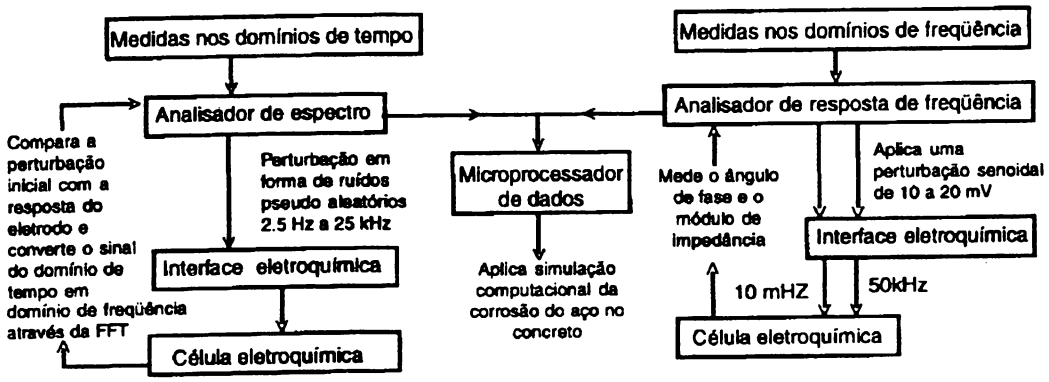


FIGURA 20 - ESQUEMA ILUSTRATIVO DO PROCESSO DE MEDIDA E OBTENÇÃO DE DADOS DE IMPEDÂNCIA NOS DOMÍNIOS DE TEMPO E DE FREQÜÊNCIA

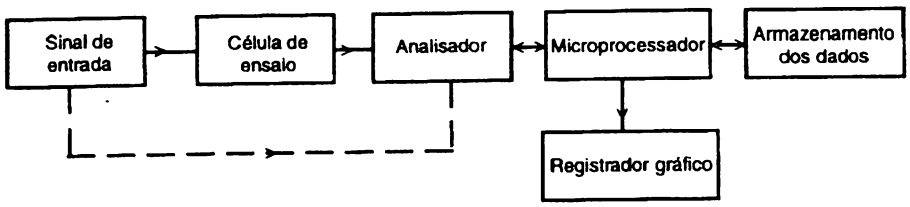


FIGURA 21 - DIAGRAMA DE BLOCOS PARA INSTRUMENTAÇÃO DA IMPEDÂNCIA

Podem-se enumerar as principais informações que podem ser extraídas do sistema de corrosão por meio da técnica de EIS:

- taxa ou velocidade de corrosão instantânea (i_{corr}), numa indicação quantitativa sobre a cinética do processo corrosivo[78];
- tipo de mecanismo do controle eletroquímico de corrosão, ou seja, é possível saber se o sistema em análise é controlado por ativação (controle cinético) ou por difusão (controle difusional)[75];
- morfologia do ataque, isto é, se ocorre corrosão localizada, generalizada, etc.[74];
- identificação e definição do estado da armadura (se passiva ou ativa), pela magnitude do arco capacitivo e do parâmetro R_t oriundos do diagrama de Nyquist que será abordado logo adiante[99]; e
- caracterização completa do processo de corrosão, pela determinação dos parâmetros de corrosão (elementos constituintes do circuito equivalente), os quais fornecem dados a respeito da resistividade do concreto e informações relacionadas a filmes superficiais sobre o aço (resistência, resistividade e espessura desses filmes)[75].

A identificação da morfologia do ataque pode ser realizada pelo acompanhamento da evolução da impedância do sistema ao longo do tempo. Uma diminuição abrupta da impedância está associada com a quebra do filme de óxido

passivante, o que dá indícios do início de uma corrosão localizada do aço inserido em concreto contaminado por cloretos[100].

2.5.2.5. Apresentação dos resultados

Os resultados de medições por EIS podem ser apresentados de diversas maneiras. A maior parte dos pesquisadores e profissionais que se utilizam desta técnica prefere a representação gráfica, cujos principais exemplos são os diagramas de Nyquist e de Bode[2].

2.5.2.5.1. Diagrama de Nyquist

Esta é a forma mais usada mundialmente para expressar os resultados obtidos através da técnica de impedância[74].

O diagrama de Nyquist trata-se de uma extensão do diagrama de Argand, no qual a freqüência é utilizada como variável. Ele consiste de uma série de pontos, cada um representando a grandeza e a direção do vetor de impedância para uma freqüência de excitação particular. Este diagrama, na verdade, é um plano complexo (real-imaginário) de coordenadas cartesianas, onde se tem, nas abscissas, a parte real (termos resistivos) e nas ordenadas, a parte imaginária (termos capacitivos ou indutivos)[7]. Os dados de impedância são, então, representados neste plano cartesiano sob uma larga variação de freqüência, gerando configurações típicas, de acordo com o mecanismo eletroquímico predominante[54].

Na Figura 22 é mostrado um diagrama de Nyquist, com sua curva típica na forma de semicírculo, juntamente com seu circuito equivalente ideal[54].

No eixo horizontal está representada a parte real da impedância (Z'), ou seja, o componente de resistência, enquanto que o eixo vertical representa o componente imaginário (Z"), a saber, a reatância capacitiva[54].

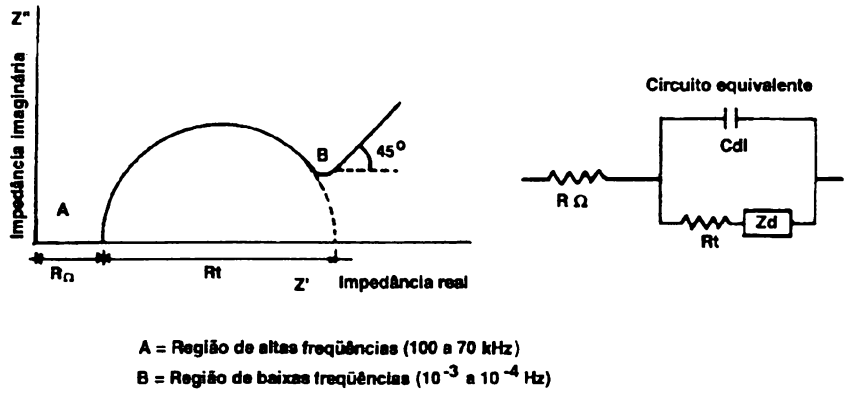


FIGURA 22 - DIAGRAMA DE NYQUIST, COM SEU CIRCUITO EQUIVALENTE, MOSTRANDO O EFEITO DA IMPEDÂNCIA DIFUSIONAL

PROENÇA (1998)[101] destaca como característica fundamental do diagrama de Nyquist a facilidade de observação dos efeitos da resistência ôhmica em um sistema eletroquímico.

Desprezando-se a presença do componente de impedância difusional (Z_d) e considerando altas freqüências (acima de 10 kHz), o capacitor permite facilmente a passagem de corrente e, efetivamente, "põe R_t em curto", restando no diagrama apenas o efeito da componente ôhmica (R_Ω), devida ao concreto e ao filme interfacial[54]. Nas palavras de PROENÇA (1998)[101], esta resistência é obtida pela "leitura do valor resultante da extrapolação à esquerda, para baixo do eixo x, do semicírculo".

À medida que a freqüência decresce, o capacitor conduz cada vez menos corrente e, como resposta, obtém-se o semicírculo conhecido como "arco capacitivo". Para freqüências mais baixas (próximas de zero), o capacitor cessa de conduzir corrente e a impedância toma-se a soma de R_Ω e R_t, onde R_t é a resistência à transferência de carga (denotada graficamente pela extrapolação à direita do semicírculo até o eixo horizontal)[54].

Cita-se como vantagem deste diagrama o fato do formato semicircular típico da curva não variar com a mudança da resistência ôhmica, de forma que é possível se comparar os resultados obtidos de dois ensaios separados, realizados, por exemplo, com variações da posição dos eletrodos de referência ou variações das correntes de

perturbação do sistema[101].

Contudo, situações onde se pode desprezar Z_d raramente ocorrem na prática, uma vez que a taxa de corrosão dificilmente é controlada apenas por ativação[54]. Assim, torna-se necessária a inclusão da impedância Warburg (impedância difusional Z_W, a qual descreve a impedância da concentração e dos processos relacionados com difusão) no sistema, em série com R_t. Esta impedância apresenta-se como um número complexo dado pela Equação 14.

$$Z_W = \frac{\sigma}{\sqrt{\omega}} - j \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{\omega}} \qquad \text{EQUAÇÃO 14}$$

onde σ é o coeficiente de Warburg.

No diagrama, a impedância Z_W (ou Z_d) é representada por uma linha reta a 45° de ambos os eixos, na região de baixas freqüências[54]. A altas freqüências, o termo $1/\sqrt{\omega}$ é pequeno, uma vez que a impedância Warburg descreve um processo de transferência de massa envolvendo difusão iônica; conseqüentemente, esse tipo de impedância só é observado nas baixas freqüências[80].

Uma vez construído o diagrama de Nyquist, faz-se a extrapolação da parte direita do semicírculo até o eixo real (horizontal); o diâmetro do semicírculo é, então, a resistência à transferência de carga (R_t), que é equivalente à resistência de polarização (R_p), pela qual se pode determinar a taxa de corrosão (i_{corr}) pela equação de Stern-Geary (Equação 11). Então, utilizando-se esta equação com a substituição de R_p por R_t, obtém-se a velocidade de corrosão esperada[89].

Entretanto, a extrapolação à direita nem sempre é fácil de ser realizada (Figura 23, por exemplo), uma vez que a curva pode tomar uma forma semicircular imperfeita[54].

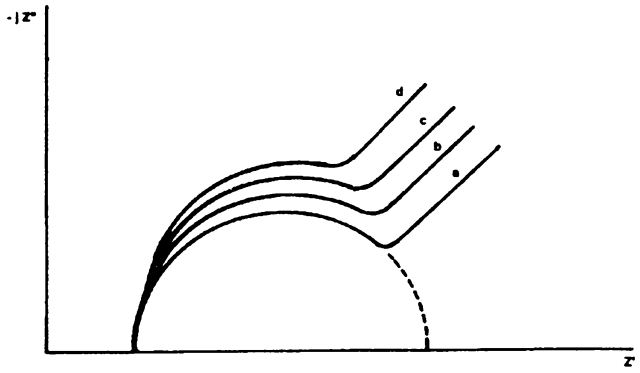


FIGURA 23 - VARIAÇÕES NA CURVA DO DIAGRAMA DE NYQUIST

CASCUDO (1997)[54] informa que, em se tratando de armaduras essencialmente passivas, o diagrama de Nyquist identifica claramente esse estado passivo, apesar de que outras informações (entre elas aquelas de caráter cinético) sejam mais difíceis de serem obtidas.

Outros inconvenientes apresentados por este diagrama são citados por PROENÇA (1998)[101]. Um deles é o fato da freqüência não ser explicitamente mostrada pelo gráfico. Além disso, apesar de que as resistências ôhmica e de polarização são obtidas fácil e diretamente do gráfico, "a capacitância do eletrodo só pode ser calculada após a determinação da freqüência".

2.5.2.5.2. Diagrama de Bode

O diagrama de Bode é uma forma menos usual para a representação dos dados de um ensaio de impedância eletroquímica, mas que apresenta algumas vantagens sobre o diagrama de Nyquist[2].

Este diagrama consiste de um plano de eixos ortogonais, onde no eixo das ordenadas se pode geralmente representar duas grandezas: o logaritmo da impedância (log $|Z|$) em ohms (Ω) e o ângulo de fase (ϕ) em graus (°); no eixo das abscissas, tem-se o logaritmo da freqüência angular (log ω), com ω em radianos por segundo (rad/s). Pode-se também representar nas abscissas o logaritmo da freqüência (log f, com f em

Hz)[54].

O principal benefício da utilização deste diagrama está no fato de que, em virtude da freqüência ser uma variável explícita no gráfico (eixo das abscissas), torna-se mais fácil observar como a impedância depende da freqüência. Outra vantagem está no fato de se poder cobrir uma vasta faixa de limites de impedância em um mesmo eixo, em virtude da representação logarítmica de |Z|; isto se torna particularmente útil quando se estudam sistemas eletroquímicos que atuam de forma capacitiva, onde a impedância depende fortemente da freqüência[101].

A Figura 24 representa um diagrama de Bode típico, do tipo [log |Z| *versus* log ω], para um sistema eletroquímico simples (circuito simples de Randles)[2].

É fácil de se observar que, para as altas freqüências, a resistência ôhmica domina a impedância do sistema, e o valor de log R_Ω pode ser determinado pela extrapolação do patamar horizontal inferior da curva em direção ao eixo y. Nas freqüências mais baixas, a impedância é governada pela soma de R_Ω e R_p, cujo valor (em log) pode ser lido pela extrapolação à esquerda do patamar superior da curva[2].

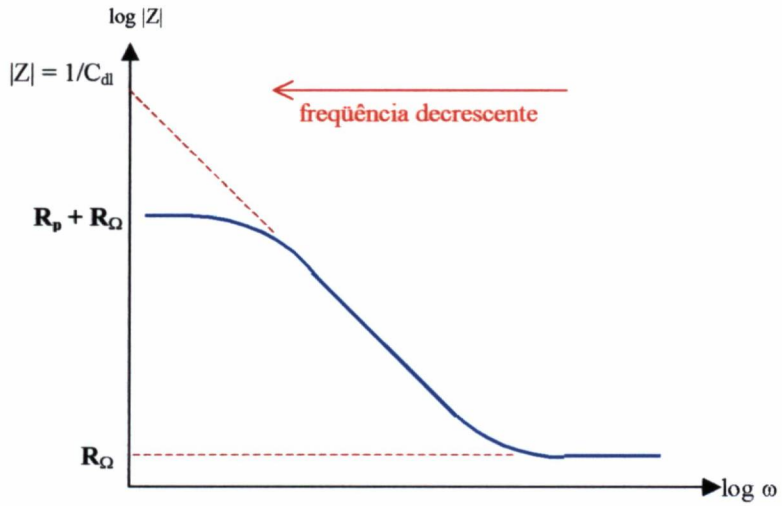


FIGURA 24 - DIAGRAMA DE BODE DO TIPO log |Z| *VERSUS* log ω

Na faixa de freqüências intermediárias, o gráfico assume a forma aproximada de uma reta de inclinação igual a -1, indicando que a impedância do

sistema é regida pela impedância capacitiva. O prolongamento desta reta em direção ao eixo das ordenadas fornece, para log $\omega = 0$, o valor da capacitância da dupla camada (C_{dl}) formada entre o eletrodo e o eletrólito. O módulo da impedância, neste ponto, é igual ao inverso da capacitância[101].

Como já foi comentado, o diagrama de Bode pode, também, ser representado pela variação do ângulo de fase ϕ em função da freqüência, conforme pode ser visto na Figura 25[2].

Nas regiões do diagrama onde o sistema eletroquímico comporta-se como um resistor, nos limites máximo e mínimo de freqüência, o ângulo de fase adquire valores quase nulos. Já em freqüências intermediárias, ϕ aumenta com o crescimento do componente imaginário da impedância, até a curva atingir um pico que representa a freqüência (em radianos) onde o ângulo de fase é máximo, ponto a partir do qual ϕ torna a diminuir[2].

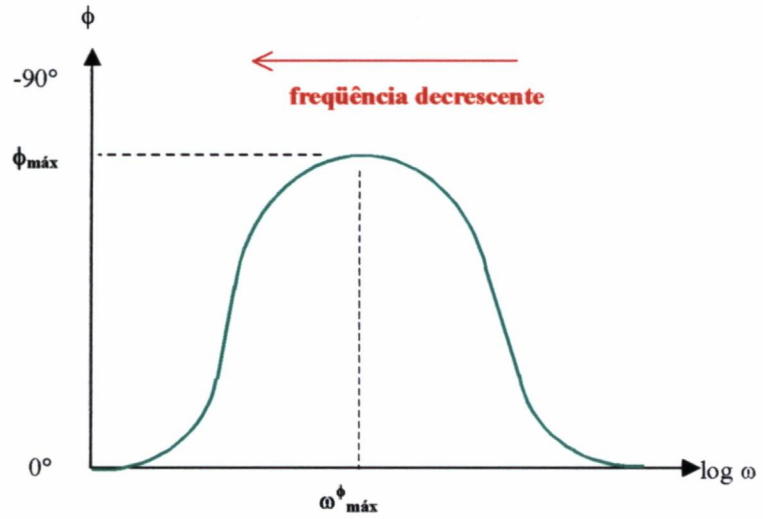


FIGURA 25 - DIAGRAMA DE BODE DO TIPO ϕ *VERSUS* log ω

No ponto de ângulo de fase máximo, a capacitância de dupla camada pode ser obtida da sua relação com a freqüência angular correspondente a $\phi_{máx}$, dada pela Equação 15[54].

$$\omega_{\phi_{máx}} = \frac{1}{C_{dl} \cdot R_p} \cdot \sqrt{1 + \frac{R_p}{R_\Omega}} \qquad \text{EQUAÇÃO 15}$$

Os valores de R_p e R_Ω necessários para resolução desta equação podem ser extraídos tanto do diagrama de Nyquist como do diagrama de Bode [log |Z| *versus* log ω][101].

A utilização dos diagramas de Bode oferece, como já foi comentado, um rol de vantagens sobre o diagrama de Nyquist[54]. Eles são, particularmente, úteis em casos onde a dispersão dos dados obtidos por um ensaio eletroquímico impede um ajuste adequado do semicírculo do diagrama de Nyquist. PROENÇA (1998)[101] também lembra que o diagrama de Bode que representa a impedância em função da freqüência permite uma extrapolação mais efetiva e precisa, para baixas freqüências, dos dados obtidos desde altas freqüências. Uma melhor descrição do comportamento de dependência com relação à freqüência, cujos valores são explícitos nos diagramas de Bode, é outra vantagem citada por este pesquisador.

CASCUDO (1997)[54], citando MANSFELD, identifica ainda outras vantagens dos diagramas de Bode. Uma delas é que todos os pontos que compõe as curvas são dispostos de forma igualmente distribuída, enquanto que no diagrama de Nyquist a maioria dos pontos localiza-se concentrada em uma ou em ambas as extremidades do espectro de freqüências.

Congruentemente com as afirmações de PROENÇA (1998)[101], no diagrama de Bode pode-se distinguir claramente as diferentes regiões de freqüência, a saber[54]:

- região de alta freqüência: caracterizada pela presença de películas de passivação ou outros tipos de revestimento sobre a armadura;
- região de freqüência média: reflete a mudança de condutividade elétrica do revestimento durante exposição em meio corrosivo; e
- região de baixa freqüência: onde a reação de corrosão na interface metal/revestimento pode ser estudada.

ANDRADE & CASTELO (1984)[99] explicam ainda que a representação de Bode é, reconhecidamente, mais sensível para detectar pequenas variações no espectro, dada por pequenas mudanças nos valores dos parâmetros que compõem o circuito equivalente (R_f, R_t, C_f, C_{dl}, etc.), e que muitas vezes tornam-se imperceptíveis na representação de Nyquist.

2.5.2.6. Critérios de avaliação da corrosão

Similarmente aos procedimentos de outras técnicas que também fornecem a taxa de corrosão estimada eletroquimicamente (i_{corr}), na EIS pode-se lançar mão deste dado para se ter uma idéia da gravidade do ataque corrosivo[54].

Por meio do monitoramento da impedância do sistema eletroquímico ao longo do tempo, é possível identificar-se a morfologia da corrosão: a mudança abrupta dessa impedância para valores substancialmente menores está ligada à despassivação da armadura, o que dá fortes indícios do início de uma corrosão localizada[100]. Já uma diminuição gradual da impedância provavelmente caracteriza uma corrosão generalizada[54].

Com relação à identificação do estado superficial da armadura em análise, CASCUDO (1997)[54] propõe que se compare, pelo diagrama de Nyquist, dois sistemas: um que se apresente num estado ativo de corrosão e outro passivado. Segundo seus estudos, no primeiro sistema serão observados valores de impedância da interface aço-concreto significativamente menores em relação ao segundo, característicos de um processo de transporte de carga elétrica na superfície do metal. Este autor também destaca que, num sistema passivo, os arcos capacitivos de transferência de carga são deficientemente desenvolvidos (denotando "grandes arcos"), o que sugere valores elevados de resistência de polarização; em sistemas ativos, os arcos tendem a se formar mais categoricamente, ainda que às vezes sejam necessárias extrapolações ou artifícios gráficos.

A presença da impedância Warburg (Z_W ou Z_d) caracteriza um controle

difusional do mecanismo eletroquímico de corrosão. No diagrama de Nyquist, este fato é evidenciado por uma distorção caracterizada por uma reta inclinada a aproximadamente 45° de ambos os eixos do gráfico, na zona de baixas freqüências. "A ausência dessa distorção resulta na formação completa do arco representante da interface de corrosão (arco de transferência de carga na dupla camada) o que indica que o sistema é puramente controlado por ativação"[54].

JOHN, SEARSON & DAWSON (1981)[102] afirmam ser possível determinar-se a espessura média de filmes superficiais (ou interfaciais) eventualmente presentes sobre a armadura, desde que se conheçam as suas resistividades.

2.5.2.7. Vantagens e desvantagens da técnica

Os estudos de CASCUDO (1997)[54] e de outros pesquisadores permitem que se enumere diversas vantagens e desvantagens da técnica de EIS.

2.5.2.7.1. Vantagens

- A técnica de EIS fornece informações sobre a cinética do processo, por meio da velocidade instantânea de corrosão (i_{corr})[89];
- é uma técnica precisa e reprodutível, bastante apropriada para ambientes de alta resistividade como é o caso do concreto, uma vez que leva em conta a queda ôhmica entre os eletrodos de trabalho e de referência[100];
- fornece dados a respeito do mecanismo do controle eletroquímico, indicando se o processo corrosivo se dá por ativação ou, como mais comumente se verifica no concreto, por fenômenos de concentração e difusão[78];
- é uma técnica sensível para detectar e caracterizar o estado da armadura (corrosão passiva ou ativa)[99];
- fornece informações sobre a morfologia do ataque (corrosão generalizada,

localizada, etc.)[74];

- é uma técnica não-destrutiva e não-perturbativa, uma vez que os sinais aplicados são de pequena amplitude, de forma que o potencial de corrosão do eletrodo em análise não é modificado após o ensaio[54];
- é bastante útil na determinação de alguns parâmetros característicos do processo de corrosão (resistência do eletrólito ou do concreto, resistência e capacitância de filmes interfaciais sobre o aço), de parâmetros eletroquímicos (capacitância da dupla camada e resistência de polarização), além da impedância difusional e do coeficiente de difusão[102];
- a presente técnica possibilita o acompanhamento preciso da evolução do estado passivo ou ativo das armaduras ao longo do tempo, constituindo-se em uma excelente ferramenta para monitorar a corrosão[54]; e
- constitui-se em um meio de monitoramento bastante útil na verificação do desempenho de diferentes tipos de reparo (quanto à sua habilidade para proteger o aço), bem como na verificação da eficiência de sistemas de proteção catódica destinados a estruturas de concreto armado[54].

2.5.2.7.2. Desvantagens

- A técnica ainda não tem aplicabilidade *in situ* nas estruturas de concreto armado, em virtude, principalmente, da dificuldade de distribuição uniforme da corrente ao longo das barras (principalmente quando o sinal enviado é de alta freqüência), de forma a ser muito difícil a determinação adequada da área que está sendo efetivamente polarizada[74];
- a técnica de impedância não calcula as constantes de Tafel (β_a e β_c), necessárias para estimar i_{corr} por meio da equação de Stern-Geary (Equação 11), havendo, portanto, a necessidade de métodos independentes para a determinação das mesmas[103], o que pode, às vezes,

não se justificar;

- eventualmente, podem-se obter resultados imprecisos durante os ensaios, o que torna complicada qualquer tentativa de extrapolação gráfica das curvas dos diagramas. Da mesma forma, se a extrapolação não for realizada criteriosamente, os dados obtidos podem ser irreais[74];
- o estudo de sistemas essencialmente passivos ou sistemas efetivamente controlados por difusão apresenta complicações no que se refere ao cálculo de R_p, face à dificuldade (ou até mesmo impossibilidade) de se efetuar as extrapolações gráficas[78];
- a técnica de EIS requer mais tempo para a obtenção dos resultados, equipamento mais complexo e de maior custo, e maior esforço computacional para obtenção dos dados, em comparação à técnica de resistência de polarização[103]; e
- necessita de mão-de-obra extremamente especializada[54].

2.6. CONSIDERAÇÕES SOBRE ALGUMAS TÉCNICAS ANALÍTICAS EMPREGADAS NO ESTUDO

Neste tópico serão descritos, resumidamente, os princípios básicos de operação e aplicação de algumas das principais técnicas analíticas adotadas no trabalho:

- análise térmica;
- difratometria de raios X; e
- microscopia eletrônica de varredura;

2.6.1. Análise térmica

O objetivo da análise térmica é investigar o comportamento dos materiais submetidos a uma determinada condição de temperatura. Dependendo das propriedades avaliadas, a análise térmica pode ser subdividida em[104]:

- análise termogravimétrica (TGA): medida da variação de massa em função da temperatura;
- análise termogravimétrica diferencial (DTG): medida da velocidade de variação da massa em função da temperatura; e
- análise térmica diferencial (DTA): medida da mudança da quantidade de calor liberado ou absorvido pela amostra; entre outras técnicas, não aplicadas neste projeto de pesquisa.

Aplicadas simultaneamente à estrutura de concreto, as técnicas de TGA e DTA permitem investigar, de forma contínua, as alterações de calor e massa envolvidas em função da temperatura e do tempo, tais como nas reações químicas de desidratação, carbonatação e descarbonatação tanto da calcita quanto de outros carbonatos, tal como o dolomítico; na perda de umidade da massa, oxidação e redução com perda de materiais voláteis; e outras transformações químicas cristalinas envolvidas[104].

No caso da análise de cimentos, importantes considerações podem ser feitas sobre os dados obtidos, principalmente, quanto à perda ao fogo, pois esta análise feita pelo método DTA/TGA é mais precisa do que pelo método gravimétrico. Além disso, têm-se como vantagens a pequena quantidade requerida de amostra, a possibilidade de identificação dos fenômenos ocorridos a cada intervalo de temperatura e a rapidez no tempo de execução do ensaio, o qual depende somente das taxas de aquecimento e resfriamento utilizadas[105].

2.6.2. Difratometria de raios X (DRX)

Um feixe de raios X, com determinada freqüência, incidindo sobre um átomo isolado, excitará os elétrons deste átomo, fazendo-os vibrar com a mesma freqüência do feixe incidente. Com a vibração, raios X serão emitidos em todas as direções e, também, com a mesma freqüência do feixe incidente. Se mais átomos encontram-se

regularmente espaçados no reticulado cristalino e o comprimento de onda da radiação incidente é da mesma ordem de grandeza deste espaçamento, haverá interferência construtiva para certos ângulos de incidência e interferência destrutiva para outros. Só ocorrerá reflexão se a distância extra percorrida por cada feixe for um múltiplo inteiro de l[8]. Assim, conforme representação esquemática da Figura 26, se o feixe difratado pelo segundo plano de átomos percorre uma distância SQ+QT a mais do que o feixe difratado pelo primeiro plano de átomos, a condição para a interferência construtiva será dada pela Equação 16[106].

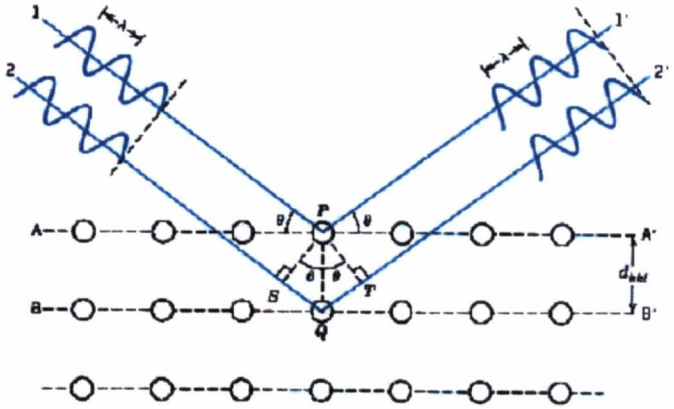


FIGURA 26 - ESQUEMA DA INTERAÇÃO DE UM FEIXE DE RAIOS X COM ÁTOMOS

$$n\lambda = \overline{SQ} + \overline{QT} = d_{hkl}\,\text{sen}\,\theta + d_{hkl}\,\text{sen}\,\theta = 2d_{hkl}\,\text{sen}\,\theta \quad \text{EQUAÇÃO 16}$$

onde n = 1, 2, 3, ...

Esta é a equação de Bragg, e os ângulos nos quais ocorre a difração são chamados ângulos de Bragg. Na condição em que a Equação 16 é satisfeita, resulta um feixe difratado de grande intensidade que pode ser facilmente detectado por um contador de radiação ou com um filme fotográfico[8].

Na análise de concreto é utilizado o método do pó. Neste método, a radiação incidente, monocromática, incide na amostra com o ângulo de incidência variando

durante a análise, desde pequenos até altos ângulos[106].

Na Figura 27 é mostrado um difratograma de raios X típico, resultante da análise de uma fase química encontrada na estrutura de concreto com suspeita de degradação por formação de etringita[8]. O padrão relativo à etringita foi extraído do banco de dados do *International Centre for Diffraction Data* (*ICDD*).

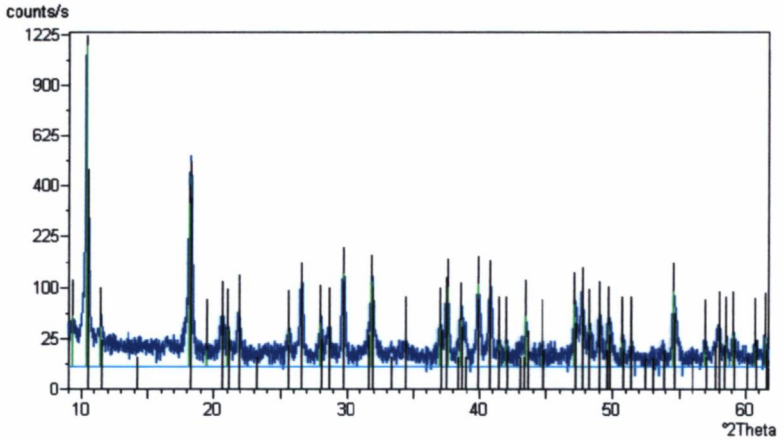


FIGURA 27 - DIFRATOGRAMA DE RAIOS X CORRESPONDENTE À FASE ETRINGITA, JUNTO COM O PADRÃO DE ETRINGITA DO *ICDD* (LINHAS PRETAS)

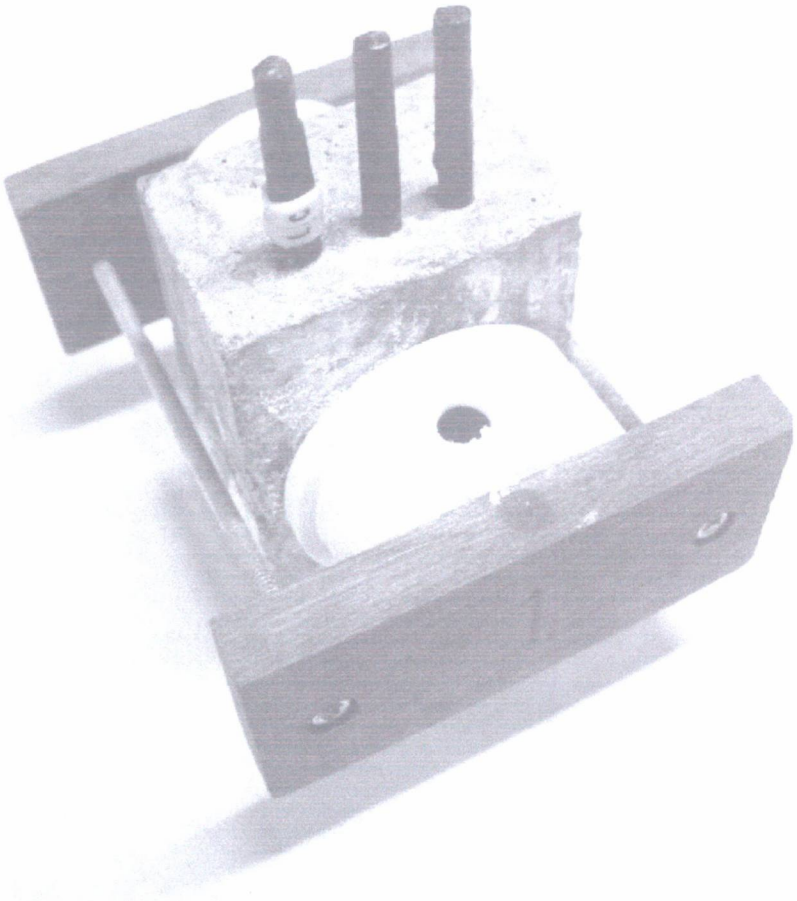
Além da identificação das fases do cimento, trabalhos de acompanhamento da lixiviação de estruturas de concreto, pela variação da dissolução de $Ca(OH)_2$ em relação à profundidade da amostra, vêm sendo apresentados na literatura[46].

2.6.3. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Na análise por MEV, um feixe eletrônico varre a superfície da amostra enquanto o sinal resultante detectado é analisado em fase com o feixe de varredura. Os principais sinais detectados são os elétrons secundários, elétrons retro-espalhados e raios X. A imagem topográfica é formada quando os elétrons secundários saídos das primeiras camadas da amostra chegam ao detector. Na geração desta imagem, sombras são formadas devido às faces da amostra voltadas para o detector apresentarem sinais mais intensos do que os das faces opostas a este. Além dos sinais obtidos pelos

elétrons secundários, elétrons retro-espalhados também podem ser utilizados pela técnica, neste caso, para obter informação de núcleos atômicos mais pesados constituintes da amostra. Neste tipo de imagem perdem-se informações topográficas, ou seja, de relevo da amostra. Também, raios X podem ser gerados a partir da interação do feixe eletrônico incidente do equipamento com os elétrons da amostra. Esta interação pode gerar raios X de vários comprimentos de onda (policromáticos, radiação branca ou contínua), pela colisão eletrônica ou raios X característicos do elemento químico analisado, monocromáticos para todos os efeitos, devido à excitação eletrônica dos átomos. Amostras eletricamente isolantes devem ter um filme fino condutor na sua superfície. Normalmente, são utilizados filmes do metal ouro ou do elemento carbono, em espessuras da ordem de 10 μm, depositados por evaporação catódica ou térmica[107].

A vantagem do emprego desta técnica está na maior quantidade de informações pertinentes, tal como a visualização de fases amorfas e cristalinas, provenientes ou não da degradação do concreto, em conjunto com a análise química elementar da microrregião considerada[8].



PROC 3 DIMENTO EXPERIMENTAL

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo são descritos os procedimentos utilizados na etapa experimental do trabalho, que abrange desde a caracterização dos insumos e a confecção das misturas até o ensaio de cp's de concreto e a avaliação do desempenho dos materiais em campo.

3.1. CARACTERIZAÇÃO DOS INSUMOS

Os materiais utilizados na confecção dos concretos e na produção dos cp's destinados a ensaios e análises em laboratório foram adquiridos em lojas de materiais de construção da região de Curitiba, ou foram fornecidos como amostras gratuitas de seus fabricantes.

A fim de conhecer os materiais comumente utilizados na cidade de Aracaju, foram trazidas amostras de agregados e cimento comercializados na região metropolitana da capital sergipana, as quais também foram caracterizadas.

3.1.1. Aglomerantes

Para a realização dos estudos foram utilizados três tipos de cimento Portland, produzidos em indústria cimenteira da região metropolitana de Curitiba:

- CPII-F 32 (cimento Portland composto com adição de fíler, com resistência característica mínima de 32 MPa aos 28 dias);
- CPII-Z 32 (cimento Portland composto com adição de pozolana, com resistência característica mínima de 32 MPa aos 28 dias);
- CPV-ARI RS (cimento Portland de alta resistência inicial, resistente a sulfatos).

Também, foi analisado cimento do tipo CPII-F 32 adquirido na região de Aracaju, o qual foi utilizado em dosagens experimentais destinadas à fabricação de

artefatos de concreto em Sergipe.

3.1.1.1. Caracterização físico-química

Na Tabela 9 são informadas as análises químicas realizadas para caracterização nos cimentos, bem como as respectivas normas técnicas que as regulamentam. O intuito principal foi identificar e determinar, quantitativamente, os principais compostos químicos presentes, incluindo aqueles que têm algum tipo de influência na vida útil das estruturas de concreto.

TABELA 9 - ANÁLISES QUÍMICAS, E SUAS RESPECTIVAS NORMAS, REALIZADAS NOS CIMENTOS

ANÁLISE REALIZADA	REFERÊNCIA	TÍTULO
Perda ao fogo	NBR 5743/89[108]	Cimento Portland - Determinação da perda ao fogo
Resíduo insolúvel	NBR 5744/89[109]	Cimento Portland - Determinação de resíduo insolúvel
Teor de SO_3	NBR 5745/89[110]	Cimento Portland - Determinação de anidrido sulfúrico
Teor de Na_2O, K_2O	NBR 5747/89[111]	Cimento Portland - Determinação de óxido de sódio e óxido de potássio por fotometria de chama
Teor de CaO livre	NBR 7227/89[112]	Cimento Portland - Determinação de óxido de cálcio livre pelo etileno glicol
Análise química	NBR 8347/92[113]	Cimento Portland pozolânico, cimento Portland comum e cimento Portland composto com adições de materiais pozolânicos - Análise química - Método de referência
Teores de Al_2O_3, SiO_2, Fe_2O_3, CaO, MgO	NBR 9203/85[114]	Cimento Portland comum e clínquer - Análise química por complexometria

A determinação do equivalente alcalino (Na_2O eq.) foi realizada segundo método descrito por MEHTA & MONTEIRO (1994)[1].

Na Tabela 10 estão indicados os testes físicos realizados nos aglomerantes, cujo objetivo foi conhecer algumas propriedades do material que são importantes para o desenvolvimento dos estudos de dosagem dos concretos.

Para verificação do desempenho mecânico dos aglomerantes, foram

realizados ensaios para determinação da resistência à compressão de cp's cilíndricos de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, confeccionados com argamassa preparada com areia normal e com os cimentos em análise. O procedimento de ensaio é regulamentado pela norma NBR 7215/96[115].

TABELA 10 - ANÁLISES FÍSICAS, E SUAS RESPECTIVAS NORMAS, REALIZADAS NOS CIMENTOS

ANÁLISE REALIZADA	REFERÊNCIA	TÍTULO
Resíduo na peneira #325	NBR 9202/85[116]	Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura por meio da peneira 0,044 mm (número 325)
Resíduo na peneira #200	NBR 11579/91[117]	Cimento Portland - Determinação da finura por meio da peneira 75 micrômetros (número 200)
Tempos de pega	NBR 11581/91[118]	Cimento Portland - Determinação dos tempos de pega
Expansibilidade à quente	NBR 11582/91[119]	Cimento Portland - Determinação da expansibilidade de Le Chatelier
Massa específica	NBR NM 23/01[120]	Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação de massa específica
Finura	NBR NM 76/98[121]	Cimento Portland - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine)

Os resultados da caracterização físico-química e ensaio mecânico dos cimentos foram confrontados com os limites estabelecidos nas respectivas normas (NBR 5733/91[25] - Cimento Portland de alta resistência inicial; NBR 5737/92[30] - Cimentos Portland resistentes a sulfatos; NBR 11578/91[21] - Cimento Portland composto) ou nas referências bibliográficas e/ou com as especificações fornecidas pelo fabricante.

Além das análises de caracterização citadas, amostras dos cimentos também foram submetidas a análise por DRX, fluorescência de raios X (FRX), DTA e TGA.

O tamanho médio das partículas de cimento foi, adicionalmente, determinado para os quatro tipos de aglomerante. Utilizou-se um granulômetro à laser, marca Cilas, modelo 1064 (Figura 28a), segundo metodologia descrita no manual do equipamento[122]. A dispersão do pó dos materiais realizou-se em etanol absoluto, e foi

facilitada pelo uso de dispositivo ultra-som por, aproximadamente, 3 minutos.

A determinação da área superficial dos grãos dos cimentos CPII-F 32 proveniente de Aracaju e CPV-ARI RS, utilizados nas dosagens piloto, também foi realizada, pela técnica de adsorção de nitrogênio (BET), utilizando-se equipamento marca Quantachrome, modelo Nova 1200 (Figura 28b).

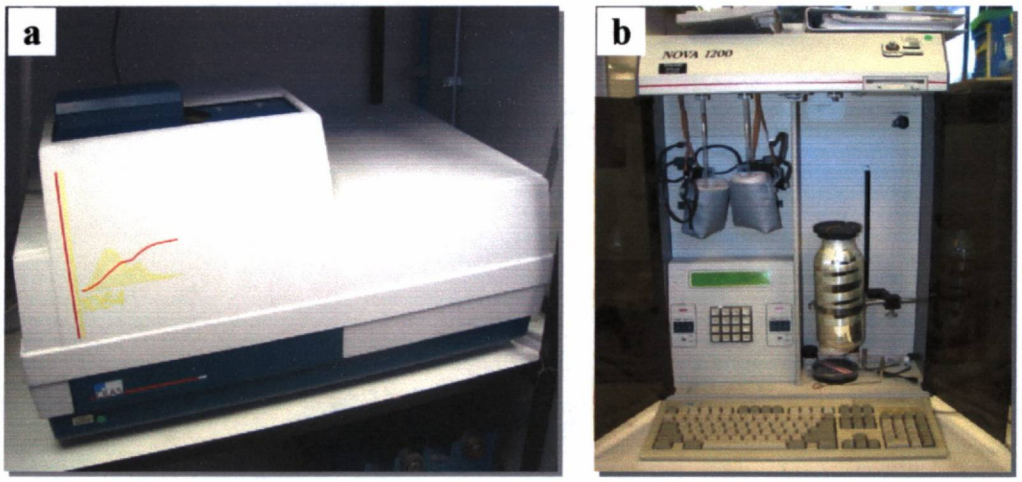


FIGURA 28 - EQUIPAMENTOS USADOS NA ANÁLISE DE CIMENTOS: A) GRANULÔMETRO À LASER; B) BET

3.1.1.1.1. Análise por FRX

Os cimentos foram analisados por esta técnica, que visa fornecer informações, qualitativas e quantitativas, sobre a composição química dos materiais. Cada amostra, constituída de 0,9 g de cimento e 9 g de pérolas de tetraborato de lítio (fundente) com diâmetro de 40 mm, foi analisada em equipamento Philips PW 2400.

3.1.1.1.2. Análise por DRX

A utilização desta técnica visa determinar as fases cristalinas presentes em amostras de material, originalmente em pó ou previamente pulverizado. As análises foram realizadas em um difratômetro da marca Philips, modelo X'Pert (Figura 29a),

tendo sido empregada radiação CuKα, com comprimento de onda de 1,54056 Å e filtro de níquel, tensão elétrica de 40 kV e corrente elétrica de 40 mA. Utilizou-se varredura angular 2θ de 5° a 90°, com passo de 0,02° por segundo. A identificação das fases presentes foi feita por intermédio dos cartões de referência do *ICDD*.

3.1.1.1.3. Análise térmica

Amostras com cerca de 150 mg de cada cimento foram submetidas a análise térmica (DTA e TGA), a fim de verificar-se as mudanças de calor e perdas ou ganhos de massa em função da temperatura, tanto no aquecimento como no resfriamento.

Para a análise térmica, utilizou-se um equipamento marca Netzsch, modelo STA 409 (Figura 29b). Os ensaios foram executados com varredura ascendente no aquecimento e varredura descendente no resfriamento, em modo dinâmico e adotando-se uma taxa de aquecimento/resfriamento constante e igual a 10°C/min. A amplitude térmica das análises variou entre a temperatura ambiente (aproximadamente 23°C) e 1500°C, em presença de gás inerte.

Tanto o procedimento de ensaio como a avaliação dos resultados da análise térmica foram realizados com base em orientações de TAYLOR (1990)[32].

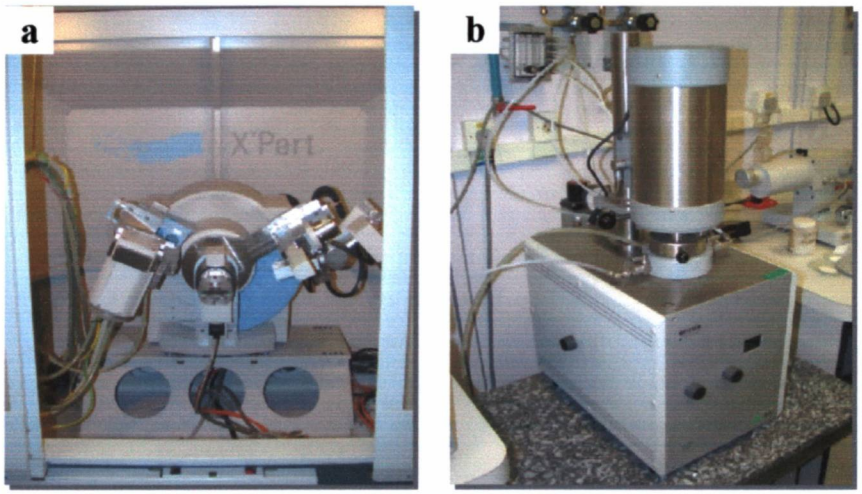


FIGURA 29 - EQUIPAMENTOS USADOS NA ANÁLISE DE CIMENTOS: A) DRX; B) DTA/TGA

3.1.2. Agregados

O agregado miúdo utilizado na confecção dos concretos em laboratório foi uma areia natural de rio, lavada, proveniente da região metropolitana de Curitiba. A Tabela 11 indica as análises físicas realizadas neste agregado para fins de sua caracterização.

TABELA 11 - ANÁLISES, E SUAS RESPECTIVAS NORMAS, REALIZADAS NOS AGREGADOS MIÚDOS

ANÁLISE REALIZADA	REFERÊNCIA	TÍTULO
Análise granulométrica, módulo de finura e diâmetro máximo	NBR 7217/87[123]	Agregados - Determinação da composição granulométrica
Teor de argila em torrões	NBR 7218/87[124]	Agregados - Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis
Material pulverulento	NBR 7219/87[125]	Agregados - Determinação do teor de materiais pulverulentos
Massa unitária solta	NBR 7251/82[126]	Agregado em estado solto - Determinação da massa unitária
Massa específica SSS e massa específica seca	NBR 9776/87[127]	Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman
Absorção de água	NBR NM 30/01[128]	Agregado miúdo - Determinação da absorção de água
Impurezas orgânicas	NBR NM 49/01[129]	Agregado fino - Determinação de impurezas orgânicas

Como agregado graúdo, utilizaram-se britas de graduação 0 (pedrisco) e 1, também originárias da região de Curitiba. As análises às quais os agregados graúdos foram submetidos, e suas correspondentes normas, são informadas na Tabela 12.

TABELA 12 - ANÁLISES, E SUAS RESPECTIVAS NORMAS, REALIZADAS NOS AGREGADOS GRAÚDOS

ANÁLISE REALIZADA	REFERÊNCIA	TÍTULO
Análise granulométrica, módulo de finura e diâmetro máximo	NBR 7217/87[123]	Agregados - Determinação da composição granulométrica
Material pulverulento	NBR 7219/87[125]	Agregados - Determinação do teor de materiais pulverulentos
Massa unitária solta	NBR 7251/82[126]	Agregado em estado solto - Determinação da massa unitária
Massa unitária compactada	NBR 7810/83[130]	Agregado em estado compactado e seco - Determinação da massa unitária
Absorção de água, massa específica SSS e massa específica seca	NBR 9937/87[131]	Agregado graúdo - Determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo

Os resultados obtidos foram confrontados com as recomendações da NBR 7211/83[132], que trata de agregados para concreto.

Também, amostras de agregados miúdo (areia natural) e graúdos (brita 1 e pedrisco) foram obtidas de fabricantes de artefatos de concreto da região metropolitana de Aracaju, e analisadas em laboratório a fim de verificar a sua qualidade e adequação para fabricação de concreto. As amostras eram representativas das jazidas existentes na região. Para o agregado miúdo proveniente de Sergipe, foram realizadas determinações da umidade crítica e do coeficiente de inchamento, segundo NBR 6467/87[133].

Para uma caracterização mais aprofundada dos agregados, também se realizaram análise petrográfica e ensaio de reatividade potencial.

3.1.2.1. Análise petrográfica

A fim de detectar a natureza mineralógica dos agregados, tanto de Curitiba quanto de Aracaju, foi realizada análise petrográfica nos mesmos, por meio da visualização de lâminas previamente preparadas em microscópio óptico com luz polarizada.

3.1.2.2. Reatividade potencial

Ensaios de reatividade potencial álcali-agregado foram realizados nos materiais adquiridos em Curitiba e utilizados nas dosagens preliminares, com o objetivo de verificar-se a propensão dos agregados à ocorrência de reações expansivas e a sua compatibilidade com os cimentos empregados.

As análises foram desenvolvidas segundo procedimento de ensaio adaptado e implantado no Laboratório de Materiais e Estruturas (LAME) sob número 1.02.01.11[134], e que tem como base o método acelerado NBRI[135] (sul-africano) e as normas NBR 9773/87[136] e ASTM C1260-01[137].

Neste teste, pequenos cp's prismáticos ("barrinhas") de concreto (Figura 30a), com dimensões de (2,5 x 2,5 x 28,5) cm e fabricados com agregados classificados, granulometricamente, conforme NBR 9773/87[136], foram submetidos ao envelhecimento acelerado por imersão em um banho preparado com solução de hidróxido de sódio (NaOH) 1N, a uma temperatura de (80 ± 5)°C, por um período de 28 dias (Figura 30b). As "barrinhas" tinham seu comprimento medido periodicamente, com o auxílio de um relógio comparador calibrado (Figura 30c), de forma a determinar-se o aumento da expansão em relação à dimensão inicial dos cp's.

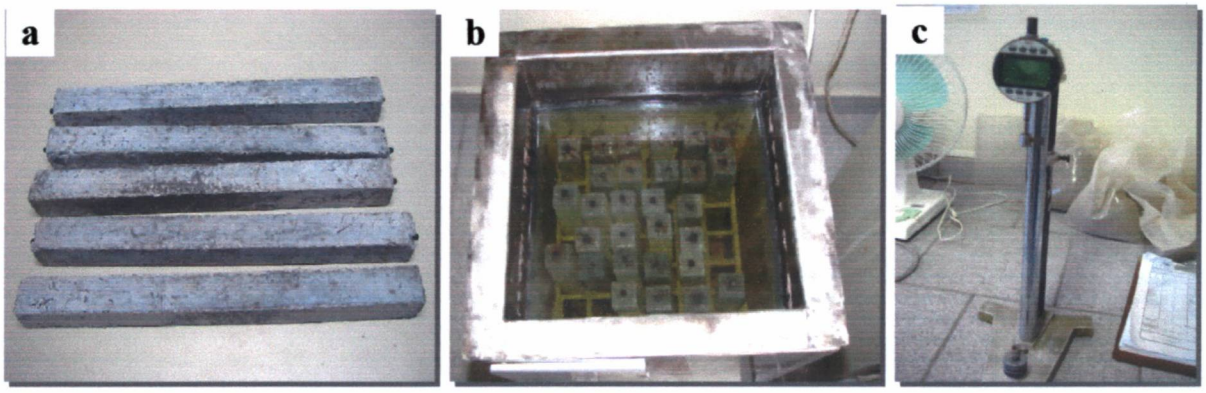


FIGURA 30 - ENSAIO DE REATIVIDADE POTENCIAL: A) CP'S PRISMÁTICOS; B) BANHO PARA ENVELHECIMENTO; C) RELÓGIO COMPARADOR USADO NA MEDIDA DA EXPANSÃO

As expansões medidas aos 16 e 28 dias foram avaliadas, a fim de se

classificar a intensidade da reatividade potencial com base em valores limítrofes pré-definidos. No apêndice da norma ASTM C1260-01[137] são fornecidas informações para a interpretação dos valores de expansão medidos, conforme segue:

- expansões menores que 0,10% aos 16 dias são indicativas de comportamento inócuo, na maioria dos casos;
- expansões maiores que 0,20% aos 16 dias são indicativas de comportamento potencialmente deletério;
- para expansões entre 0,10 e 0,20% aos 16 dias, não se pode afirmar com certeza se os agregados são inócuos ou deletérios. Neste caso, é importante prosseguir com o ensaio até os 28 dias, de forma a se poder avaliar a expansão dos cp's nesta idade.

Também foram realizados testes de reatividade nos materiais trazidos de Aracaju. Nestas análises, cp's adicionais contendo incorporação de, aproximadamente, 8% de sílica ativa foram moldados e ensaiados, com o intuito de se verificar a influência desta adição na redução das expansões dos concretos.

3.1.3. Barras de aço

Para a confecção de cp's de concreto armado destinados a ensaios eletroquímicos, foram utilizadas barras de aço para construção, também denominadas "vergalhões", da classe CA-50 (aço-carbono laminado a quente para concreto armado, com resistência característica à tração de 500 MPa), com diâmetro nominal de 6,3 mm.

Por ocasião do recebimento das barras, realizou-se inspeção visual e dimensional das mesmas, a fim de verificar o atendimento à norma NBR 7480/96[61]. Não foram realizados ensaios mecânicos nas barras, tendo sido adotadas as características informadas na *homepage* do fabricante.

3.1.4. Sílica ativa

A sílica ativa, utilizada como adição mineral em um dos traços de concreto, foi fornecida pelo fabricante em sacos de 20 kg, e amostras da mesma foram submetidas a testes físicos e químicos, a fim de determinar-se teores de SiO_2, Na_2O e K_2O, perda ao fogo, equivalente alcalino, umidade e massa específica, de acordo com as recomendações da norma NBR 13957/97[138]. Os resultados foram confrontados com as especificações e limites estabelecidos pela NBR 13956/97[139].

Adicionalmente, realizou-se análise do material por DRX, além da determinação da distribuição granulométrica das partículas (técnica à laser).

3.1.5. Resina epóxi

Em um dos traços de concreto utilizou-se resina de base epóxi, bi-componente, denominada Formulação FS-105. A mistura deste material incluiu uma dispersão aquosa de resina epóxi multifuncional (Araldite PZ 3902), um endurecedor ou agente de cura solúvel à base de amina (Hardener HZ 3802), um solvente (Texanol) e água. O preparo seguiu rigorosamente as recomendações do fabricante. Não foram feitas análises físico-químicas na mesma, sendo que os dados utilizados para correção dos traços foram aqueles constantes em catálogo técnico[140] fornecido pela empresa comercializadora do produto.

3.1.6. Aditivo superplastificante

Nos traços desenvolvidos na etapa de dosagens piloto utilizou-se um aditivo superplastificante à base de resina melamina-formaldeídeca, produto disponível comercialmente, o qual foi submetido a algumas análises, como determinação do pH, massa específica e teor de partículas sólidas, conforme NBR 10908/90[141].

3.2. PREPARATIVOS PARA AS DOSAGENS

A fim de se testar o desempenho dos concretos frente ao seu envelhecimento acelerado, planejou-se a moldagem de cp's prismáticos de concreto armado para realização de ensaios eletroquímicos. Para tanto, fazia-se necessária a inclusão de armaduras metálicas no interior dos cp's. Estas armaduras eram constituídas de vergalhões metálicos, previamente preparados.

3.2.1. Barras metálicas para cp's prismáticos

O preparo das barras metálicas para os cp's destinados às análises elétricas iniciou-se com o corte das mesmas em pedaços com 12,5 cm de comprimento. Ambas as extremidades de cada barra foram chanfradas num ângulo de aproximadamente 45°, por meio de um esmeril. Isto foi realizado de forma a evitar-se o surgimento de "efeitos de ponta", pela existência de cantos vivos, quando as barras estivessem no interior do concreto.

Em virtude da exposição ao ar atmosférico, as barras de aço para concreto armado adquirem uma camada de óxido passivante (não ativo), apresentando uma cor laranja característica de ferrugem. Esta camada, apesar de proteger o metal contra a corrosão, deve ser totalmente eliminada das barras, de forma a não interferir nos resultados/medições posteriores. Se as barras de aço forem utilizadas no estado em que se encontram como recebidas, tem-se a inclusão de mais uma variável no sistema eletroquímico, uma vez que cada uma delas certamente apresenta um estágio diferente de oxidação superficial. Desta forma, para extrair toda a camada de óxido, lançou-se mão do jateamento das barras, realizado em câmara própria para tal atividade. As barras receberam jato de granalha de aço por toda a sua superfície, até se obter um aspecto metálico brilhante, isentando-as de qualquer zona oxidada laranja. Para evitar-se o contato de substâncias que pudessem promover a oxidação em curto prazo (como o cloreto presente no suor, por exemplo), utilizaram-se constantemente luvas de látex

no manuseio das barras, as quais foram então acondicionadas no interior de um dessecador de vidro contendo sílica-gel como elemento desumidificador.

Após o jateamento, procedeu-se à pintura das extremidades das barras, a fim de se obter apenas um trecho exposto das mesmas, na sua parte central. O motivo de se fazer esta pintura é proteger a superfície das barras contra ação corrosiva em duas zonas distintas: no trecho localizado na região da interface entre o concreto e o ambiente, e na extremidade da barra que fica inserida no cp de concreto. No primeiro caso, pretendeu-se evitar o surgimento de atividade corrosiva nas barras devido à influência do ar atmosférico presente nas adjacências dos topos dos cp's; no segundo, procurou-se minimizar qualquer influência proveniente do "efeito de ponta" nas barras.

A tinta utilizada para a pintura consistiu de uma tinta de fundo ou acabamento, anticorrosiva, bicomponente, à base de "coaltar" (alcatrão de hulha) epóxi, curada com poliamida; apresenta textura semibrilhante, alta espessura, alto teor de sólidos (72 ± 2)% e, portanto, elevada viscosidade (100 – 130 UK). O seu preparo seguiu as instruções do fabricante (relação de mistura: 100,0 g do componente A e 25,4 g componente B). Para a obtenção da viscosidade desejada, não houve a necessidade de adição de solventes.

Primeiramente, foi pintada uma das extremidades de cada barra, pela imersão de aproximadamente 65 mm da sua extensão. As barras foram então colocadas para cura inicial e secagem ao ar ambiente (laboratório) por 24 horas. Com a tinta já seca ao toque, procedeu-se à pintura da outra extremidade, da mesma maneira que a anterior. Neste caso, entretanto, a extensão pintada foi de 25 mm, de forma que cada barra resultou com um comprimento exposto de aproximadamente 35 mm (conforme pode ser visualizado na Figura 31), o que fornece uma área geométrica exposta média, resultante na região central das barras, de aproximadamente 6,4 cm^2. Após mais um dia para secagem da tinta, as barras foram colocadas em estufa, com temperatura de (45 ± 5)°C, onde permaneceram por mais 24 horas, de forma a se obter a cura completa.

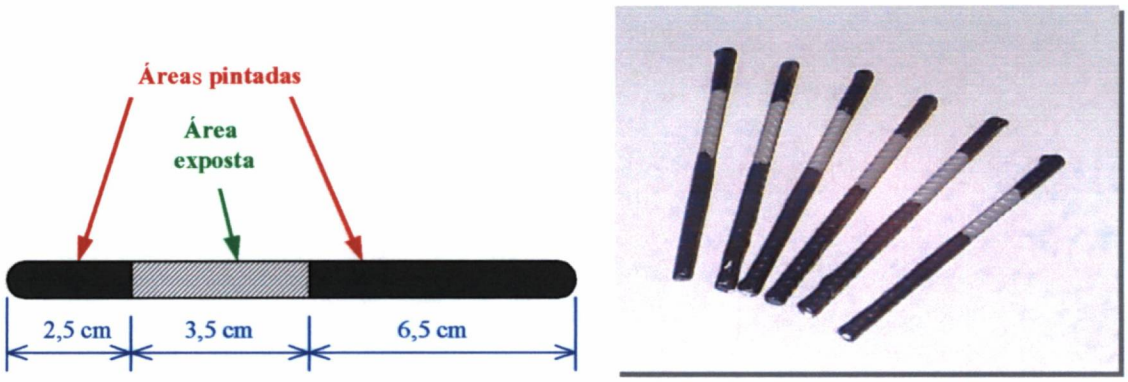


FIGURA 31 - BARRAS DE AÇO PREPARADAS PARA SEREM INCLUÍDAS NOS CP'S PRISMÁTICOS

3.2.2. Fôrmas para cp´s destinados a ensaios eletroquímicos

Como não existe normalização técnica que indique a forma ou dimensões de cp's de concreto armado para a execução de ensaios eletroquímicos, foram idealizados cp's prismáticos de pequenas dimensões, com base nos experimentos de diversos pesquisadores brasileiros e estrangeiros, dentre os quais pode-se destacar GU et al. (1999 e 2000)[142, 143], ALMEIDA & FERREIRA (2000)[144] e BAUER (1996)[145].

Foram elaboradas fôrmas de madeira, com capacidade para confecção de 10 cp's de dimensões iguais a 100 mm (altura), 71 mm (largura) e 49 mm (espessura). Um desenho esquemático da fôrma projetada pode ser visualizado na Figura 32a, enquanto que na Figura 32b tem-se uma foto dela já pronta e montada.

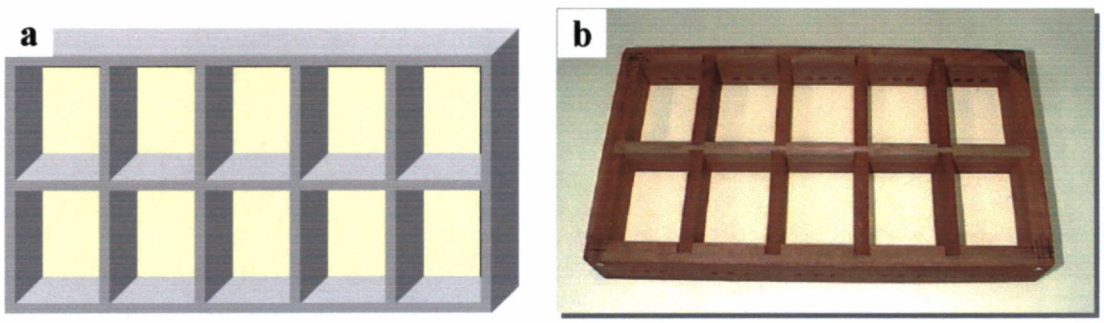


FIGURA 32 - FÔRMA DE MADEIRA PARA CONFECÇÃO DE CP'S PRISMÁTICOS

Para facilitar a posterior desmoldagem dos cp's e o reaproveitamento das fôrmas para confecção futura de novos cp's, previu-se as mesmas como sendo totalmente desmontáveis, o que foi possível graças a um sistema de encaixes entre as diversas peças constituintes dos moldes. Também foram previstas travessas de madeira, para as divisões das fôrmas, com alturas diferentes, de maneira a possibilitar a confecção de cp's com três espessuras distintas: 34, 44 e 49 mm.

Para a inserção das barras de aço, foram realizados três furos (com diâmetro de 9 mm) para cada molde de cp, com os mesmos tangenciando uma linha de referência traçada a 10 mm de altura a partir do fundo da fôrma. Para a adequada fixação destas barras metálicas no molde, foi prevista a colocação de parafusos sem ponta, transversalmente à direção de cada furo. Tais parafusos, rosqueados com furação prévia da madeira, ao serem atarraxados promovem o aperto das barras sobre as paredes internas dos furos, mantendo-as imóveis.

3.2.3. Proporcionamento dos agregados graúdos

A fim de otimizar o uso dos agregados nos concretos confeccionados nas dosagens complementares, foram realizados testes prévios com o intuito de se determinar a proporção ideal dos agregados graúdos, por meio do estudo da compacidade de diversas combinações de brita 1 e pedrisco. Sete misturas foram produzidas, com quantidades relativas de pedrisco e brita 1 de 20/80, 30/70, 40/60, 50/50, 60/40, 70/30 e 80/20, e então se avaliou a massa unitária compactada (conforme NBR 7810/83[130]) de cada combinação. A relação de mistura que apresentou maior densidade dentre as testadas foi a selecionada para utilização nos concretos.

3.2.4. Determinação da porcentagem ótima de areia

Uma vez que não existem dados acerca da quantidade relativa de agregado miúdo utilizada nos traços de concreto mais comuns em fábricas de postes, optou-se

por utilizar uma porcentagem ótima de areia, a qual foi definida de acordo com os procedimentos sugeridos pela equipe do laboratório de concreto de Furnas[146], isto é, por meio da realização de dosagens prévias. Foram confeccionados diversos concretos nos quais se variou o teor de areia e avaliou-se a alteração do a/c, mantendo-se uma mesma consistência da mistura. Conhecendo-se os módulos de finura de todos os agregados empregados, pôde-se calcular o coeficiente k e determinar a porcentagem de areia ótima para a relação cimento/agregados (1:m) adotada.

3.3. CONFECÇÃO DOS CONCRETOS PARA ESTUDO

Antes da realização das dosagens dos concretos, realizou-se a preparação dos moldes, que compreendeu inicialmente a montagem propriamente dita das fôrmas de madeira, a introdução das barras de aços nos furos a elas destinados e o aperto dos parafusos de fixação, para manter o conjunto firme para as operações da concretagem. É interessante lembrar que as barras foram posicionadas o mais paralelamente possível umas em relação às outras. Na Figura 33 são mostradas duas fotos que ilustram a disposição das barras na fôrma. Sobre as peças de madeira dos moldes foi aplicado, por meio de pincel, óleo mineral, que além de servir como desmoldante, ofereceu proteção à madeira contra incrustação de concreto, favorecendo o reaproveitamento das fôrmas para concretagens posteriores.

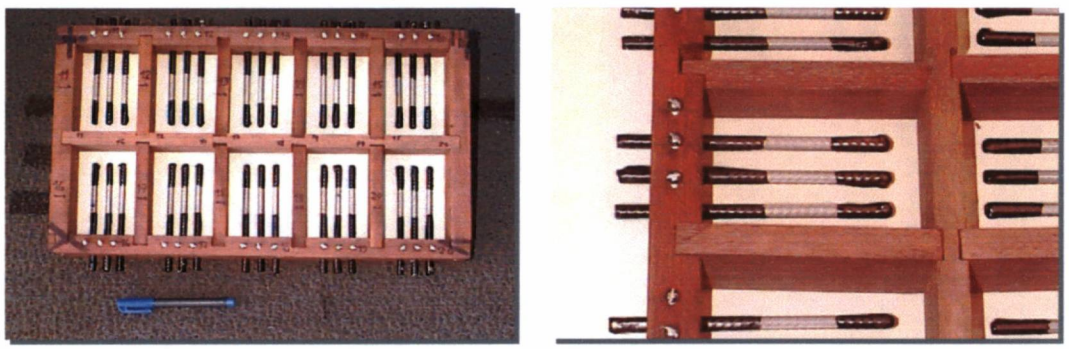


FIGURA 33 - DISPOSIÇÃO DAS BARRAS DE AÇO NA FÔRMA DE MADEIRA

3.3.1. Determinação da umidade dos agregados

Previamente ao início de cada dosagem, realizaram-se testes para verificação da umidade dos agregados, pelo método do fogareiro, de acordo com procedimento LAME 1.03.02.14[147]. Esta técnica expedita, portanto não normalizada, consistiu da pesagem de um volume qualquer de agregado úmido, sua secagem por meio do seu aquecimento em um recipiente metálico sobre uma chama, e a posterior pesagem do agregado seco. Pela relação entre a diferença dos pesos e a massa inicial, obtiveram-se os teores de umidade da areia, brita 1 ou pedrisco, os quais foram computados no cálculo dos traços de concreto a fim de se corrigir a quantidade de água de amassamento adicionada.

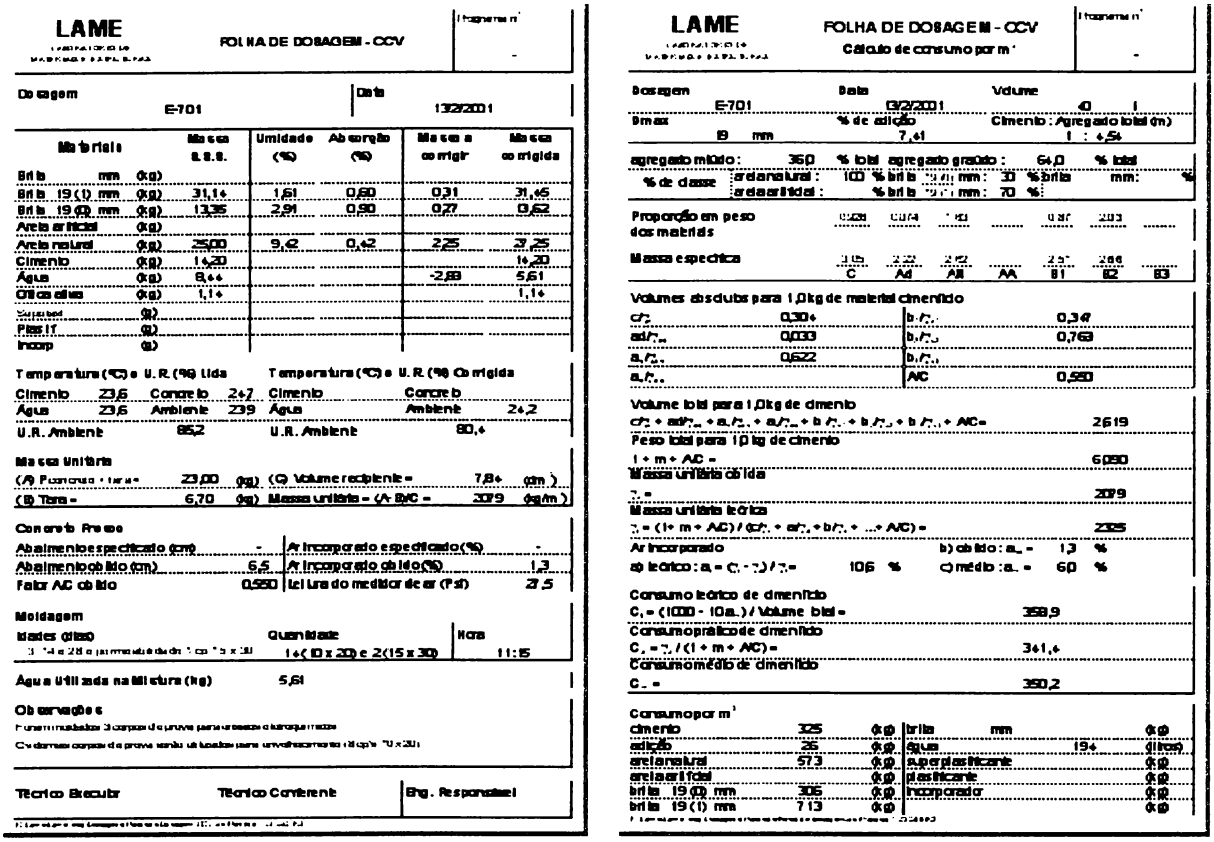
3.3.2. Estudos de dosagem

O proporcionamento dos insumos constituintes do concreto foi realizado por meio do uso da planilha de cálculo de dosagem experimental 1.03.048[148], utilizada pelo LAME e reproduzida na Figura 34. Esta planilha, assim como a metodologia de dosagem, é baseada nos procedimentos sugeridos pelo laboratório de Furnas[146].

Para o cálculo adequado dos traços de concreto, foram imprescindíveis os dados obtidos da caracterização dos agregados, como a massa específica na condição "saturado superfície seca" (SSS), a dimensão máxima característica e a absorção de água.

A relação 1:m, adotada para os traços variou em cada etapa.

As dosagens foram elaboradas em três etapas, conforme será descrito na seqüência.



LAME — FOLHA DE DOSAGEM - CCV

Dosagem: E-701 — Data: 13/2/2001

Materiais	Massa S.S.S.	Umidade (%)	Absorção (%)	Massa a corrigir	Massa corrigida
Brita mm (kg)					
Brita 19 (1) mm (kg)	31,14	1,61	0,60	0,31	31,45
Brita 19 (0) mm (kg)	13,35	2,91	0,90	0,27	0,62
Areia artificial (kg)					
Areia natural (kg)	25,00	9,42	0,42	2,25	27,25
Cimento (kg)	14,20				14,20
Água (kg)	8,44			-2,83	5,61
Ótica aliva (kg)	1,14				1,14
Superplast (g)					
Plastif (g)					
Incorp (g)					

Temperatura (°C) e U.R. (%) Lida: Cimento 23,6 — Concreto 24,7 — Água 23,6 — Ambiente 23,9 — U.R. Ambiente 85,2

Temperatura (°C) e U.R. (%) Corrigida: Cimento — Concreto — Água — Ambiente 24,2 — U.R. Ambiente 80,4

Massa Unitária: (A) Recipiente + Placa = 23,00 (kg) — (C) Volume recipiente = 7,84 (dm³) — (B) Tara = 6,70 (kg) — Massa unitária = (A-B)/C = 2079 (kg/m³)

Concreto Fresco: Abatimento especificado (cm) - — Ar incorporado especificado (%) - — Abatimento obtido (cm) 6,5 — Ar incorporado obtido (%) 1,3 — Fator AC obtido 0,550 — Leitura do medidor de ar (Psi) 27,5

Moldagem: Moldes (dias) — Quantidade 1+(10 x 20) e 2(15 x 30) — Hora 11:15

Água utilizada na mistura (kg) 5,61

Observações

Técnico Executor — Técnico Conferente — Eng. Responsável

LAME — FOLHA DE DOSAGEM - CCV — Cálculo de consumo por m³

Dosagem: E-701 — Data: 13/2/2001 — Volume: 40 l

Dmax: 19 mm — % de adição: 7,41 — Cimento : Agregado total (m): 1 : 4,54

agregado miúdo: 35,0 % total — agregado graúdo: 64,0 % total

% de classe: areia natural: 100 % brita 19 (1) mm: 30 % brita mm: % — areia artificial: % brita 19 (1) mm: 70 %

Proporção em peso dos materiais: 0,28 — 0,74 — 1,83 — 0,37 — 2,03

Massa específica: 3,15 — 2,22 — 2,52 — 2,57 — 2,66

C — A4 — A8 — AA — B1 — B2 — B3

Volumes absolutos para 1,0 kg de material cimentício

c/ρ_c 0,304 — b/ρ_b 0,347

$a1/\rho_{a1}$ 0,033 — b/ρ_b 0,763

a_2/ρ_{a2} 0,622 — b/ρ_b

a_n/ρ_{an} — AC 0,550

Volume total para 1,0 kg de cimento: $c/\rho_c + a1/\rho_{a1} + a_2/\rho_{a2} + a_n/\rho_{an} + b/\rho_b + b/\rho_b + b/\rho_b + AC$ = 2,619

Peso total para 1,0 kg de cimento: 1 + m + AC = 6,090

Massa unitária obtida: = 2079

Massa unitária teórica: = (1 + m + AC) / ($c/\rho_c + a1/\rho_{a1} + b/\rho_b + ... + AC$) = 2325

Ar incorporado — b) obtido: a_o = 1,3 % — a) teórico: a_t = C - ... / ... = 10,6 % — c) médio: a_m = 6,0 %

Consumo teórico de cimento: C_t = (1000 - 10a_t) / Volume total = 358,9

Consumo prático de cimento: C_o = ... / (1 + m + AC) = 341,4

Consumo médio de cimento: C_m = 350,2

Consumo por m³

cimento	325	kg	brita mm		kg
adição	26	kg	água	194	litros
areia natural	573	kg	superplastificante		kg
areia artificial		kg	plastificante		kg
brita 19 (0) mm	306	kg	incorporador		kg
brita 19 (1) mm	713	kg			kg

FIGURA 34 - PLANILHA UTILIZADA NOS ESTUDOS DE DOSAGEM DOS CONCRETOS

3.3.2.1. Dosagens preliminares

A definição dos traços, fatores água/cimento, consumos de cimento e abatimentos foi realizada objetivando-se reproduzir os concretos comumente produzidos pela maioria das fábricas de artefatos de concreto. Tais dados foram levantados previamente e durante o desenvolvimento dos estudos referentes a este trabalho, por meio de visitas técnicas e inspeções a diversas empresas do ramo, localizadas nos Estados do Paraná, Santa Catarina, Rio Grande do Sul e Sergipe.

Foram utilizados três tipos de cimento, a saber: CPII-F 32, CPII-Z 32 e CPV-ARI RS. Para cada cimento, foram confeccionados, inicialmente, dois traços de concreto, cuja diferença residiu nos consumos de cimento adotados: aproximadamente 290 e 350 kg/m^3. Definiu-se fixar o abatimento (*slump*) dos concretos em (40 ± 10)

mm, de forma que, para que essa característica fosse atendida, a quantidade de água adicionada resultou diferente para cada traço, tendo o a/c variado de 0,53 a 0,69. Tais valores, apesar de não serem recomendados para estruturas de concreto sujeitas a atmosferas agressivas, resultaram bastante similares aos normalmente verificados nas indústrias de artefatos[11], atendendo, portanto, aos objetivos propostos. Nas dosagens preliminares não foi utilizado qualquer aditivo ou adição mineral, pois o principal objetivo era a verificação da influência do tipo e consumo de cimento, além da espessura de cobrimento, na durabilidade dos concretos.

3.3.2.2. Dosagens complementares

Adicionalmente aos concretos dosados na etapa preliminar, foram preparadas outras duas misturas, ambas confeccionadas com agregados do Paraná e cimento CPII-F 32 proveniente da região Nordeste, adquirido em Aracaju:

- concreto com adição de 8% de sílica ativa (em relação ao peso de cimento e em substituição a este), com consumo de material cimentício da ordem de 350 kg/m^3; e
- concreto contendo 3,7% de resina epóxi, com consumo de cimento de, aproximadamente, 310 kg/m^3.

3.3.2.3. Dosagens piloto

Com a realização de diversos ensaios e análises nos concretos confeccionados nas etapas preliminar e complementar, puderam ser obtidas conclusões acerca dos materiais utilizados e dos proporcionamentos adotados. Com isso, foi possível a especificação de duas misturas destinadas à moldagem de postes e cruzetas, em uma fábrica de artefatos pré-moldados localizada na região metropolitana de Aracaju, a serem ensaiados mecanicamente e instalados à beira-mar para envelhecimento natural.

Estes traços foram previamente dosados em laboratório a fim de se avaliar a trabalhabilidade das misturas frescas, bem como de se verificar a sua resistência mecânica, por meio da moldagem de cp's e ruptura dos mesmos por compressão axial.

Ambas as misturas foram preparadas com agregados oriundos do Estado de Sergipe, e prevendo-se um consumo de cimento de aproximadamente 350 kg/m^3:

- concreto confeccionado com cimento CPII-F 32 proveniente de Aracaju, com adição de 8% de sílica ativa e utilização de 1,5% de aditivo superplastificante, ambos dosados em relação ao peso de cimento; e
- concreto confeccionado com cimento CPV-ARI RS proveniente de Curitiba.

3.3.3. Preparo dos concretos

O preparo dos concretos, bem como a moldagem dos cp's e posterior ensaio dos mesmos, foi realizado nas dependências do LAME, segundo procedimento LAME 1.03.08.16[149], o qual é baseado nas recomendações na NBR 12821/93[150].

Para e pesagem dos materiais, utilizou-se balança industrial digital, marca Urano, modelo UDP-10.000, com capacidade máxima de 150 kg e precisão de 50 g.

Para a mistura dos concretos foi usada betoneira de eixo inclinado com capacidade para 320 litros. Antes da primeira dosagem, foi realizada "imprimação" da betoneira, que consistiu da colocação de, aproximadamente, 10% da quantidade de materiais prevista para o traço definitivo, sua mistura por alguns segundos e retirada. Este procedimento teve como finalidade impregnar as paredes internas da cuba da betoneira com o mesmo material que será posteriormente preparado, de forma a não ocorrer a aderência de concreto às mesmas, com conseqüente perda de água de amassamento ou cimento, durante a mistura principal.

No caso das dosagens preliminares, após a pesagem dos insumos, os mesmos foram colocados na betoneira seguindo-se a ordem descrita na Tabela 13.

TABELA 13 - SEQÜÊNCIA DE COLOCAÇÃO DOS MATERIAIS NA BETONEIRA

SEQÜÊNCIA	DESCRIÇÃO
1º	Colocação dos agregados graúdos, com a betoneira parada
2º	Colocação dos agregados miúdos, com a betoneira parada
3º	Mistura por 30 segundos
4º	Colocação de metade da quantidade de água prevista, com a betoneira parada
5º	Mistura por 30 segundos
6º	Colocação do cimento, com a betoneira ligada
7º	Colocação do restante da água, com a betoneira ligada

Em relação às dosagens complementares, na mistura contendo sílica ativa a adição foi colocada juntamente com o cimento. Nos traços em que foram utilizados resina epóxi e aditivo superplastificante, os mesmos foram adicionados após a colocação do cimento e antes da adição do restante da água, com a betoneira ligada.

A mistura dos concretos foi realizada em dois estágios, com um intervalo entre os mesmos, conforme indicado na Tabela 14.

TABELA 14 - TEMPO DE MISTURA DOS CONCRETOS

SEQÜÊNCIA	DESCRIÇÃO	DURAÇÃO
1º	Mistura do concreto	3 minutos
2º	Pausa	3 minutos
3º	Mistura do concreto	2 minutos

A primeira etapa da mistura iniciou-se tão logo o cimento foi colocado na betoneira. Durante a pausa realizada na homogeneização de cada concreto, foi efetuado ensaio para determinação do abatimento do tronco de cone (*slump*) e, conforme necessário, foi adicionada a água à massa tão logo a segunda etapa da mistura iniciou.

Terminado o processo de amassamento dos concretos, os mesmos foram despejados em um carrinho-de-mão e homogeneizados, manualmente, com o auxílio de pás.

3.3.4. Ensaios nos concretos frescos

Tão logo os concretos foram retirados da betoneira, efetuaram-se alguns ensaios e verificações nos mesmos, conforme Tabela 15.

TABELA 15 - ENSAIOS (E SUAS RESPECTIVAS NORMAS) REALIZADOS NOS CONCRETOS FRESCOS

ANÁLISE REALIZADA	REFERÊNCIA	TÍTULO
Slump	NBR NM 67/98[151]	Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone
Massa unitária	NBR 9833/87[152]	Concreto fresco - Determinação da massa específica e do teor de ar pelo método gravimétrico
Teor de ar incorporado	NBR NM 47/02[153]	Concreto - Determinação do teor de ar em concreto fresco - Método pressométrico
Temperatura da massa	..	..

Os procedimentos para determinação do *slump*, massa unitária e teor de ar incorporado dos concretos são ilustrados na Figura 35.

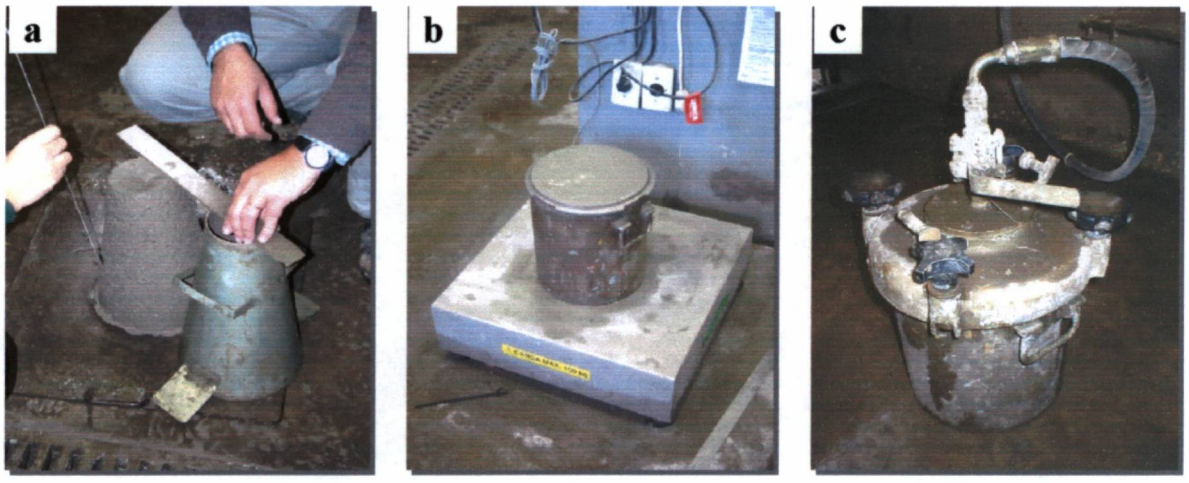


FIGURA 35 - ENSAIOS NOS CONCRETOS FRESCOS: A) *SLUMP*; B) MASSA UNITÁRIA; C) TEOR DE AR INCORPORADO

Os resultados obtidos para a massa unitária foram importantes para o cálculo do consumo de cimento e agregados, realizado automaticamente pela planilha de dosagem. A temperatura dos concretos foi medida com um termômetro termoparizado

digital, com calibração válida.

3.4. CONFECÇÃO DE CP'S

Corpos-de-prova de diferentes formatos e dimensões foram moldados com o intuito de se avaliar a resistência mecânica, propriedades físicas e durabilidade dos concretos.

3.4.1. Moldagem dos cp's

Para cada mistura, foram confeccionados cp's de formatos e dimensões variadas, destinados a diferentes ensaios ou análises:

- cp's cilíndricos com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, destinados aos ensaios mecânicos de determinação da resistência à compressão axial, conforme NBR 5739/94[154];
- cp's cilíndricos com 15 cm de diâmetro e 30 cm de altura, destinados aos ensaios físicos de permeabilidade, conforme NBR 10786/89[155]; e
- cp's prismáticos com 7 cm de largura, 10 cm de altura, e espessura alternando entre 49 mm, 44 mm e 34 mm, destinados a ensaios eletroquímicos.

De modo geral, a moldagem dos cp's de concreto para os ensaios mecânicos e físicos seguiu as recomendações da norma NBR 5738/94[156], sendo o seu adensamento realizado por meio de vibrador de imersão (agulha). Na Figura 36 podem ser visualizadas as etapas de moldagem dos cp's cilíndricos.

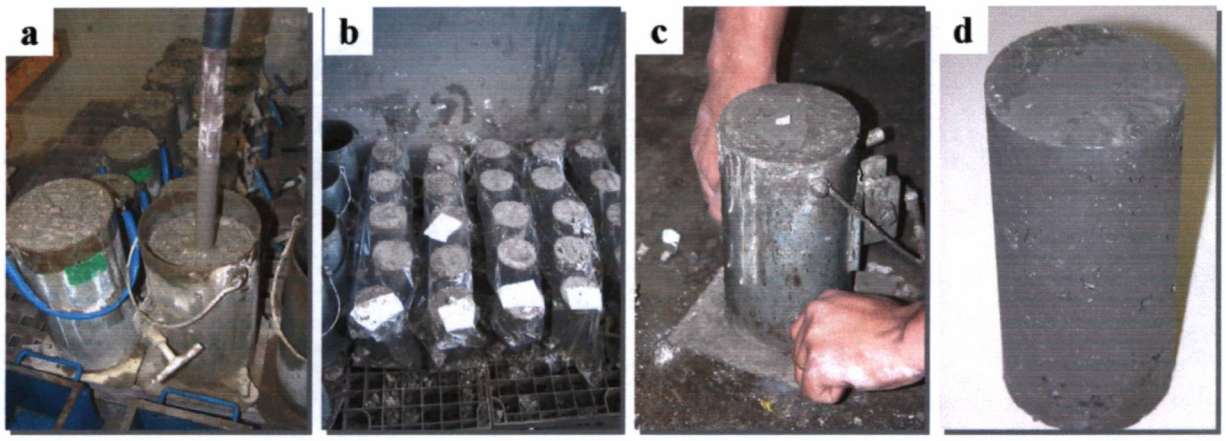


FIGURA 36 - MOLDAGEM DOS CP'S CILÍNDRICOS DE CONCRETO: A) ADENSAMENTO; B) CURA INICIAL; C) DESMOLDAGEM; D) CP PRONTO

3.4.1.1. Cp's prismáticos destinados a ensaios eletroquímicos

A moldagem dos cp's prismáticos de concreto armado não é contemplada pela normalização brasileira. Então, os mesmos foram moldados mediante a aplicação de uma camada de concreto nas fôrmas de madeira elaboradas especialmente para tal, com posterior adensamento da mistura por intermédio de mesa vibratória, durante aproximadamente, 1 minuto. Na Figura 37 são mostradas algumas imagens obtidas durante a moldagem destes cp's.

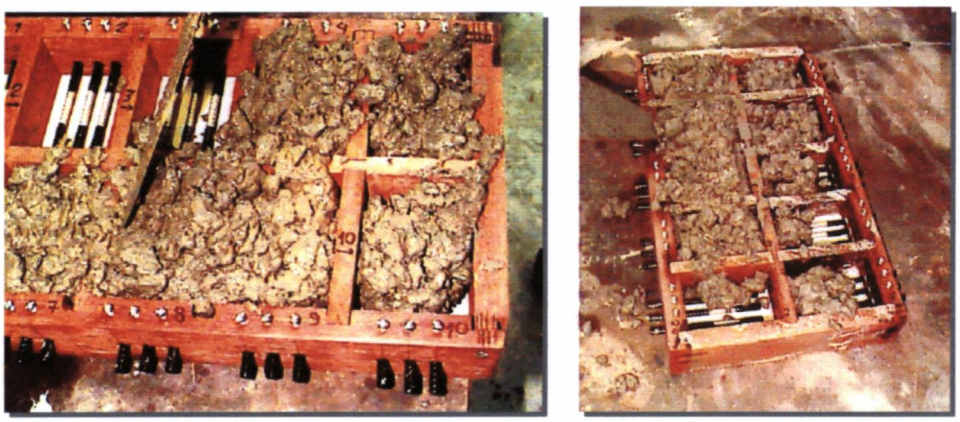


FIGURA 37 - MOLDAGEM DOS CP'S PRISMÁTICOS DE CONCRETO ARMADO

Como já comentado no item 3.2.2, as fôrmas para os cp's prismáticos foram confeccionadas de maneira a possibilitar a obtenção de cp's com espessuras diferentes, por meio da troca das divisórias internas de madeira. Com isso, para um mesmo concreto, puderam ser moldados cp's com cobrimentos distintos, a saber: 10, 15, 25 e 30 mm. Na Figura 38 pode ser visualizado um desenho esquemático do cp prismático, enquanto que na Figura 39 é possível visualizar alguns cp's prontos.

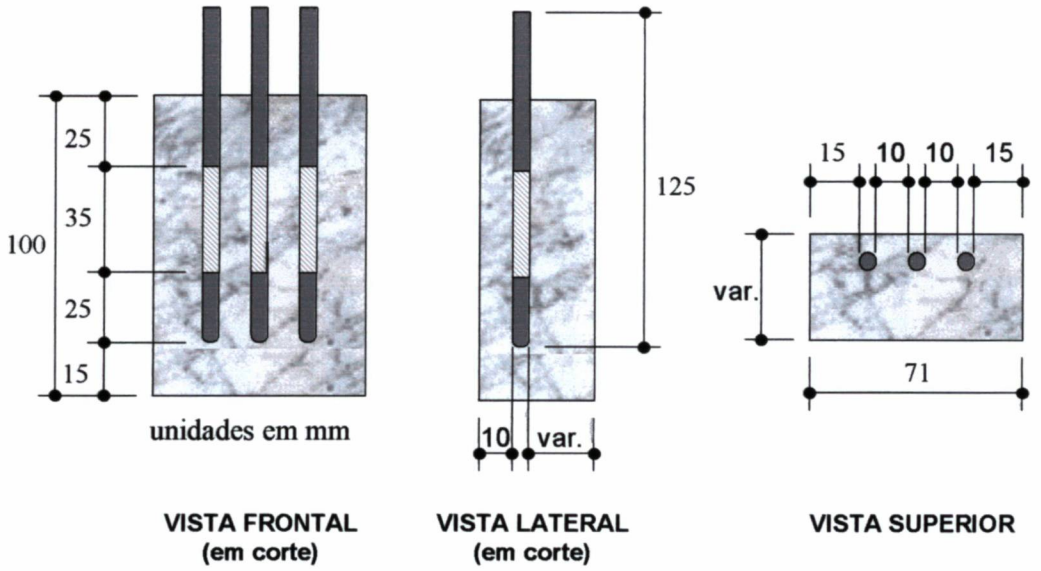


FIGURA 38 - DESENHO ESQUEMÁTICO DO CP PRISMÁTICO DE CONCRETO ARMADO

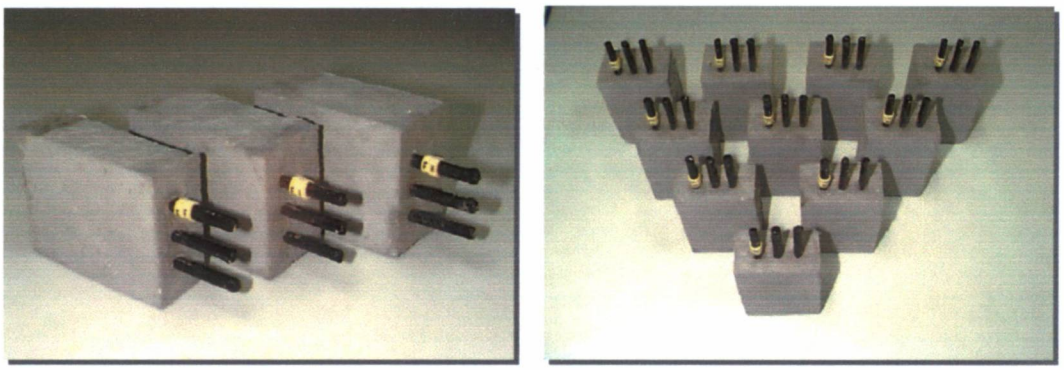


FIGURA 39 - CP'S PRISMÁTICOS DE CONCRETO ARMADO PRONTOS

Os cp's com cobrimentos de 10 e 30 mm apresentaram dimensões totais idênticas, sendo apenas alterada a posição de manuseio. Com isso, no caso dos cp's

com 10 mm, a face em estudo foi a que permaneceu na parte superior da fôrma. Por outro lado, a face de estudo dos cp's representativos do cobrimento de 30 mm foi a que ficou na região inferior dos moldes, apresentando, portanto, um melhor acabamento superficial.

3.4.2. Cura dos cp's

Completada a moldagem, os moldes cilíndricos e prismáticos foram cobertos com filme de PVC transparente, e mantidos na atmosfera ambiente do Laboratório de Dosagem por 24 horas, ao término das quais os cp's foram desmoldados, identificados e transportados até uma câmara úmida, com umidade relativa maior que 95% e temperatura de (23 ± 2)°C, onde permaneceram em cura por até 28 dias. Os cp's destinados ao ensaio de resistência à compressão foram curados até a data prevista para a ruptura. Na Figura 40a é mostrado o interior da câmara utilizada na cura dos cp's.

3.5. ENSAIOS FÍSICOS E MECÂNICOS NOS CP'S

Corpos-de-prova de concreto foram submetidos a ensaios para determinação da resistência à compressão e do coeficiente de permeabilidade, além de análise por radiografia industrial.

3.5.1. Resistência à compressão axial

A metodologia para determinação da resistência à compressão seguiu as orientações da NBR 5739/94[154]. Os cp's cilíndricos de (10 x 20) cm foram submetidos a ruptura aos 3, 14 e 28 dias após a moldagem. Também foram rompidos cp's submetidos ao envelhecimento por imersão parcial em solução salina durante períodos variados, conforme o item 3.5.1.1.

Previamente à execução dos ensaios, os cp's receberam capeamento com

uma pasta constituída de 70% de enxofre e 30% de quartzo, ambos em pó, misturados à quente.

Utilizou-se uma máquina universal de ensaios, marca Leipzig/WPM, modelo ZD-100, com capacidade máxima de 100.000 kgf (100 tf), a qual pode ser vista na Figura 40b. A aplicação do esforço mecânico obedeceu a uma taxa de compressão da ordem de 500 kgf/s, a qual se enquadra nos limites especificados pela NBR 5739/94[154] para o cp citado.

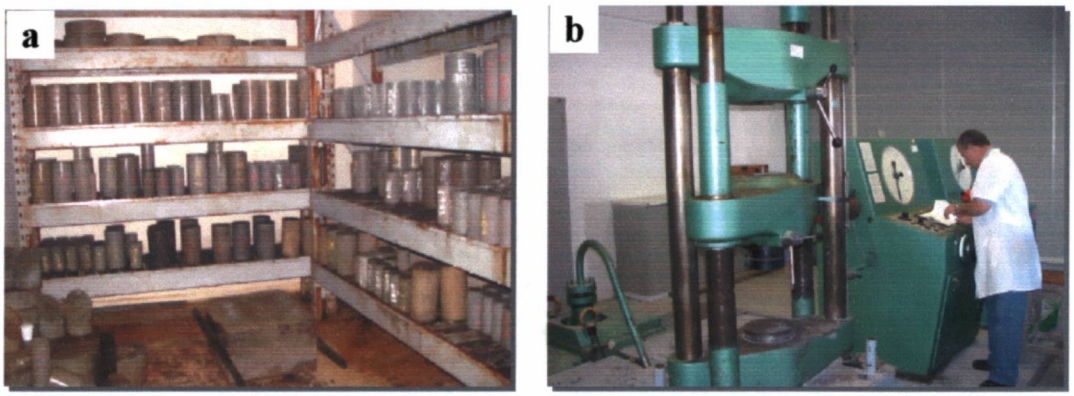


FIGURA 40 - A) CÂMARA ÚMIDA; B) MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAIOS

Para cada traço confeccionado foram ensaiados dois cp's em cada idade, sendo tomado o valor médio dos resultados como a tensão de ruptura correspondente.

3.5.1.1. Envelhecimento em solução salina

Após a cura, os cp's cilíndricos de 10 cm de diâmetro foram submetidos ao envelhecimento acelerado, por meio da imersão parcial em uma solução aquosa de 3,4% de cloreto de sódio (NaCl), conforme pode ser visto na Figura 41.

Os cp's permaneceram nestas condições por períodos variados, a saber: 28, 91, 203 e 420 dias, tendo sido, então, levados à ruptura por compressão axial, após capeamento prévio.

FIGURA 41 - ENVELHECIMENTO DOS CP'S CILÍNDRICOS EM SOLUÇÃO SALINA

3.5.2. Ensaio de permeabilidade

Foram realizados testes para determinação do coeficiente de permeabilidade (K) dos concretos pelo método de percolação de água sob pressão, segundo metodologia recomendada na NBR 10786/89[155], em cp's cilíndricos de (15 x 30) cm, após 60 dias de cura.

Os cp's tiveram suas extremidades serradas e descartadas, tendo o ensaio sido realizado na porção central resultante, com 15 cm de altura. Isto foi realizado de forma a minimizar os efeitos de uma eventual exsudação e/ou carbonatação[146]. Na Figura 42 podem ser vistos o preparo dos cp's e o sistema utilizado no ensaio.

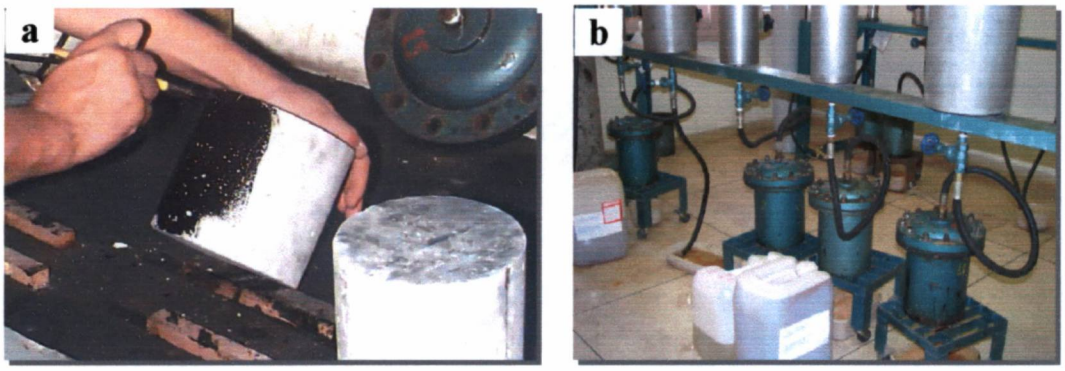


FIGURA 42 - A) PREPARO DOS CP'S; B) SISTEMA DE ENSAIO DE PERMEABILIDADE

O valor adotado para K foi obtido pela média aritmética dos coeficientes dos

cp's ensaiados.

3.5.3. Radiografia industrial

Após suspeita ou constatação da ruptura dos cp's prismáticos de concreto destinados aos ensaios eletroquímicos, durante envelhecimento acelerado, os mesmos foram avaliados em um tomógrafo industrial de raios X da marca Gilardoni, modelo CHF 160-S, dotado de tubo de raios X com alvo de tungstênio. O equipamento opera com tensão limitada a 160 kV, corrente de até 10 mA e potência máxima de 640 W.

O objetivo foi detectar defeitos estruturais e inomogeneidades internas do concreto, tais como vazios de exsudação, poros comunicantes, falhas de adensamento, segregação, disposição da armadura metálica nos cp's, entre outros.

3.6. ANÁLISES EM AMOSTRAS EXTRAÍDAS DOS CP'S

Amostras extraídas dos cp's de concreto foram submetidas a ensaio para determinação da massa especifica, absorção e índice de vazios, bem como a análise pelas técnicas de MEV, DRX e DTA/TGA.

3.6.1. Massa específica, absorção de água e índice de vazios

São parâmetros importantes para avaliação da qualidade do concreto e previsão do seu desempenho frente a condições de exposição direta a atmosferas agressivas. O método de ensaio recomendado pela norma que trata de postes de concreto armado (NBR 8451/98[42]) é aquele descrito na NBR 6124/80[43].

Amostras de concreto foram extraídas de regiões intactas dos cp's submetidos a ensaio de resistência à compressão aos 28 dias. Para a execução do ensaio utilizou-se uma estufa calibrada para uma temperatura de (105 ± 5)°C, uma chapa de aquecimento e uma balança semi-analítica marca Ohauss, modelo Precision Plus, além de instrumentos básicos de laboratório.

A NBR 6124/80[43], que trata especificamente dos ensaios no concreto de postes e cruzetas, orienta que valores de absorção acima de 6% para a média das amostras analisadas e 7,5% para uma amostra isolada, são indicativos de grande probabilidade de envelhecimento precoce do material. Também, podem indicar a presença de defeitos internos expressivos, como poros contínuos, trincas e vazios, os quais poderão se tornar iniciadores de fraturas no concreto, quando o mesmo for solicitado mecanicamente[8].

Adicionalmente foram desenvolvidos ensaios para determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica, seguindo-se o procedimento indicado pela NBR 9778/87[44], que trata de argamassa e concreto endurecidos em geral. Neste caso, após a imersão em água, os cp's são submetidos a fervura por 5 horas. Este método tem-se demonstrando ser mais efetivo e, de acordo com estudos de PORTELLA et al. (2001)[8], os resultados por ele obtidos são cerca de 1,33 vezes maiores do que os resultantes pelo método da NBR 6124/80[43].

3.6.2. Análise por MEV

Foram extraídas amostras de concreto dos cp's prismáticos utilizados nos ensaios eletroquímicos, após, aproximadamente, 290 dias de envelhecimento em solução salina. As amostras para análise da superfície de fratura foram limpas por meio de jatos de ar e gás inerte. As amostras destinadas a análise da superfície polida foram cortadas em serra com disco diamantado, planificadas por intermédio de discos abrasivos e lixas e, posteriormente, polidas com o uso de solução de alumina em pó ou pasta de diamante.

Realizou-se, então, inspeção visual instrumentada (com auxílio de lupa) das amostras, a fim de detectarem-se eventuais alterações macroscópicas no concreto. Para tal, utilizou-se lupa estereoscópica da marca Wild, modelo MPS 12, com ampliação máxima de 50 vezes (Figura 43a).

Para poder garantir uma boa qualidade das imagens, as amostras receberam

metalização de ouro, realizada por evaporação catódica à vácuo em equipamento Bal-Tec SCD 005. O equipamento utilizado para a análise por MEV é da marca Philips, modelo XL30 (Figura 43b). A análise da composição química elementar de regiões específicas das amostras foi possível em razão do uso de uma microssonda analítica para espectroscopia de energia dispersiva de raios X (EDS), marca Edax, acoplada ao microscópio.

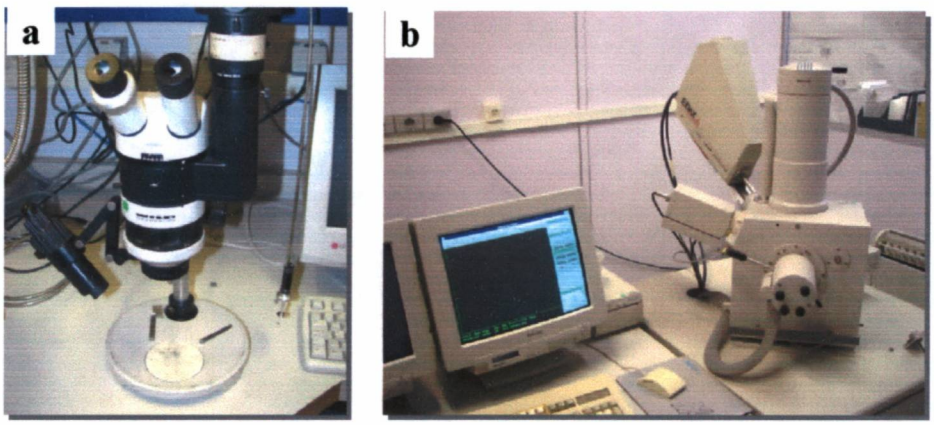


FIGURA 43 - A) LUPA ESTEREOSCÓPICA; B) MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA

3.6.3. Análise por DRX

Porções de amostras de concreto retiradas dos cp's cilíndricos e prismáticos foram moídas em almofariz, até obter-se uma pequena quantidade de material passante em uma peneira com abertura de malha #48 (igual a 0,3 mm). As análises foram então realizadas em equipamento Philips X'Pert, já citado no item 3.1.1.1.2, com o objetivo de identificar as principais fases cristalinas contidas nos concretos estudados, e avaliar o efeito do envelhecimento nos materiais.

3.6.4. Análise térmica

Amostras de concreto pulverizadas, obtidas de maneira análoga à descrita no

item 3.6.3, foram submetidas a análises de DTA e TGA, a fim de avaliar-se o calor absorvido e liberado pelas mesmas, bem como a sua perda ou ganho de massa, em função da temperatura. O principal objetivo foi acompanhar o teor de água absorvido pelos materiais ao longo da sua hidratação.

As amostras foram obtidas em diferentes idades de cura, desde algumas horas até 4 semanas após a moldagem.

O equipamento utilizado e o procedimento de análise adotado foram os mesmos empregados para análise dos cimentos, conforme descrito no item 3.1.1.1.3.

3.7. ENSAIOS ELETROQUÍMICOS

Para avaliar-se a durabilidade dos concretos estudados, optou-se por técnicas eletroquímicas. Medidas de potencial de corrosão e EIS foram realizadas nos cp's prismáticos de concreto armado. Entretanto, para ser possível uma avaliação em tempo hábil, foi decidido que os cp's seriam submetidos a um envelhecimento acelerado.

3.7.1. Envelhecimento acelerado de cp's

O envelhecimento dos cp's iniciou-se assim que se completaram 28 dias de cura dos concretos. Foi idealizado e construído um sistema, doravante denominado de "célula", de envelhecimento para testes eletroquímicos, constituído de dois recipientes (*cap's* de PVC para tubulação de esgoto - DN 50), um de cada lado do cp prismático, adaptados por meio de barras rosqueadas e travessas de madeira. Para se obter a vedação no contato entre os cap's e as faces do cp, efetuou-se o corte dos mesmos, exatamente na metade da largura da "bolsa" (canaleta onde é posicionado um anel de borracha). A estanqueidade do contato entre os recipientes e a superfície do concreto foi obtida pela utilização dos anéis de borracha (*o'rings*) referidos, também conhecidos como "virolas".

Cada cap foi furado na sua superfície lateral cilíndrica. A finalidade destes

furos, com diâmetro de 10 mm, era de servirem como aberturas para reposição e controle do nível de solução salina.

A solução agressiva utilizada foi uma solução aquosa a 3,4% de NaCl. Esta concentração é a mesma usada pelos pesquisadores GU et al. (1999 e 2000)[142, 143] em seus estudos sobre corrosão de armaduras em concreto. Outros autores submeteram concretos a envelhecimentos em soluções com concentrações próximas dessa, variando entre 2% e 5% de NaCl[157, 158, 159, 160]. A concentração de NaCl na água de mar varia de 2,5 a 3,5%[3].

O recipiente colocado na face da espessura de cobrimento a ser estudada foi completado com a solução agressiva, e o outro cheio apenas com água destilada. Isto foi realizado com o intuito de se induzir a difusão de íons cloreto (Cl^-) por todo o volume de concreto, em virtude da diferença de concentração de NaCl entre uma face e outra do cp.

Esquema ilustrativo da célula de envelhecimento é mostrado na Figura 44[2].

Na Figura 45 tem-se uma foto da célula de envelhecimento já montada, pronta para ensaio eletroquímico (Figura 45a), e uma foto mostrando uma vista explodida desta célula (Figura 45b)[2].

Os ensaios eletroquímicos foram realizados periodicamente ao longo do envelhecimento, o qual perdurou por aproximadamente 42 semanas. Durante este tempo, a solução salina e a água destilada contida nos recipientes da célula eram completadas semanalmente.

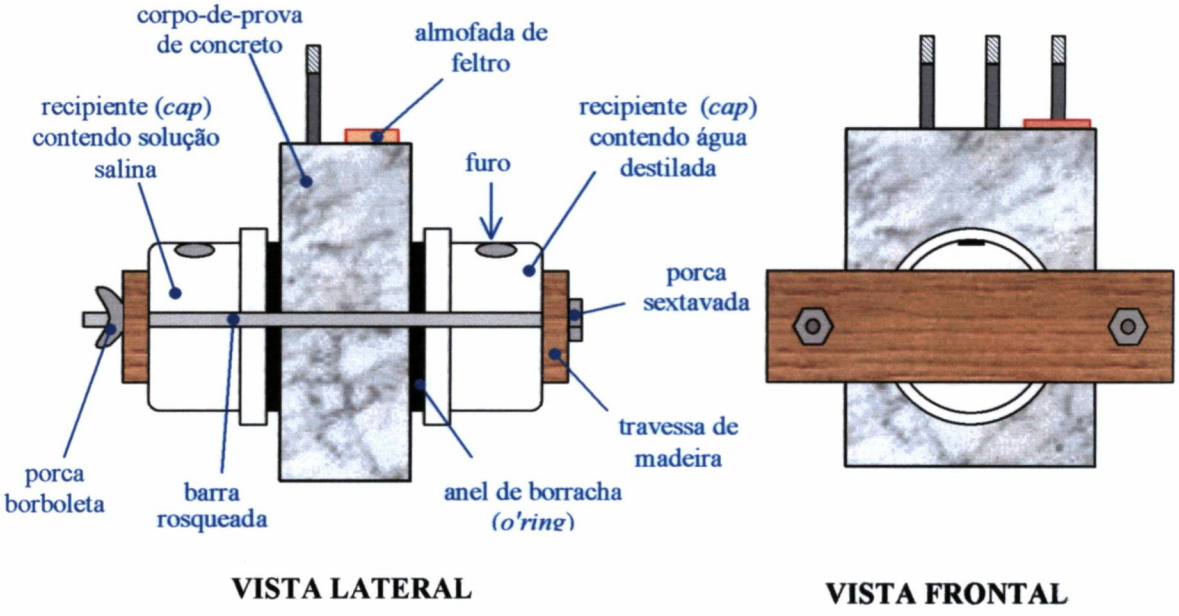


FIGURA 44 - ESQUEMA ILUSTRATIVO DA CÉLULA DE ENVELHECIMENTO

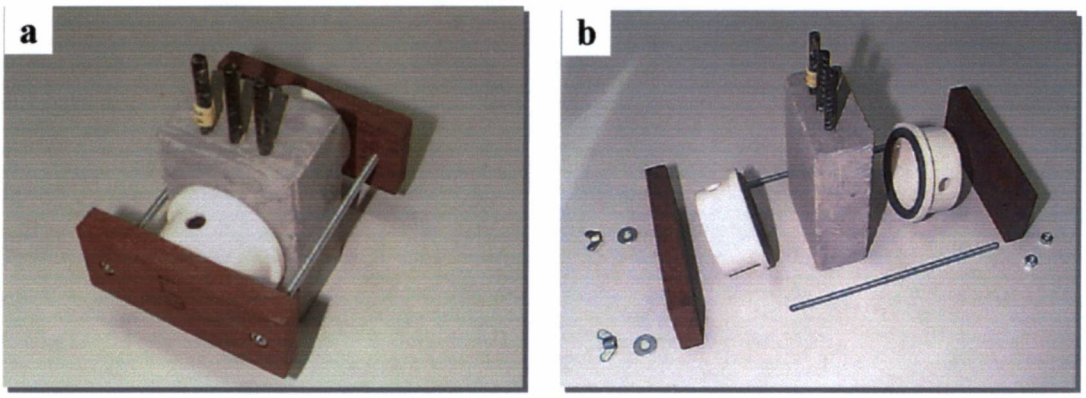


FIGURA 45 - CÉLULA DE ENVELHECIMENTO: A) MONTADA; B) EM VISTA EXPLODIDA

3.7.2. Análise por EIS

Para a realização dos testes eletroquímicos nos cp's prismáticos, utilizou-se um sistema de medições eletroquímicas, marca Eco-Chemie, modelo Autolab 20, monitorado por microcomputador com sistema operacional Windows 3.11, operando no modo analisador de resposta de freqüência, por intermédio do *software* FRA (de

Frequency Response Analyser) versão 2.3. Na Figura 46 é mostrada uma foto do equipamento, bem como uma imagem da tela principal do programa FRA.

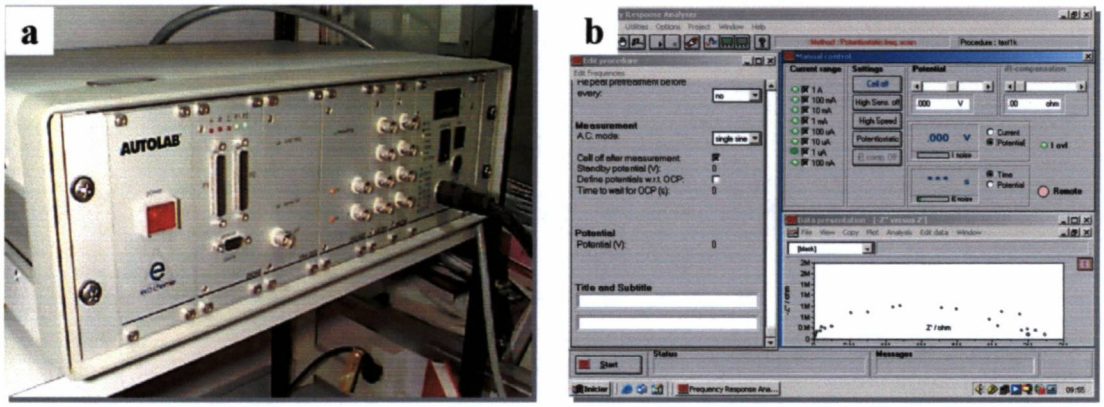


FIGURA 46 - A) EQUIPAMENTO UTILIZADO NAS MEDIDAS POR EIS; B) TELA DO *SOFTWARE* FRA

Duas das três barras de aço inseridas nos cp's serviram como eletrodos. Mantendo-se cada cp com a face de cobrimento em estudo voltada para o operador, estipulou-se a barra de aço da extremidade esquerda como sendo o eletrodo de trabalho, e a barra central como contra-eletrodo.

O eletrodo de referência utilizado foi o ECS, em virtude das indicações de uso deste tipo de eletrodo pela literatura estudada[75]. Todos os potenciais neste trabalho estão referidos a ele.

O contato do eletrodo de referência com a superfície superior dos cp's de concreto foi realizado pela utilização de pequenas "almofadas" de feltro embebidas em água destilada. A ligação dos terminais do sistema de medição às outras barras (eletrodo de trabalho e contra-eletrodo) foi realizada com pinças metálicas, conhecidas como "jacarés".

Na Figura 47 são mostrados o esquema de eletrodos utilizado e uma foto do sistema com a conexões realizadas[2].

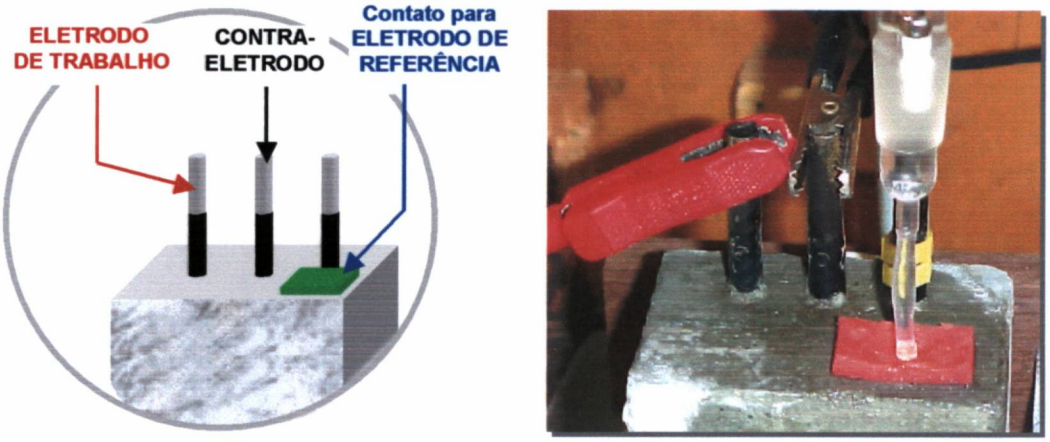


FIGURA 47 - ESQUEMA DE CONEXÃO DOS ELETRODOS

Os ensaios de EIS foram realizados por varredura em freqüência descendente, calculada pelo *software* após a entrada de alguns dados. Abaixo estão colocadas algumas informações a respeito desta análise:

- Equipamento: Eco-Chemie, Autolab 20
- *Software*: FRA v2.3
- Número de freqüências: 66
- Freqüência inicial: 50 kHz
- Freqüência final: 10 mHz
- Amplitude (rms): 5 mV
- Temperatura ambiente: (23 ± 2)°C
- Faixa de corrente: 1A a 100 nA
- Potencial eletroquímico: E_{corr}
- Tempo de cada ensaio: 10 a 20 min
- Utilização de Gaiola de Faraday

Para evitar qualquer interferência externa ao sistema durante as medidas, a célula de envelhecimento foi colocada no interior de uma gaiola de Faraday, materializada por meio de uma caixa metálica aterrada (Figura 48a). Na Figura 48b têm-se uma visão geral do sistema de medidas por EIS.

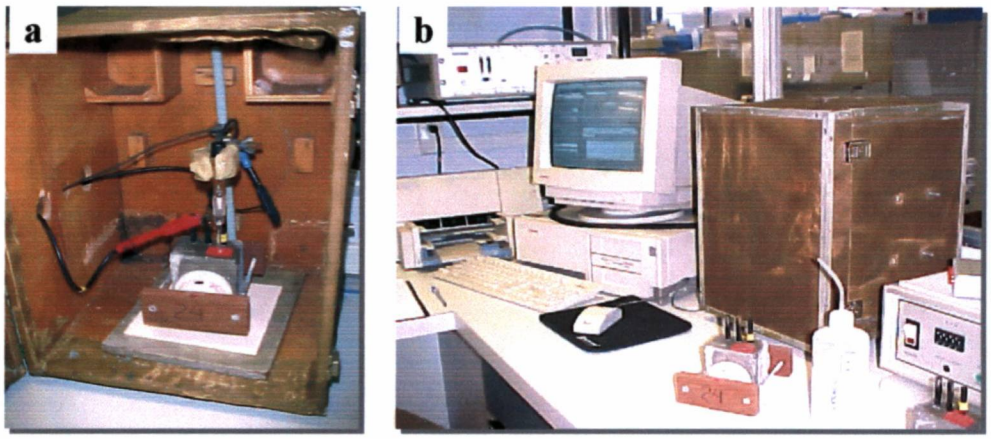


FIGURA 48 - A) GAIOLA DE FARADAY; B) SISTEMA DE MEDIDAS POR EIS MONTADO

3.7.2.1. Potencial de corrosão

A partir do instante em que as conexões entre os terminais do Autolab 20 e os eletrodos (barras) eram realizadas, obtinha-se o potencial do sistema (ou potencial de corrosão E_{corr}), medido em relação ao eletrodo de referência. A leitura era obtida após a estabilização do potencial, o que levava alguns minutos.

Os potenciais verificados em cada medição dos cp's foram anotados, a fim de se avaliar a sua variação ao longo do tempo de envelhecimento e para tentar-se detectar alterações no sistema eletroquímico.

3.7.2.2. Procedimento de ensaio

No procedimento de ensaio adotado, em cada medição realizada o equipamento imprimiu, no cp em análise, dois potenciais superpostos (Figura 49): um de corrente contínua (DC) e outro de corrente alternada (AC). O potencial DC foi mantido constante e igual ao potencial de corrosão E_{corr}[2]. Neste potencial, a corrente elétrica resultante foi nula.

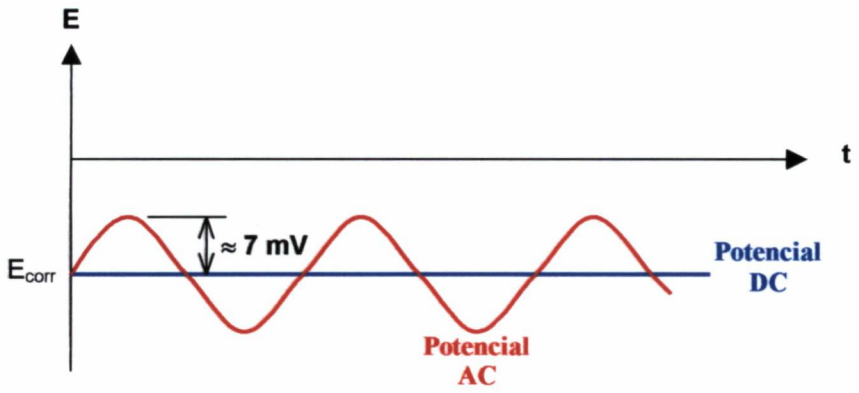


FIGURA 49 - ESQUEMA MOSTRANDO OS POTENCIAIS DC E AC

O potencial AC foi aplicado senoidalmente, com uma amplitude de ± 5 mV em relação ao E_{corr}. Entretanto, como a amplitude é do tipo *rms* (*root mean square*), o pico da senóide apresentou uma altura igual a esta amplitude multiplicada pela raiz quadrada de dois, ou seja, aproximadamente 7 mV. A varredura de freqüências, como já comentado no item 3.7.2, foi decrescente, ou seja, iniciou pelas freqüências mais altas e terminou nas mais baixas. Adicionalmente, vale ressaltar que, no caso do potencial AC, as freqüências finais utilizadas não poderiam ser muito baixas. A finalidade de se proceder deste modo foi de não ocasionar perturbação permanente no sistema durante as medidas, uma vez que as freqüências muito baixas tendem a causar perturbações na semicélula eletroquímica[54].

Os resultados das medidas foram representados na forma de diagrama de Nyquist (Z" *versus* Z'), em escala logarítmica. Entretanto, o *software* permitia também a visualização de diversos outros tipos de gráficos e diagramas, entre eles o de Bode.

A primeira medição por EIS de cada cp foi realizada com ambos os recipientes (*cap's*) da célula completados com água destilada; esta leitura inicial foi, então, considerada a medida padrão de referência. Depois disso, o recipiente localizado na face correspondente ao cobrimento em estudo foi esvaziado e completado com a solução aquosa a 3,4% de NaCl. A partir desde instante, passou-se a contar o tempo de envelhecimento entre as medições subseqüentes por EIS.

O intervalo entre uma medida e outra foi determinado aleatoriamente, de

acordo com a disponibilidade do equipamento. No início, este intervalo foi da ordem de algumas horas. Como porém não houve variação visível do potencial nestas medidas, resolveu-se aumentar o intervalo entre as medidas para dias. As últimas leituras incluídas nesta dissertação foram realizadas com, aproximadamente, 290 dias de envelhecimento.

3.7.2.3. Interpretação dos dados

A interpretação dos dados resultantes das medidas de EIS foi realizada por meio do *software* ZView, versão 2.0.

Este programa permite a representação dos dados obtidos em várias opções de gráficos e diagramas, entre eles os de Nyquist e de Bode. Também dispõe de recurso para *fitting* dos dados por diversos métodos, incluindo a utilização de circuitos elétricos equivalentes.

O circuito equivalente adotado foi definido após a revisão de diversos trabalhos publicados por outros autores. O ajuste, com este circuito, dos dados coletados nas leituras de EIS, deu-se pelo método dos mínimos quadrados não-lineares[12].

3.8. ATIVIDADES DE CAMPO

Além dos procedimentos experimentais em laboratório, também foram realizadas atividades em campo, a saber: inspeção na RDE de Aracaju; visitas a fabricantes; confecção, ensaio, instalação e acompanhamento do desempenho de artefatos de concreto.

3.8.1. Inspeção na rede instalada em Aracaju[8]

A fim de se ter uma idéia do grau de agressividade a que os artefatos de concreto instalados na orla de Aracaju estavam sujeitos, realizou-se inspeção em

diversos pontos da RDE local, tendo sido dada ênfase à avaliação de postes e cruzetas. A documentação se deu por meio de intenso registro fotográfico dos defeitos constatados.

Amostras intactas de concreto foram retiradas, de postes já bastante danificados, e analisadas em laboratório a fim de se determinar o teor de cloretos. A alcalinidade (pH) do material de alguns postes também foi avaliada, qualitativamente, pela aplicação de solução alcoólica de fenolftaleína.

Outras amostras foram coletadas e, posteriormente, preparadas para a realização de análises por MEV, EDS e DRX no LACTEC.

Dois postes de seção duplo T, um com 11 metros de comprimento e 300 daN de resistência nominal e o outro com 9 metros e 150 daN, foram retirados de seu local (Figura 50a) original e levados às dependências de uma fábrica de artefatos em Aracaju, onde foram ensaiados a fim de se determinar sua elasticidade e resistência à ruptura, conforme anexo A da norma NBR 8451/98[42]. O objetivo dos ensaios foi avaliar o efeito da degradação dos artefatos na resistência mecânica dos mesmos. Os postes estavam implantados em pontos distintos da orla da capital sergipana e, apesar de ambos possuírem cerca de 5 anos de instalação, já apresentavam indícios de degradação do concreto e corrosão da armadura (Figura 50b).

Após a ruptura dos postes, procedeu-se à verificação da espessura de cobrimento e do afastamento das armaduras, bem como do estado geral das barras de aço.

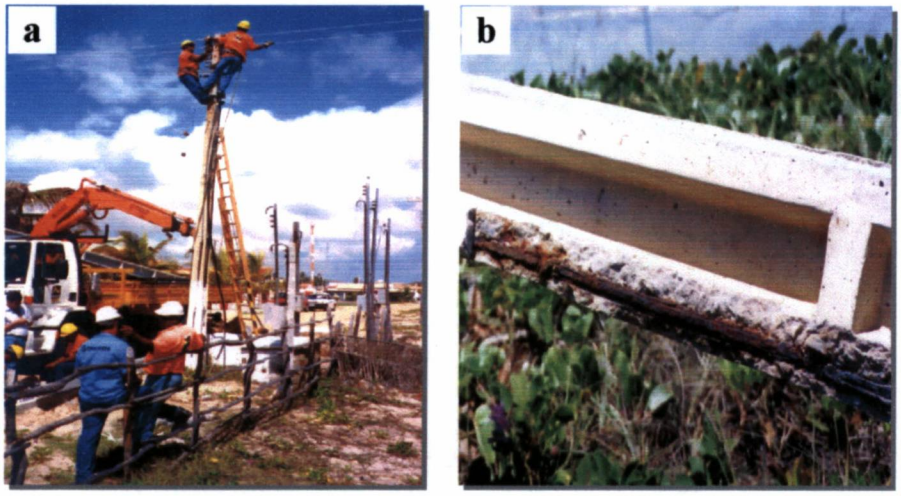


FIGURA 50 - A) RETIRADA DE POSTE PARA REALIZAÇÃO DE ENSAIOS; B) POSTE EM ESTADO AVANÇADO DE DEGRADAÇÃO

3.8.2. Visitas técnicas a fabricantes locais

Foram realizadas visitas técnicas às principais fábricas de artefatos pré-moldados de concreto armado da região metropolitana de Aracaju, com o intuito de se avaliar o processo de produção e a qualidade dos produtos confeccionados.

Todas as etapas do processo produtivo foram acompanhadas, desde o recebimento das matérias-primas até a expedição dos produtos acabados.

Também, foi possível a obtenção de informações sobre os traços empregados, como tipo e consumo de cimento, a/c, proporção dos agregados, consistência, etc.

3.8.3. Confecção e ensaio de postes e cruzetas

Os concretos confeccionados na etapa de dosagens piloto embasaram a especificação de traços para a moldagem de artefatos para serem instalados na orla de Aracaju, objetivando o seu envelhecimento natural.

Para a concretagem de postes e cruzetas, utilizaram-se as instalações de uma das fábricas visitadas previamente. Procurou-se não interferir no processo de

fabricação adotado pela empresa. Isto foi definido de forma a ser possível uma posterior avaliação do desempenho dos concretos estudados, previamente, em laboratório, em comparação ao material, usualmente, preparado pelo fabricante.

Os dois traços confeccionados em campo, um com cimento CPV-ARI RS e outro com cimento CPII-F 32, sílica ativa e superplastificante, foram similares aos estudados na etapa de dosagens piloto.

A umidade superficial do agregado miúdo foi, previamente, determinada pelo emprego do método de Speedy, descrito no procedimento DNER-ME 052/94[161]. Os agregados graúdos tiveram sua umidade total determinada de acordo com o procedimento DNER-ME 196/98[162].

Em virtude da infra-estrutura disponível na fábrica onde os concretos foram produzidos, o método de proporcionamento dos insumos teve que ser alterado. Como não havia balança para a pesagem dos agregados, a dosagem se deu em termos do volume dos materiais. Cálculos para conversão dos traços foram realizados, de forma que os concretos obtidos resultaram praticamente idênticos aos estudados em laboratório.

Realizaram-se ensaios para verificação do *slump* das misturas frescas, e também foram moldados cp's para ensaio de resistência à compressão axial aos 3, 7 e 28 dias de idade.

Para cada um dos traços confeccionados, foram fabricados:

- 2 postes de seção duplo T, tipo B, com 11 metros de comprimento e resistência nominal de 300 daN, conforme NBR 8452/98[163]; e
- 2 cruzetas tipo T, com 1900 mm de comprimento, conforme NBR 8454/84[164].

Na Figura 51 podem ser vistas imagens da fabricação dos artefatos.

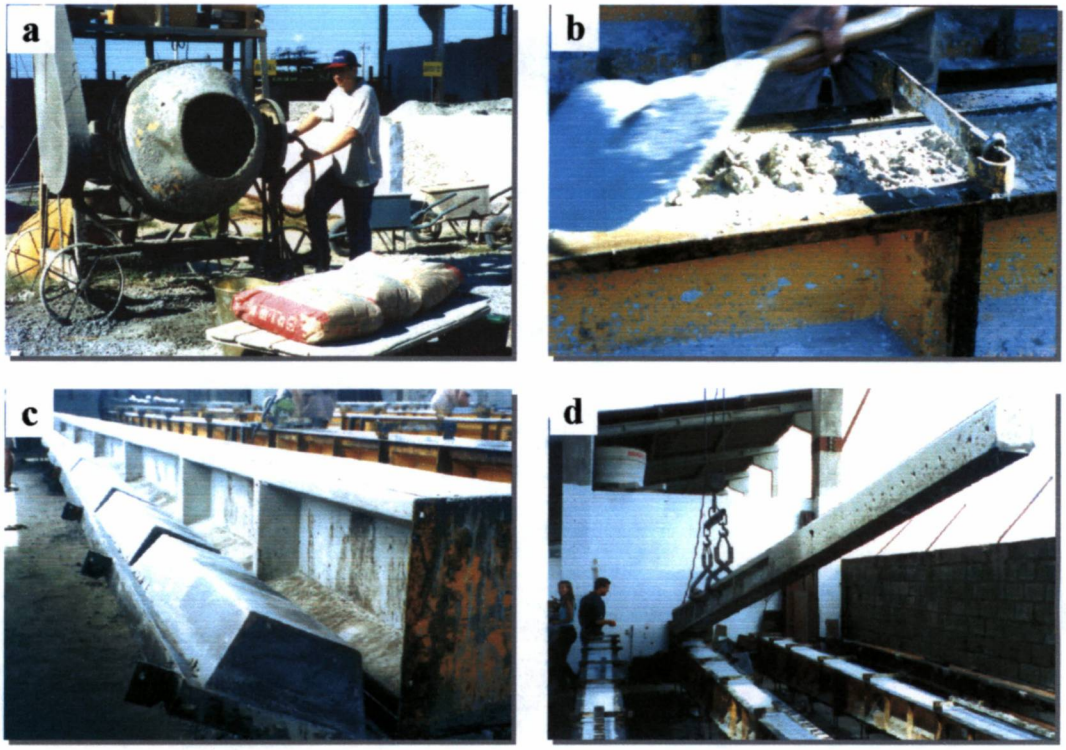


FIGURA 51 - FABRICAÇÃO DE ARTEFATOS DE CONCRETO ARMADO PARA ESTUDO: A) MISTURA; B) LANÇAMENTO; C) DESFORMA; D) IÇAMENTO

Também, foram selecionados dois postes e duas cruzetas fabricados pela empresa no dia anterior, de forma a servirem como padrões para comparação da resistência mecânica e do desempenho dos artefatos produzidos com os traços estudados em laboratório. Os produtos escolhidos possuíam os mesmos tipos, dimensões e resistências nominais dos produzidos com os concretos piloto, e haviam sido fabricados com cimento CPII-F 32 e consumo da ordem de 350 kg/m^3, porém, sem o uso de adição ou aditivo.

Decorridos 28 dias da moldagem dos artefatos, um poste e uma cruzeta de cada traço foram submetidos a ensaios de flexão e ruptura, de acordo com os procedimentos descritos no anexo A da NBR 8451/98[42] e no anexo B da NBR 8453/84[165], respectivamente. Um dos postes convencionais produzidos pela empresa também foi ensaiado. Para a realização dos testes, utilizou-se bancada de ensaios localizada nas dependências da fábrica onde os artefatos foram produzidos, conforme Figura 52.

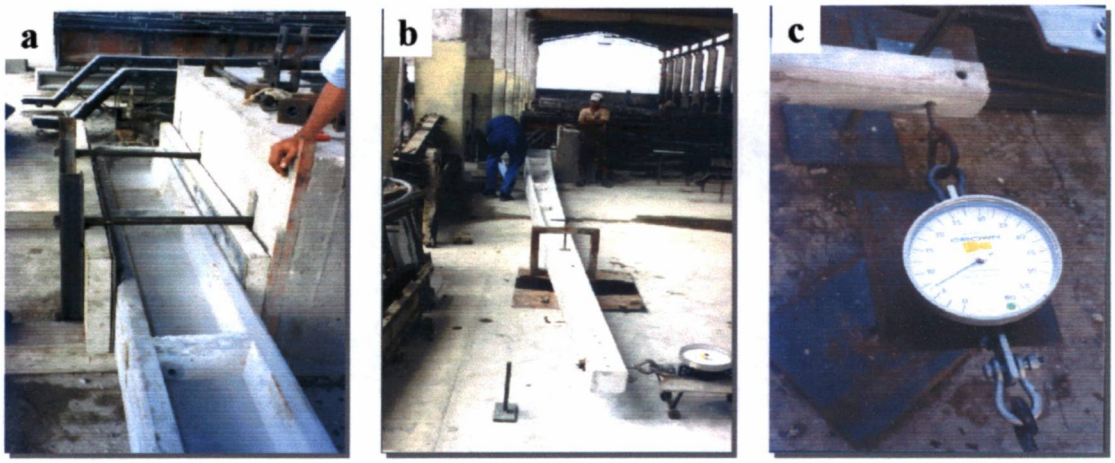


FIGURA 52 - ENSAIO DE POSTE FABRICADO COM CONCRETO ESTUDADO EM LABORATÓRIO: A) ENGASTAMENTO; B) CARREGAMENTO; C) DETALHE DO DINAMÔMETRO

Os valores obtidos do ensaio mecânico de postes e cruzetas foram confrontados com as especificações das respectivas normas: NBR 8451/98[42] e NBR 8453/84[165].

Após a ruptura, realizou-se a verificação da espessura de cobrimento, e do afastamento das armaduras, além de avaliação do estado geral das barras de aço e da alcalinidade do concreto. Amostras coletadas dos postes foram submetidas e ensaio de absorção de água, conforme NBR 6124/80[43].

3.8.4. Instalação e acompanhamento do desempenho dos artefatos em campo

Dos artefatos fabricados conforme descrito no item 3.8.3, um poste e uma cruzeta de cada traço foram transportados até o município de Itaporanga d'Ajuda, no litoral sul do Sergipe, a fim de proceder-se à sua instalação à beira-mar para envelhecimento natural. Um par de artefatos produzidos com o concreto padrão da empresa, selecionados do estoque da fábrica, também foram levados. Em todos os postes foram realizadas medições do potencial de corrosão, por meio do uso de um multímetro digital conectado à armadura, em relação a um eletrodo de referência em contato com a superfície de concreto umedecida.

De forma a se permitir o acompanhamento periódico do desempenho dos artefatos, bem como da degradação de amostras e cp's de outros materiais, foi idealizada e construída uma estação experimental de corrosão (doravante denominada EEC), situada na praia da Caueira, litoral sul de Sergipe. A EEC, com dimensões em planta de (20 x 3) m, foi implantada defronte ao mar, a aproximadamente 17 m da linha de maré cheia. Uma imagem da EEC pode ser vista na Figura 53a.

Na área delimitada da EEC foi possível a instalação dos três postes a serem avaliados, cada um contendo uma cruzeta fabricada com o mesmo traço de concreto. Todos os postes foram alinhados, paralelamente, à linha de maré, de forma a ficarem expostos às mesmas condições agressivas. Na Figura 53b é mostrada a instalação de um dos artefatos.

No espaço entre os postes foram colocadas bancadas metálicas pintadas para servirem como suporte a cp's de concreto armado e amostras de chapas metálicas pintadas, para avaliação periódica de sua degradação em razão do tempo de exposição à atmosfera litorânea.

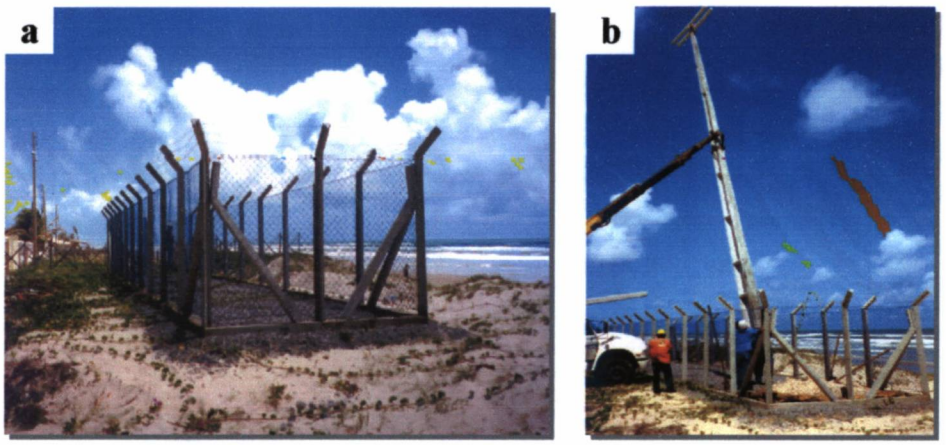


FIGURA 53 - A) VISTA DA EEC CONSTRUÍDA NA PRAIA DA CAUEIRA; B) INSTALAÇÃO DE POSTE NO INTERIOR DA EEC

Na EEC também foram instalados suportes para sistemas de coleta de dados acerca da corrosão atmosférica. Foram implementados instrumentos para determinação:

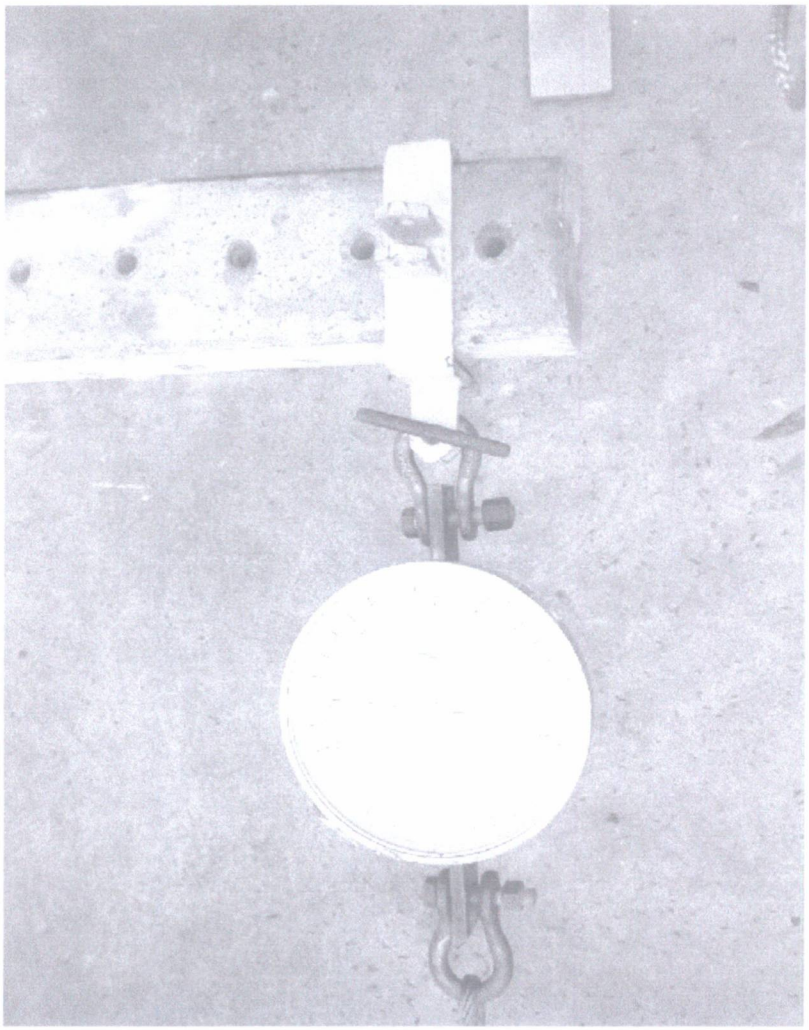
- da taxa de sulfatação, pelo método da vela de dióxido de chumbo, conforme NBR 6921/81[166];
- do teor de cloretos da atmosfera, pelo método da vela úmida, conforme NBR 6211/01[167]; e
- do teor de material particulado precipitado (ou partículas sedimentáveis), de acordo com especificações da norma americana ASTM D1739-98[168].

Informações acerca da temperatura média, umidade relativa ambiente, precipitação pluvial e insolação da região foram obtidas, mensalmente, para o período de estudo[10], mediante solicitação à Companhia de Processamento de Dados de Sergipe (PRODASE).

Periodicamente, por ocasião da realização de viagens técnicas de equipe do LACTEC a Sergipe, foram realizadas inspeções nos artefatos instalados na EEC, bem como recolhimento dos materiais coletados para avaliação da agressividade da atmosfera local.

Em relação aos artefatos de concreto, além de inspeção visual detalhada, realizaram-se também medições do potencial de corrosão em diversas regiões dos postes. Para as leituras, utilizou-se um multímetro digital marca Protek, modelo 506, conectado a um micro-computador portátil (*notebook*). Para ser possível o contato de um dos terminais do multímetro à armadura, foi realizado furo de pequeno diâmetro no concreto de cada poste, o qual era lacrado com cera após as medições. O outro terminal do equipamento era conectado a um eletrodo de referência ECS, colocado em contato com a superfície de concreto dos postes por meio de uma almofada de feltro umedecido com água destilada.

Os valores de potencial obtidos nos pontos considerados foram registrados, e sua variação ao longo do tempo, avaliada.



RESULTADOS E DISCUSSÕES

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados verificados nos procedimentos experimentais, bem como as conclusões obtidas nas avaliações de campo. As discussões pertinentes a cada resultado estão incluídas nos respectivos tópicos.

4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS INSUMOS

No presente item apresentam-se os resultados da caracterização dos aglomerantes, agregados, adição, resina epoxídica e aditivo, utilizados na confecção dos concretos.

4.1.1. Cimentos

Os resultados da análise química realizada nos cimentos oriundos das regiões de Curitiba/PR e Aracaju/SE estão colocados na Tabela 16. Os limites recomendados pelas normas correspondentes também são informados.

Os resultados da maior parte das análises resultou dentro dos limites estipulados nas normas de cimento. O teor de equivalente alcalino de todos os cimentos ultrapassou o valor máximo estimado. NEVILLE (1997)[3] discute os valores limites de álcalis no cimento, principalmente Na_2O e K_2O, acima dos quais alerta para uma maior probabilidade de ocorrência de reações químicas destes componentes com alguns tipos de agregados que podem levar a uma deterioração mais rápida do concreto. Em relação aos cimentos CPII-F 32, não obstante os teores de Na_2O e K_2O serem um pouco diferentes, os equivalentes alcalinos resultaram praticamente idênticos para os dois cimentos.

TABELA 16 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS CIMENTOS UTILIZADOS NAS DOSAGENS

ANÁLISE	CPII-Z (PR)	CPII-F (PR)	CPII-F (SE)	*LIMITES NBR 11578/91*[21]	CPV-RS (PR)	*LIMITES NBR 5737/92*[30]
COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)						
Al_2O_3	6,9	4,1	4,6		6,7	
SiO_2	22,6	18,0	19,6		22,4	
Fe_2O_3	2,96	2,64	2,63		3,00	
CaO	52,6	59,6	61,5		54,7	
MgO	4,54	5,42	1,42	*Máx. 6,5*	3,66	*Máx. 6,5*
SO_3	2,77	2,75	2,23	*Máx. 4,0*	3,33	*Máx. 3,5*
Na_2O	0,21	0,25	0,09		0,23	
K_2O	0,77	0,86	1,13		0,84	..
Perda ao fogo	5,75	5,63	5,93	*Máx. 6,5*	3,81	*Máx. 4,5*
Total	99,10	99,25	99,13	*99,00 a 99,70**	98,67	*99,00 a 99,70**
Resíduos insolúveis	14,00	0,97	0,98	*Máx. 16,0/2,5*	10,05	
CaO livre	1,4	1,7	2,5	*1,00 a 2,00**	1,5	*1,00 a 2,00**
Na_2O eq.	0,72	0,82	0,84	*Máx. 0,60**	0,78	*Máx. 0,60**
MÓDULOS E SATURAÇÃO (%)						
M.Si	2,39	2,77	2,71	*2,00 a 3,00**	2,55	*2,00 a 3,00**
Al/Fe	2,27	1,61	1,75	*Máx. 2,50**	2,19	*Máx. 2,50**
Saturação	70,91	99,20	94,61	..	71,11	..

NOTA: * Valores estimados

Pode-se, facilmente, perceber que, apesar dos cimentos CPII-F 32 oriundos de Curitiba e de Aracaju serem do mesmo tipo, apresentam diferenças em alguns dos resultados, principalmente em relação aos teores de MgO, CaO livre e saturação. Tais variações advêm, provavelmente, de diferenças de natureza mineralógica das minas de onde são extraídos os materiais utilizados na fabricação dos cimentos. TAYLOR (1990)[32] comenta que teores de MgO maiores que 5% propiciam a formação de periclase, o qual reage lentamente com a água, causando danos por expansão em concretos endurecidos.

Na Tabela 17 são apresentados os resultados das análises físicas executadas nas amostras de cimentos oriundas do Paraná e de Sergipe, bem como os limites estabelecidos nas respectivas normas.

TABELA 17 - RESULTADOS DAS ANÁLISES FÍSICAS REALIZADAS NOS CIMENTOS

ANÁLISE	CPII-Z (PR)	CPII-F (PR)	CPII-F (SE)	*LIM. NBR 11578/91*[21]	CPV-RS (PR)	*LIM. NBR 5737/92*[30]
Massa específica (g/cm^3)	2,94	3,10	3,05	..	3,00	
Finura Blaine (cm^2/g)	3390	3030	3690	*Mín. 2600*	4320	*Mín. 3000*
Resíduo peneira #200 (%)	1,0	2,0	0,4	*Máx. 12,0*	0,2	*Máx. 6,0*
Resíduo peneira #325 (%)	5,7	10,1	4,1		1,5	
Expansib. a quente (mm)	0,5	0,0	1,0	*Máx. 5,0*	0,5	*Máx. 5,0*
Início de pega (h:min)	3:40	2:55	2:25	*Mín. 1:00*	3:25	*Mín. 1:00*
Fim de pega (h:min)	5:20	4:35	3:35	*Máx. 10:00*	4:35	*Máx. 10:00*

À parte os resultados terem ficado dentro dos limites normalizados, o cimento CPII-F 32 oriundo de Sergipe apresentou maior finura (e, talvez por isso, maior expansibilidade) que o aglomerante de mesmo tipo produzido no Paraná. Os teores de resíduos nas peneiras #200 e #325 também resultaram distintos.

Os valores obtidos para a resistência à compressão dos cimentos são informados na Tabela 18, junto de seus respectivos limites mínimos em cada idade. Os resultados de cada cimento referem-se aos valores médios obtidos do ensaio de três cp's.

TABELA 18 - RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CIMENTOS

IDADE	CPII-Z (PR)	CPII-F (PR)	CPII-F (SE)	*LIM. NBR 11578/91*[21]	CPV-RS (PR)	*LIM. NBR 5737/92*[30]
1 dia	..	..	..		32,2	*Mín. 11,0*
3 dias	21,9	19,7	24,8	*Mín. 10,0*	34,1	*Mín. 24,0*
7 dias	27,3	25,2	31,7	*Mín. 20,0*	45,8	*Mín. 34,0*
28 dias	34,4	31,3	39,0	*Mín. 32,0*	..	..

NOTA: Resistências em MPa.

O cimento CPII-F 32 adquirido em Curitiba apresentou menores resistências que o trazido de Aracaju, inclusive não atingindo o valor mínimo recomendado aos 28 dias. Isto se deve, provavelmente, à menor finura do material.

4.1.1.1. Análise por FRX

Na Tabela 19 são informados os resultados da análise química dos cimentos,

pela técnica de FRX.

Os teores obtidos por FRX apresentaram-se um pouco diferentes dos valores determinados por análise química, o que é normalmente esperado quando do uso de técnicas diferentes. Entretanto, a proporção entre os resultados foi mantida.

A semelhança dos resultados de óxido de estrôncio (SrO) e óxido de zinco (ZnO), obtidos para os cimentos do tipo CPII-F 32, pode ser resultado de imprecisão na curva de calibração do equipamento utilizado, uma vez que se esperava valores distintos em razão da origem diferenciada dos materiais.

TABELA 19 - RESULTADOS DA ANÁLISE DOS CIMENTOS POR FRX, EM %

ANÁLISE	CPII-Z (PR)	CPII-F (PR)	CPII-F (SE)	CPV-RS (PR)
Al_2O_3	6,97	2,97	3,29	6,75
SiO_2	21,87	17,51	19,04	22,64
Fe_2O_3	2,85	2,60	2,58	2,81
CaO	53,60	59,90	61,57	54,53
MgO	4,68	5,03	1,92	4,92
SO_3	2,54	2,47	2,04	2,92
Na_2O	0,15	0,15	0,08	0,15
K_2O	1,17	1,00	1,23	1,16
TiO_2	0,44	0,25	0,28	0,40
Mn_2O_3	0,07	0,09	0,08	0,09
P_2O_5	0,13	0,12	0,13	0,14
SrO	0,24	0,27	0,25	0,24
ZnO	0,02	0,02	0,02	0,02
Cl	0,03	0,02	0,04	0,02
SOMA	94,77	92,45	92,59	96,79

4.1.1.2. Análise por DRX

Na Figura 54 são mostrados os difratogramas obtidos por DRX em amostras dos cimentos utilizados nas dosagens. Abaixo dos espectros podem ser vistas as linhas relativas à identificação de fases cristalinas em função da posição dos picos, conforme os padrões de referência do banco de dados do *ICDD*.

A única diferença notada entre os cimentos foi quanto à intensidade relativa

dos picos. Visualmente, nenhum pico extra foi constatado, apesar dos diferentes tipos de aglomerantes analisados.

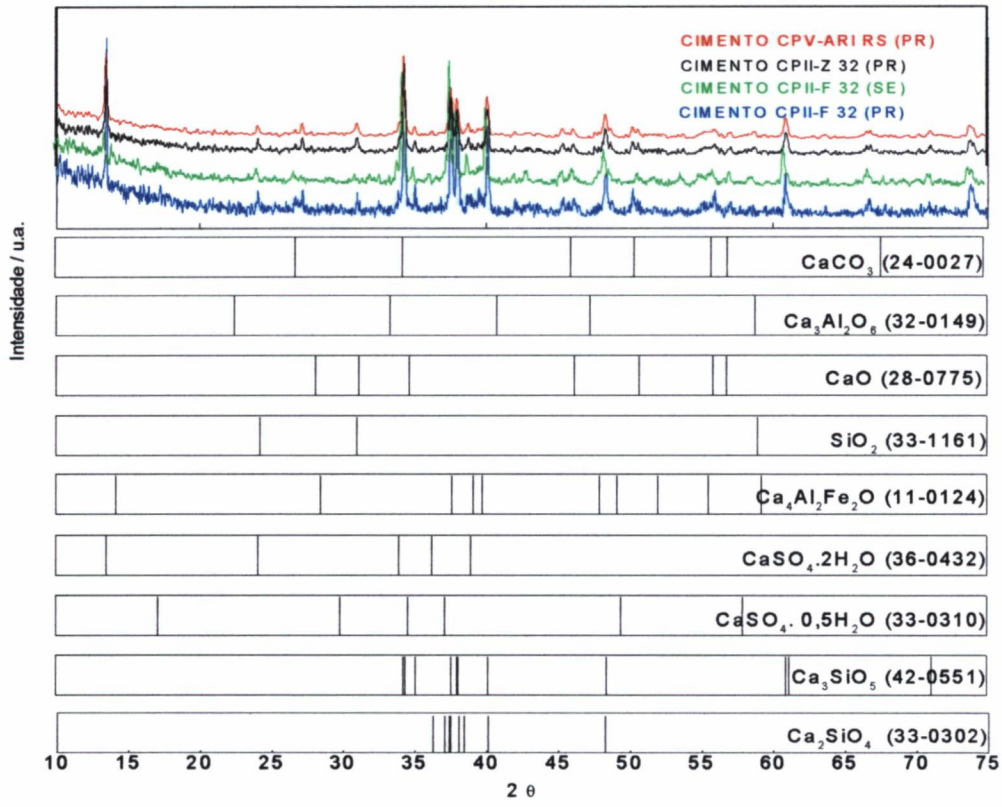


FIGURA 54 - DIFRATOGRAMAS DE RAIOS X DOS CIMENTOS, COM IDENTIFICAÇÃO DE FASES PELOS PADRÕES DO *ICDD*

4.1.1.3. Análise térmica

As curvas resultantes da análise térmica dos aglomerantes podem ser visualizadas na Figura 55. A linha azul indica a curva de perda de massa de cada amostra, obtida por TGA, enquanto que a linha vermelha refere-se à exotermia/endotermia do cimento considerado, obtida por DTA.

Importantes considerações podem ser feitas sobre os dados obtidos por DTA/TGA, principalmente quanto à perda ao fogo, pois esta determinação feita por análise térmica apresenta algumas vantagens em relação ao método gravimétrico,

como a maior rapidez no tempo de execução do ensaio e a possibilidade de identificação dos fenômenos térmicos ocorridos a cada intervalo de temperatura[8]. A principal desvantagem advém da menor precisão e confiabilidade dos resultados, em decorrência da utilização de pequena quantidade de amostra, comparativamente ao método utilizando mufla.

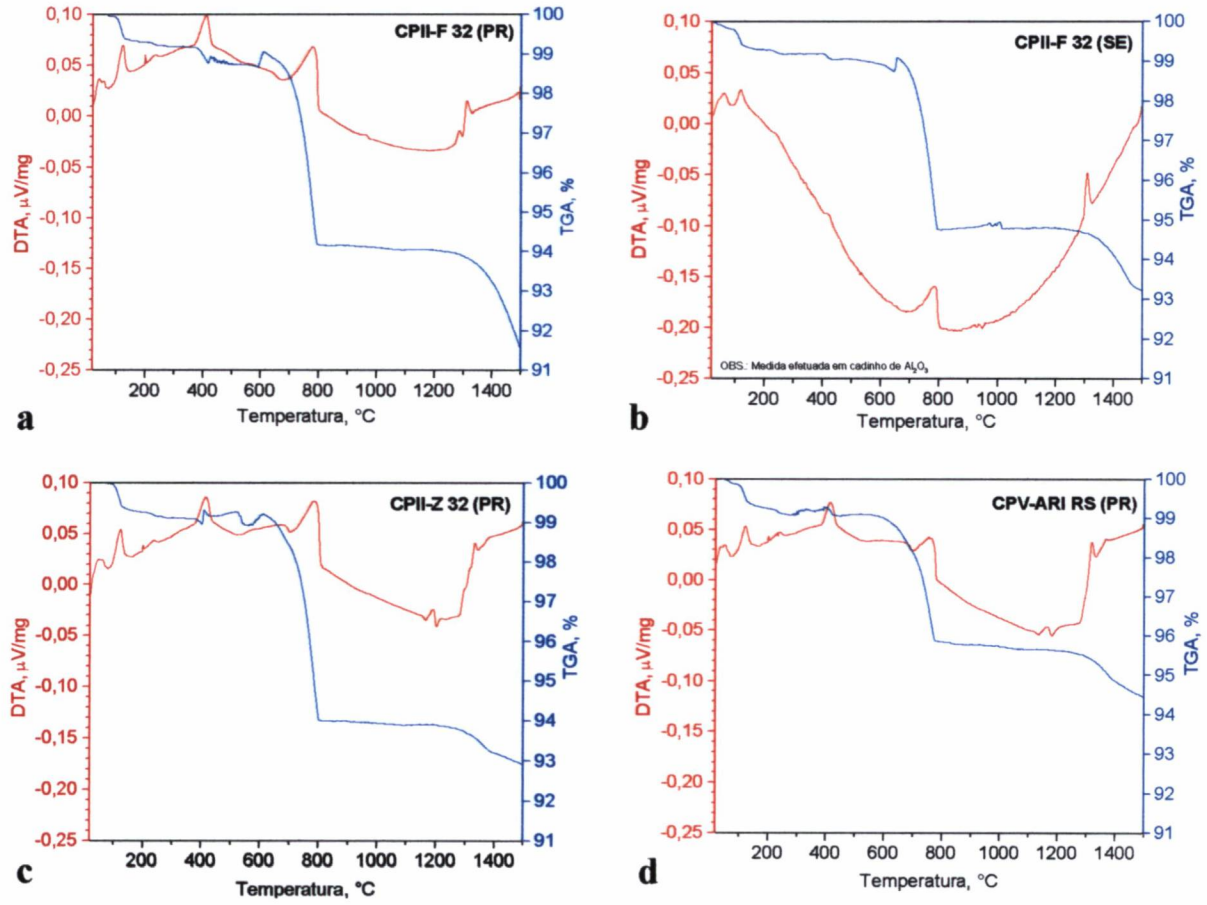


FIGURA 55 - TERMOGRAMAS DOS CIMENTOS UTILIZADOS NAS DOSAGENS: A) CPII-F 32 (PARANÁ); B) CPII-F 32 (SERGIPE); C) CPII-Z 32 (PARANÁ); D) CPV-ARI RS (PARANÁ)

A análise do termograma do cimento CPII-F 32 do Paraná indica que até 1000°C a perda ao fogo total foi de 5,86%, contra os 5,63% obtidos pelo método gravimétrico. Destes 5,86%, atribui-se 4,87% à descarbonatação da calcita (ocorrida a 780,7°C), restando 0,99% de perda de água. A perda por desidroxilação da portlandita foi de 0,49%, ocorrida a 412,4°C. Acima de 1000°C houve uma perda de cerca de 2,65% em massa do cimento, valor este que pode ser atribuído aos compostos voláteis

presentes no material, tal como o SO_3.

Os cimentos CPII-Z 32 e CPV-ARI RS apresentam termogramas bastante similares ao do CPII-F 32 do Paraná. Para o primeiro material, a perda de massa total até 1500°C foi de 7,09%, enquanto que para o cimento CPV-ARI RS, este valor foi de 5,52%, sendo o menor de todos.

Diferenças podem ser observadas entre as curvas dos cimentos CPII-F 32 do Paraná e de Sergipe. O material sergipano apresenta menor perda ao fogo até 1500°C e menor quantidade de CH na temperatura de 412,4°C. Neste caso, o calor absorvido pelo CH é bem menor, conforme pico observado na curva de DTA, na faixa de temperatura compreendida entre 400 e 500°C.

4.1.1.4. Outros resultados

O diâmetro médio dos grãos de cada cimento analisado, obtido por granulometria à laser, é informado na Tabela 20.

A maior finura do cimento CPII-F 32 de Sergipe foi confirmada pelo reduzido diâmetro médio dos seus grãos, o qual resultou 24% menor que o do material de mesmo tipo produzido no Paraná.

TABELA 20 - DIÂMETRO MÉDIO DOS GRÃOS DE CIMENTO

CIMENTO	DIÂMETRO MÉDIO DAS PARTÍCULAS
CPII-Z 32 (Paraná)	18,52 μm
CPII-F 32 (Paraná)	21,45 μm
CPII-F 32 (Sergipe)	16,30 μm
CPV-ARI RS (Paraná)	14,31 μm

Da análise por BET da superfície específica dos grãos dos cimentos CPII-F 32 oriundo de Sergipe e CPV-ARI RS foram obtidos os valores: 0,7169 m^2/g e 0,9248 m^2/g, respectivamente.

4.1.2. Agregados

Neste item são informados os resultados da caracterização e análise petrográfica dos agregados miúdos e graúdos usados nas dosagens. Também são apresentadas as conclusões do ensaio de reatividade potencial.

4.1.2.1. Agregados miúdos

Na Tabela 21 são indicados os resultados das análises de caracterização dos agregados miúdos (areias) oriundos das regiões metropolitanas de Curitiba e Aracaju. A umidade crítica e o coeficiente de inchamento da areia proveniente de Sergipe também são informados.

TABELA 21 - RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS MIÚDOS

ANÁLISE	AREIA (PARANÁ)	AREIA (SERGIPE)	*LIMITES NBR 7211/83*[132]
Dimensão máxima característica (mm)	2,4	1,2	
Módulo de finura	1,96	1,87	..
Teor de argila em torrões (%)	0,6	0,2	*Máx. 1,5*
Material pulverulento (%)	1,58	0,30	*Máx. 3,0*
Massa unitária solta (kg/dm^3)	1,36	1,47	
Massa específica SSS (g/cm^3)	2,62	2,62	
Massa específica seca (g/cm^3)	2,61	2,61	
Absorção de água (%)	0,65	0,42	
Impurezas orgânicas (ppm)	< 300	< 300	*Máx. 300*
Umidade crítica (%)		3,85	
Coeficiente de inchamento	..	1,369	..

A areia de Sergipe, mais fina que a de Curitiba, apresentou melhor qualidade, em razão dos menores teores de material pulverulento e torrões de argila e da sua baixa absorção.

As curvas granulométricas dos agregados miúdos, tanto o adquirido no Paraná quanto o trazido de Sergipe, podem ser vistas na Figura 56.

De acordo com as porcentagens retidas acumuladas em cada peneira, as

graduações dos agregados miúdos resultaram **areia fina** (zona 2) e **areia muito fina** (zona 1), respectivamente. Os limites granulométricos inferiores e superiores que delimitam as respectivas zonas destes agregados, de acordo com a NBR 7211/83[132], estão representados nos gráficos por linhas tracejadas.

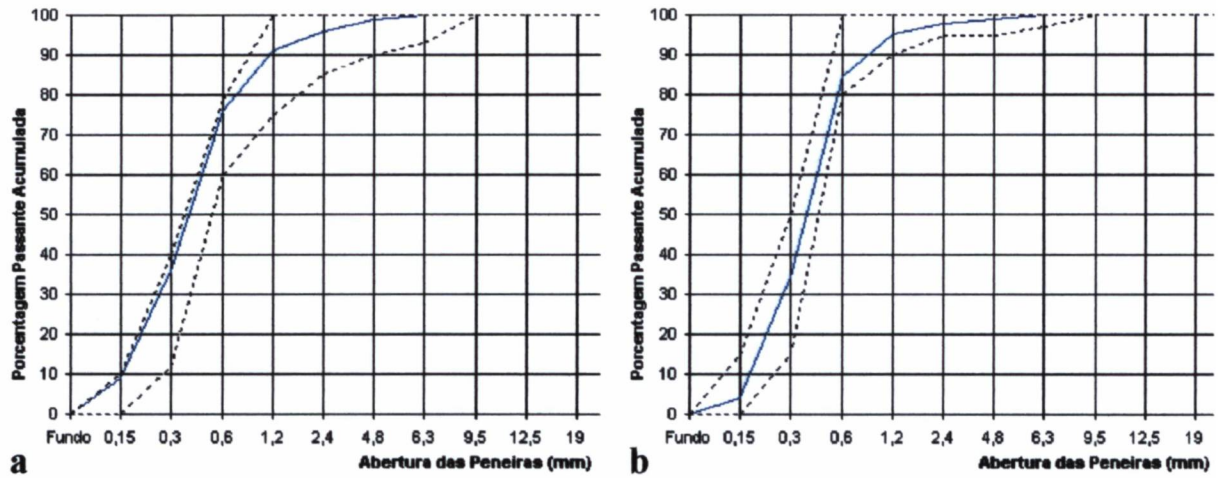


FIGURA 56 - CURVAS GRANULOMÉTRICAS DOS AGREGADOS MIÚDOS PROCEDENTES DE: A) CURITIBA (AREIA FINA); B) ARACAJU (AREIA MUITO FINA)

4.1.2.1.1. Análise petrográfica

Os resultados da análise mineralógica dos agregados miúdos são indicados na Tabela 22. As areias eras provenientes dos rios:

- Iguaçu, na região metropolitana da capital paranaense; e
- Pochim, no município de Itaporanga d'Ajuda, Sergipe.

A análise revelou que as areias apresentam composições similares. Segundo YUSHIRO, citado por ANDRADE (1997)[146], os silicatos existentes no feldspato podem ocasionar reações expansivas em combinações de cimento e agregados. Também se considera que o quartzo, embora seja um dos minerais, termodinamicamente, mais estáveis, pode ser potencialmente reativo quando apresenta

o retículo cristalino deformado, principalmente por tensões de origem geológica. DOLAR-MANTUANI (1983)[169] afirma que rochas contendo grãos médios e grandes de quartzo são vulneráveis ao ataque químico de soluções alcalinas, podendo produzir gel expansivo.

TABELA 22 - RESULTADOS DA ANÁLISE MINERALÓGICA NOS AGREGADOS MIÚDOS

FRAÇÃO	AREIA (PARANÁ)
2,36 mm	80% quartzo, 15% feldspato e 5% rocha.
1,18 mm	70% quartzo e 30% feldspato.
0,355 mm	80% quartzo, 20% feldspato e traços de ilmenita.
0,180 mm	90% quartzo, 9% feldspato e 1% ilmenita.
FRAÇÃO	AREIA (SERGIPE)
2,36 mm	95% quartzo, 4% feldspato e 1% rocha.
1,18 mm	65% quartzo, 25% feldspato, 8% rocha, 1% mica e 1% ilmenita.
0,355 mm	85% quartzo, 10% feldspato, 2% rocha, 1% mica, 1% granada, 1% epidoto, traços de ilmenita e traços de óxido de ferro.
0,180 mm	90% quartzo, 9% feldspato, 1% mica, traços de granada e traços de óxido de ferro.

4.1.2.2. Agregados graúdos

Na Tabela 23 mostram-se os resultados da caracterização dos agregados graúdos (britas e pedriscos) procedentes do Paraná e de Sergipe.

Os agregados graúdos do Paraná apresentaram melhor qualidade que os materiais oriundos de Sergipe, mostrando teores de absorção de água e material pulverulento bem menores que os obtidos por estes últimos. É interessante notar, também, a considerável diferença entre os módulos de finura dos pedriscos sergipano e paranaense.

As curvas granulométricas dos agregados graúdos podem ser vistas na Figura 57. Os limites sugeridos pela NBR 7211/83[132] que mais se aproximaram da granulometria dos materiais também são mostrados. O eixo das abscissas refere-se à abertura de malha das peneiras, enquanto que o das ordenadas, à porcentagem passante acumulada.

TABELA 23 - RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS GRAÚDOS

ANÁLISE	BRITA 1 (PR)	BRITA 1 (SE)	PEDRISCO (PR)	PEDRISCO (SE)	*LIM. NBR 7211/83*[132]
Dimensão máx. caract. (mm)	19,0	19,0	9,5	9,5	..
Módulo de finura	6,61	6,81	5,38	6,17	..
Material pulverulento (%)	0,67	1,60	2,60	4,20	*Máx. 1,0*
Massa unitária solta (kg/dm^3)	1,88	1,36	1,33	1,30	..
Massa unit. compact. (kg/dm^3)	1,93	1,46	1,49	1,44	..
Massa específica SSS (g/cm^3)	2,69	2,59	2,60	2,51	..
Massa específica seca (g/cm^3)	2,68	2,56	2,59	2,48	..
Absorção de água (%)	0,46	1,30	0,70	1,40	..

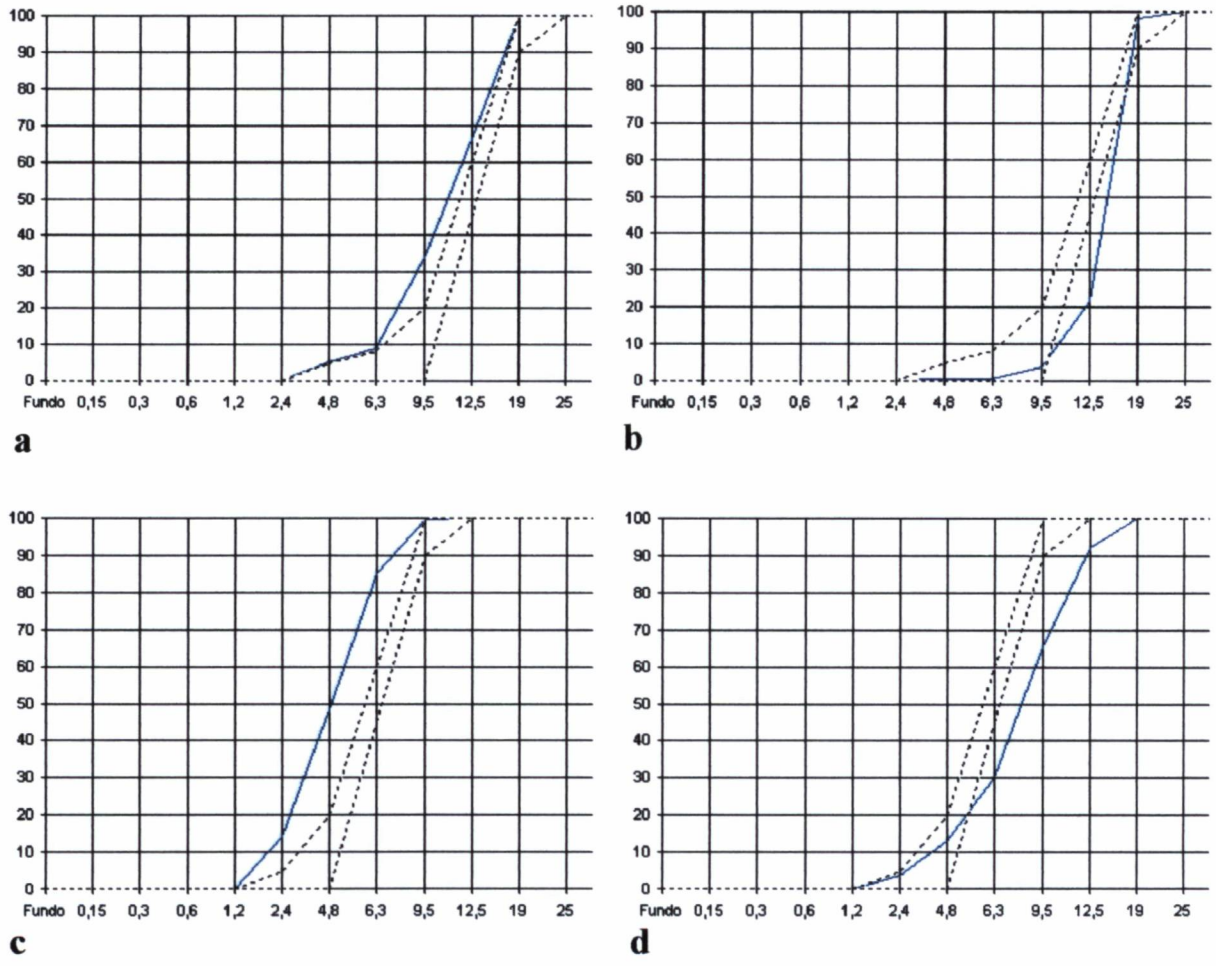


FIGURA 57 - CURVAS GRANULOMÉTRICAS DOS AGREGADOS GRAÚDOS: A) BRITA - PR; B) BRITA - SE; C) PEDRISCO - PR; D) PEDRISCO - SE

As granulometrias dos agregados graúdos do Paraná resultaram mais finas que os intervalos relativos às respectivas graduações. Isto pode ser visualizado nas

curvas granulométricas como um deslocamento à esquerda da linha azul, em relação às linhas tracejadas que indicam os limites granulométricos da brita 1 e da brita 0 (pedrisco).

Por outro lado, os agregados originários de Sergipe mostraram-se, em geral, mais grossos que os padrões normalizados, em razão do deslocamento à direita das curvas granulométricas.

4.1.2.2.1. Análise petrográfica

Na Tabela 24 são colocados os resultados da análise petrográfica realizada nos agregados graúdos de Curitiba e Aracaju.

TABELA 24 - RESULTADOS DA ANÁLISE MINERALÓGICA NOS AGREGADOS GRAÚDOS

	BRITA 1 E PEDRISCO (PARANÁ)
Descrição macroscópica	Presença de fragmentos de cores negra e cinza escura, granulometria fina, maciço e homogêneo.
Mineralogia e descrição microscópica	50 a 55% de plagioclásio ripiforme curto, com organização ofítica (forma de triângulos), com basicidade bitowinita-anortita; 30 a 35% de augita em pequenos grãos cristalizados nos espaços triangulares entre os prismas de plagioclásio; 10 a 15% de magnetita formada em pequenos grãos dispersos homogeneamente na rocha; e 10 a 15% de olivina, formada como pequenos grãos dispersos homogeneamente na rocha.
Textura	Textura basáltica ofítica microgranular, com estrutura maciça, sem fissuras visíveis opticamente e sem grau de alteração.
Classificação	Rocha basáltica.
	BRITA 1 E PEDRISCO (SERGIPE)
Descrição macroscópica	Presença de fragmentos de cores cinza escura e clara, granulometria fina, maciço e homogêneo.
Mineralogia e descrição microscópica	50 a 55% de sericita, que faz a matriz da rocha muito fina, encontrando-se cristalizada substituindo feldspato potássico e plagioclásio; 10 a 15% de feldspato K em grãos com bordas esfiapadas, alterados por sericita; 25 a 30% de quartzo muito recristalizado, com extinção ondulante e bordas irregulares tipo "sutura"; 5 a 7% de epidoto em pequenos grãos dispersos homogeneamente na rocha, cristalizado devido a destruição do plagioclásio; traços de esfeno de pequenos cristais normais em granitóides; e 10 a 15% de biotita mesclada à sericita, com cristais originais recristalizados pelo hidrotermalismo e novos cristais hidrotermais.
Textura	Textura fílica hidrotermal, com estrutura maciça, com fissuras visíveis opticamente e grau de alteração elevado.
Classificação	Rocha granitóide alterada por hidrotermalismo.

A petrografia dos agregados graúdos paranaenses, de natureza basáltica, não indica a possibilidade de ocorrência de RAA.

Já a origem granítica dos agregados graúdos sergipanos pode, segundo Yushiro, promover reações expansivas do tipo álcali-silicato[146].

4.1.2.3. Reatividade potencial

Algumas combinações de cimento e agregados mostraram-se potencialmente reativas, de acordo com os resultados dos testes executados conforme descrito no item 3.1.2.2. O gráfico da Figura 58 ilustra os valores obtidos nas medidas periódicas das expansões dos cp's preparados com o agregado miúdo e os cimentos adquiridos na região de Curitiba. Os limites para as leituras aos 16 dias e que servem como indicação da reatividade, de acordo com sugestões da ASTM C1260-01[137], também são mostrados.

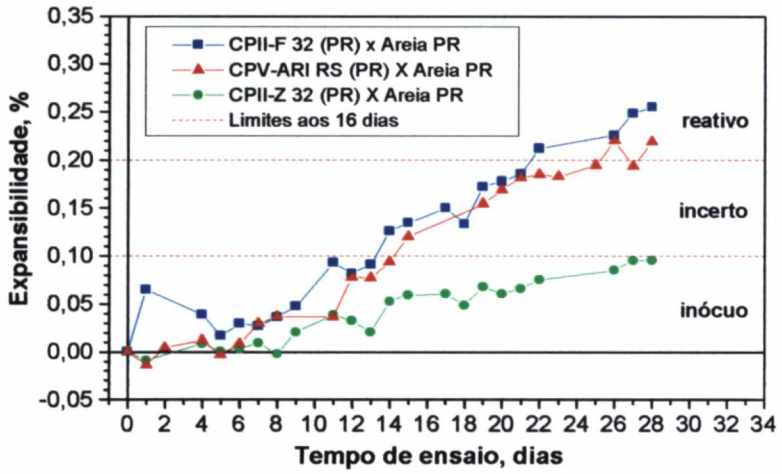


FIGURA 58 - REATIVIDADE POTENCIAL DOS MATERIAIS ADQUIRIDOS NO PARANÁ

De acordo com os resultados do ensaio, a combinação entre o agregado miúdo e o cimento CPII-Z 32 paranaenses não apresenta reatividade potencial. Os cp's contendo os cimentos CPII-F 32 e CPV-ARI RS apresentaram maiores expansões aos 16 dias. Com o prosseguimento do ensaio, as expansões superaram 0,20% aos 28 dias,

indicando que os concretos confeccionados com estes aglomerantes têm grande probabilidade de apresentaram reações expansivas no futuro.

Na Figura 59 podem ser vistos os resultados de reatividade para os concretos confeccionados com cimento e agregados oriundos de Sergipe, com e sem incorporação de sílica ativa na mistura.

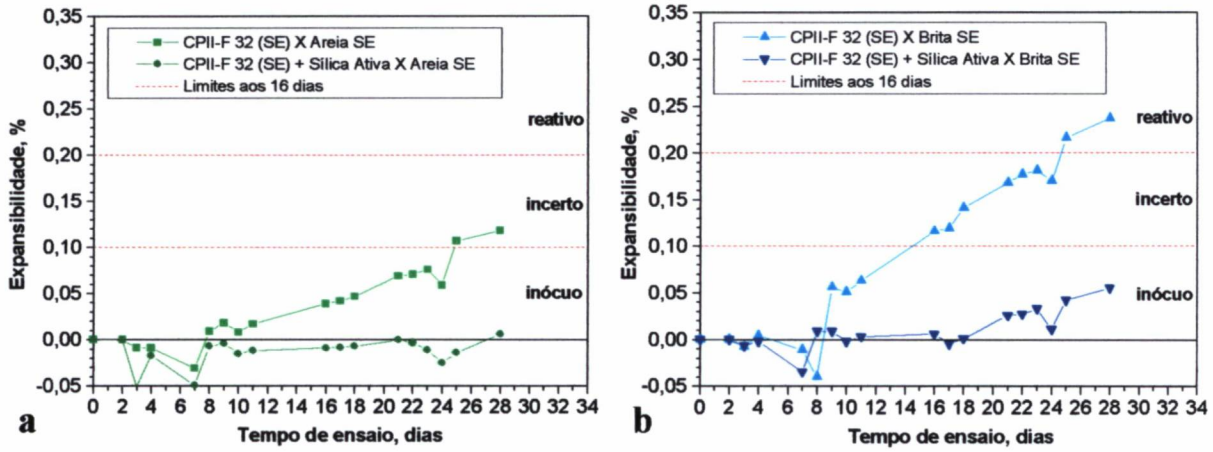


FIGURA 59 - REATIVIDADE POTENCIAL DOS MATERIAIS ADQUIRIDOS EM SERGIPE: A) AGREGADO MIÚDO; B) AGREGADO GRAÚDO

A combinação de areia e cimento de Sergipe resultou, praticamente, inócua. Quando a areia é substituída por pedrisco, as expansões do concreto passam a ser indicativas de RAA.

Em ambos os casos, a adição de 8% de sílica ativa nas misturas promoveu uma redução considerável das expansibilidades, as quais resultaram inócuas. No concreto confeccionado com areia, a expansão foi praticamente nula até o término do ensaio. Este comportamento já é bem conhecido pela comunidade técnico-científica, conforme comprovado nos ensaios realizados por ANDRADE (1997)[146].

4.1.3. Sílica ativa

A composição química e principais propriedades físicas da sílica ativa, obtidas por análises laboratoriais, são apresentadas na Tabela 25. Também são

informados os limites estabelecidos pela NBR 13956/97[139] e as especificações fornecidas pelo fabricante do produto, para que se possa confrontar os resultados.

TABELA 25 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA E PROPRIEDADES FÍSICAS DA SÍLICA ATIVA

ANÁLISE OU ENSAIO	RESULTADOS DOS ENSAIOS	*LIMITES NBR 13956/97[139]*	*ESPECIFICAÇÕES DO FABRICANTE*
SiO_2 (%)	96,4	*Mín. 85,0*	*Mín. 85,0*
Na_2O (%)	0,25		
K_2O (%)	0,73		
Perda ao fogo (%)	1,98	*Máx. 6,0*	
Total (%)	99,36		
Na_2O equivalente (%)	0,7	*Máx. 1,5*	*Máx. 0,5*
Umidade (%)	0,90	*Máx. 3,0*	..
Massa específica (g/cm^3)	2,20		*2,22*
Diâmetro médio dos grãos (μm)	8,81 ± 1,23	..	*0,2*

Os teores obtidos nos ensaios encontram-se dentro das especificações de norma. Contudo, a sílica ativa apresentou tamanho de grão 44 vezes maior que o informado pelo fabricante. Esta diferença pode ser decorrente de falhas no processo de produção do material ou de erros na execução do ensaio. De qualquer maneira, o diâmetro das partículas é, aproximadamente, metade do tamanho médio dos grãos de cimento Portland, o que contribui para que a reação do material com o $Ca(OH)_2$ formado na hidratação do cimento seja bastante favorável[3]. Na Figura 60 é apresentado gráfico da distribuição granulométrica média das partículas de sílica ativa, o qual apresenta uma configuração bimodal, com uma pequena parte dos grãos situada na faixa de 1 μm.

Por DRX, verificou-se a ausência de fases cristalinas no material, conforme pode ser confirmado pela ausência de picos no difratograma mostrado na Figura 61. Portanto, trata-se de uma sílica ativa amorfa, que apresenta bom efeito cimentício no concreto.

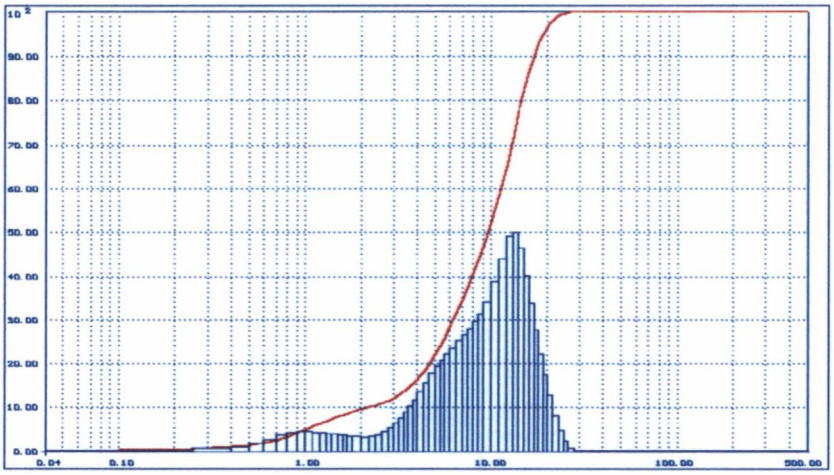


FIGURA 60 - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS GRÃOS DE SÍLICA ATIVA

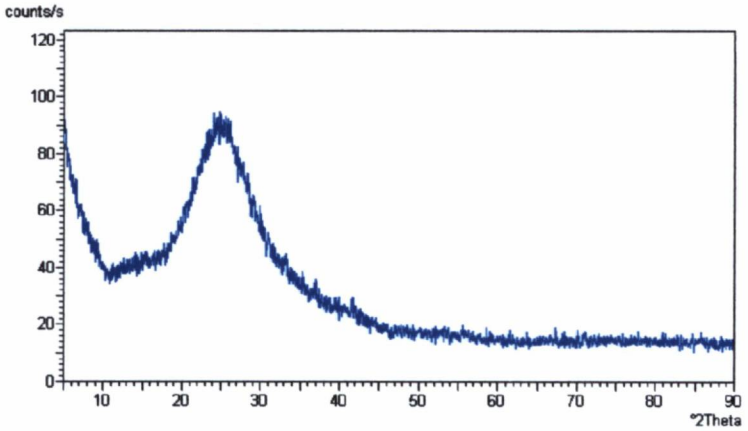


FIGURA 61 - DIFRATOGRAMA DE RAIOS X DA SÍLICA ATIVA

4.1.4. Resina epóxi

A Tabela 26 traz algumas informações acerca da resina epoxídica FS-105, utilizada em traço de concreto na etapa de dosagens complementares. As informações foram obtidas de catálogo técnico fornecido pelo fabricante do produto.

TABELA 26 - DADOS TÉCNICOS DA RESINA EPÓXI, DE ACORDO COM ESPECIFICAÇÕES DO FABRICANTE

PROPRIEDADE OU CARACTERÍSTICA	*ESPECIFICAÇÃO DO FABRICANTE*
Viscosidade	*85 UK*
Teor de sólidos	*47,85%*
Teor de compostos orgânicos voláteis	*268,0 g/l*
Relação de mistura (parte A / parte B), em peso	*81% / 19%*
Tempo de vida útil (*potlife*)	*5 a 6h*
Tempo de indução para uso em concreto	*30 min*
Tempo de secagem ao toque	*2 h*
Tempo de cura inicial	*8 h*
Tempo de cura completa	*24 h*

4.1.5. Aditivo superplastificante

Na Tabela 27 são informados os resultados das análises executadas no aditivo, cuja base química é uma resina de melamina-formaldeído.

TABELA 27 - RESULTADOS DAS ANÁLISES EFETUADAS NO ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE

ENSAIO	RESULTADO	*ESPECIFICAÇÃO DO FABRICANTE*
pH (medido a 19,2°C)	8,0	..
Massa específica (medida a 25°C)	1,127 g/cm^3	*1,12*
Teor de partículas sólidas (medido a 110°C)	21,8%	..

4.2. ESTUDOS DE DOSAGEM

Os traços dos concretos desenvolvidos nas dosagens preliminares foram estipulados com base nas misturas adotadas por diversas fábricas de postes e cruzetas localizadas em diferentes Estados do país. Por isso, tentou-se reproduzir tais concretos por meio da utilização de dados similares, como a relação 1:m próxima de 0,2 (1:5), os consumos de cimento da ordem de 290 e 350 kg/m^3, o *slump* em torno de 40 mm e a/c entre 0,5 e 0,7. É óbvio que fatores água/cimento acima de 0,6 não são recomendados para concretos que ficarão expostos à atmosfera marinha, porém como o objetivo do

estudo era justamente avaliar os traços mais comuns na indústria de artefatos de concreto, tais valores foram mantidos.

Os gráficos da Figura 62 ilustram os dados obtidos do estudo para definição da proporção ideal entre os agregados graúdos provenientes de Curitiba e de Aracaju. Na confecção dos concretos da etapa de dosagens complementares, em que se usaram agregados de Curitiba e cimento de Aracaju, a melhor mistura foi a que utilizou 70% de brita 1 e 30% de pedrisco, conforme Figura 62a.

Já para as dosagens piloto, a combinação de agregados de Aracaju que apresentou maior compacidade, denotada pelo ponto de máximo da curva, foi aquela em que se usou 55% de brita 1 e 45% de pedrisco (Figura 62b).

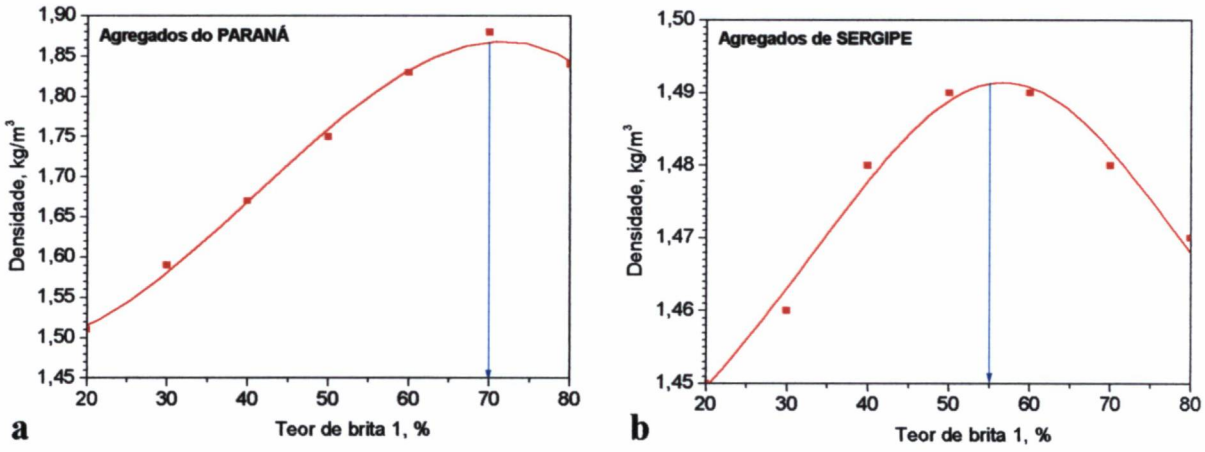


FIGURA 62 - GRÁFICOS PARA DETERMINAÇÃO DA PROPORÇÃO IDEAL DE AGREGADOS GRAÚDOS: A) DOSAGENS COMPLEMENTARES; B) DOSAGENS PILOTO

Por meio de dosagens experimentais, conforme descrito no item 3.2.4, determinou-se a porcentagem ótima de areia para os agregados utilizados nas dosagens.

Para os concretos das dosagens preliminares, o resultado obtido foi de 38,5% de agregado miúdo para os traços com menor consumo de cimento ($\approx$ 290 kg/m^3), sendo o restante, portanto, a ser preenchido por agregados graúdos. Os concretos com consumo de cimento da ordem de 350 kg/m^3 apresentaram um teor de areia de 35,0%.

Ambas as misturas da etapa de dosagens complementares resultaram com um teor de agregado miúdo de 36,0%. O teor de areia para as dosagens piloto foi de 38%.

Na Tabela 28 estão indicadas as principais informações sobre os concretos obtidos na etapa de dosagens preliminares, incluindo os resultados dos ensaios efetuados nas misturas frescas.

TABELA 28 - DADOS SOBRE OS CONCRETOS OBTIDOS NA ETAPA DE DOSAGENS PRELIMINARES E RESULTADOS DOS ENSAIOS NAS MISTURAS FRESCAS

Nº DA DOSAGEM	E-655	E-667	E-668	E-669	E-670	E-671
Tipo de cimento	CPII-F	CPII-F	CPII-Z	CPII-Z	CPV RS	CPV RS
Relação 1:m	1:6,5	1:5,4	1:6,5	1:5,42	1:6,5	1:5,42
Teor de agregado miúdo (%)	38,5	35,0	38,5	35,0	38,5	35,0
Consumos (kg/m^3)						
Cimento	292	347	288	345	292	344
Areia	730	656	720	656	730	654
Brita 1	1168	1218	1152	1215	1168	1211
Água	190	201	199	185	191	186
Traço						
Cimento	1	1	1	1	1	1
Areia	2,50	1,89	2,50	1,90	2,50	1,90
Brita 1	4,00	3,51	4,00	3,52	4,00	3,52
Fator a/c	0,650	0,577	0,690	0,534	0,651	0,540
Slump (mm)	35	50	50	40	40	40
Massa unitária (kg/m^3)	2378	2427	2357	2402	2383	2395
Teor de ar incorporado (%)	0,8	0,7	1,1	0,5	0,8	0,6
Temperatura da massa (°C)	18,5	17,8	17,5	17,6	17,5	17,2

Na Tabela 29 são mostrados os dados obtidos e resultados de ensaios nos concretos frescos confeccionados na etapa complementar.

A adição de resina epóxi ao concreto conferiu um considerável e inesperado aumento do *slump*, atingindo quase três vezes o valor previamente estipulado. Apesar de ter sido usado com o intuito principal de diminuir a permeabilidade, o material também atua, provavelmente, como um aditivo plastificante no concreto. Desta forma, os efeitos da resina epóxi na consistência do concreto deverão ser mais bem estudados.

TABELA 29 - DADOS SOBRE OS CONCRETOS OBTIDOS NA ETAPA DE DOSAGENS COMPLEMENTARES E RESULTADOS DOS ENSAIOS NAS MISTURAS FRESCAS

Nº DA DOSAGEM	E-701	E-703
Tipo de cimento	CPII-F 32 (SE)	CPII-F 32 (SE)
Teor de adição ou resina	8% de sílica ativa	3,72% de resina epóxi
Relação 1:m	1:4,54	1:5,12
Teor de agregado miúdo (%)	36,0	36,0
Consumos (kg/m^3)		
Cimento	325	307
Sílica ativa	26	..
Areia	573	565
Brita 1	713	704
Pedrisco	306	301
Água	194	160
Resina epóxi	..	12
Traço		
Materiais cimentícios	1	1
Areia	1,63	1,84
Brita 1	2,03	2,29
Pedrisco	0,87	0,98
Fator a/c	0,553	0,521
Slump (mm)	65	110
Massa unitária (kg/m^3)	2079	2034
Teor de ar incorporado (%)	1,3	1,1
Temperatura da massa (°C)	24,7	24,8

Um fator negativo do traço contendo resina epoxídica advém do alto custo deste material, o que inviabiliza a sua aplicação prática, atualmente, em artefatos para RDE's.

Na Tabela 30 são mostrados os dados obtidos e resultados de ensaios nos concretos frescos confeccionados na etapa de dosagens piloto.

Os concretos trabalhados na etapa de dosagens piloto apresentaram considerável redução do consumo de água, em comparação às misturas estudadas nas etapas anteriores. Os valores de a/c obtidos são compatíveis com aplicações em ambientes contendo elementos ambientais agressivos, como é o caso da atmosfera

litorânea.

TABELA 30 - DADOS SOBRE OS CONCRETOS OBTIDOS NA ETAPA DE DOSAGENS PILOTO E RESULTADOS DOS ENSAIOS NAS MISTURAS FRESCAS

Nº DA DOSAGEM	E-856	E-857
Tipo de cimento	CPII-F 32 (SE)	CPV-ARI RS (PR)
Teor de adição ou aditivo	8% de sílica + 1,5% aditivo s.p.	..
Relação 1:m	1:4,76	1:5,13
Teor de agregado miúdo (%)	38,0	38,0
Consumos (kg/m^3)		
Cimento	350	350
Sílica ativa	28	..
Areia	643	682
Brita 1	636	612
Pedrisco	521	501
Água	174	186
Adit. superplastificante	5,25	..
Traço		
Materiais cimentícios	1	1
Areia	1,63	1,84
Brita 1	2,03	2,29
Pedrisco	0,87	0,98
Fator a/c	0,460	0,531
Slump (mm)	30	30
Massa unitária (kg/m^3)	2034	2022
Teor de ar incorporado (%)	0,4	0,8
Temperatura da massa (°C)	22,5	23,6

4.3. ENSAIOS EM CP'S E AMOSTRAS DE CONCRETOS ENDURECIDOS

Neste item são apresentados os resultados, com as respectivas discussões, dos ensaios e análises realizados nos cp's de concreto e nas amostras extraídas das misturas endurecidas.

4.3.1. Resistência à compressão

No gráfico da Figura 63a são comparados os valores obtidos no ensaio de

resistência à compressão axial de cp's representativos dos concretos preparados na etapa de dosagens preliminares. As rupturas foram realizadas aos 3, 14 e 28 dias após a moldagem, com os cp's sob cura em câmara úmida. Também foram ensaiados os cp's submetidos a envelhecimento acelerado por imersão em solução de 3,4% de NaCl, após 28, 91, 203 e 420 dias de envelhecimento (56, 119, 231 e 448 dias após a moldagem, respectivamente), e os resultados podem ser vistos na Figura 63b.

Os valores da curva referente a cada concreto referem-se às tensões médias, ou seja, à média aritmética das tensões de ruptura de dois cp's (para cada idade), com precisão de 0,1 MPa. A linha tracejada, em vermelho, indica a resistência à compressão mínima aos 28 dias requerida para concretos utilizados na fabricação de postes e cruzetas para RDE's, cujo valor é 25 MPa, conforme NBR 8451/98[42].

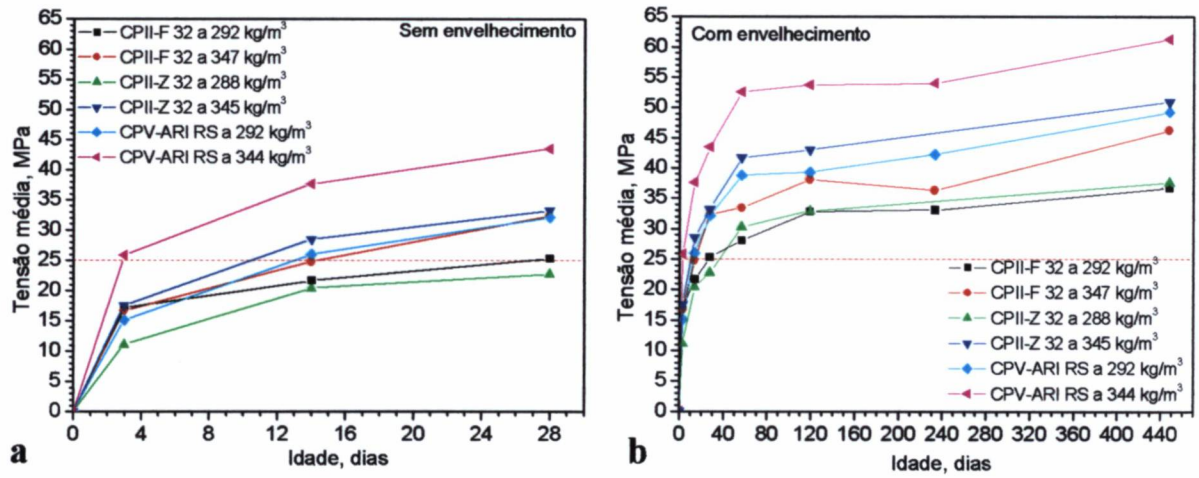


FIGURA 63 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DOS CONCRETOS DAS DOSAGENS PRELIMINARES: A) APÓS CURA EM CÂMARA ÚMIDA; B) APÓS ENVELHECIMENTO EM SOLUÇÃO SALINA

Em geral, os materiais com maior consumo de cimento, assim como as misturas confeccionadas com cimento CPV-ARI RS, apresentaram maiores resistências, como era de se esperar.

Mesmo após envelhecimento por imersão em solução salina, os concretos continuaram a ganhar resistência com o avanço do tempo. Isto demonstra que a constante disponibilidade de água (a qual beneficiou a hidratação dos cimentos) teve

mais influência na resistência mecânica do que a presença de NaCl nessa água. A inexistência de armadura metálica nos cp's também contribuiu para a inalterabilidade dos resultados. A mistura com maior consumo de cimento CPV-ARI RS atingiu, na última ruptura, uma resistência à compressão maior que 60 MPa, podendo ser caracterizada, segundo MEHTA & MONTEIRO (1994)[1], como um CAR.

Na Figura 64a podem ser vistos os resultados de resistência à compressão, até os 28 dias, dos concretos da etapa de dosagens complementares. Na Figura 64b são mostrados também os valores obtidos para as rupturas realizadas após o envelhecimento dos cp's em solução salina por 35, 91, 224 e 420 dias.

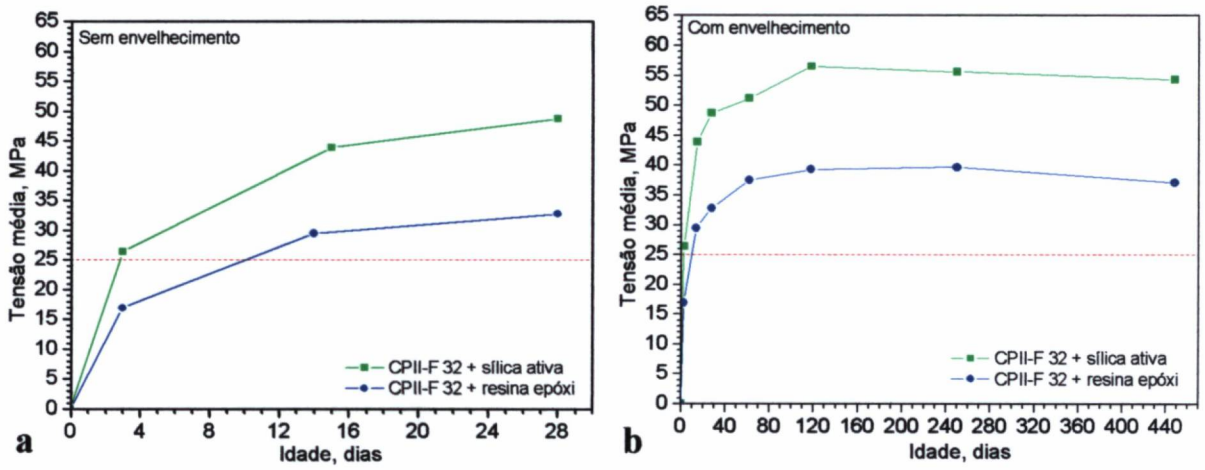


FIGURA 64 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DOS CONCRETOS DAS DOSAGENS COMPLEMENTARES: A) APÓS CURA EM CÂMARA ÚMIDA; B) APÓS ENVELHECIMENTO EM SOLUÇÃO SALINA

A mistura contendo sílica ativa apresentou resistência elevada já aos 14 dias. A partir de 91 dias de envelhecimento (119 dias de idade), os cp's dos concretos da etapa complementar apresentaram uma sensível queda gradativa da resistência mecânica. Uma vez que concretos contendo sílica ativa tendem a apresentar menor permeabilidade e maior resistência ao ingresso dos íons Cl^-, a redução da resistência pode ser devida à retração destes materiais, a qual é tipicamente 15% maior do que nos concretos sem essa adição[3]. Outra hipótese decorre da cristalização, nos poros do concreto, de sais que eventualmente tenham penetrado no material[1]. Este efeito

provoca fissuração generalizada, pelo surgimento de tensões internas, o que acarreta diminuição da capacidade resistiva do concreto.

As resistências à compressão, aos 3, 7, 14 e 28 dias, dos concretos preparados na etapa de dosagens piloto podem ser visualizadas no gráfico da Figura 65.

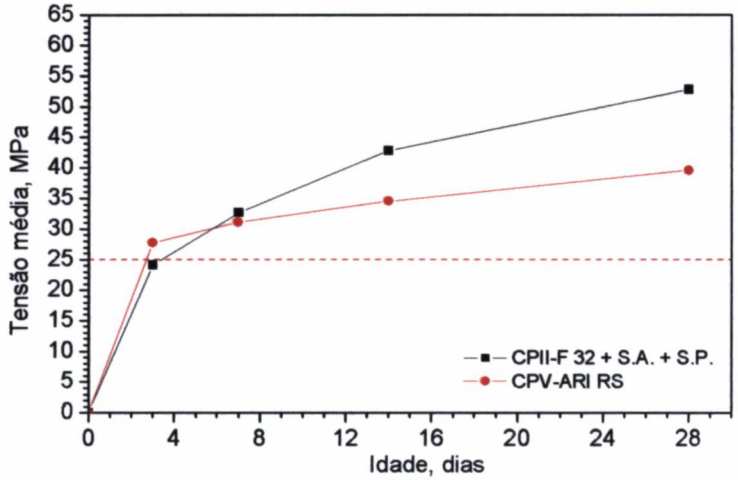


FIGURA 65 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS DAS DOSAGENS PILOTO

A influência da adição de sílica ativa e do uso de aditivo plastificante (como redutor de água) no concreto confeccionado com cimento CPII-F 32 foi mais pronunciada que a simples utilização de cimento de alta resistência inicial. Mesmo assim, ambas as misturas apresentaram, praticamente, resistências à compressão maiores que 25 MPa já aos 3 dias de idade. O concreto com sílica atingiu resistência maior que 50 MPa aos 28 dias.

4.3.2. Permeabilidade

Na Tabela 31 podem ser visualizados os coeficientes de permeabilidade (K) dos cp's referentes aos concretos produzidos nas etapas de dosagens preliminares e complementares. Os valores referem-se à média dos resultados de dois cp's.

Os cp's fabricados com cimento CPV-ARI RS apresentaram fluxo de água excessivo, requerendo por diversas vezes a drenagem da solução percolada, de forma a

não ter sido possível a determinação do coeficiente K. Como era esperada uma baixa permeabilidade em razão do menor tamanho das partículas do cimento, pode-se citar as causas mais prováveis para este comportamento: falha na instalação ou vedação dos cp's no dispositivo de ensaio (permeâmetro) e/ou presença de trincas geradas durante o corte e preparo dos cp's.

TABELA 31 - COEFICIENTES DE PERMEABILIDADE DOS CONCRETOS DAS ETAPAS DE DOSAGENS PRELIMINARES E COMPLEMENTARES

DOSAGEM	TIPO DE CIMENTO	CONSUMO DE CIMENTO (kg/m^3)	A/C	COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE (m/s)
DOSAGENS PRELIMINARES				
E-655	CPII-F 32 (PR)	292	0,650	$4,58 \times 10^{-12}$
E-667	CPII-F 32 (PR)	347	0,577	$3,70 \times 10^{-12}$
E-668	CPII-Z 32 (PR)	288	0,690	$1,26 \times 10^{-11}$
E-669	CPII-Z 32 (PR)	345	0,534	$1,73 \times 10^{-8}$
E-670	CPV-ARI RS (PR)	292	0,651	x
E-671	CPV-ARI RS (PR)	344	0,540	x
DOSAGENS COMPLEMENTARES				
E-701	CPII-F 32 (SE)	351	0,553	$5,25 \times 10^{-13}$
E-703	CPII-F 32 (SE)	307	0,521	$7,62 \times 10^{-11}$

Os valores de coeficiente de permeabilidade dos concretos contendo cimento CPII-F 32 resultaram adequados. Por outro lado, a mistura confeccionada com cimento CPII-Z 32 do Paraná e maior consumo de aglomerante apresentou permeabilidade elevada, considerando-se valores de K descritos na literatura[3, 146]. De acordo com ANDRADE (1997)[146], concretos com menor a/c e maior consumo de cimento apresentam menores coeficientes de permeabilidade. Contudo, o resultado verificado para a mistura da dosagem E-669 não condiz exatamente com esta afirmação. Desta forma, o valor elevado obtido para K pode ser decorrente não da qualidade do material, mas de fatores intervenientes no processo de moldagem, cura ou preparo dos cp's.

Em relação aos concretos das dosagens complementares, a mistura com sílica ativa (E-701) apresentou-se como a de melhor desempenho quanto à

permeabilidade, uma vez que o respectivo coeficiente K permaneceu na casa de 10^{-13} m/s. O material contendo resina epóxi teve um desempenho regular.

Em princípio, não se percebeu nenhuma relação entre o valor de K e o a/c, possivelmente, pelo fato de terem sido utilizados diferentes tipos e consumos de cimento, bem como adições.

4.3.3. Massa específica, absorção de água e índice de vazios

Na Tabela 32 são apresentados os resultados de massa específica e índice de vazios, obtidos dos ensaios executados conforme a NBR 9778/87[44]. Os valores mostrados referem-se à média dos valores obtidos para três amostras de cada concreto.

TABELA 32 - MASSA ESPECÍFICA E ÍNDICE DE VAZIOS DOS CONCRETOS DA ETAPA PRELIMINAR DE DOSAGEM

DOSAGEM	E-655	E-667	E-668	E-669	E-670	E-671
Tipo de cimento	CPII-F	CPII-F	CPII-Z	CPII-Z	CPV RS	CPV RS
Consumo de cimento (kg/m^3)	292	347	288	345	292	344
Fator a/c	0,650	0,577	0,690	0,534	0,651	0,540
Massa específica (kg/l)						
Real	2,64	2,64	2,64	2,64	2,64	2,64
Seca	2,23	2,27	2,22	2,25	2,24	2,25
Após saturação	2,38	2,40	2,37	2,39	2,38	2,39
Após sat. e fervura	2,39	2,40	2,38	2,39	2,38	2,40
Índice de vazios (%)						
Após saturação	14,81	13,37	14,98	13,77	14,61	13,65
Após sat. e fervura	15,19	13,94	15,51	14,19	15,13	14,16

As massas específicas resultaram similares para todas as misturas, sendo de menos de 3% a maior variação encontrada. Já o índice de vazios apresentaram uma dependência do a/c, com maiores valores percentuais para os concretos com maior consumo de água.

Os valores de massa específica e índice de vazios dos concretos das etapas

complementar e piloto são mostrados na Tabela 33.

Os resultados encontrados para a massa específica apresentaram pouca variação de uma mistura para outra, e os valores situaram-se próximos daqueles comumente verificados na literatura[1, 3]. Quanto ao índice de vazios, a composição com resina epóxi e o concreto com sílica ativa e aditivo superplastificante demonstraram melhor qualidade.

TABELA 33 - MASSA ESPECÍFICA E ÍNDICE DE VAZIOS DOS CONCRETOS DAS ETAPAS DE DOSAGENS COMPLEMENTARES E PILOTO

DOSAGEM	E-701	E-703	E-856	E-857
Etapa de dosagem	complementar	complementar	piloto	piloto
Tipo de cimento	CPII-F (SE)	CPII-F (SE)	CPII-F (SE)	CPV RS (PR)
Tipo de adição/aditivo	sílica ativa	resina epóxi	sílica + s.p.	..
Consumo de cimento (kg/m^3)	351	307	378	350
Fator a/c	0,553	0,521	0,460	0,531
Massa específica (kg/l)				
Real	2,64	2,54	2,57	2,57
Seca	2,19	2,21	2,22	2,20
Após saturação	2,36	2,33	2,35	2,34
Após sat. e fervura	2,36	2,34	2,36	2,34
Índice de vazios (%)				
Após saturação	16,96	12,81	12,95	14,00
Após sat. e fervura	17,32	13,39	13,42	14,54

Nos gráficos da Figura 66 são mostrados os resultados de absorção obtidos para os concretos de todas as etapas de dosagem, conforme metodologia da NBR 9778/87[44]. Também foram incluídos os dados de absorção obtidos segundo metodologia da NBR 6124/80[43].

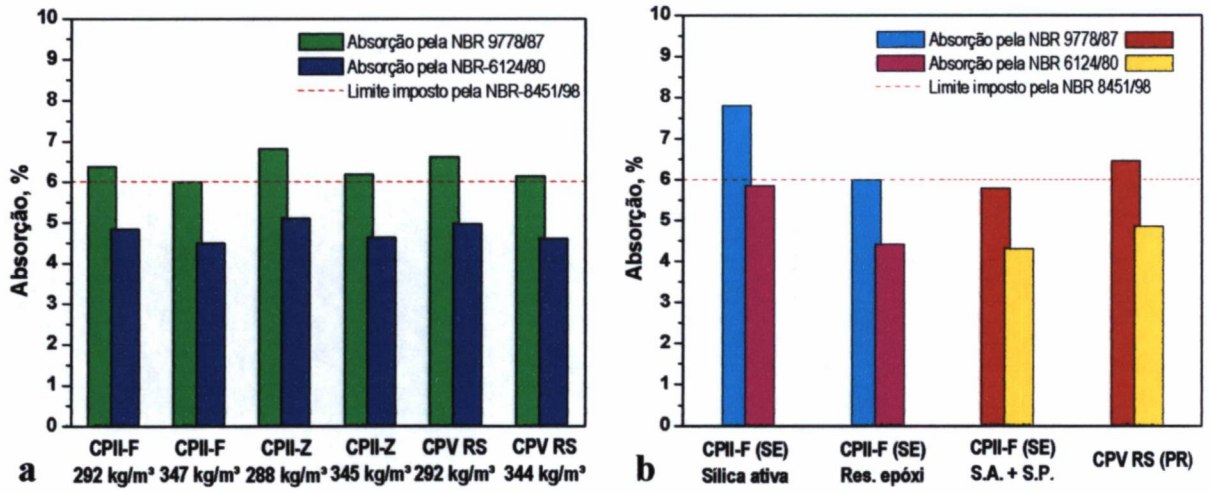


FIGURA 66 - ABSORÇÃO DOS CONCRETOS ESTUDADOS: A) DOSAGEM PRELIMINARES; B) DOSAGENS COMPLEMENTARES E PILOTO

Os resultados obtidos pela NBR 9778/87[44] são, aproximadamente, 33% maiores que os alcançados pelo método da NBR 6124/80[43], o que confirma hipóteses levantadas anteriormente por PORTELLA et al. (2001)[8], conforme item 2.3.2.1. Desta maneira, apesar dos valores médios obtidos pela NBR 9778/87[44] terem ficado acima de 6% (linha tracejada, em vermelho), todos os concretos estão em conformidade com a NBR 8451/98[42], no que diz respeito à absorção de água obtida segundo a NBR 6124/80[43], pois os resultados ficaram abaixo daquele valor.

Pode-se, facilmente, perceber que concretos com valores mais altos de índice de vazios apresentaram maiores teores de absorção de água, conforme esperado.

4.3.4. Análise por MEV

Análises por MEV e EDS foram realizadas em amostras de todos os concretos estudados em laboratório. Entretanto, dos resultados verificados, serão comentados apenas os mais interessantes. Na barra de dados situada no rodapé das imagens podem ser obtidas algumas informações sobre cada micrografia, como ampliação, tensão utilizada, escala, etc.

Na Figura 67 são mostradas duas micrografias, e seus respectivos espectros

de análise elementar, da superfície de fratura de amostras extraídas de cp prismático de concreto confeccionado com cimento CPV-ARI RS, após envelhecimento artificial acelerado em laboratório.

Os concretos apresentam, praticamente, similares e muito baixos teores de cloretos na superfície de fratura. A massa é compacta, mas apresenta algumas trincas, porém não se pode atribuí-las a problemas de degradação, já que não há participação de outras fases químicas aparentes. É provável que tais trincas tenham sido geradas durante o processo de extração ou preparo das amostras. Também, não foi encontrado gel nas superfícies analisadas, podendo ser descartada a possibilidade imediata de reação expansiva.

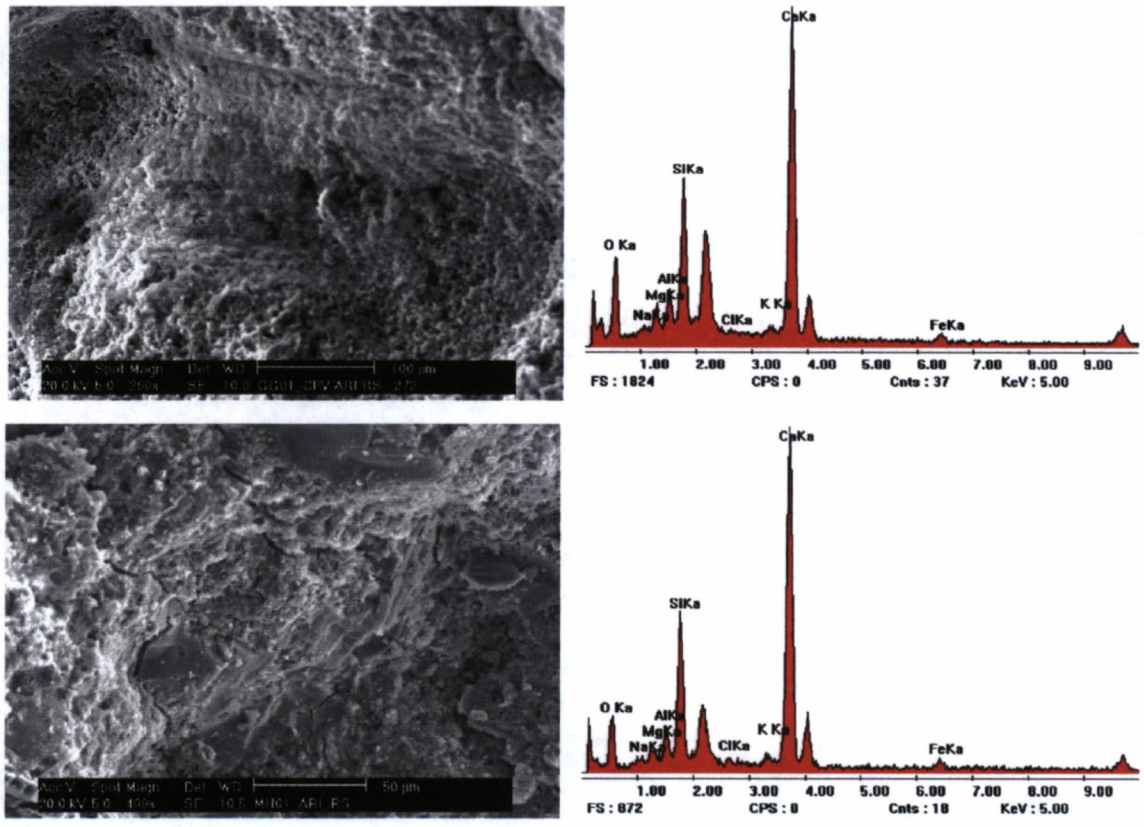


FIGURA 67 - IMAGENS E ANÁLISE ELEMENTAR, POR MEV E EDS, DA SUPERFÍCIE DE FRATURA DE AMOSTRA COM CIMENTO CPV-ARI RS, APÓS ENVELHECIMENTO ARTIFICIAL

Quando submetida a envelhecimento natural na EEC da praia da Caueira, a

composição com mesmo tipo e consumo de cimento apresentou alterações de fase visíveis por MEV, principalmente no interior de alguns poros, como pode ser visto na Figura 68.

O aspecto da micrografia, conforme imagem ampliada, e a análise elementar indicam a presença de cristais aciculares de etringita. Na ampliação também pode ser verificada a presença de tobermorita (aspecto de escamas entre os cristais de etringita), porém, a presença de íon Cl^-, que era esperada, não foi detectada pela análise química elementar. Isto talvez foi devido à presença do elemento em concentração menor que o limite de detecção do equipamento (5%), impossibilidade de alocar a sonda do EDS sobre a região constatada ou permanência do cloreto no volume (*bulk*) da amostra.

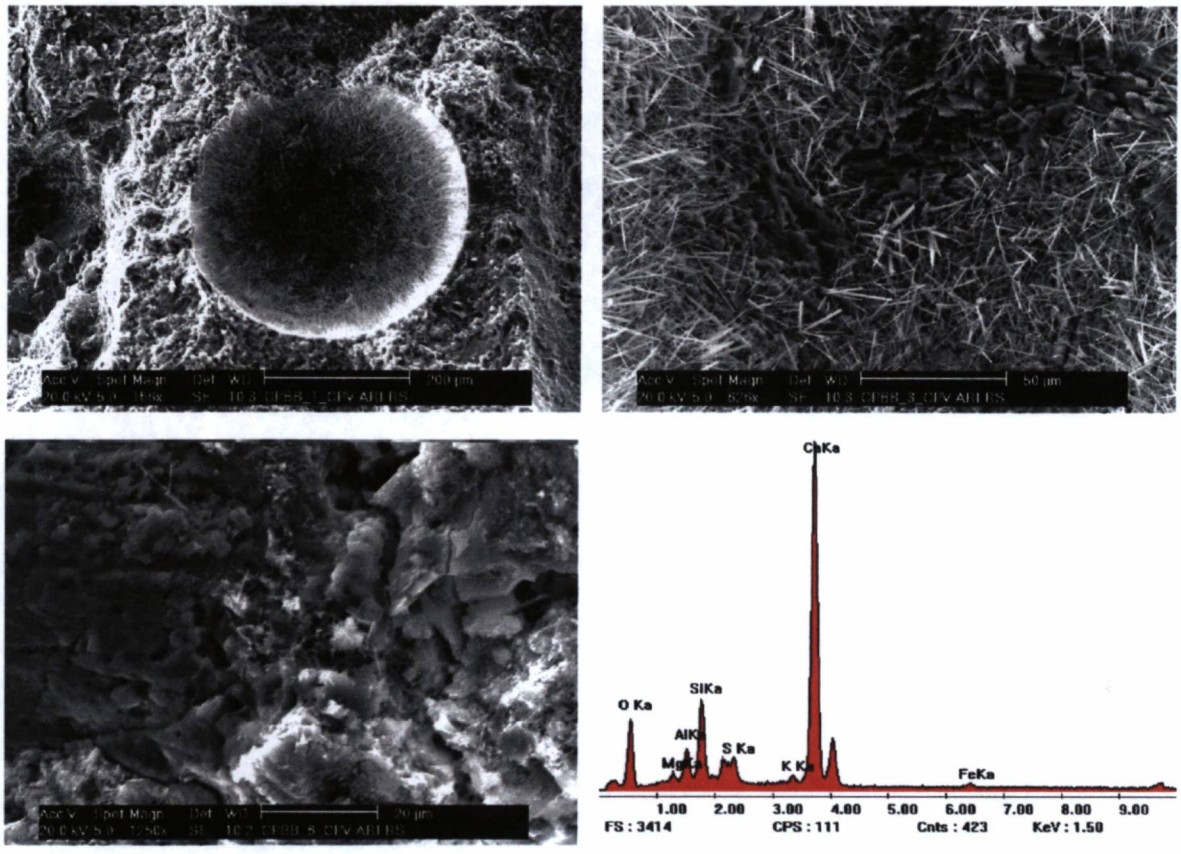


FIGURA 68 - MICROGRAFIAS E ANÁLISE ELEMENTAR, POR MEV E EDS, DA SUPERFÍCIE DE FRATURA DE AMOSTRA COM CIMENTO CPV-ARI RS, APÓS ENVELHECIMENTO NATURAL NA EEC

Em outra região da superfície de fratura dessa mesma amostra foi localizada

a formação de gel no interior de um poro, conforme mostrado na Figura 69.

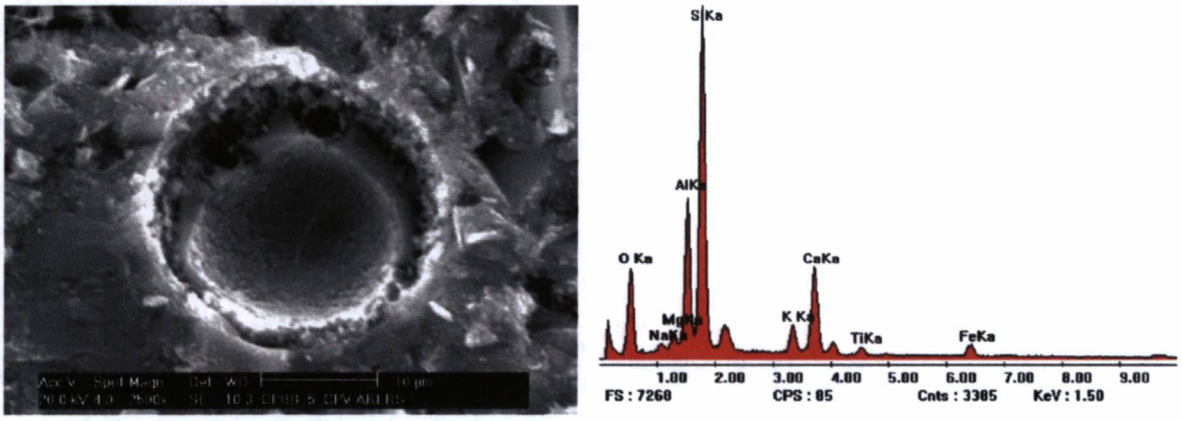


FIGURA 69 - MICROGRAFIA E ANÁLISE ELEMENTAR, POR MEV E EDS, DA SUPERFÍCIE DE FRATURA DE AMOSTRA COM CIMENTO CPV-ARI RS, APÓS ENVELHECIMENTO NATURAL NA EEC

Os concretos com cimento CPII-F 32 envelhecidos em laboratório apresentaram visíveis alterações de fases, com cristais formados nas regiões de poros e entre trincas em, praticamente, toda a sua superfície de fratura.

Conforme pode ser visto na Figura 70, a quantidade de cloreto no seu interior é superior à das amostras representativas dos outros concretos, e cujas composições incluem cimento CPII-F 32 com 8% de sílica ativa e cimento CPV-ARI RS.

Também foi detectada a presença de enxofre, pela análise elementar dos cristais. Nos espectros apresentados, o pico referente ao enxofre está sobrepondo-se ao do ouro utilizado na metalização da amostra. Este enxofre deve fazer parte da etringita formada, conforme agulhas bem características mostradas na microestrutura. A superfície de fratura se apresenta bastante fissurada e contém cristais formados no seu interior. Estes cristais podem propiciar a evolução deste tipo de defeito, segundo dados publicados na literatura[46].

Na Figura 71 pode ser observada a micrografia da superfície de fratura de uma das amostras de concreto confeccionado com cimento CPII-F 32, submetida a envelhecimento natural na EEC da praia da Caueira.

É interessante salientar que ambas as amostras (envelhecidas no campo e no

laboratório) apresentaram micrografias similares e com participação de íons sulfato. Também, foi observada a presença de agulhas de etringita ($3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.32H_2O$) conforme verificado nas imagens mostradas. Este fato indica que o íon sulfato deve ser proveniente da própria matriz e não de contaminação externa pela névoa salina natural.

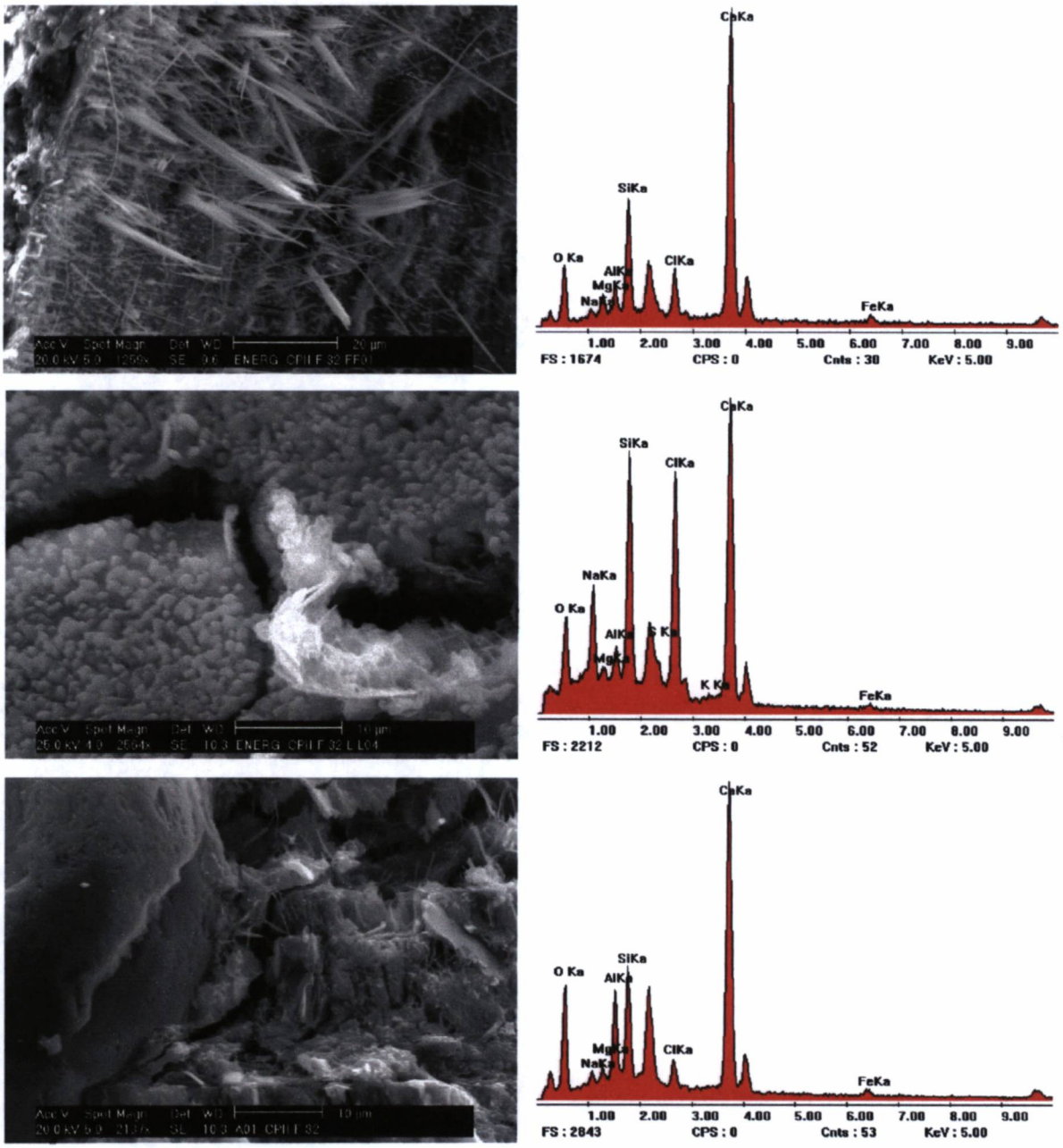


FIGURA 70 - MICROGRAFIA E ANÁLISE ELEMENTAR DA SUPERFÍCIE DE FRATURA DE AMOSTRA COM CIMENTO CPII-F 32, APÓS ENVELHECIMENTO EM LABORATÓRIO

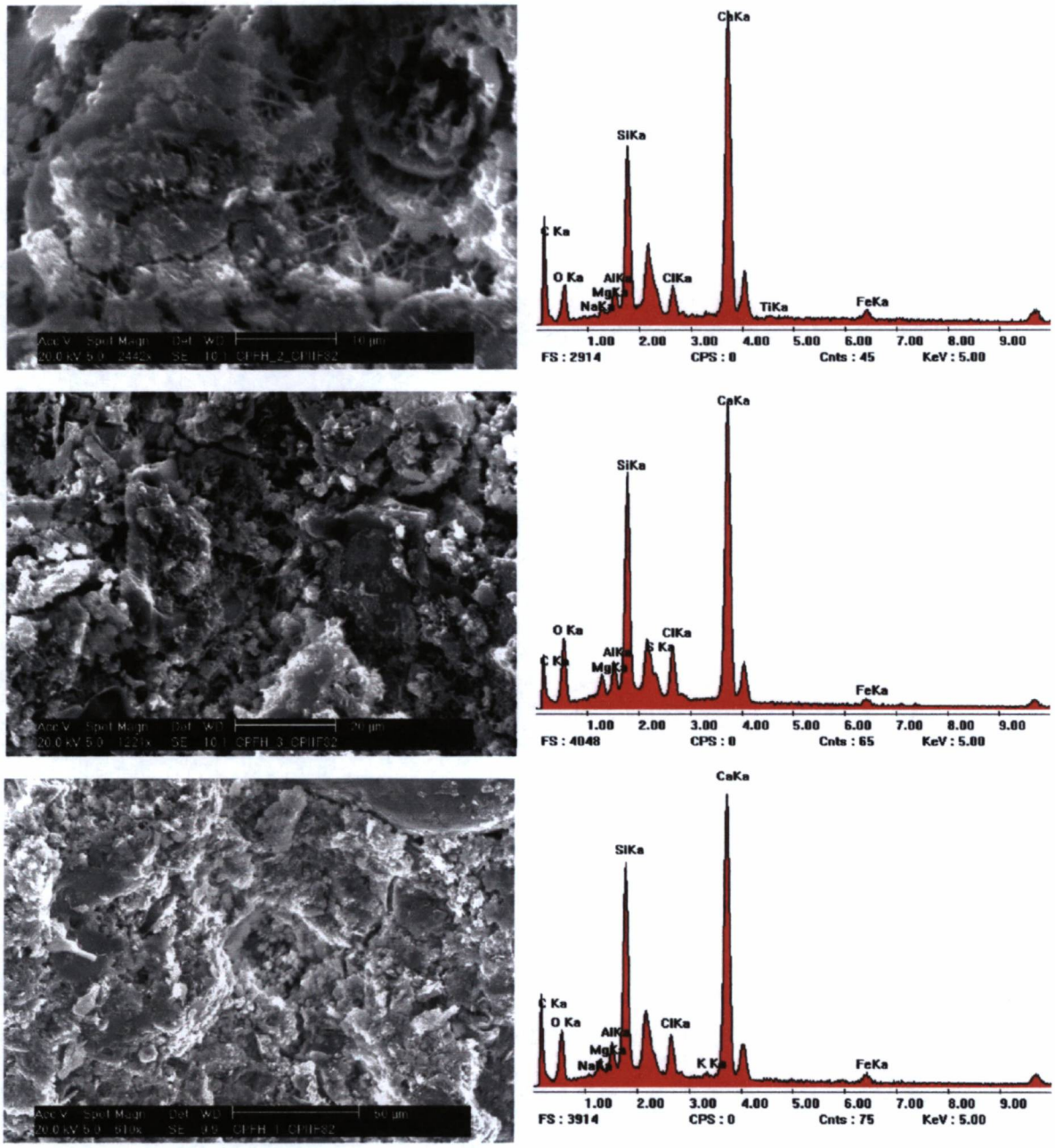


FIGURA 71 - MICROGRAFIA E ANÁLISE ELEMENTAR DA SUPERFÍCIE DE FRATURA DE AMOSTRA COM CIMENTO CPII-F 32, APÓS ENVELHECIMENTO NATURAL

As micrografias da superfície de fratura da composição com CPII-F 32 e 8% de sílica ativa, obtidas após envelhecimentos artificial em laboratório e natural na ECC, estão mostradas na Figura 72 e na Figura 73, respectivamente.

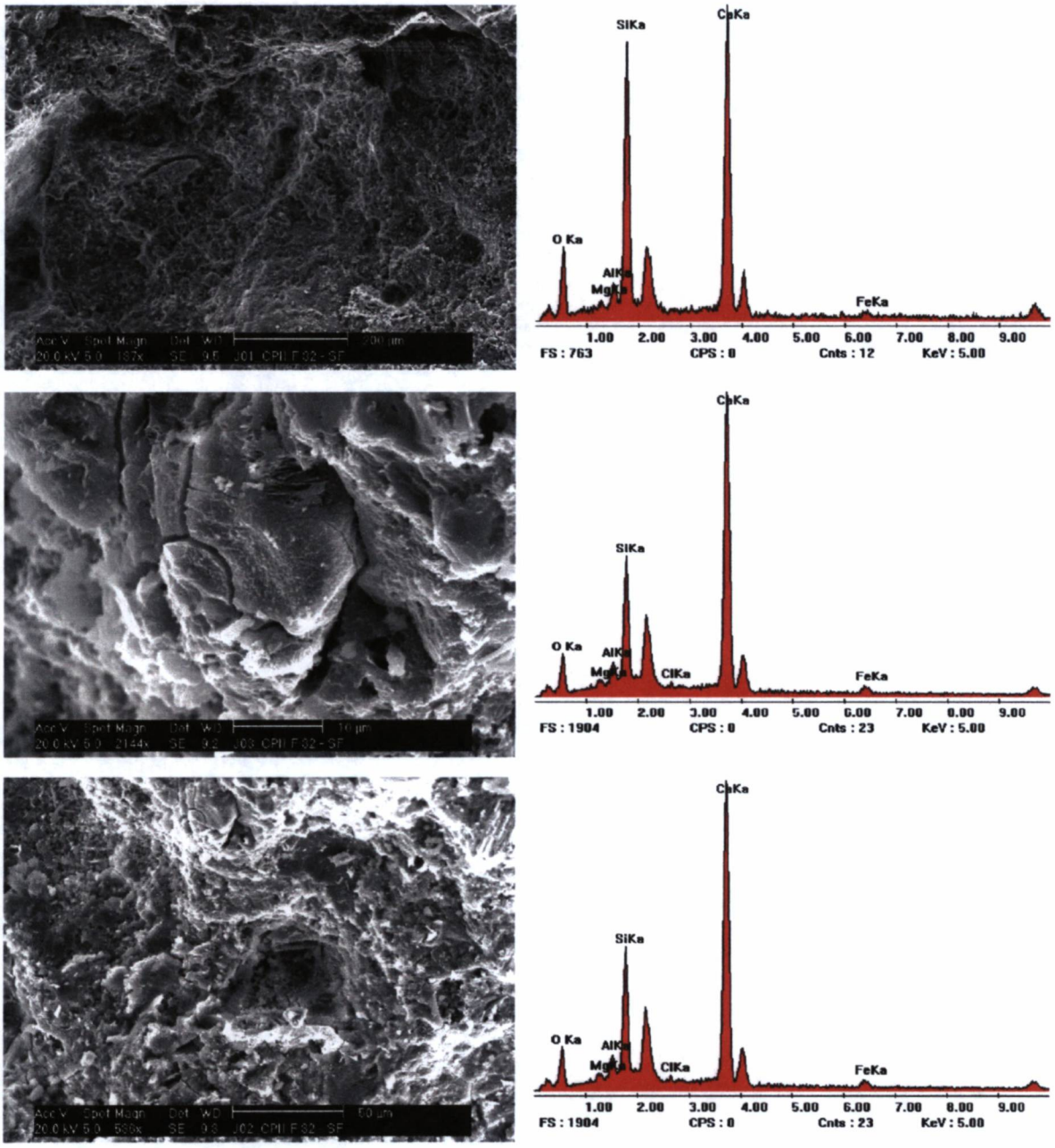


FIGURA 72 - MICROGRAFIA E ANÁLISE ELEMENTAR DA SUPERFÍCIE DE FRATURA DE AMOSTRA COM CIMENTO CPII-F 32 E 8% DE SÍLICA ATIVA, APÓS ENVELH. ARTIFICIAL

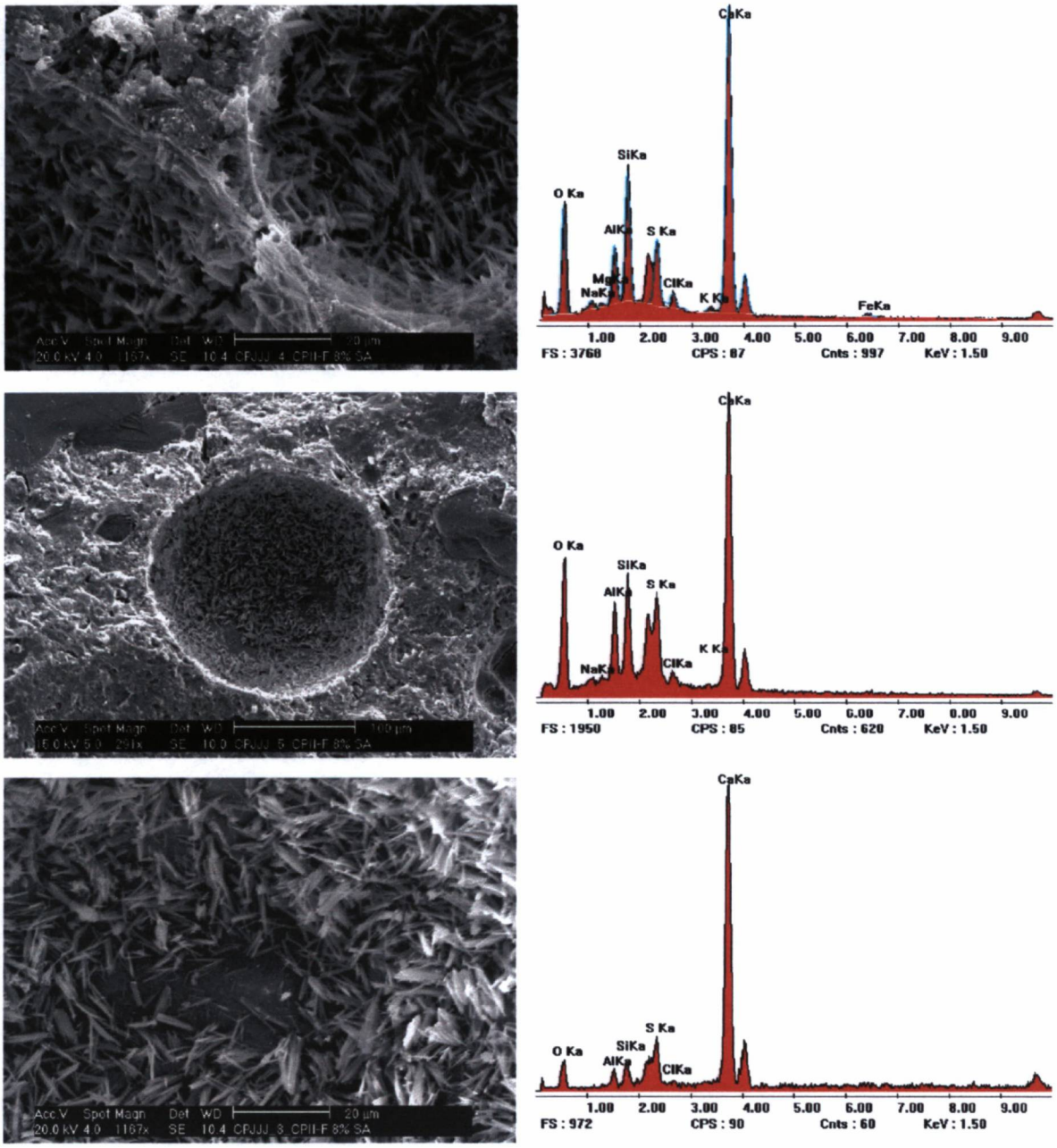


FIGURA 73 - MICROGRAFIA E ANÁLISE ELEMENTAR DA SUPERFÍCIE DE FRATURA DE AMOSTRA COM CIMENTO CPII-F 32 E 8% DE SÍLICA ATIVA, APÓS ENVELHECIMENTO NATURAL

A superfície de fratura da amostra envelhecida no laboratório apresentou micrografia e composição química elementar similar à da composição com cimento CPV-ARI RS.

A concentração do íon cloreto é pequena quando comparada ao resultado da análise elementar feita na composição com CPII-F 32 sem adição, conforme pôde ser

visto nos espectros de EDS. Também pode ser observado que a amostra não apresenta porosidade intensa.

Já as amostras dos concretos preparados com composição similar à dos postes fabricados em Aracaju mostraram na superfície de fratura analisada, após envelhecimento natural, fases químicas diferentes da composição estudada no laboratório. Foi verificada a presença de poros não comunicantes com diâmetros superiores a 20 μm e nestes, cristais de cloreto de cálcio (cristais tipo lascas) e agulhas de etringita. Estes tipos de fases não são comuns em composição com sílica ativa, principalmente, quando formadas em tão pouco tempo de envelhecimento natural. A sua presença indica a possibilidade de problemas de dispersão da sílica ativa durante a mistura do concreto na betoneira.

De uma forma geral, as imagens por MEV e a análise da composição química elementar, por EDS, na superfície de fratura dos cp's envelhecidos tanto no laboratório quanto no campo revelam que:

- a composição com CPII-F 32 apresentou maior susceptibilidade para a difusão do íon cloreto do que os concretos confeccionados com outros tipos de cimento;
- o concreto com cimento CPII-F 32 mostrou maior concentração de fases, como a etringita, na superfície de fratura dos cp's envelhecidos tanto no laboratório como em campo. Em razão disso, o íon sulfato é originário, provavelmente, da própria composição do cimento;
- a composição com CPII-F 32 e 8% de sílica ativa apresentou indícios de má dispersão da sílica ativa na massa de concreto, face às micrografias verificadas, com possível formação de cloreto de cálcio e etringita em alguns dos poros visualizados; e
- nas amostras da composição com CPV-ARI RS verificou-se maior influência da agressividade natural na formação de subprodutos internos.

4.3.5. Análise por DRX

Neste item apresentam-se os difratogramas obtidos por DRX dos concretos confeccionados com os três tipos de cimento empregados.

4.3.5.1. Concretos com cimento CPII-F 32

Os difratogramas de raios X das amostras de concreto confeccionado com cimento CPII-F 32 e consumo de 292 kg/m^3, obtidas em diferentes idades de cura, são mostrados na Figura 74.

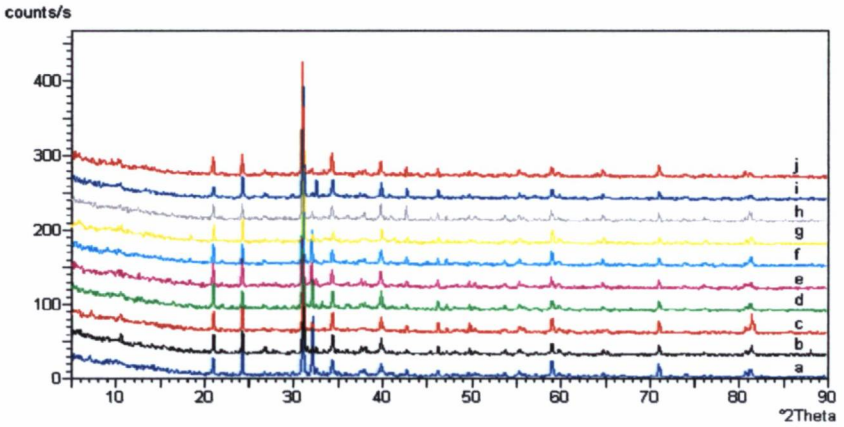


FIGURA 74 - DIFRATOGRAMAS DO CONCRETO PRODUZIDO COM 292 kg/m^3 DE CIMENTO CPII-F 32, OBTIDOS APÓS CURA POR: 43 h (A), 67 h (B), 139 h (C), 175 h (D), 213 h (E), 305 h (F), 355 h (G), 28 DIAS (H), 69 DIAS (I) E 98 DIAS (J)

Na identificação das fases cristalinas (Figura 75, referente ao concreto com 292 kg/m^3 de cimento CPII-F e 43 horas de cura) de acordo com o banco de dados do *ICDD*, constatou-se a presença, basicamente, de: quartzo (sílica), calcita (carbonato de cálcio), portlandita (hidróxido de cálcio) e, naturalmente, CSH. Também foi verificada a ocorrência de etringita, apesar do curto período de hidratação da amostra.

Estas fases se repetem em todas as amostras, de forma a não ter sido constatada alteração significativa das mesmas ao longo da cura. Os difratogramas dos concretos confeccionados com outros tipos e consumos de cimento, praticamente, não se alteraram, apresentado apenas discretas diferenças nas alturas dos picos.

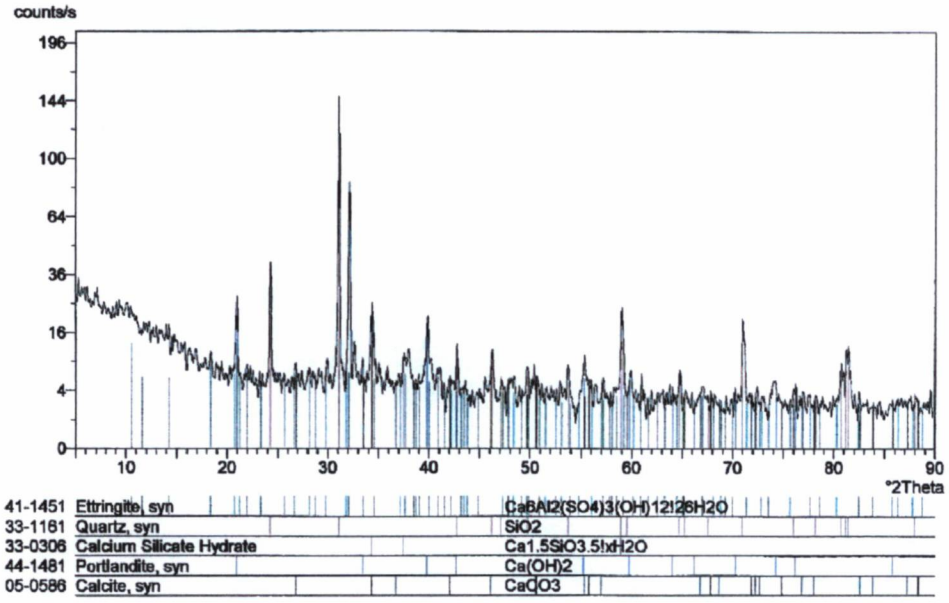


FIGURA 75 - DIFRATOGRAMA E RESPECTIVA IDENTIFICAÇÃO DE FASES, DO CONCRETO PRODUZIDO COM 292 kg/m^3 DE CIMENTO CPII-F 32, OBTIDOS APÓS 43 HORAS DE CURA

Na Figura 76 podem ser visualizados os difratogramas do concreto contendo maior consumo de cimento CPII-F 32.

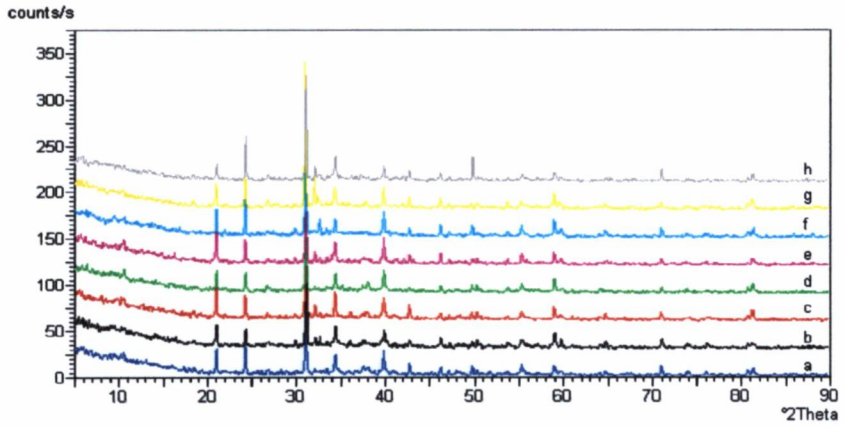


FIGURA 76 - DIFRATOGRAMAS DO CONCRETO PRODUZIDO COM 347 kg/m^3 DE CIMENTO CPII-F 32, OBTIDOS APÓS CURA POR: 74 h (A), 125 h (B), 158 h (C), 253 h (D), 406 h (E), 32 DIAS (F), 96 DIAS (G) E 160 DIAS (H)

4.3.5.2. Concretos com cimento CPII-Z 32

Na Figura 77 e na Figura 78 são mostrados os difratogramas dos concretos

dosados com cimento CPII-Z 32, com consumos de 288 e 345 kg/m^3, respectivamente.

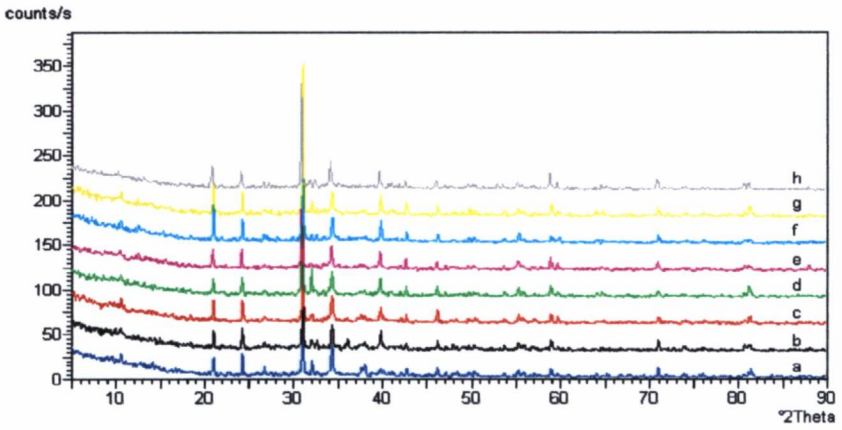


FIGURA 77 - DIFRATOGRAMAS DO CONCRETO PRODUZIDO COM 288 kg/m^3 DE CIMENTO CPII-Z 32, OBTIDOS APÓS CURA POR: 30 h (A), 53 h (B), 80 h (C), 102 h (D), 192 h (E), 340 h (F), 29 DIAS (G) E 90 DIAS (H)

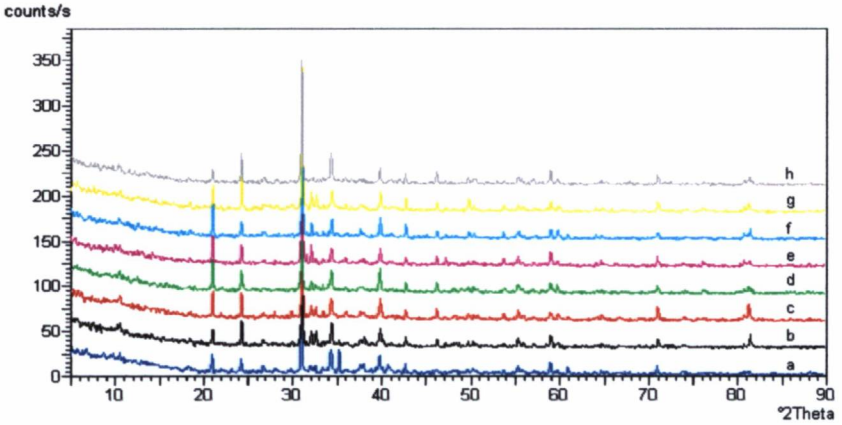


FIGURA 78 - DIFRATOGRAMAS DO CONCRETO PRODUZIDO COM 345 kg/m^3 DE CIMENTO CPII-Z 32, OBTIDOS APÓS CURA POR: 31 h (A), 46 h (B), 74 h (C), 170 h (D), 223 h (E), 367 h (F), 29 DIAS (G) E 91 DIAS (H)

4.3.5.3. Concretos com cimento CPV-ARI RS

Os difratogramas de raios X dos concretos contendo cimento CPV-ARI RS e consumos de 292 e 344 kg/m^3 estão colocados na Figura 79 e na Figura 80, respectivamente.

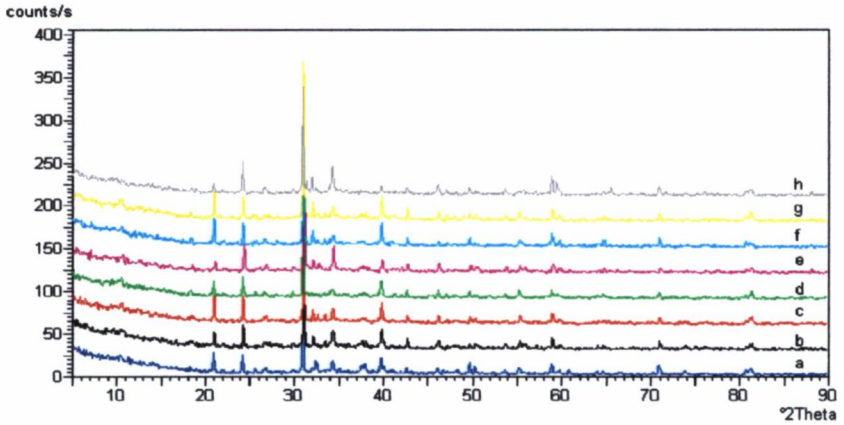


FIGURA 79 - DIFRATOGRAMAS DO CONCRETO PRODUZIDO COM 292 kg/m^3 DE CIMENTO CPV-ARI RS, OBTIDOS APÓS CURA POR: 28 h (A), 48 h (B), 125 h (C), 150 h (D), 166 h (E), 312 h (F), 29 DIAS (G) E 90 DIAS (H)

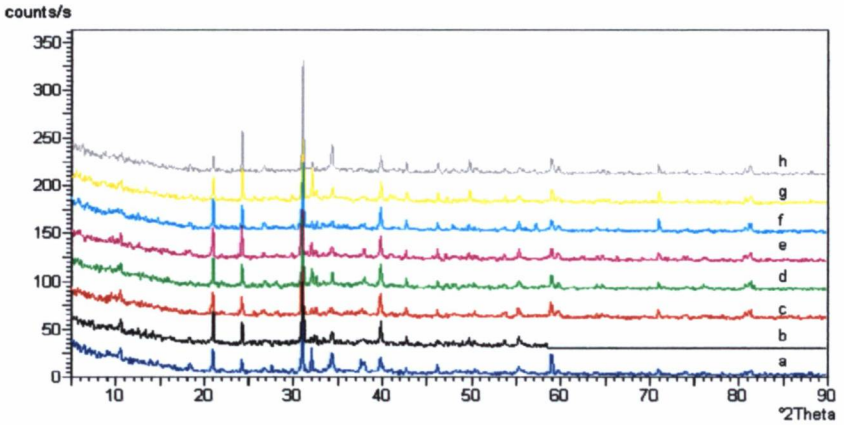


FIGURA 80 - DIFRATOGRAMAS DO CONCRETO PRODUZIDO COM 344 kg/m^3 DE CIMENTO CPV-ARI RS, OBTIDOS APÓS CURA POR: 28 h (A), 96 h (B), 120 h (C), 144 h (D), 263 h (E), 336 h (F), 32 DIAS (G) E 90 DIAS (H)

4.3.6. Análise térmica

Os principais picos identificados no DTA aparecem, praticamente, nas mesmas temperaturas para todas as amostras. Para análise das dados de DTA obtidos (linhas azuis), considera-se que os picos para cima são representativos de reações endotérmicas. SHA, O'NEILL & GUO (1999)[170] dão algumas indicações sobre a interpretação das curvas obtidas por análise térmica, em seu estudo de cimento Portland comum por calorimetria diferencial de varredura.

O primeiro pico que surge, por volta de 110°C, é resultado da reação de

desidratação devida à perda de água do CSH. Nas primeiras idades dos concretos, ao invés de um, podem ocorrer dois sub-picos, representativos de uma perda gradual de dois tipos de moléculas de água.

O segundo pico endotérmico acontece a, aproximadamente, 470°C, e corresponde à desidroxilação do CH, outro produto de hidratação.

O pico formado entre 700 e 800°C representa a reação de descarbonatação do $CaCO_3$, que pode também estar associada a transformações de fase do tipo sólido-sólido[170].

A cristalização do material tem início em, aproximadamente, 850°C, sendo chamada de cristalização de baixa temperatura. Entre 1200 e 1300°C, percebe-se o início a cristalização de alta temperatura do cimento.

Os autores informam que, entre 165 e 205°C, podem ser detectados pequenos picos endotérmicos atribuídos à etringita. Porém, na maioria dos concretos analisados, nesta faixa de temperatura percebeu-se apenas um leve desvio da curva base.

4.3.6.1. Concretos com cimento CPII-F 32

Para as amostras com consumo de cimento da ordem de 290 kg/m^3, a variação de massa total até 1500°C, foi de -12,8% após 43 horas de cura (Figura 81a), e de -16,9% após 28 dias. A partir dos 7 dias de idade, os termogramas resultaram bastante similares ao apresentado na Figura 81b, só havendo variações nos teores de perda de massa.

Para a dosagem com maior consumo de cimento, a variação de massa aumentou para -15 e -22%, respectivamente para amostras obtidas após 3 e 13 dias de cura. Os termogramas da composição com 347 kg/m^3, após 86 e 326 horas de cura, estão representados na Figura 82.

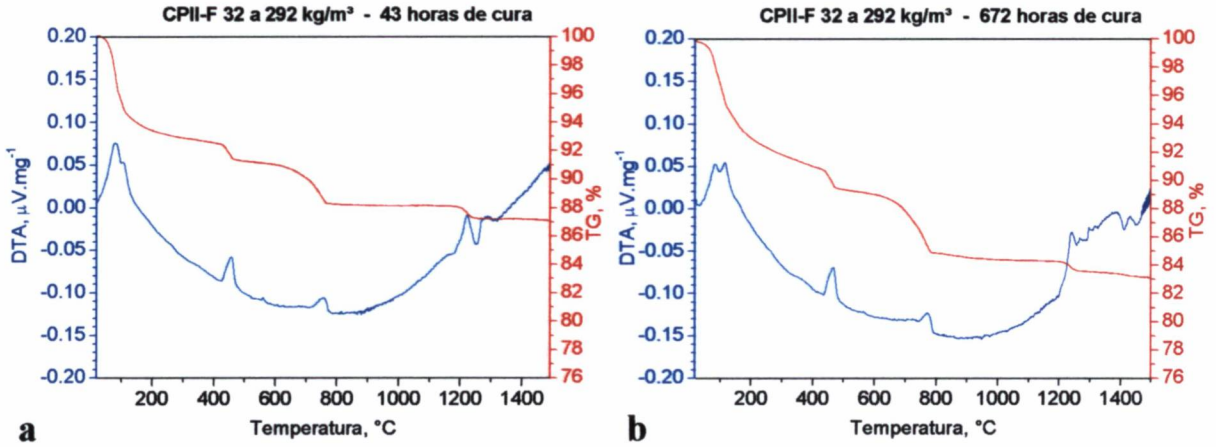


FIGURA 81 - TERMOGRAMAS DAS AMOSTRAS DE CONCRETO FABRICADO COM 292 kg/m^3 DE CIMENTO CPII-F 32, APÓS CURA POR: A) 43 h; B) 672 h

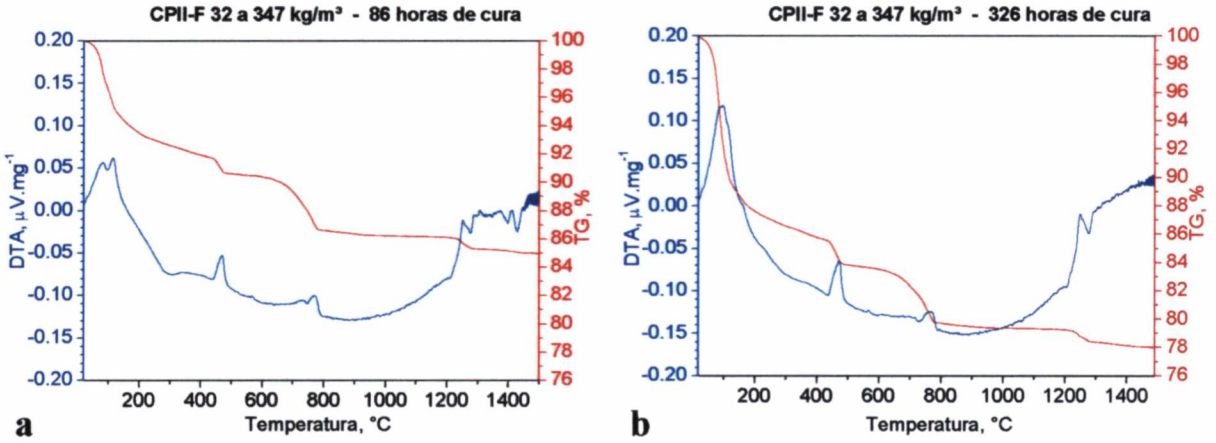


FIGURA 82 - TERMOGRAMAS DAS AMOSTRAS DE CONCRETO FABRICADO COM 347 kg/m^3 DE CIMENTO CPII-F 32, APÓS CURA POR: A) 86 h; B) 326 h

4.3.6.2. Concretos com cimento CPII-Z 32

Para esta classe de cimento e no consumo de 288 kg/m^3, as variações de massa totais até 1500°C, foram de -13,9% para a amostra curada por 30 horas e de -22,8% para o concreto curado por 16 dias. Acima desta idade, não houve variação significativa das curvas de DTA durante o período de cura. Na Figura 83 são mostrados os referidos termogramas.

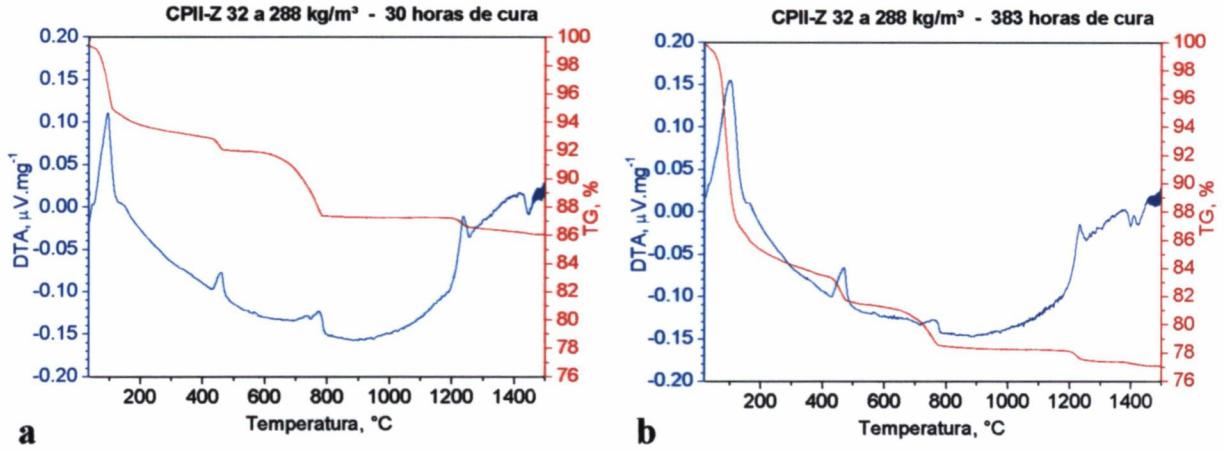


FIGURA 83 - TERMOGRAMAS DAS AMOSTRAS DE CONCRETO FABRICADO COM 288 kg/m^3 DE CIMENTO CPII-Z 32, APÓS CURA POR: A) 30 h; B) 383 h

Curvas muito similares foram obtidas para a dosagem com consumo de cimento de 345 kg/m^3. As variações de massa finais ficaram parecidas para as amostras curadas por 46 e 407 horas. As curvas, inclusive as de TGA, não se alteraram a partir dos 17 dias iniciais da cura. Os termogramas estão mostrados na Figura 84.

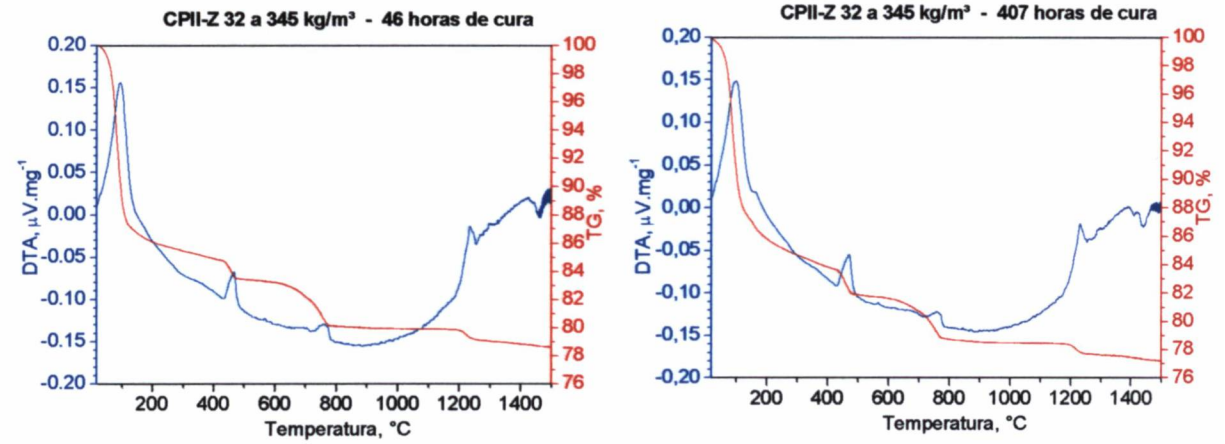


FIGURA 84 - TERMOGRAMAS DAS AMOSTRAS DE CONCRETO FABRICADO COM 345 kg/m^3 DE CIMENTO CPII-Z 32, APÓS CURA POR: A) 46 h; B) 407 h

4.3.6.3. Concretos com cimento CPV-ARI RS

Para esta classe de cimento e no consumo de 292 kg/m^3, a variação de massa total até 1500°C foi de apenas -10,7% após 28 horas de cura e de -21,9% após 15 dias.

Na Figura 85 são mostrados os referidos termogramas.

À exceção das demais amostras, em que o pico supostamente atribuído à etringita não foi explicitamente verificado, o concreto com menor consumo de cimento CPV-ARI RS e curado por pouco mais de um dia mostrou, em sua curva DTA, um pequeno pico endotérmico entre 150 e 200°C.

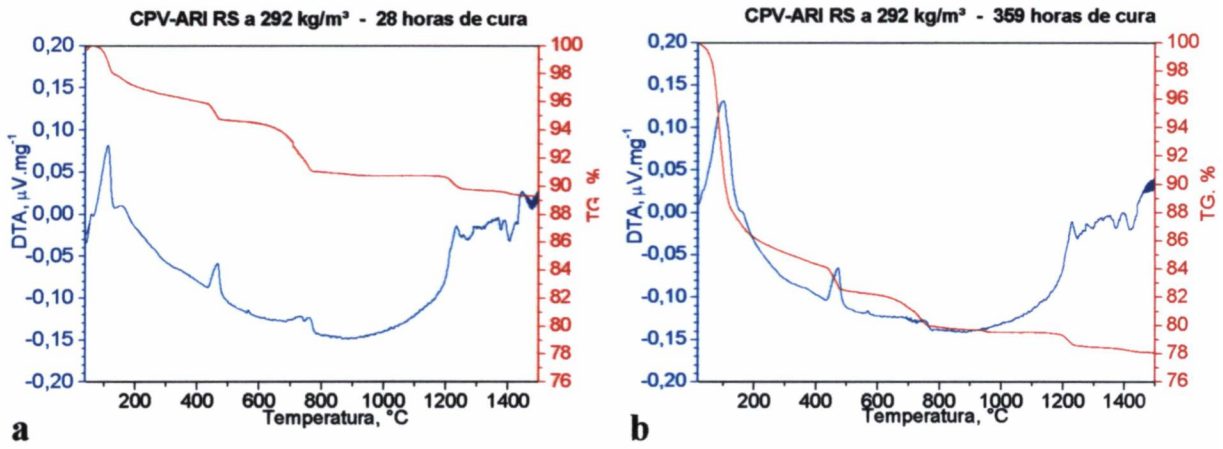


FIGURA 85 - TERMOGRAMAS DAS AMOSTRAS DE CONCRETO FABRICADO COM 292 kg/m^3 DE CIMENTO CPV-ARI RS, APÓS CURA POR: A) 28 h; B) 359 h

Os termogramas para a dosagem com 344 kg/m^3 são mostrados na Figura 86.

A amostra analisada após cura por 11 dias (263 horas) apresentou a maior perda de massa entre todas as demais, com uma variação de -23%.

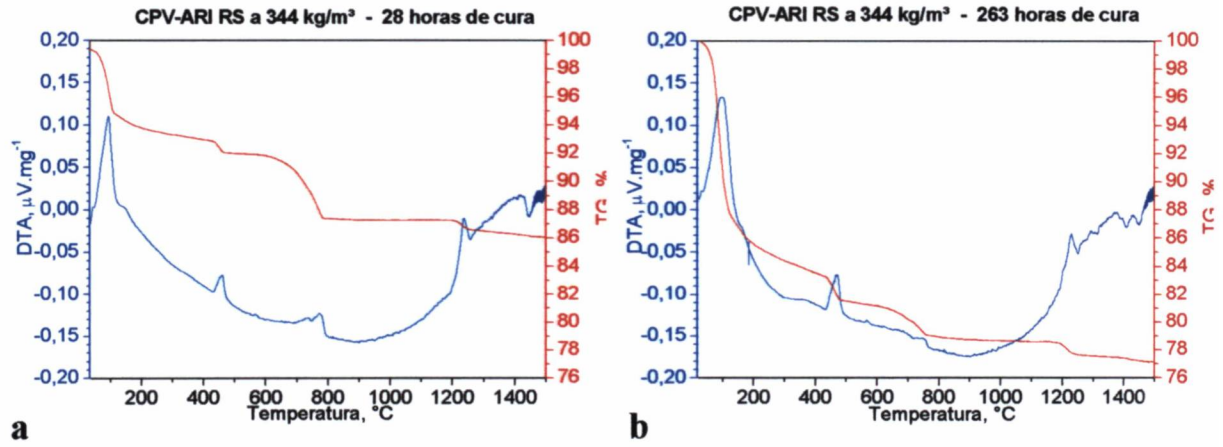


FIGURA 86 - TERMOGRAMAS DAS AMOSTRAS DE CONCRETO FABRICADO COM 344 kg/m^3 DE CIMENTO CPV-ARI RS, APÓS CURA POR: A) 28 h; B) 263 h

4.3.7. Radiografia industrial

Na Figura 87 são mostradas imagens, obtidas por radiografia industrial, dos cp's prismáticos de concreto armado utilizados nos ensaios eletroquímicos. A Figura 87a refere-se ao cp confeccionado com cimento CPII-Z 32 e consumo de aglomerante da ordem de 290 kg/m^3, após o mesmo ter apresentado uma fissura decorrente da corrosão das armaduras de aço, em função do envelhecimento acelerado.

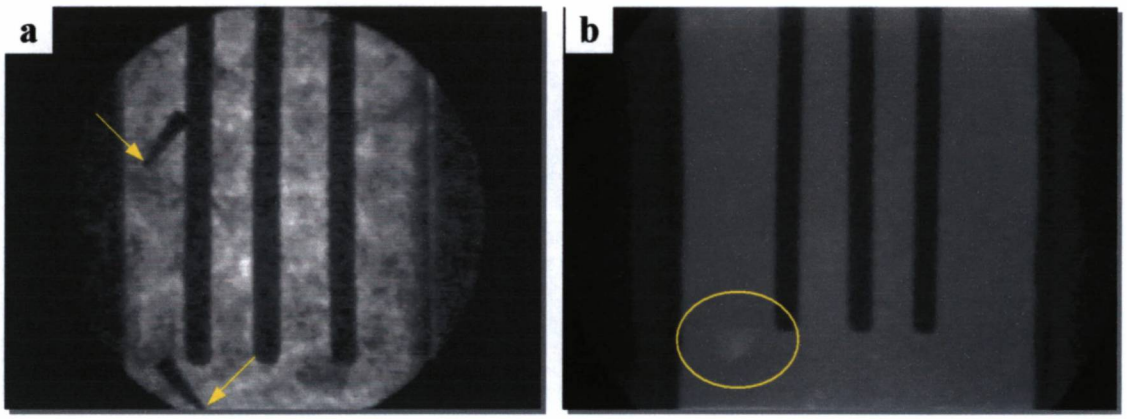


FIGURA 87 - IMAGENS, POR RADIOGRAFIA INDUSTRIAL, DE CP'S PRISMÁTICOS DE CONCRETO ARMADO

Os pontos de início e fim da trinca foram previamente assinalados com setas de chumbo, mas a detecção do defeito não foi efetiva, em razão da sua abertura e das limitações de resolução do equipamento de raios X. As barras de aço, utilizadas como eletrodos nos ensaios eletroquímicos, podem ser vistas.

O sistema de radiografia industrial utilizado permite, contudo, a visualização de falhas com dimensões maiores que 1 mm, como pode ser visto na Figura 87b, em que é mostrado um outro cp prismático que apresentou desempenho irregular nos testes de potencial elétrico. Pode-se notar a presença de um vazio – que também pode ser uma região de menor densidade, proveniente da segregação do concreto – no interior do cp, conforme indicado na imagem.

4.4. ENSAIOS ELETROQUÍMICOS

Neste item são apresentados os resultados dos ensaios de potencial de corrosão e EIS dos cp's prismáticos moldados com os diferentes concretos confeccionados nas dosagens preliminar, complementar e piloto.

4.4.1. Potencial de corrosão

Os potenciais de corrosão obtidos para os cp's foram esboçados em gráficos do tipo potencial de corrosão *versus* tempo de envelhecimento, classificados em termos da composição (tipo e consumo de cimento) e da espessura de cobrimento. Os valores limites que indicam a probabilidade de corrosão das armaduras, de acordo com as orientações da ASTM C876-91[69], encontram-se representados nas figuras por linhas tracejadas (em vermelho) posicionadas a –0,125 e –0,275 V.

4.4.1.1. Dosagens preliminares

Na Figura 88 podem ser visualizados os gráficos de E_{corr} dos cp's representativos dos concretos da etapa de dosagens preliminares, separados em função da composição.

De uma forma geral, pode perceber dos gráficos que as composições de melhor desempenho eletroquímico são aquelas confeccionadas com cimento do tipo CPV-ARI RS, pois apresentaram maior quantidade de amostras com potenciais mais positivos que –125 mV. Também, verifica-se que, para cada tipo de cimento utilizado, os concretos com maior consumo de aglomerante demonstraram melhores resultados.

O concreto de pior desempenho foi aquele confeccionado com cimento CPII-Z 32 e consumo de 288 kg/m^3, do qual dois cp's prismáticos apresentaram, ao longo do período de envelhecimento, ruptura do concreto em razão da corrosão das barras de aço. A mistura contendo menor consumo de CPII-F 32 também não demonstrou desempenho adequado, com a maioria dos respectivos cp's apresentando potenciais

menores que –275 mV, um dos quais com trincamento do concreto.

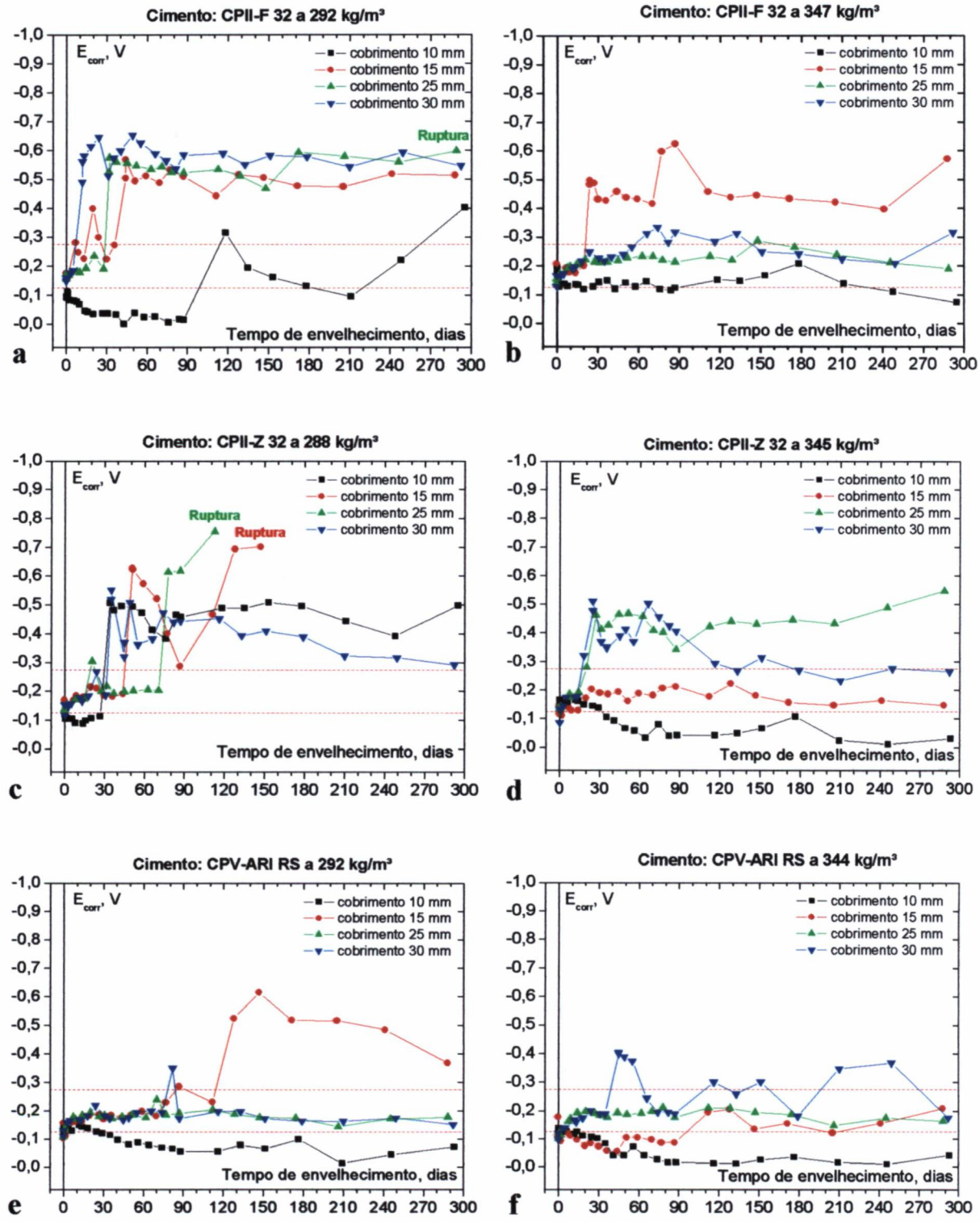


FIGURA 88 - GRÁFICOS DE POTENCIAL DE CORROSÃO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE ENVELHECIMENTO, DOS CONCRETOS DAS DOSAGENS PRELIMINARES: A) CPII-F 32 A 292 kg/m^3; B) CPII-F 32 A 347 kg/m^3; C) CPII-Z 32 A 288 kg/m^3; D) CPII-Z 32 A 345 kg/m^3; E) CPV-ARI RS A 292 kg/m^3; F) CPV-ARI RS A 344 kg/m^3

Considerações adicionais sobre as curvas obtidas para as dosagens estudadas serão feitas na seqüência, para cada espessura de cobrimento dos cp's.

4.4.1.1.1. Espessura de cobrimento de 10 mm

Era esperado para a maioria dos cp's com espessura de cobrimento de 10 mm (Figura 89) que o processo de corrosão, caracterizado pelo aumento brusco do potencial, viesse a ser deflagrado anteriormente às outras espessuras, o que não aconteceu. Quase todas as composições apresentaram potenciais mais positivos que –275 mV, ao longo de todo o período de envelhecimento artificial. A exceção foi observada para a dosagem com CPII-Z 32 e menor consumo de cimento, cuja alteração da curva para potenciais indicativos de uma maior probabilidade de corrosão ocorreu em tempo menor do que 30 dias.

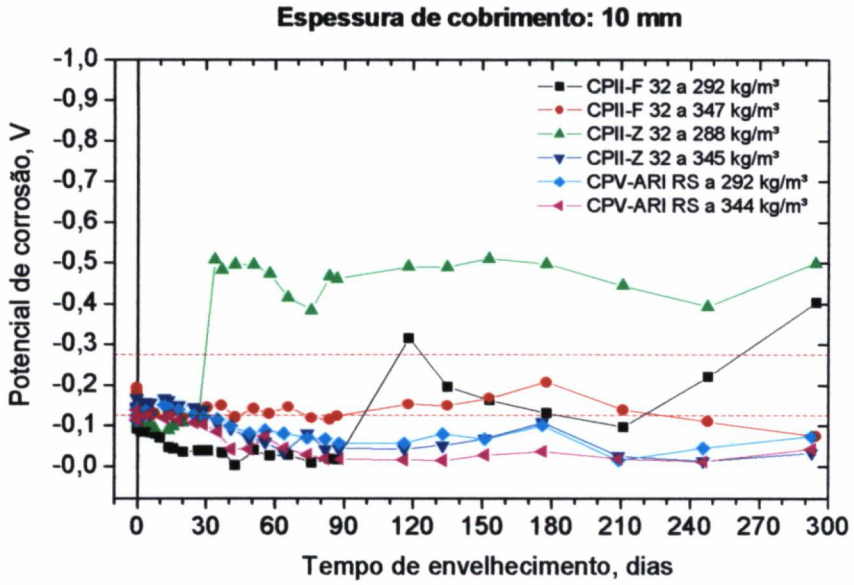


FIGURA 89 - GRÁFICO DE POTENCIAL DE CORROSÃO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE ENVELHECIMENTO, DOS CP'S COM ESPESSURA DE COBRIMENTO DE 10 mm

A análise dos resultados levou à investigação do processo de fabricação dos cp's. Observando-se a fôrma para a fabricação dos mesmos, foi constatado que esta espessura era obtida sempre na parte inferior do molde. Sendo assim, pela vibração da massa do concreto, esta região tornou-se mais compactada, deixando a superfície dos

cp's em contato com as paredes do molde, praticamente, livre de defeitos. Como não houve perda da argamassa ou nata do cimento pelos cantos da fôrma, a diminuição dos defeitos e a obtenção de uma superfície lisa e regular tornaram os concretos menos susceptíveis à penetração de agentes agressivos, como o íon cloreto. E, para o caso dos cp's com cobrimento de 10 mm, foi justamente na face de melhor acabamento em que a solução salina foi imposta.

Nas fábricas onde as fôrmas dos postes encontram-se em boas condições, também deve acontecer algo similar, ou seja, a região inferior deverá ter maior resistência aos agentes agressivos, conforme verificado pela presente análise. Desta forma, constata-se a importância do planejamento do processo produtivo na qualidade dos artefatos de concreto, aumentando a resistência química frente aos meios agressivos, mesmo com consumos de cimento inferiores.

4.4.1.1.2. Espessura de cobrimento de 15 mm

Para os cp's com cobrimento de 15 mm (Figura 90), verificou-se que, em geral, as dosagens com menores consumos de cimento apresentaram alterações do potencial elétrico da armadura, para potenciais mais negativos.

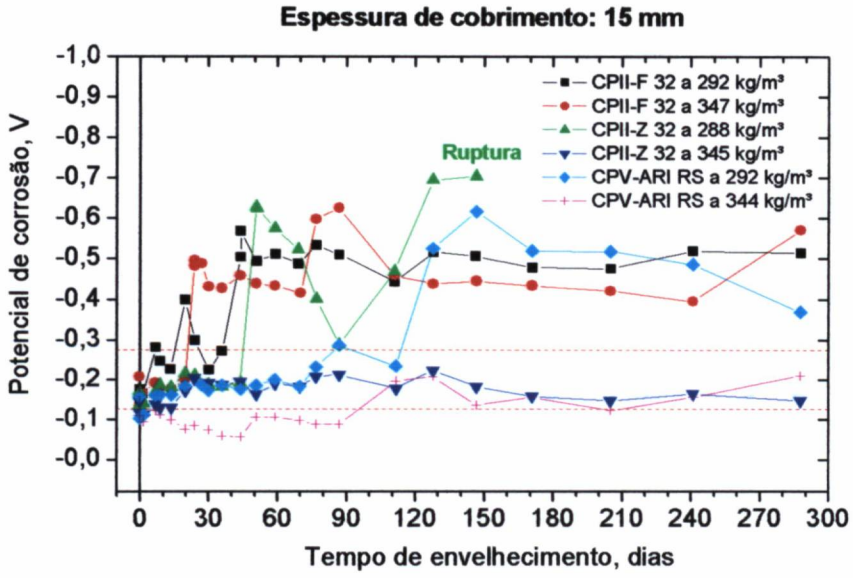


FIGURA 90 - GRÁFICO DE POTENCIAL DE CORROSÃO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE ENVELHECIMENTO, DOS CP'S COM ESPESSURA DE COBRIMENTO DE 15 mm

O pior desempenho eletroquímico foi verificado para as misturas com cimento CPII-F 32, uma vez que os cp's de ambos os consumos mostraram potenciais menores que –275 mV, após aproximadamente 20 e 40 dias de envelhecimento.

Constatou-se um interessante comportamento eletroquímico do cp com cimento CPII-Z 32 e consumo de 288 kg/m^3, o qual apresentou, após os primeiros 40 dias, variação do potencial para regiões mais negativas, portanto mais sujeitas à corrosão. Cerca de 40 dias depois, houve a sua auto-recuperação, com os potenciais retornando para próximo da região cuja probabilidade de corrosão é incerta. Com a continuidade do envelhecimento, entre 140 e 150 dias ocorreu o surgimento de trinca longitudinal no concreto, na direção das barras da armadura. O comportamento apresentado pela mistura não é interessante, já que o colapso da estrutura se dá repentinamente. Na Figura 91 é apresentada em detalhe a trinca no cp. Conforme já comentado no item 4.3.7, não foi possível a detecção da trinca pela técnica de radiografia industrial.

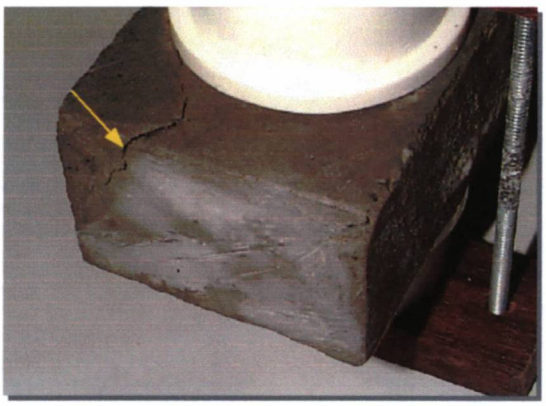


FIGURA 91 - DETALHE DA TRINCA SURGIDA NO CP COM CIMENTO CPII-Z 32 E CONSUMO DE 288 kg/m^3

4.4.1.1.3. Espessuras de cobrimento de 25 e 30 mm

A dosagem com cimento CPII-F 32 e menor consumo foi a que apresentou pior desempenho em ambos os cobrimentos, com o potencial de corrosão passando

para valores com maior probabilidade de corrosão em curto tempo de envelhecimento. Para a espessura de 30 mm a alteração elétrica foi verificada já a partir dos 10 primeiros dias de envelhecimento acelerado, conforme mostra a curva de potencial de corrosão apresentada na Figura 93.

O cp com cobrimento de 25 mm e confeccionado com cimento CPII-Z 32 e consumo de 288 kg/m^3, apresentou trinca longitudinal na direção da armadura, com tempo de envelhecimento em torno de 110 dias, conforme Figura 92.

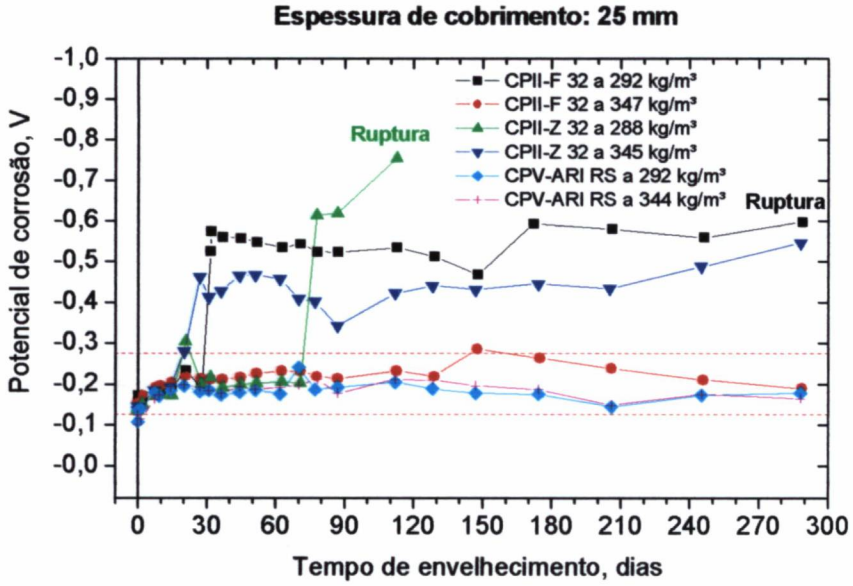


FIGURA 92 - GRÁFICO DE POTENCIAL DE CORROSÃO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE ENVELHECIMENTO, DOS CP'S COM ESPESSURA DE COBRIMENTO DE 25 mm

Como esperado, quanto maior a espessura de cobrimento maior foi a resistência dos cp's ao agente agressivo, descartadas as exceções já descritas. A maioria das dosagens se manteve nos potenciais eletroquímicos que indicam probabilidade incerta de corrosão (50%).

Vale destacar o bom desempenho mostrado pelos concretos confeccionados com cimento CPV-ARI RS, não só nos maiores cobrimentos. Isto contraria o que diz NEVILLE (1997)[3]: "deve ser notado que o uso de cimento resistente aos sulfatos pode ser desvantajoso quando houver risco de presença de íons Cl^- em concretos com armadura ou com outro tipo de aço no seu interior". Segundo o autor, este cuidado

deve-se ao fato do C_3A do cimento fixa o cloreto, formando cloro-aluminato de cálcio.

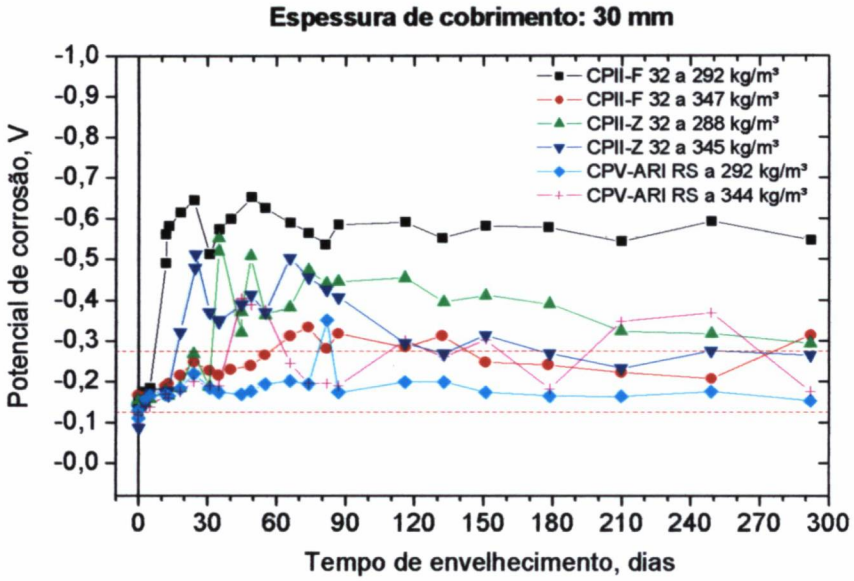


FIGURA 93 - GRÁFICO DE POTENCIAL DE CORROSÃO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE ENVELHECIMENTO, DOS CP'S COM ESPESSURA DE COBRIMENTO DE 30 mm

A explicação mais apropriada para o bom desempenho eletroquímico obtido pelos cp's com cimento CPV-ARI RS é a de que a maior finura do aglomerante promove a obtenção de um concreto mais denso e menos permeável, o que serve de barreira à penetração do cloreto. Estas duas últimas características também explicam os bons resultados obtidos pelas misturas contendo maior consumo de cimento.

4.4.1.2. Dosagens complementares

O gráfico da Figura 94 mostra os potenciais de corrosão dos cp's, ambos com cobrimento de 15 mm, referentes aos concretos confeccionados na etapa complementar de dosagem.

As duas composições apresentaram potenciais na faixa de incerteza de corrosão, mesmo após 300 dias de envelhecimento acelerado. Comparativamente, o concreto contendo sílica ativa apresentou melhor desempenho, com valores de potencial de corrosão quase não transpondo a zona mais negativa que –100 mV. Este

comportamento, em conjunto com as demais propriedades apresentadas, teve grande influência, na escolha dos traços de concreto para as dosagens piloto e, conseqüentemente, para a fabricação de postes e cruzetas em Aracaju.

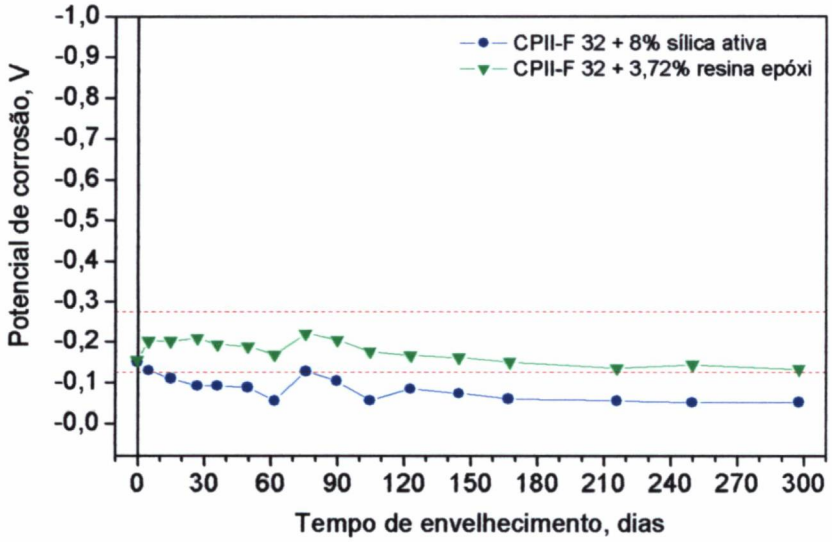


FIGURA 94 - GRÁFICO DE POTENCIAL DE CORROSÃO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE ENVELHECIMENTO, DOS CONCRETOS CONFECCIONADOS NA ETAPA DE DOSAGENS COMPLEMENTARES

4.4.1.3. Observações adicionais

Vários cp's, após certo período de envelhecimento, apresentaram cristalização de sais em sua superfície externa (Figura 95a). Tais cristais foram analisados por MEV (Figura 95b e Figura 95c) e EDS. Como resultados, obtiveram-se os elementos Na e Cl, como era de se esperar, comprovando a ocorrência do processo de difusão do cloreto pelo concreto. A análise elementar por EDS (Figura 95d) do material precipitado também detectou a presença, em pequena concentração, de Ca e Si, possivelmente CSH proveniente de lixiviação do concreto. Análises dos materiais coletados de cp's distintos apresentaram diferentes proporções entre sódio e cloreto.

4.4.2. Análise por EIS

Esta análise envolve diversos aspectos, como a formulação dos diagramas de Nyquist e Bode, elaboração do modelo elétrico correspondente, ajuste dos dados (*fitting*) e determinação do comportamento das variáveis do sistema eletroquímico, como resistência de polarização e constante de Warburg.

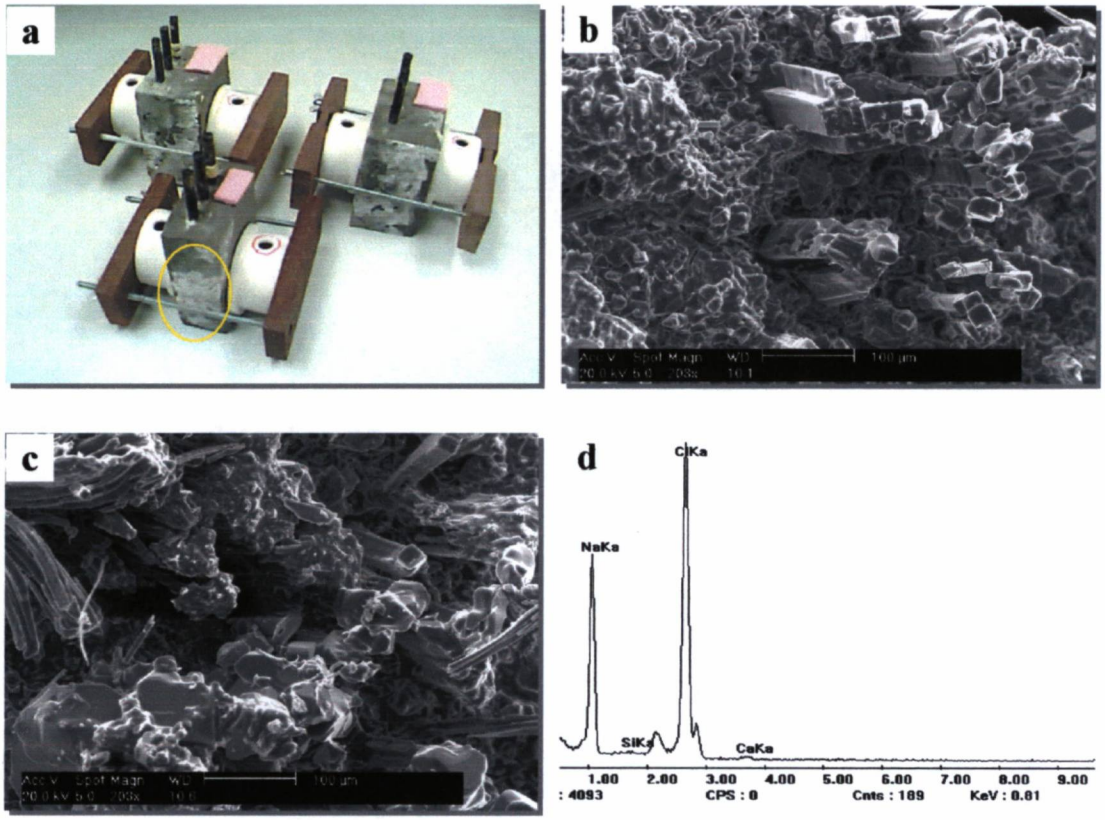


FIGURA 95 - CRISTALIZAÇÃO DE SAL NA SUPERFÍCIE DOS CP'S, COM AS RESPECTIVAS MICROGRAFIAS OBTIDAS POR MEV E ESPECTRO DA ANÁLISE POR EDS

4.4.2.1. Diagramas de Nyquist e Bode

A seguir estão mostrados os diagramas de Nyquist e Bode, obtidos nas medições de EIS nos cp's prismáticos de concreto armado. No primeiro diagrama de Bode representam-se os logaritmos da impedância e da freqüência, enquanto que no segundo têm-se os logaritmos do ângulo de fase e da freqüência.

Apesar de terem sido realizadas dezenas de medidas, apenas quatro delas são mostradas em cada diagrama, a fim de facilitar a visualização das mudanças ocorridas na célula, com o avanço do envelhecimento acelerado. Tais medidas foram selecionadas de forma a ilustrar as alterações mais importantes verificadas nas curvas de impedância. Na análise de cada cp, a primeira medida refere-se à leitura efetuada antes do início do envelhecimento. As duas seguintes representam leituras realizadas antes e após a constatação (se houver) de alteração brusca no respectivo potencial de corrosão da armadura. A última medida relaciona-se ao resultado obtido perto do término do envelhecimento ou a alguma alteração de potencial em especial.

Nos diagramas de Nyquist obtidos, não foi possível visualizar, explicitamente, o semicírculo conhecido por "arco capacitivo", citado por diversos autores[12, 54, 67, 87, 89]. Mesmo focando a análise na região de altas freqüências, nas proximidades da origem do gráfico, o reconhecimento do arco é, praticamente, impossível. MCKENZIE (1987)[78] dá pistas de que esta é uma das dificuldades de interpretação do diagrama de Nyquist, notadamente quando se trata da caracterização de uma armadura essencialmente passiva. Neste estado, a transferência de carga ao longo das barras de aço, que denota um processo de corrosão, é muito pequena, de forma que os arcos capacitivos de transferência de carga na dupla camada elétrica são pobremente desenvolvidos, prejudicando uma clara interpretação dos dados. Conforme verificado por CASCUDO (1997)[54] e FELIU et al. (1998)[171], o que se tem, na prática, é uma linha ascendente oriunda da região de alta freqüência e que apenas levemente esboça o contorno do início do arco, visualizado como um pequeno apêndice no início da curva. Desta forma, não se pode obter, pelo menos graficamente, dados acerca de R_t (caracterizada pelo diâmetro do círculo), R_Ω (interseção do trecho à esquerda do arco com o eixo das abscissas) e, dependendo do circuito equivalente utilizado, da resistência das soluções (interna e externa) do concreto.

A maioria dos autores concorda que o trecho reto das curvas plotadas no diagrama de Nyquist refere-se ao elemento difusional do sistema, caracterizado pela

impedância Warburg (Z_d ou Z_W). Entretanto, esta "cauda de difusão" como também é chamado, normalmente tende a apresentar uma inclinação de 45° ou algo próximo disso[171]. Inclinações da curva maiores que 45° podem ser resultado de um efeito combinado da difusão e da lenta resposta do sistema, em razão de valores elevados da resistência de transferência de carga.

Em relação aos diagramas de Bode, a determinação gráfica dos parâmetros do sistema eletroquímico se torna bem mais fácil, uma vez que a aparência das curvas obtidas condiz com as descrições verificadas na literatura[54, 99, 101].

Em razão da faixa de freqüências que foi empregada no ensaio de EIS, os diagramas de Bode representativos do ângulo de fase em função da freqüência resultaram com uma aparência um pouco distinta daquela encontrada na literatura, uma vez que as curvas obtidas denotam apenas uma parte da parábola característica deste tipo de diagrama.

4.4.2.1.1. Dosagens preliminares

Da Figura 96 até a Figura 119 são mostrados os diagramas referentes aos cp's representativos dos concretos produzidos na etapa preliminar de dosagens. Todos os diagramas de mesmo tipo foram representados em uma mesma escala.

Nos diagramas de Nyquist, posicionados à esquerda, o eixo das abscissas representa a impedância real (em ohms) e o eixo das ordenadas, a impedância imaginária (em ohms). Em relação aos diagramas de Bode, no superior é representado o módulo da impedância (em ohms) em função da freqüência (em hertz), e no inferior tem-se o ângulo de fase (em graus) *versus* a freqüência (em hertz).

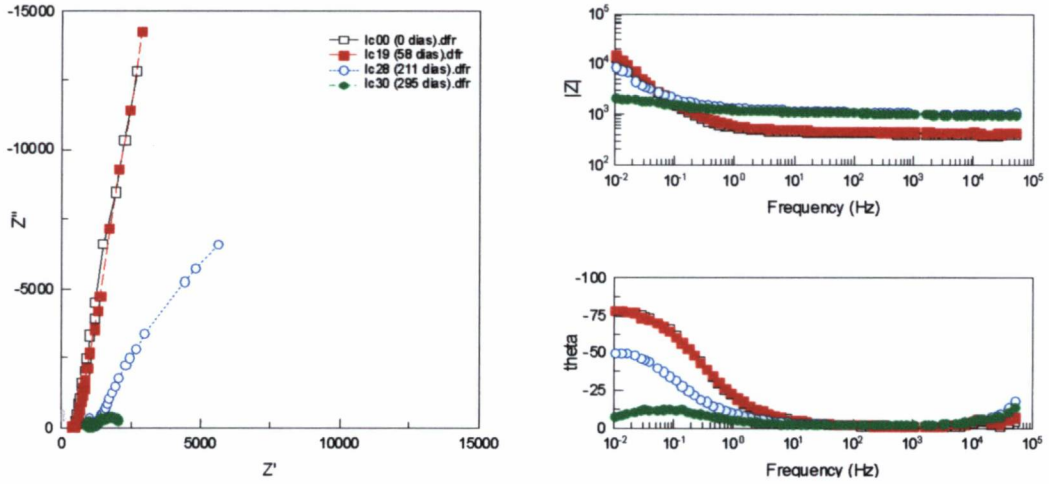


FIGURA 96 - DIAGRAMAS DE NYQUIST E BODE: CPII-F 32, 292 kg/m^3, 10 mm

O cp com cobrimento de 10 mm (Figura 96), apesar de ter apresentado potenciais mais positivos que –275 mV na maioria das leituras, demonstrou um aumento brusco do E_{corr} aos 118 dias de envelhecimento, voltando a valores da ordem de –100 mV na medida realizada aos 211 dias, caracterizada pela curva azul. Percebe-se facilmente a diferença de inclinação das curvas no diagrama de Nyquist: enquanto as curvas referentes às medidas efetuadas antes da variação de potencial são quase verticais, as realizadas após o evento apresentam a tendência de aproximarem-se do eixo horizontal, ao mesmo tempo em que deixam de ser, praticamente, retilíneas. FELIU et al. (1998)[171] confirmam esta variação do diagrama de Nyquist, e concordam que a discussão deve ser focada na parte do diagrama correspondente às médias e baixas freqüências, onde a resposta do sistema é devida, essencialmente, a processos capacitivos. Para os autores, a tendência de rotação das curvas no sentido horário, em função do avanço do envelhecimento por íons Cl^-, sugere a ação do elemento de fase constante (CPE_C). Esta tendência que as curvas apresentam de manterem-se na horizontal também faz com os pontos que a formam sejam aproximados, concentrando-se na região próxima à origem (altas freqüências).

Ainda em relação ao diagrama de Nyquist, a curva referente à medida efetuada aos 295 dias, quando o potencial de corrosão atingiu valores da ordem de

–400 mV, apresenta os efeitos de "horizontalização" e "encurtamento" ainda mais intensos.

Dos diagramas de Bode pode-se perceber a variação, entre cada medida, de alguns dos parâmetros eletroquímicos do sistema. Do diagrama que relaciona a impedância e a freqüência, visualiza-se a tendência de diminuição dos valores em que ocorre a intercessão das curvas com o eixo da ordenadas, o que indica um aumento gradativo da capacitância da dupla camada (C_{dl}), uma vez que estas variáveis são inversamente proporcionais. Também se pode analisar a mudança que ocorre na resistência ôhmica (R_Ω), caracterizada pelo patamar formado, em cada curva, nas freqüências mais altas.

Em razão da faixa de freqüências utilizada nas medições, não se pode precisar os valores do termo relativo à soma de R_P e R_Ω, uma vez que não é possível a visualização do patamar normalmente verificado na região de baixas freqüências. Apesar disso, pode-se prever que ocorre um abaixamento do mesmo, à medida que há aumento do módulo de E_{corr} em função do envelhecimento por NaCl.

Na maioria dos diagramas de Bode do tipo [log ϕ *versus* log f], pode-se estimar o ângulo de fase máximo, bem como a freqüência corresponde. Neste caso, também se percebe uma diminuição dos valores destes parâmetros com a diminuição do potencial de corrosão.

Comportamento similar ao descrito acima também foi verificado para os cp's representativos das demais espessuras de cobrimento. Porém, as variações nos diagramas ocorreram após tempos de envelhecimento menores, conforme pôde ser visto nos gráficos de potencial de corrosão do item 4.4.1.

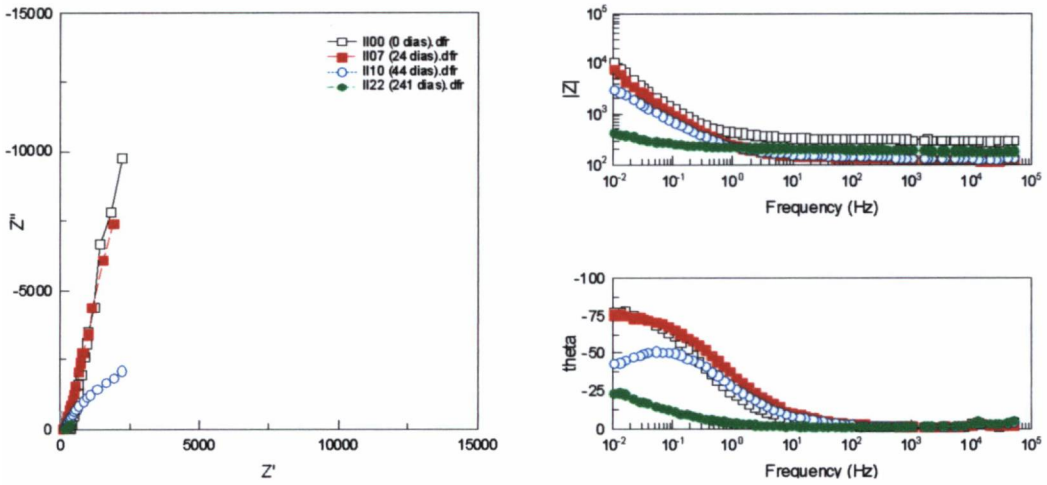


FIGURA 97 - DIAGRAMAS DE NYQUIST E BODE: CPII-F 32, 292 kg/m^3, 15 mm

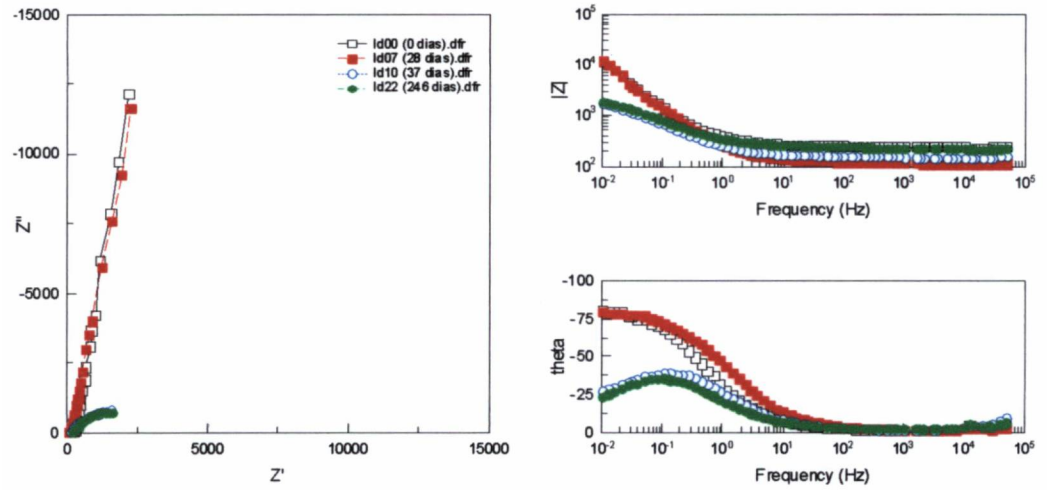


FIGURA 98 - DIAGRAMAS DE NYQUIST E BODE: CPII-F 32, 292 kg/m^3, 25 mm

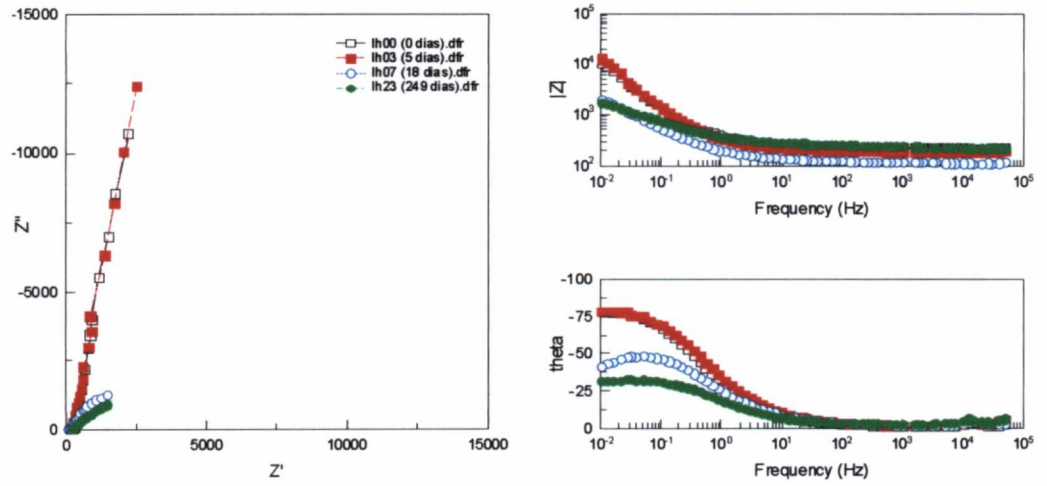


FIGURA 99 - DIAGRAMAS DE NYQUIST E BODE: CPII-F 32, 292 kg/m^3, 30 mm

Apenas um dos quatro cp's confeccionados com maior consumo de cimento CPII-F 32 apresentou alterações importantes nos diagramas eletroquímicos, coincidindo, exatamente, com o comportamento verificado em relação aos potenciais de corrosão. Com exceção do cp com 15 mm de cobrimento (Figura 101), todos os demais apresentaram diagramas de Nyquist similares, nos quais as variações detectadas dizem respeito à posição das retas, cujas inclinações resultaram bastante próximas. Uma pequena tendência de rotação horária é percebida. Nos diagramas de Bode [log |Z| *versus* log f], o efeito do avanço do tempo de envelhecimento é denotado por uma elevação gradual do patamar das curvas (resistência ôhmica).

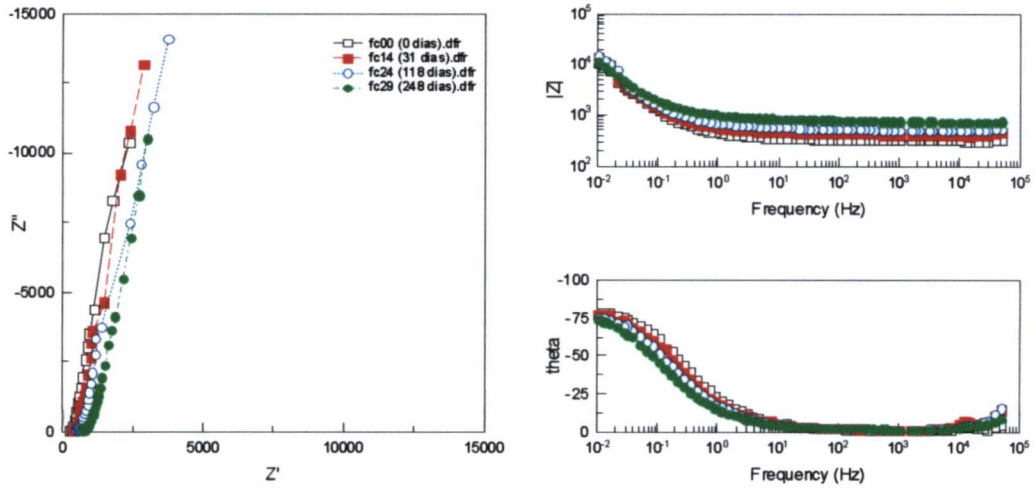


FIGURA 100 - DIAGRAMAS DE NYQUIST E BODE: CPII-F 32, 347 kg/m^3, 10 mm

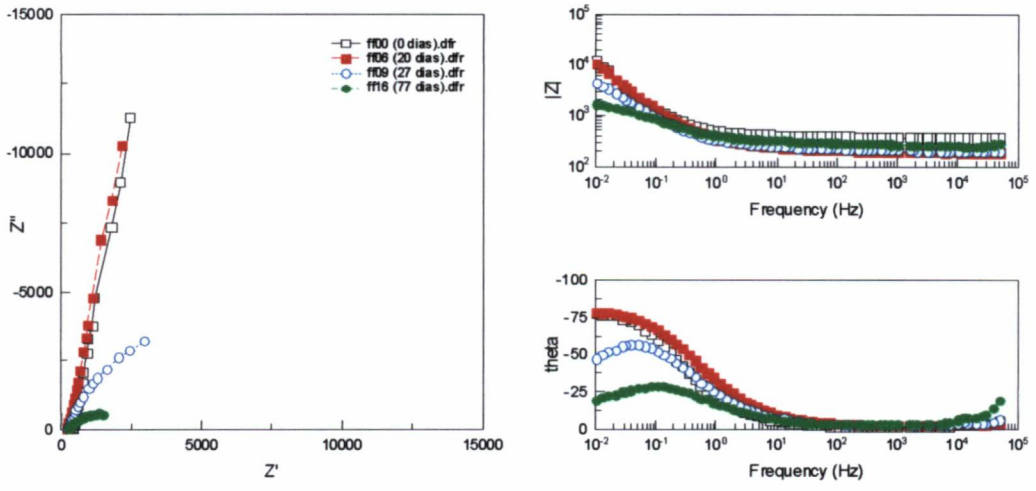


FIGURA 101 - DIAGRAMAS DE NYQUIST E BODE: CPII-F 32, 347 kg/m^3, 15 mm

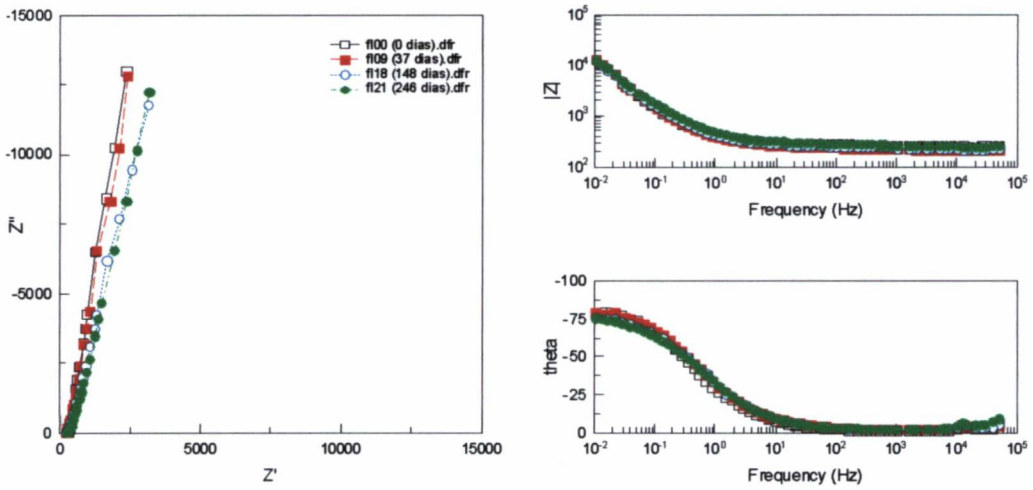


FIGURA 102 - DIAGRAMAS DE NYQUIST E BODE: CPII-F 32, 347 kg/m^3, 25 mm

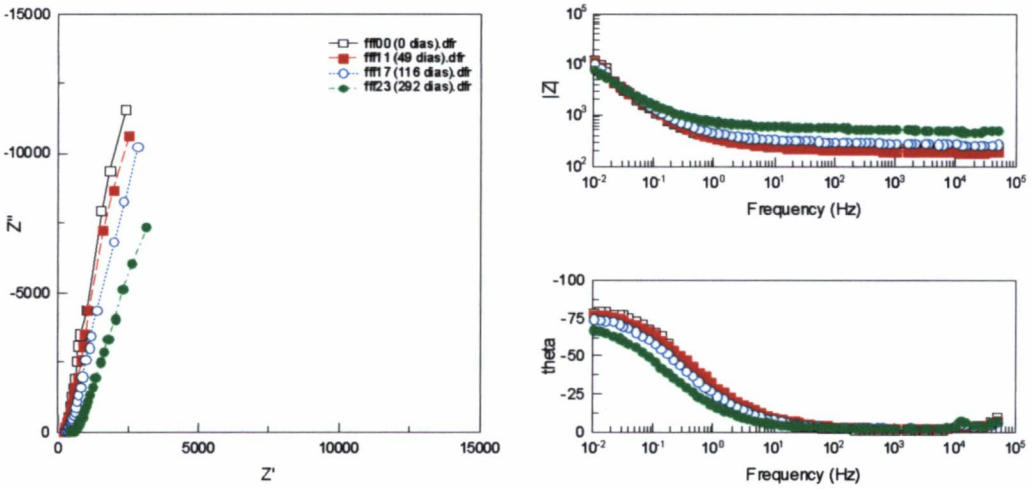


FIGURA 103 - DIAGRAMAS DE NYQUIST E BODE: CPII-F 32, 347 kg/m^3, 30 mm

Para os concretos produzidos com cimento CPII-Z 32 e consumo de 288 kg/m^3, o comportamento dos diagramas de Nyquist e Bode foi semelhante ao das misturas com menor consumo de CPII-F 32. Pode-se destacar a aparência da curva do primeiro correspondente à medida realizada em idade próxima à em que ocorreu o trincamento do concreto dos cp's com cobrimentos de 15 mm (Figura 105) e 25 mm (Figura 106), provocado pela corrosão da armadura. Nestes casos, os pontos que formam cada curva apresentam-se extremamente próximos uns dos outros, aglomerados próximos à origem do diagrama.

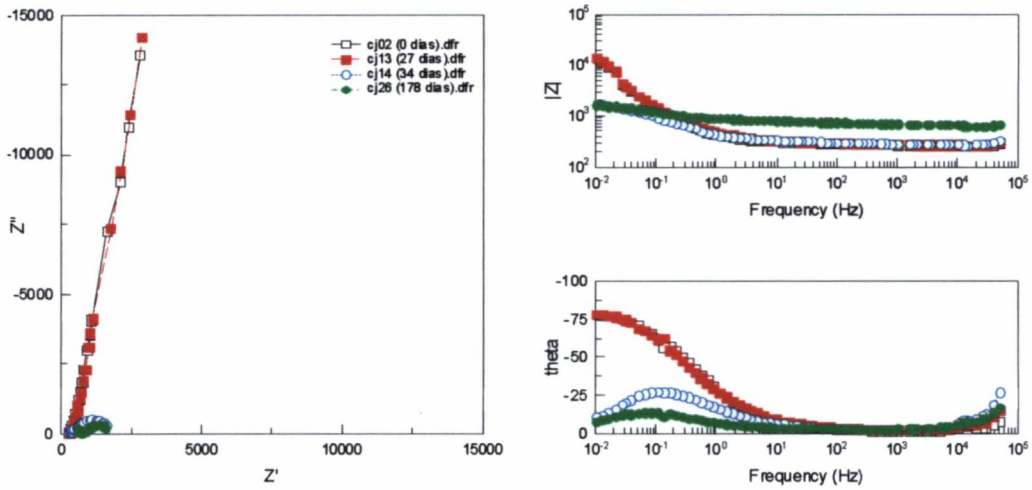


FIGURA 104 - DIAGRAMAS DE NYQUIST E BODE: CPII-Z 32, 288 kg/m^3, 10 mm

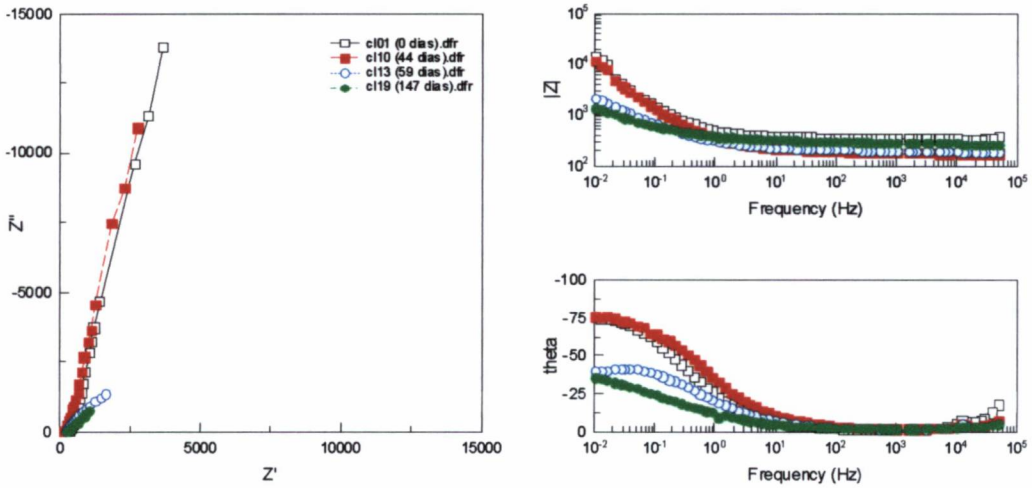


FIGURA 105 - DIAGRAMAS DE NYQUIST E BODE: CPII-Z 32, 288 kg/m^3, 15 mm

Constatou-se, também, que quanto mais negativo o potencial de corrosão medido para a armadura inserida em um cp de concreto, mais a curva do diagrama de Bode [log ϕ *versus* log f] se aproxima de uma reta horizontal, de forma que o módulo do ângulo de fase máximo é cada vez menor, conforme visualizado na Figura 106.

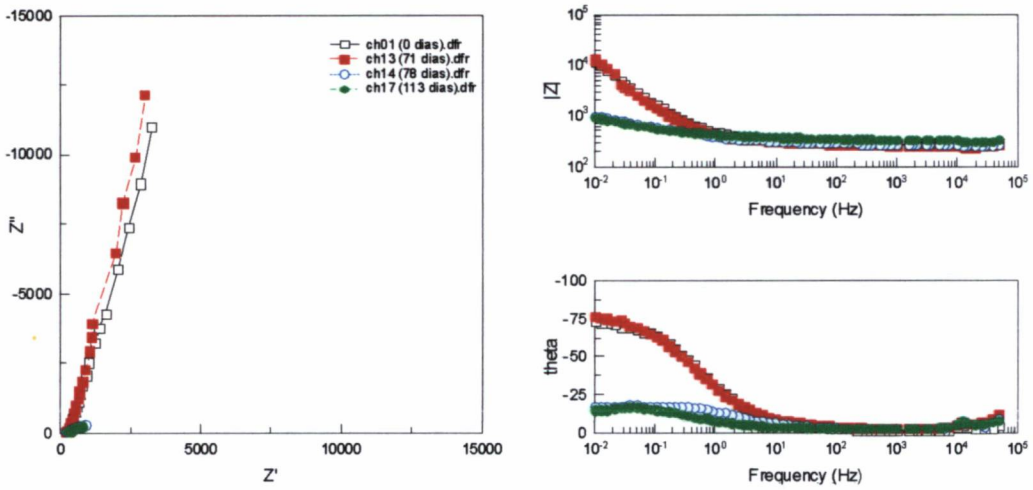


FIGURA 106 - DIAGRAMAS DE NYQUIST E BODE: CPII-Z 32, 288 kg/m^3, 25 mm

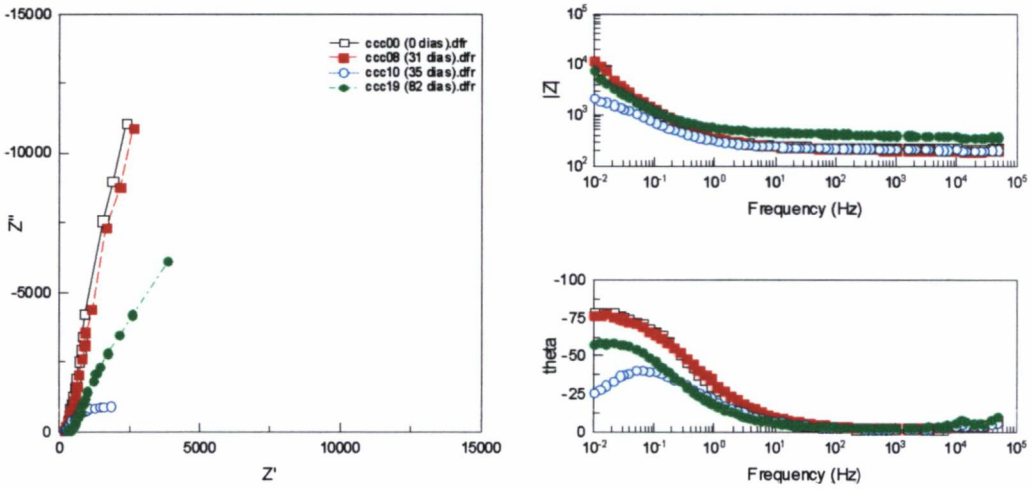


FIGURA 107 - DIAGRAMAS DE NYQUIST E BODE: CPII-Z 32, 288 kg/m^3, 30 mm

O comportamento dos diagramas obtidos para os concretos confeccionados com 345 kg/m^3 de cimento CPII-Z 32 pode ser visualizado a seguir. Os cp's de menor cobrimento, curiosamente, não mostraram alterações consideráveis, coincidindo com a permanência dos potenciais de corrosão em valores maiores que –275 mV. Os demais cp's apresentaram comportamentos parecidos com os já descritos para outras composições.

O diagrama de Nyquist do cp com 30 mm (Figura 111) indica uma auto-recuperação do estado passivo das suas armaduras. Após a alteração da curva aos 25 dias de envelhecimento, coincidente com a variação súbita de potencial, o diagrama

relativo à medida efetuada aos 116 dias resultou com a mesma aparência do gráfico obtido antes do início do envelhecimento. O que se percebe é apenas um pequeno deslocamento à direita do diagrama, uma vez que a sua inclinação é, praticamente, idêntica à da leitura inicial. Segundo FELIU et al. (1998)[171] e DHOUIBI, TRIKI & RAHARINAIVO (2002)[172], este comportamento é devido não só ao efeito do envelhecimento e da difusão do cloreto, mas também à ação do elemento de fase constante.

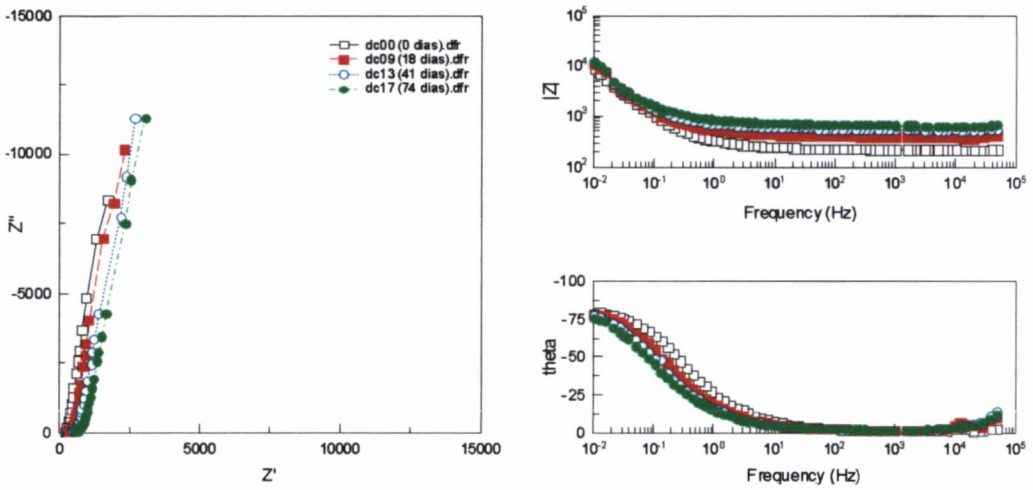


FIGURA 108 - DIAGRAMAS DE NYQUIST E BODE: CPII-Z 32, 345 kg/m^3, 10 mm

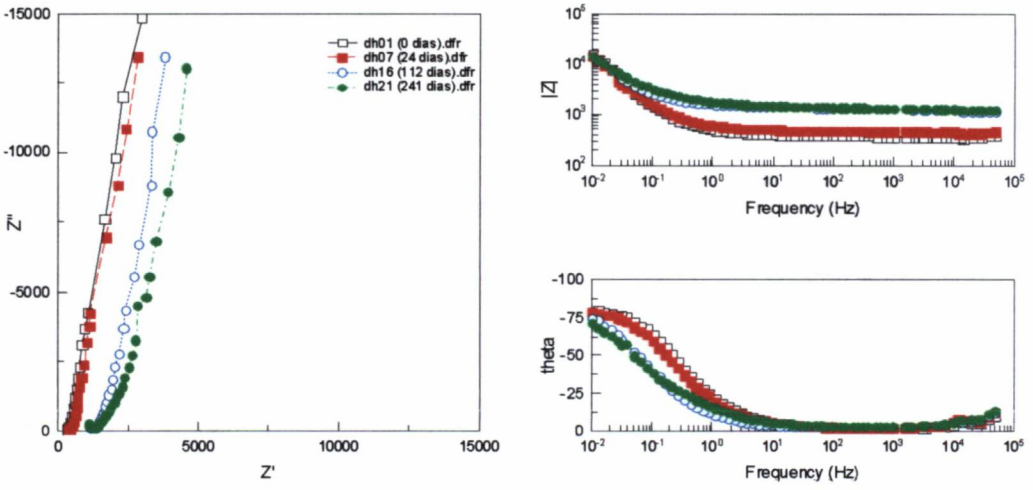


FIGURA 109 - DIAGRAMAS DE NYQUIST E BODE: CPII-Z 32, 345 kg/m^3, 15 mm

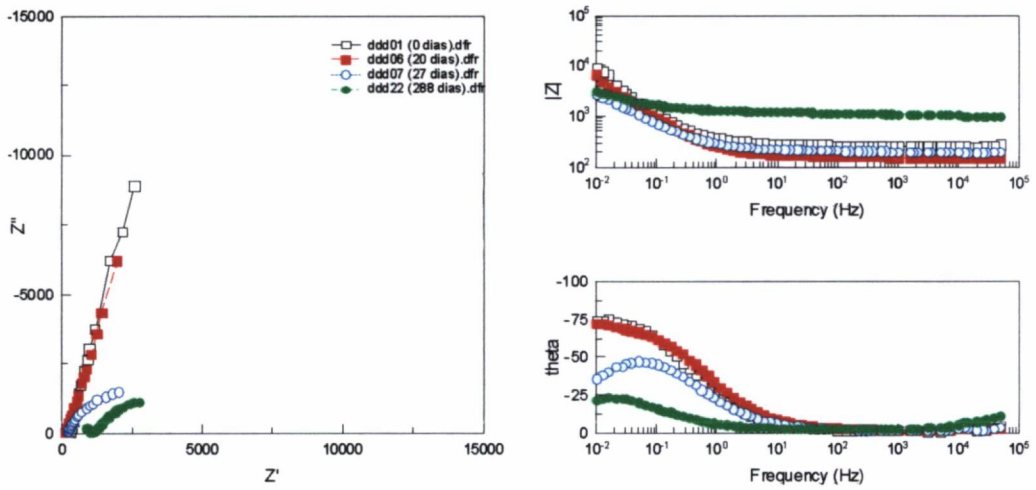


FIGURA 110 - DIAGRAMAS DE NYQUIST E BODE: CPII-Z 32, 345 kg/m^3, 25 mm

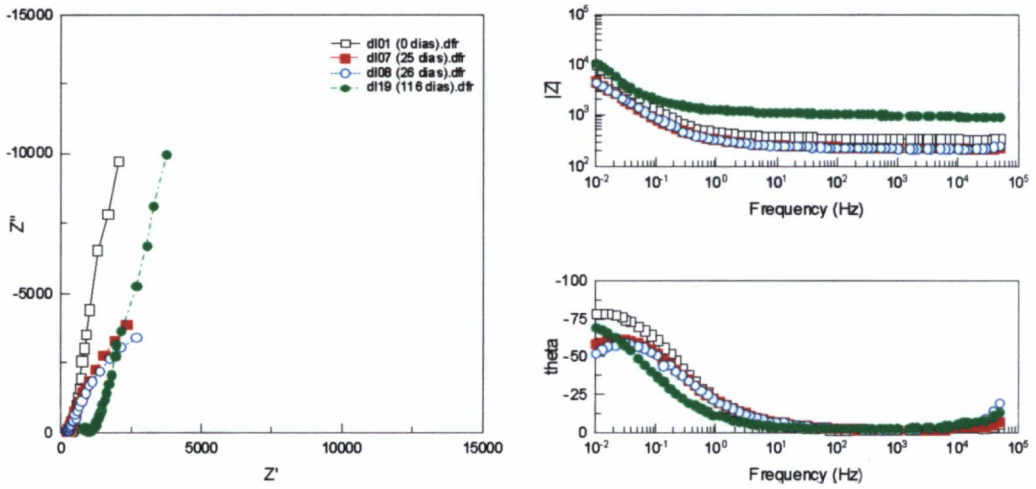


FIGURA 111 - DIAGRAMAS DE NYQUIST E BODE: CPII-Z 32, 345 kg/m^3, 30 mm

Os diagramas obtidos para a maior parte dos cp's confeccionados com cimento CPV-ARI RS demonstraram poucas alterações, o que confirma o bom desempenho eletroquímico dos concretos preparados com esse aglomerante. São visíveis deslocamentos à direita dos diagramas de Nyquist e manutenção da inclinação das curvas, por efeito, principalmente, do envelhecimento e do processo de difusão do íon agressivo. O cp com menor consumo de cimento e cobrimento de 15 mm (Figura 113) apresentou o pior desempenho, pelo fato de ter sido o único em que a rotação horária das curvas foi verificada.

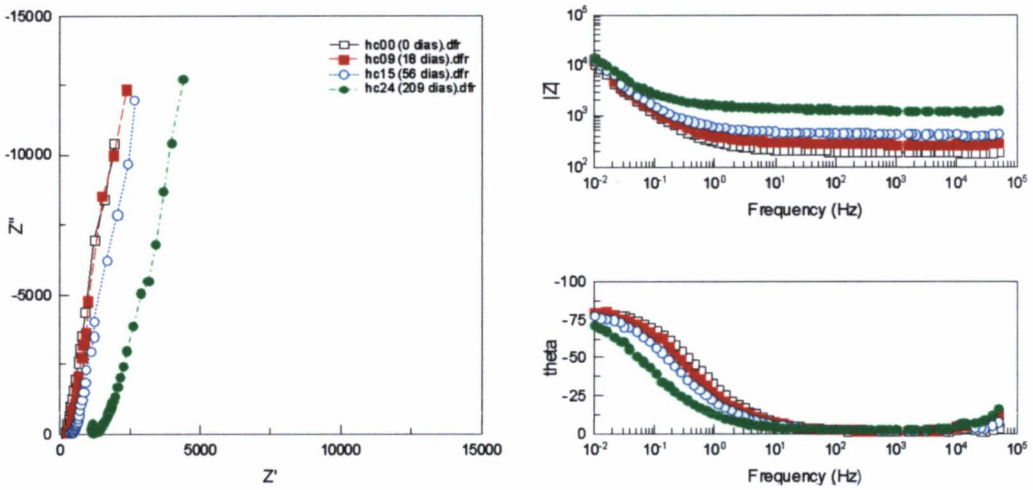


FIGURA 112 - DIAGRAMAS DE NYQUIST E BODE: CPV-ARI RS, 292 kg/m^3, 10 mm

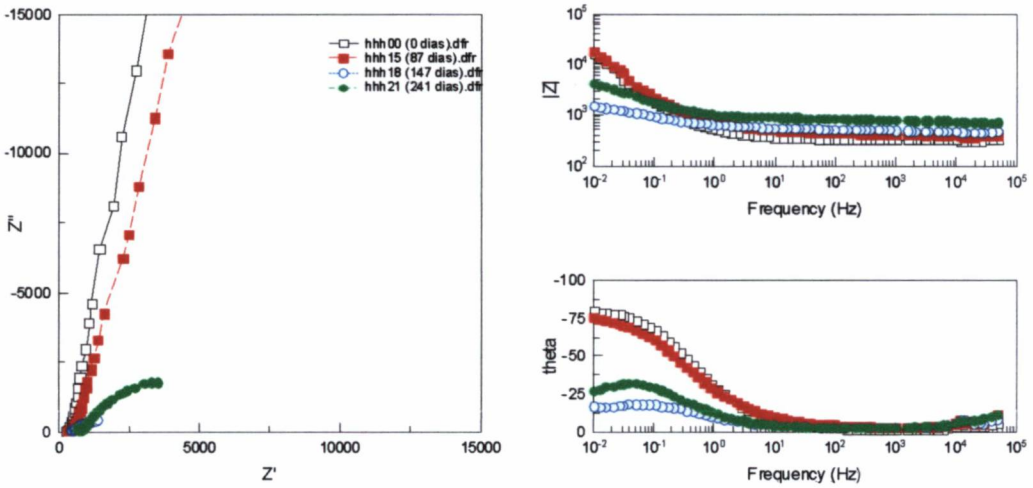


FIGURA 113 - DIAGRAMAS DE NYQUIST E BODE: CPV-ARI RS, 292 kg/m^3, 15 mm

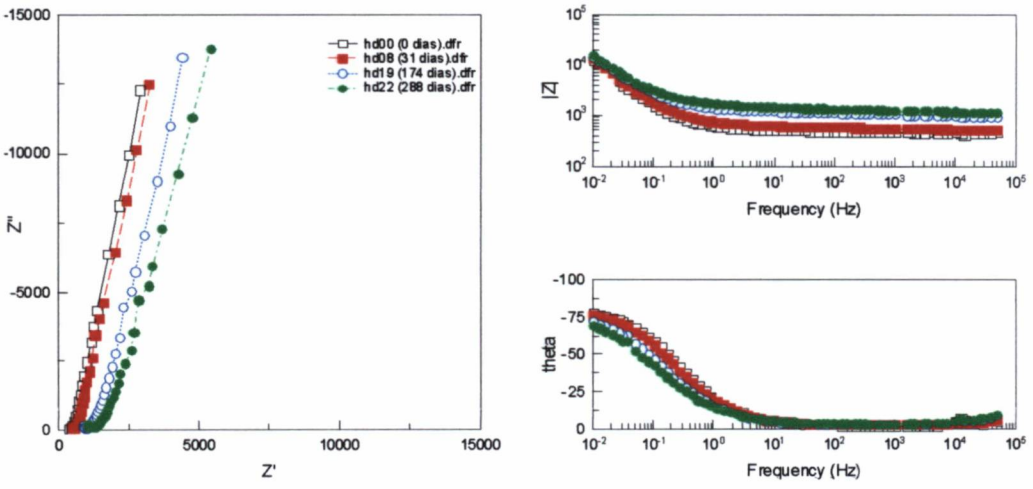


FIGURA 114 - DIAGRAMAS DE NYQUIST E BODE: CPV-ARI RS, 292 kg/m^3, 25 mm

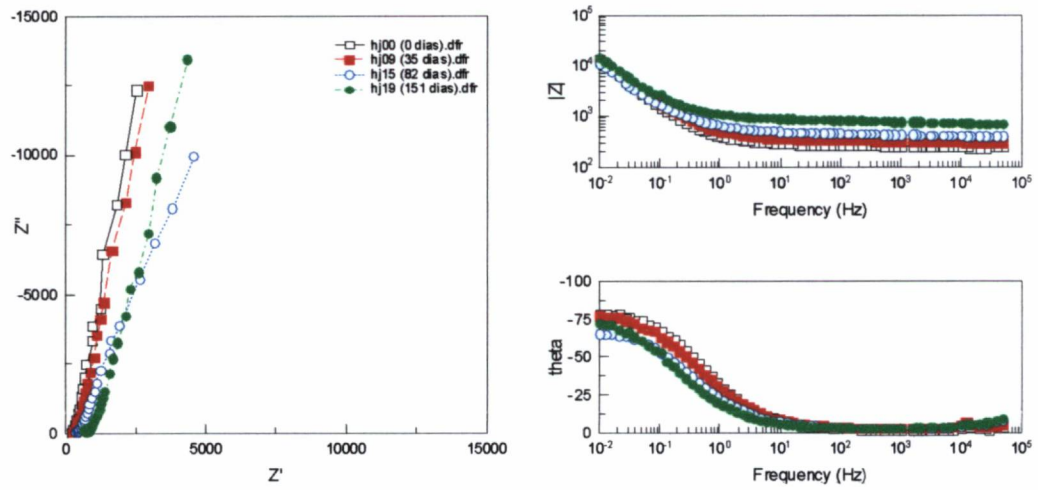


FIGURA 115 - DIAGRAMAS DE NYQUIST E BODE: CPV-ARI RS, 292 kg/m^3, 30 mm

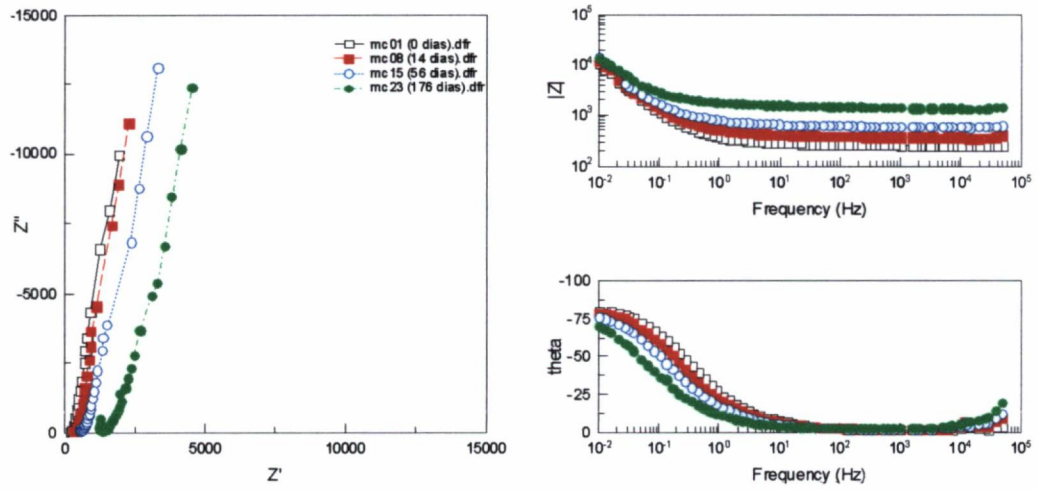


FIGURA 116 - DIAGRAMAS DE NYQUIST E BODE: CPV-ARI RS, 344 kg/m^3, 10 mm

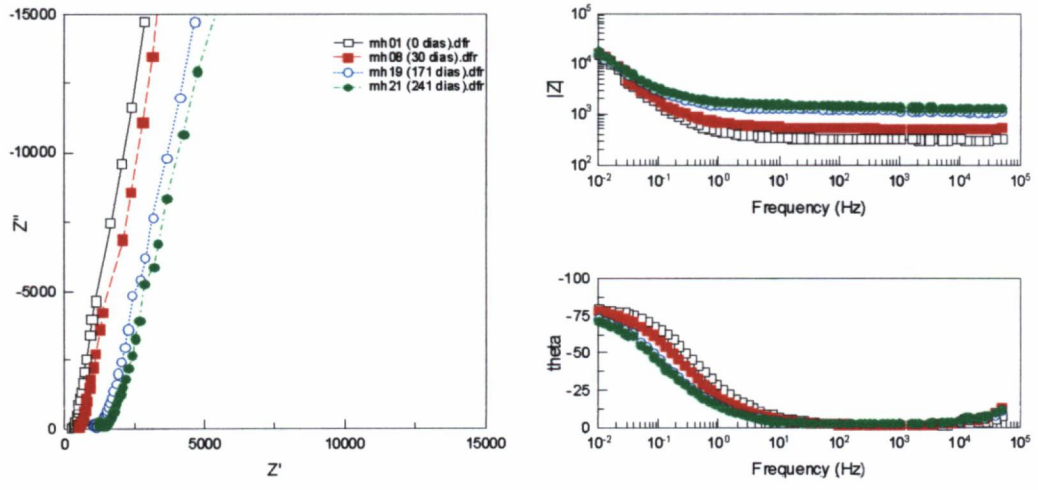


FIGURA 117 - DIAGRAMAS DE NYQUIST E BODE: CPV-ARI RS, 344 kg/m^3, 15 mm

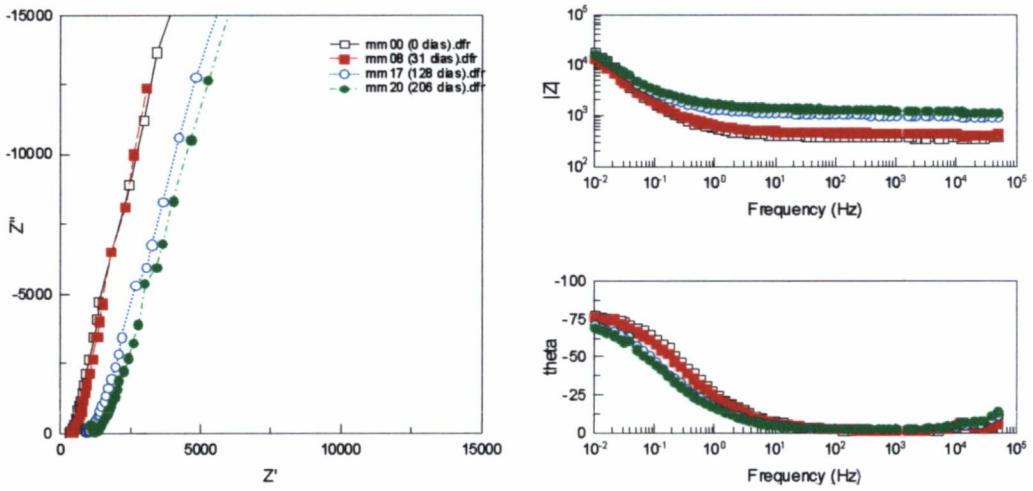


FIGURA 118 - DIAGRAMAS DE NYQUIST E BODE: CPV-ARI RS, 344 kg/m^3, 25 mm

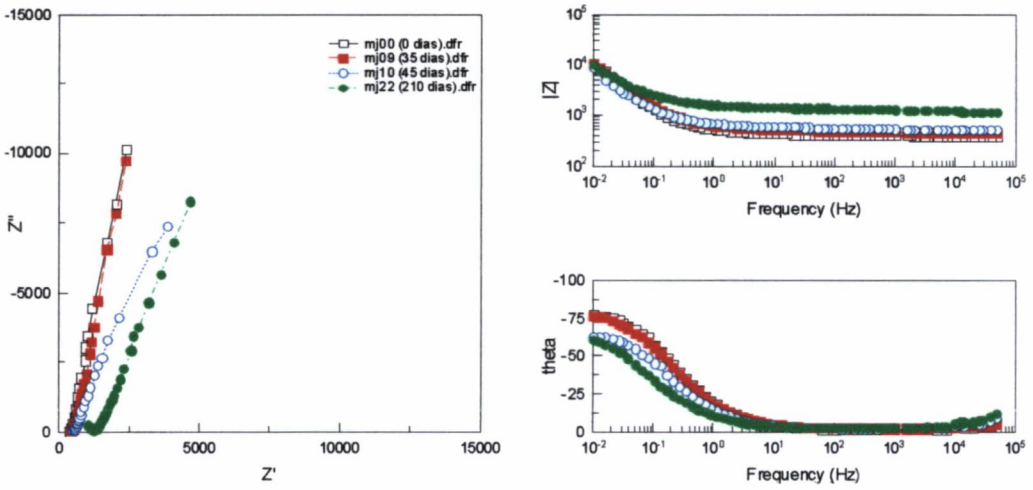


FIGURA 119 - DIAGRAMAS DE NYQUIST E BODE: CPV-ARI RS, 344 kg/m^3, 30 mm

4.4.2.1.2. Dosagens complementares

Na Figura 120 e na Figura 121 mostram-se os diagramas de Nyquist e Bode obtidos nas medições de EIS realizadas nos cp's confeccionados com adição de sílica ativa e resina epóxi, respectivamente.

As alterações que merecem atenção são aquelas em que houve deslocamento à direita dos diagramas de Nyquist, decorrente do envelhecimento e da difusão.

Em geral, ambos os materiais denotaram bom desempenho eletroquímico.

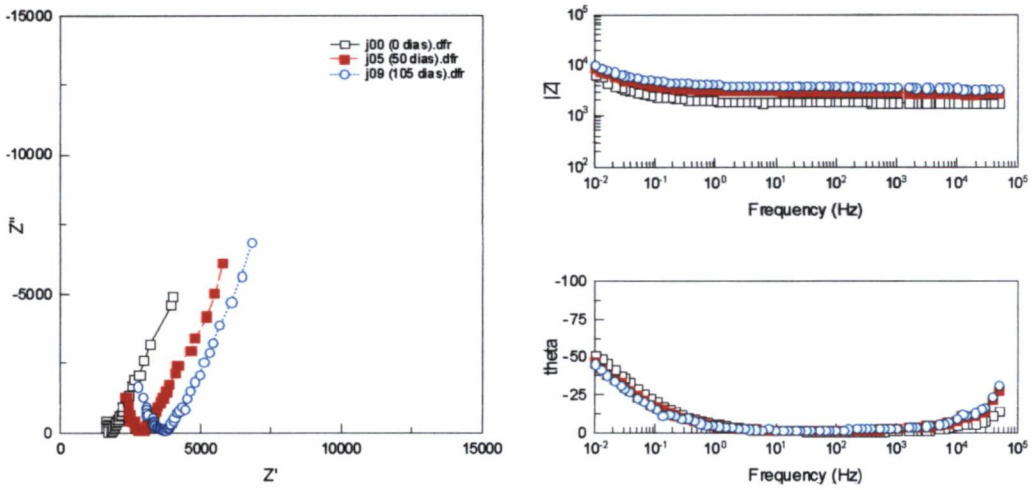


FIGURA 120 - DIAGRAMAS DE NYQUIST E BODE DO CP CONTENDO SÍLICA ATIVA

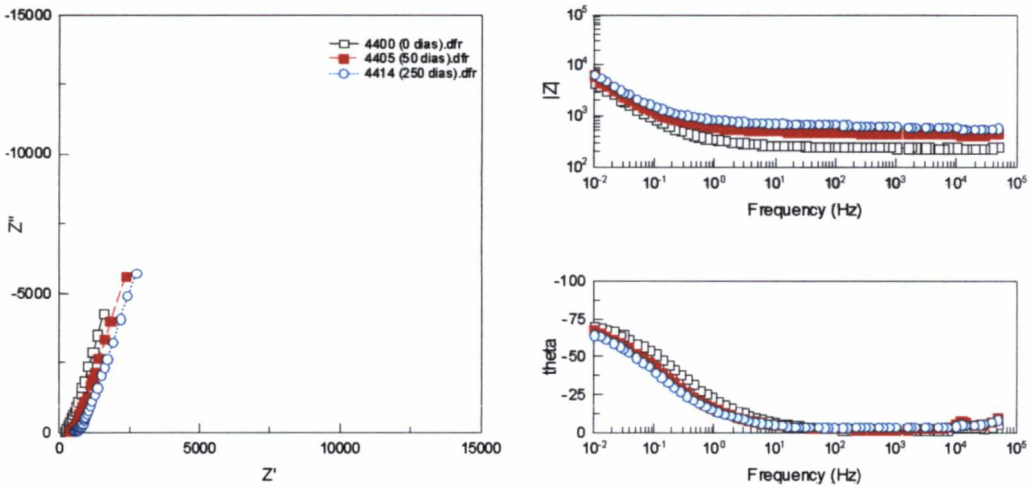


FIGURA 121 - DIAGRAMAS DE NYQUIST E BODE DO CP CONTENDO RESINA EPÓXI

4.4.2.2. Circuito elétrico equivalente e *fitting* dos dados

Com base na literatura, GARCIA et al. (2001)[12] propuseram um circuito elétrico equivalente (Figura 122) para realização do *fitting*, pelo método dos mínimos quadrados não-lineares, dos dados obtidos nas medidas de impedância de cp's prismáticos de concreto armado. Este foi o modelo utilizado no presente trabalho.

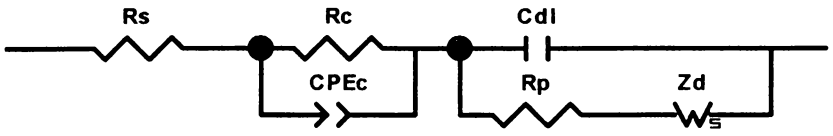


FIGURA 122 - CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE UTILIZADO NO *FITTING* DOS DADOS EXPERIMENTAIS

Os elementos do circuito podem ser descritos conforme segue:

- R_S: resistência da solução externa ao concreto;
- R_C: resistência da solução dentro dos poros;
- CPE_c: elemento de fase constante;
- C_{dl}: capacitância da dupla camada elétrica;
- R_P: resistência de polarização; e
- Z_d: impedância difusional (Warburg) de circuito fechado.

O elemento de fase constante é definido por dois valores: CPE-T e CPE-P. Se o módulo deste último é igual a 1, o elemento CPE atua como um capacitor. Se CPE-P é igual a 0,5, então uma linha inclinada de 45° é produzida no diagrama de Argand; isto pode ser adotado quando se deseja produzir um elemento Warburg de comprimento infinito. Quando CPE é colocado em paralelo com um resistor, produz-se um semicírculo no plano, também conhecido como elemento de Cole[173].

Usualmente, CPE é usado em um modelo em substituição a um capacitor a fim de compensar eventuais heterogeneidades no sistema. Como por exemplo, uma superfície rugosa ou porosa pode originar o aparecimento de uma capacitância de dupla camada como um elemento de fase constante com um valor de CPE-P entre 0,9 e 1. De fato, um capacitor é, na realidade, um elemento de fase constante que apresenta um ângulo de fase constante e igual a 90°.

O elemento da impedância difusional Warburg (Z_d ou Z_W) ocorre quando há processos difusivos através do material. Freqüências mais baixas correspondem a uma difusão mais intensa no concreto. Se o cp é pouco espesso, as baixas freqüências irão

"penetrar" por toda a espessura do material, criando um elemento Warburg de comprimento finito. Se o material é espesso o suficiente para que as freqüências menores aplicadas não "penetrem" totalmente no cp, então se pode interpretar o elemento como infinito[173].

Na Figura 123 pode ser visto o *fitting* dos dados de impedância (diagramas de Nyquist e de Bode), obtidos após 28 dias de envelhecimento acelerado, do cp com 25 mm de cobrimento referente ao concreto confeccionado com 292 kg/m^3 de cimento CPII-F 32. Na Figura 124, é mostrado o ajuste dos dados obtidos aos 37 dias, logo após a ocorrência de uma súbita elevação do potencial de corrosão.

As linhas em vermelho são os dados reais obtidos por EIS, enquanto que as linhas na cor verde refletem o *fitting* desses dados realizado por meio do circuito equivalente. Percebe-se que o ajuste resultou satisfatório, com a maior parte das curvas, praticamente, se coincidindo.

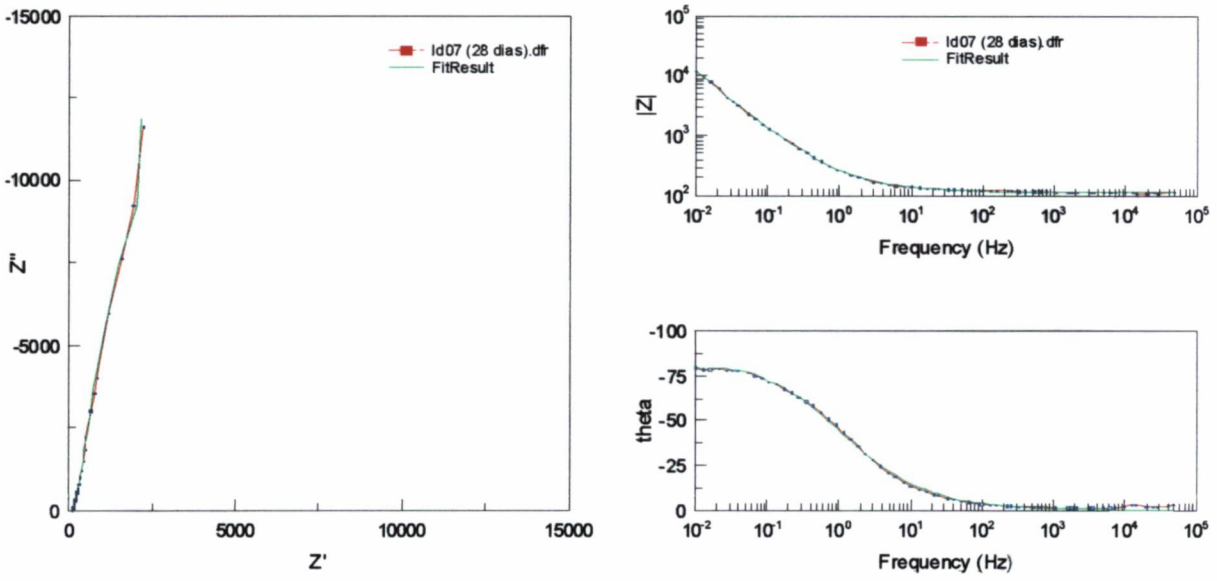


FIGURA 123 - *FITTING* DOS DADOS DA MEDIDA DE IMPEDÂNCIA AOS 28 DIAS DO CP CONFECCIONADO COM 292 kg/m^3 DE CIMENTO CPII-F 32 E COBRIMENTO DE 25 mm

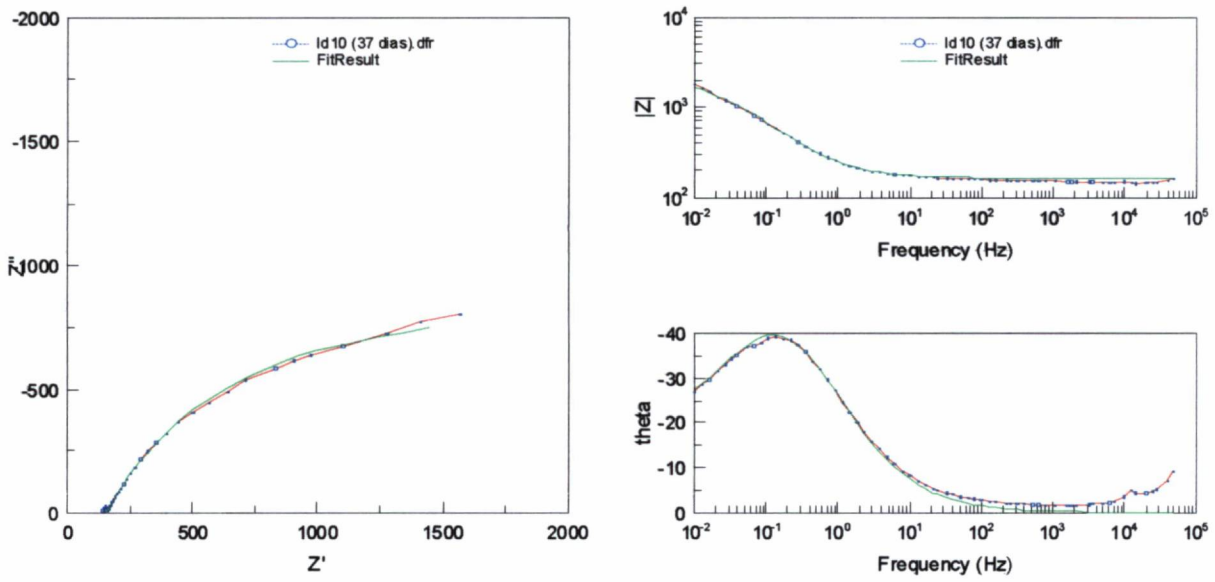


FIGURA 124 - *FITTING* DOS DADOS DA MEDIDA DE IMPEDÂNCIA AOS 37 DIAS DO CP CONFECCIONADO COM 292 kg/m^3 DE CIMENTO CPII-F 32 E COBRIMENTO DE 25 mm

Com a realização do *fitting*, percebeu-se que os elementos que apresentam maior variação em função do tempo de envelhecimento foram a resistência de polarização e o elemento difusional, como era de se esperar. Os demais parâmetros do modelo (R_S, R_C, CPE_C e C_{dl}) demonstraram mudanças pequenas ou, praticamente, nulas durante o período de envelhecimento, indicando não serem afetados pela difusão dos íons Cl^-. Segundo GARCIA et al. (2001)[12], isto se explica pelo fato de que a estrutura do concreto é uma estrutura de macro e microporos interligados por uma rede de canais na qual quase sempre existe água e íons dissolvidos do próprio concreto.

Durante o processo de ajuste dos dados, foi dada atenção especial à variação dos parâmetros do circuito equivalente nas idades próximas às ocorrências de alterações súbitas do potencial de corrosão, e constatou-se que a resistência de polarização apresentava uma queda brusca no mesmo período, passando para valores próximos de zero. A constante de Warburg (S_W), cuja relação com o elemento Z_d é dada pela Equação 17 (a qual deriva da equação generalizada de Warburg), demonstrou um comportamento similar ao de R_P. Os gráficos da Figura 125 ilustram a variação de R_P e de S_W com o tempo de envelhecimento.

$$Z_d = S_W \cdot \omega^{-1/2} - J \cdot S_W \cdot \omega^{-1/2} \qquad \text{EQUAÇÃO 17}$$

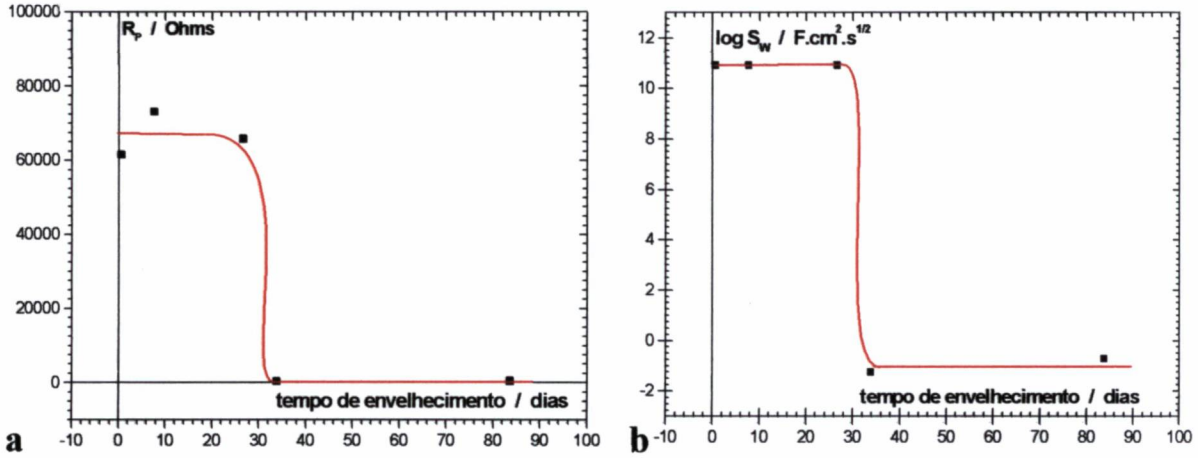


FIGURA 125 - VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS DO MODELO EM FUNÇÃO DO ENVELHECIMENTO: A) RESISTÊNCIA DE POLARIZAÇÃO; B) CONSTANTE DE WARBURG

4.5. ESTUDOS DE CAMPO

Os resultados da inspeção na RDE de Aracaju, do levantamento meteorológico, das visitas às fábricas locais e dos ensaios e testes em campo nos artefatos encontram-se descritos a seguir.

4.5.1. Inspeção na rede instalada na orla de Aracaju

A maioria dos artefatos inspecionados na RDE da orla de Aracaju possuía data de fabricação entre 5 e 10 anos atrás. Foi constatada ocorrência generalizada de diversos defeitos, entre os quais salienta-se a existência de trincas longitudinais no sentido da armadura, causadas pela corrosão acentuada, com conseqüente destacamento da cobertura de concreto e possível diminuição expressiva da resistência mecânica. As fotos da Figura 126 ilustram alguns desses artefatos.

Pela dissolução dos produtos de corrosão da armadura, manchamentos generalizados e superficiais da cobertura de concreto, percebe-se que o concreto

utilizado na fabricação dos artefatos apresenta-se bastante permeável, não protegendo a armadura metálica contra a penetração de agentes agressivos por um período adequado de tempo.

FIGURA 126 - ARTEFATOS DE CONCRETO DEGRADADOS, NA ORLA DE ARACAJU

Ensaios mecânicos foram executados em dois postes de seção duplo T, cuja escolha foi feita após inspeção visual. O primeiro deles, com 9 m de comprimento e 150 daN de resistência nominal, apresentava defeitos superficiais não significativos e aspecto superficial com poucas trincas e pouca evidência de corrosão da armadura. Este artefato foi considerado como apresentando degradação intermediária entre um poste novo (sem defeitos ou corrosão aparente) e um com estado avançado de degradação. O segundo poste, com 11 m e 300 daN, apresentava, superficialmente, corrosão bem mais acentuada, com corrosão aparente de algumas das barras da armadura, camadas de óxido superficial e destacamento da cobertura de concreto, principalmente na face voltada para o lado oposto à praia.

O resultado do ensaio de ruptura do poste de 150 daN mostrou-se compatível com a resistência mínima, especificada pela norma NBR 8451/98[42], de 300 daN. O segundo poste ensaiado (300 daN) rompeu-se com uma carga mecânica de apenas 350 daN, valor este inferior ao mínimo especificado em norma, que é de 600 daN. Com isto, considera-se que o risco de colapso de postes similares a esse, durante a manutenção da RDE, é grande.

Outra observação pertinente, do ponto de vista da degradação, é o fato de que, na maioria dos postes, a face voltada para o mar apresenta menor corrosão aparente que a face oposta, conforme pode ser vislumbrado na Figura 127.

FIGURA 127 - CORROSÃO APARENTE DIFERENCIAL ENTRE AS FACES DOS POSTES

Constatou-se que tal fato é devido à predominância, na região, de ventos provenientes do mar, tanto durante o dia quanto à noite. Isto faz com que haja maior acúmulo de umidade, e conseqüente aderência de maior quantidade de partículas contendo cloreto na face oposta ao mar, não atingida pela brisa constante. Também, as partículas sólidas (areia) carregadas pelo vento, ao colidirem com a face voltada para o oceano, promovem um efeito abrasivo, similar a um "jateamento", na superfície do poste, mantendo-a com um melhor aspecto visual.

Juntamente com a elevada temperatura média anual de Aracaju e a alta salinidade da atmosfera, este é um dos fatores preponderantes do processo de corrosão no litoral sergipano. Como o fato citado é verificado na maior parte dos postes instalados na orla marítima, o seu conhecimento pode ser um importante instrumento de prevenção e aumento da vida útil na especificação de projetos futuros de RDE's.

A análise química ao longo do volume de concreto dos postes ensaiados mostrou teores de cloretos entre 16 e 26 vezes o limite estipulado pela NBR 6118/80[52], conforme pode ser visto na Tabela 34. Os valores diferem muito pouco

entre as faces mais ou menos atacadas.

TABELA 34 - TEOR DE CLORETOS DE AMOSTRAS DE CONCRETO EXTRAÍDAS DE POSTES INSTALADOS NA ORLA DE ARACAJU

AMOSTRA	CLORETOS (g/kg DE CIMENTO)	LIMITE NBR 6118/80[52]
Poste 1 (150 daN)		0,2 g/kg de cimento
volume da face menos atacada (voltada para o mar)	3,2	
volume da face mais atacada (oposta ao mar)	3,3	
Poste 2 (300 daN)		
volume da face menos atacada (voltada para o mar)	4,8	
volume da face mais atacada (oposta ao mar)	5,3	
superfície da face mais atacada (oposta ao mar)	18,0	

Pode-se verificar que o teor é quase quatro vezes maior na superfície de cobrimento mais atacada do que ao longo do volume.

Análise mais detalhada do volume do concreto dos postes revelam, na superfície de fratura, regiões com abaixamento do pH, verificado com o uso de solução alcoólica de fenolftaleína. Nas áreas onde o concreto se encontra com pH abaixo de 8,3, o indicador permanece incolor (Figura 128a). As regiões de cor avermelhada encontram-se com pH alcalino (Figura 128b), demonstrando um concreto qualitativamente melhor, do ponto de vista da corrosão.

FIGURA 128 - ANÁLISE DO PH DO CONCRETO, COM O USO DE FENOLFTALEÍNA

No poste de 300 daN levado à ruptura, retirou-se a camada de cobertura de concreto sobre uma das barras de aço da armadura, cortando-a em cerca de um metro de extensão. A redução média no seu diâmetro foi de 21%, com variações máximas de 30%. A perda de massa média foi de 33%. Considerando que o referido poste estava instalado há 6 anos, o mesmo apresentou perda de massa média anual de 5,5%.

Análise por MEV de amostras de concreto extraídas de postes instalados na orla revelou a presença de gel sílico-cálcico, trincas e poros com cerca de 0,5 mm de diâmetro. Por EDS, confirmou-se a existência de quantidades importantes de cloreto, como era de se esperar. Na análise por DRX, foi detectada a presença de sais de cloreto, tal como o oxi-cloreto de cálcio e alumínio ($3CaO.Al_2O_3.CaCl_2.10H_2O$), bem como da etringita.

4.5.2. Agressividade ambiental e corrosividade atmosférica

Na Figura 129 são mostrados os dados meteorológicos (precipitação pluvial, umidade relativa ambiente, temperatura média e insolação) da região de Aracaju, referentes ao ano de 2002, período em que os artefatos de concreto instalados na EEC da praia da Caueira foram avaliados. Os dados mensais foram fornecidos pela PRODASE.

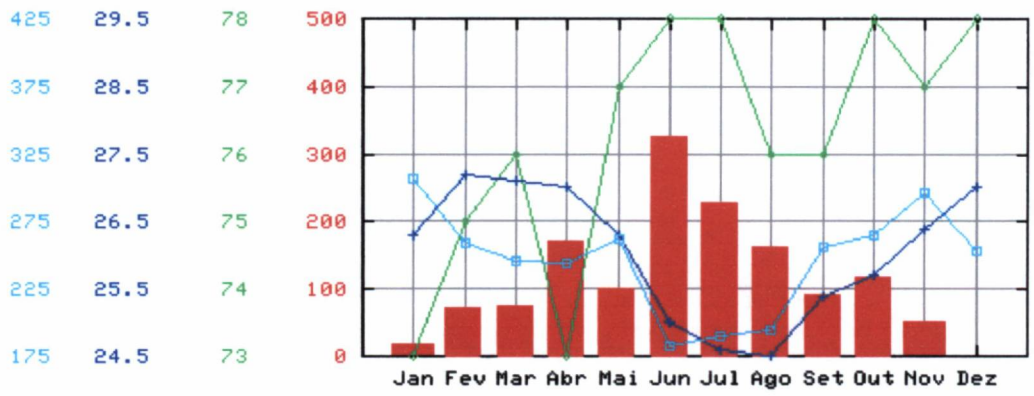


FIGURA 129 - INFORMAÇÕES CLIMÁTICAS PARA ARACAJU/SE, NO ANO DE 2002: PRECIPITAÇÃO (mm), UMIDADE RELATIVA (%), TEMPERATURA (°C) E INSOLAÇÃO (h)

O gráfico da Figura 130 indica os resultados mensais de salinidade, coletados

na EEC. Para este local, obteve-se um teor de cloretos médio, ao longo do ano, de (1087 ± 394) mg/m^2.d. A taxa de deposição de sulfatos média obtida foi de (156 ± 115) mg/m^2.d. De acordo com a NBR 14643/01[174], os valores verificados enquadram-se nas categorias B3 e A3, respectivamente, e caracterizam uma atmosfera marinha, bastante corrosiva.

A medida do teor de material particulado não surtiu resultados satisfatórios, uma vez que na maioria das visitas não foi verificado material depositado no coletor.

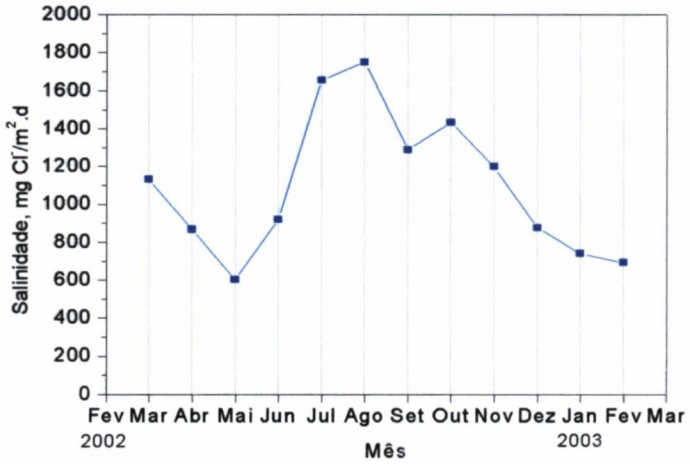


FIGURA 130 - VARIAÇÃO DO TEOR DE CLORETOS NA ATMOSFERA DA EEC, EM 2002

Os resultados de salinidade e sulfatação obtidos para a EEC são, sem dúvida, bastante superiores aos valores encontrados por outros pesquisadores. PINTOS et al. (2002)[175] mediram o teor de cloretos em 10 estações de corrosão espalhadas na costa do Brasil, tendo encontrado um valor máximo de 360 mg/m^2.d, para a cidade de Fortaleza, no Ceará. SILVA & PORTELLA (1989)[176], em determinações periódicas, durante dois anos, da taxa de deposição de cloretos em uma estação de corrosão no litoral do Paraná, verificaram salinidades entre 20 mg/m^2.d (inverno) e 120 mg/m^2.d (verão). Estes valores equivalem a menos de um décimo dos resultados obtidos na EEC da praia da Caueira.

Com base nos estudos de PINTOS et al. (2002)[175] e MORCILLO et al. (2000)[177], e considerando-se apenas os resultados obtidos para o teor de cloretos,

pode-se prever, para os materiais expostos na costa de Sergipe, uma taxa de corrosão três vezes maior que o valor encontrado por aqueles autores para o litoral cearense.

Desta forma, a elevada salinidade atmosférica, a temperatura média acima de 24°C e a umidade relativa superior a 70%, ao longo de todo o ano, contribuem para que a atmosfera da região costeira do Estado de Sergipe possa ser considerada uma das mais agressivas do país, do ponto de vista da degradação de materiais.

4.5.3. Análise do processo de fabricação de postes em Aracaju

A durabilidade de artefatos de concreto armado está intimamente ligada com a sua fabricação, uma vez que a ocorrência de falhas, mesmo as despercebidas, durante o processo produtivo acarreta a inclusão de defeitos ao produto final. Em função disso, postes instalados próximos ao mar, que deveriam durar aproximadamente 35 anos, pelo que diz a norma NBR 8451/98[42], necessitam ser substituídos em menos de 5 anos[6].

Irregularidades podem ser constatadas em grande parte das indústrias fabricantes de postes e cruzetas, e em praticamente qualquer etapa da produção. A maioria destes problemas é devida ao conhecimento técnico insuficiente por parte das pessoas envolvidas no processo, e geralmente requer soluções simples e pouco custosas. Boa parte dos defeitos constatados em inspeções visuais realizadas em postes e cruzetas, instalados e em instalação na RDE da capital sergipana, são conseqüentes dos procedimentos de fabricação.

Por isso, uma das etapas dos estudos de campo consistiu da realização de visitas técnicas a fabricantes de artefatos de concreto armado para RDE's (postes, cruzetas, etc.), situados na região metropolitana de Aracaju. O objetivo foi caracterizar e avaliar o processo de produção e a qualidade dos produtos, de forma a ser possível levantar as principais falhas operacionais ou erros cometidos que podem levar à diminuição da vida útil dos artefatos.

Como produto das visitas realizadas, além dos respectivos relatórios de inspeção, foi elaborado um documento denominado "Questionário para cadastro geral

de fornecedores"[16]. O objetivo principal do questionário foi permitir a verificação das condições técnicas dos fornecedores para fabricar produtos dentro das especificações recomendadas em normas e exigidas pelos consumidores, sejam eles as concessionárias de energia ou particulares.

Na Tabela 35 as principais falhas verificadas nas visitas são citadas, separadas por etapa da produção dos artefatos, a fim de não se estender o presente texto.

Na Figura 131 podem ser visualizadas algumas das irregularidades citadas.

Foi possível comprovar, por meio de visitas a fábricas de postes, que a durabilidade reduzida de postes em concreto armado instalados em regiões com proximidade do mar é devida, em grande parte, a procedimentos errôneos utilizados durante o processo de fabricação. A maioria das falhas é causada inconscientemente pelos operadores, em razão do desconhecimento das recomendações de norma e das práticas de concretagem.

A eliminação de muitas das irregularidades observadas depende da implementação de soluções e métodos simples e baratos, que não requerem mais do que um pouco de bom senso e interesse por parte dos proprietários das fábricas. Um maior controle e rigor das concessionárias de energia elétrica contribuiriam para que a busca de alternativas para a obtenção de artefatos com melhor qualidade fosse a bandeira a ser seguida por aquelas empresas.

Após as inspeções, foram emitidos relatórios contendo informações sobre as falhas constatadas e sugestões de como corrigi-las, os quais foram remetidos aos fabricantes visitados.

TABELA 35 - IRREGULARIDADES NA PRODUÇÃO DE ARTEFATOS PARA RDE'S

ETAPA	PRINCIPAIS FALHAS E DEFEITOS
Materiais e insumos	- Armazenamento inadequado de agregados, ferragem e aditivos - Armazenamento incorreto de cimento e adições - Baixa qualidade dos agregados - Utilização de agregados potencialmente reativos - Uso sem critérios de aditivos e adições minerais - Água de amassamento imprópria
Equipamentos	- Irregularidades geométricas e defeitos nas fôrmas - Incrustações e ferrugem na superfície interna das fôrmas - Falta de estanqueidade, vedação incorreta dos moldes (Figura 131a) - Instalação de moldes e betoneiras em local inapropriado - Estado precário das betoneiras
Montagem da armadura e preparo das fôrmas	- Erros de geometria e disposição das barras de aço (Figura 131b) - Uso de arame recozido como armadura transversal (Figura 131c) - Espaçamento excessivo entre estribos - Cobrimento insuficiente (Figura 131d) - Uso sem critérios de desmoldantes - Uso de óleo mineral "queimado" (Figura 131e)
Preparo do concreto	- Dosagem por volume (Figura 131f) - Desatualização dos dados de dosagem - Falta de padronização na dosagem - Inexistência de controle da umidade dos agregados - Água adicionada de acordo com a sensibilidade do operador - Tempo de mistura do concreto excessivo ou insuficiente
Lançamento e adensamento	- Desconhecimento do *slump* - Demora entre betonadas subseqüentes - Método de lançamento inadequado - Tempo e freqüência de vibração desajustados - Incorreção no número e posicionamento dos vibradores - Acoplamento falho de vibradores estacionários
Desforma e cura	- Desmoldagem precoce - Método impróprio para abertura das fôrmas - Concentração de esforços durante a desforma - Método e tempo de cura inapropriados - Favorecimento da evaporação da água - Inexistência de controle da água usada em tanques de cura
Içamento, transporte e estocagem dos artefatos	- Içamento precoce - Içamento por um único ponto - Posição errônea de empilhamento dos postes - Excesso de artefatos em uma mesma pilha - Inexistência ou insuficiência de calços entre as peças
Outras falhas	- Gravação precoce da identificação - Ausência de numeração serial - Falta de controle tecnológico do concreto e artefatos

FIGURA 131 - FOTOS MOSTRANDO ALGUMAS DAS IRREGULARIDADES CONSTATADAS NA PRODUÇÃO DE ARTEFATOS DE CONCRETO NO ESTADO DE SERGIPE

4.5.4. Fabricação, ensaio e instalação de postes em Sergipe

Na Tabela 36 são mostradas as quantidades de cada insumo utilizado na fabricação dos concretos para confecção de postes e cruzetas em fábrica de artefatos da região metropolitana de Aracaju. Os traços foram similares aos estudados na etapa de dosagens piloto. As composições são dadas em volume, e referem-se à quantidade de material usada em cada betonada. Também são informados os números de identificação dos artefatos fabricados com as respectivas misturas.

TABELA 36 - QUANTIDADE DE MATERIAIS USADOS NAS DOSAGENS EM ARACAJU

DOSAGEM	1	2
Quantidade de materiais		
Cimento CPII-F 32 (SE)	2 sacos de 50 kg	
Cimento CPV-ARI RS (PR)	..	2 sacos de 50 kg
Sílica ativa	8 kg	
Areia	172 l	189 l
Brita 1	137 l	137 l
Pedrisco	110 l	110 l
Água	38 l	45 l
Aditivo superplastificante	1,5 kg	..
Fator a/c	0,35	0,45
Identificação dos artefatos moldados		
Postes	221 e 222	224 e 225
Cruzetas	1929 e 1930	1932 e 1933

Nas dosagens realizadas em Aracaju conseguiu-se a consistência adequada dos concretos utilizando-se uma quantidade de água menor que a prevista nos estudos laboratoriais, obtendo-se concretos com baixos fatores a/c. Isto, provavelmente, se deveu à elevada temperatura ambiente (maior que 30°C) e à alta umidade relativa no dia das dosagens em Sergipe, que podem ter aumentado a eficiência do aditivo superplastificante[3] e a velocidade de hidratação dos grãos de cimento, em especial o do tipo CPV-ARI RS.

Além dos artefatos fabricados com os concretos estudados em laboratório, também foram selecionados dois postes e duas cruzetas dentre os produtos fabricados com o traço usual da empresa (cimento CPII-F 32) e estocados no canteiro da fábrica. Tais artefatos estavam identificados como: postes 227 e 232; cruzetas 1892 e 1897.

Os cp's moldados com os concretos preparados em campo foram rompidos por compressão axial aos 3, 7 e 28 dias, e os respectivos resultados podem ser vistos na Figura 132.

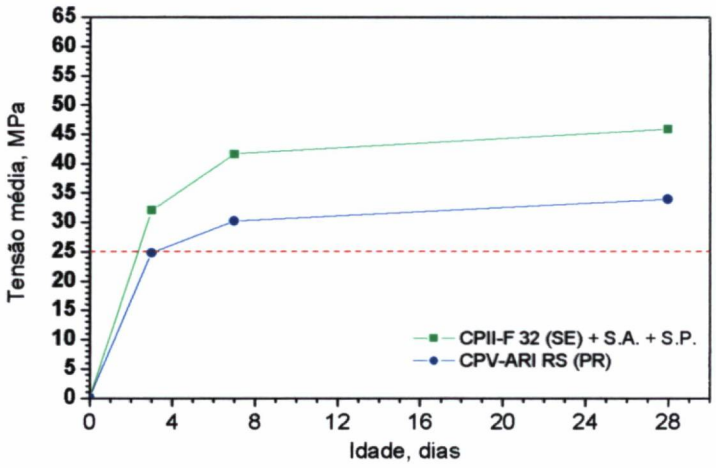


FIGURA 132 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS CONFECCIONADOS EM ARACAJU

Observou-se que a adição de sílica ativa, em conjunto com o aditivo superplastificante, teve influência mais acentuada na resistência mecânica do concreto do que a simples utilização do cimento de alta resistência inicial, oriundo de Curitiba. Este fato evidencia um dos benefícios do reduzido tamanho de partícula da sílica ativa, a qual, espera-se, também promova maior durabilidade aos produtos fabricados.

Na Tabela 37 são mostrados os resultados verificados nos ensaios e testes realizados em um dos postes de cada composição.

Apesar dos resultados dos três artefatos terem atendido aos requisitos de norma, percebe-se que o poste padrão, confeccionado com concreto normal, apresentou desempenho mecânico inferior aos demais, produzidos com as misturas estudadas em laboratório. Além do fato de sua carga de ruptura ter ficado 50 daN abaixo dos valores atingidos pelos postes 221 e 224, as flechas verificadas no ensaio resultaram entre 24 e 57% maiores que as constatadas para aqueles. Comparando-se apenas os artefatos 221 e 224, conclui-se que o poste contendo sílica ativa e superplastificante oferece características mecânicas um pouco melhores.

TABELA 37 - RESULTADOS DOS ENSAIOS E TESTES NOS POSTES FABRICADOS EM ARACAJU

IDENTIFICAÇÃO	221	224	227	*LIMITES NBR 8451/98*[42]
Material	CPII-F + sílica	CPV RS	Padrão (CPII-F)	
Face ensaiada	B	B	B	
Flecha p/ 300 daN (mm)	106	113	167	*≤ 385*
Flecha p/ 420 daN (mm)	207	218	271	..
Flecha residual (mm)	38	36	40	*≤ 38,5*
Carga de ruptura (daN)	750	750	700	*≥ 600*
Dimensões base (mm)	451 x 329	450 x 331	446 x 335	*448x330 (±5)*
Dimensões topo (mm)	144 x 111	143 x 112	142 x 112	*140x110 (±5)*
Furos	OK	OK	OK	
Cobrimento	OK	OK	OK	
Identificação	OK	OK	OK	
Acabamento	OK	OK	OK	..

Os resultados dos ensaios executados nas cruzetas são informados na Tabela 38. Similarmente ao que foi verificado nos ensaios dos postes, pode-se verificar pelos resultados que a cruzeta confeccionada com a mistura contendo sílica ativa foi a que apresentou o melhor desempenho mecânico, comparativamente aos demais artefatos.

Na Tabela 39 podem ser vistos os resultados de massa específica, índice de vazios e absorção de água, obtidos segundo NBR 9778/87[44], de amostras de concreto extraídas dos postes e cruzetas após a sua ruptura durante os ensaios. Novamente, o material contendo sílica foi o que demonstrou melhor qualidade, por apresentar os menores valores de absorção e índice de vazios. Em seguida, tem-se a mistura confeccionada com cimento CPV-ARI RS como a de desempenho regular. Os piores resultados foram verificados para o traço padrão utilizado pela fábrica de artefatos.

TABELA 38 - RESULTADOS DOS ENSAIOS E TESTES NAS CRUZETAS FABRICADAS EM ARACAJU

IDENTIFICAÇÃO	1929	1932	1892	*LIMITES NBR 8453/84*[165]
Material	CPII-F + sílica	CPV RS	Padrão (CPII-F)	-
Tipo de ensaio	Esf. horizontal	Esf. horizontal	Esf. horizontal	-
Flecha p/ 200 daN (mm)	6	14	20	*≤ 14,25*
Flecha p/ 280 daN (mm)	12	21	23	-
Flecha residual (mm)	1	3	2	*≤ 3,325*
Carga de ruptura (daN)	750	750	750	*≥ 400*
Comprimento real (mm)	1905	1906	1903	*1900 (±10)*
Furos	OK	OK	OK	-
Cobrimento	OK	OK	OK	-
Identificação	OK	OK	OK	-
Acabamento	OK	OK	OK	-

TABELA 39 - MASSA ESPECÍFICA, ÍNDICE DE VAZIOS E ABSORÇÃO DOS CONCRETOS PRODUZIDOS EM ARACAJU

POSTE	221	224	227
Material	CPII-F + sílica	CPV RS	Padrão (CPII-F)
Massa específica (kg/m³)	2,34	2,24	2,17
Índice de vazios (%)	10,2	14,3	16,5
Absorção de água (%)	4,37	6,39	7,60

Os artefatos confeccionados e não ensaiados foram implantados na EEC situada na praia da Caueira. Na Figura 133 podem-se visualizar uma foto da EEC com os postes e cruzetas já instalados, bem como uma planta esquemática mostrando a posição e identificação de cada artefato.

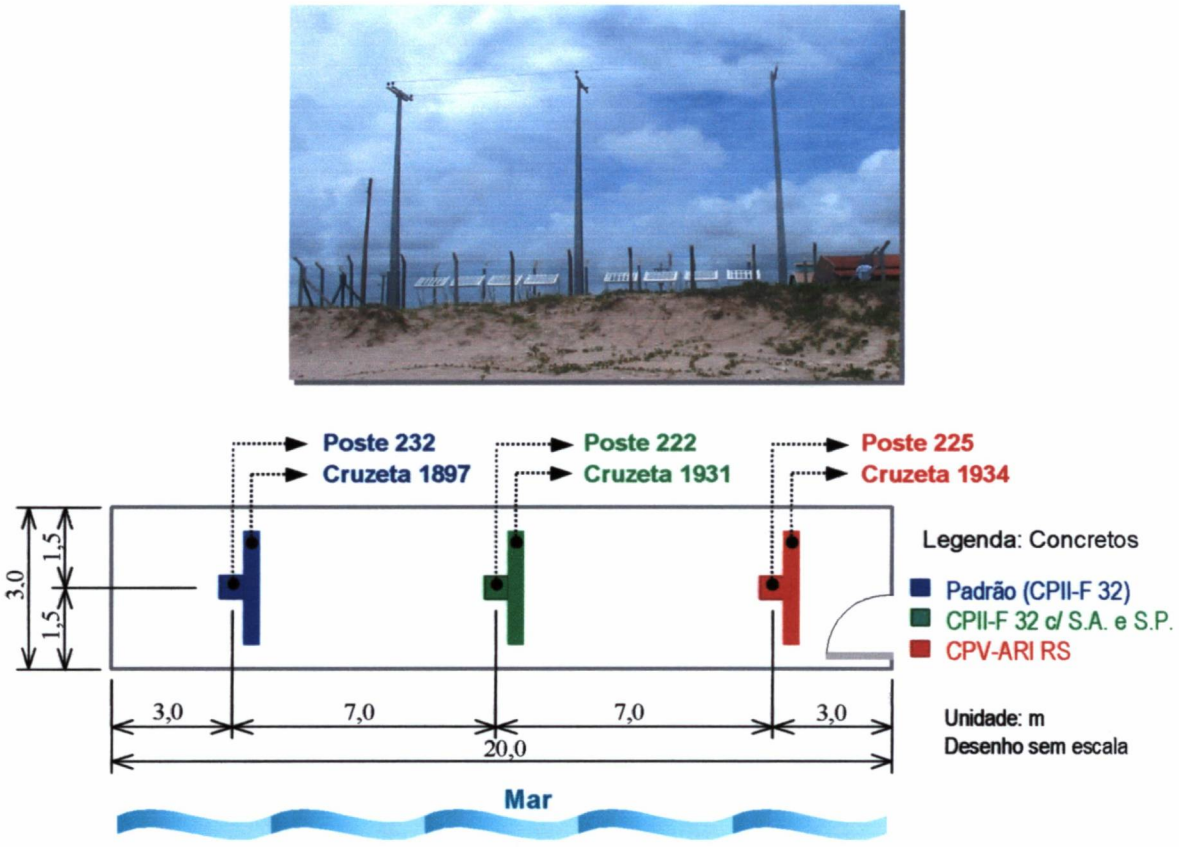


FIGURA 133 - IDENTIFICAÇÃO DOS ARTEFATOS INSTALADOS NA EEC

4.5.5. Acompanhamento do desempenho dos artefatos em campo

Os valores médios de potencial elétrico obtidos nos postes destinados ao envelhecimento natural, antes de sua implantação na EEC, foram os seguintes:

- Poste 222 (CPII-F 32 + sílica + superplastificante): –96 mV;
- Poste 225 (CPV-ARI RS): –138 mV; e
- Poste 232 (padrão): –142 mV.

Na Figura 134a é mostrada a evolução do potencial de corrosão dos postes ao longo do tempo de exposição à atmosfera litorânea do sul de Sergipe. Cada ponto do gráfico refere-se ao valor médio de potencial obtido de 30 leituras realizadas em diferentes partes dos artefatos.

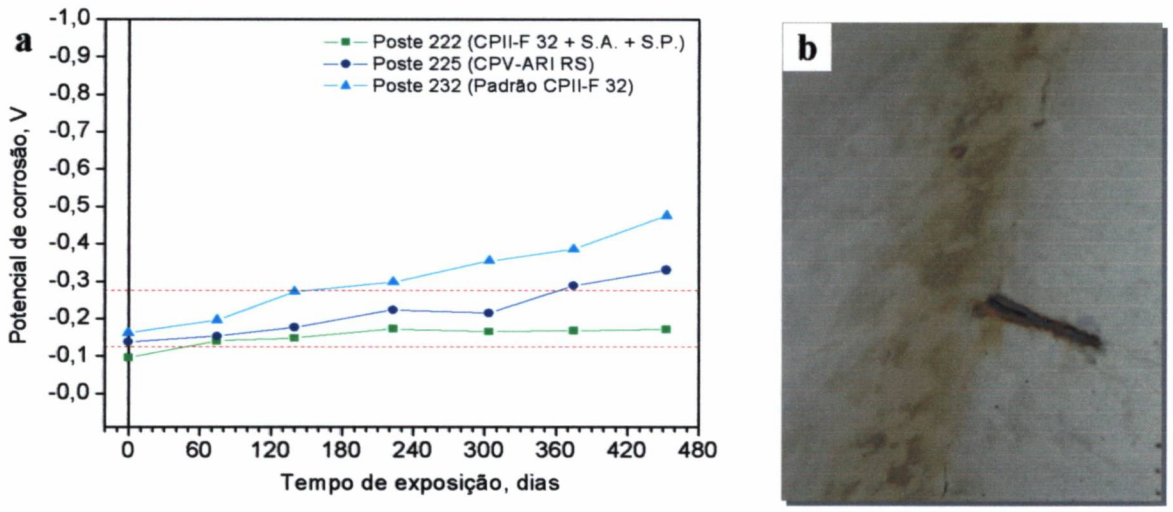


FIGURA 134 - A) VARIAÇÃO DO POTENCIAL DE CORROSÃO DOS POSTES INSTALADOS NA EEC; B) APARÊNCIA DO POSTE 232

Observa-se que os potenciais medidos nos postes 225 e 232 encontram-se gradativamente tendendo para as regiões de maior probabilidade de corrosão, sendo que o mais alterado se refere à composição padrão. O artefato fabricado com adição de sílica ativa apresenta-se com potenciais de corrosão, praticamente, estabilizados na zona de incerteza de atividade corrosiva.

Em relação à inspeção visual, apenas o poste 232 mostrou alterações perceptíveis a olho nu, ao final do período de envelhecimento natural. Seu aspecto superficial indica corrosão moderada da armadura, como pode ser visto na foto da Figura 134b, em razão da alteração da coloração do concreto nas adjacências da armadura principal (sentido longitudinal) e da corrosão de parte da armadura transversal em um dos estribos no trecho do poste próximo à região de engaste no solo.

Com isso, considerando-se os dados coletados em campo, pode-se eleger a mistura com sílica ativa como o material de melhor desempenho, seguido pelo concreto com CPV-ARI RS. O último lugar fica reservado para o traço padrão, utilizando cimento CPII-F 32 sem qualquer adição.

Quanto às cruzetas, nenhum teste ou avaliação periódica foi efetivada, pelo fato das mesmas estarem instaladas no topo dos postes e estes se encontrarem energizados.

CONCLUSÕES

5. CONCLUSÕES

São muitas as conclusões que podem ser tiradas deste trabalho, uma vez que, além do desenvolvimento experimental ter se dado em várias etapas, também foram realizadas diversas atividades de campo.

Na etapa laboratorial de dosagens preliminares, em que se procurou produzir concretos com composições similares aos comumente empregados pelas fábricas de artefatos, foi possível avaliar a influência do tipo e consumo de cimento e da espessura de cobrimento nas propriedades físicas e mecânicas do concreto, bem como no seu desempenho em termos de durabilidade. Nas dosagens complementares, também foi avaliada a influência da adição de sílica ativa e resina epóxi nos concretos.

A análise dos cimentos utilizados nas três etapas de dosagens indicou que, apesar de os produtos apresentarem qualidade adequada e características compatíveis com os requisitos normalizados, existem diferenças consideráveis na composição química (teores de MgO e CaO, principalmente) e propriedades físicas (finura) e mecânicas de materiais do mesmo tipo, porém fabricação em regiões distintas. O cimento CPII-F 32 produzido no Paraná mostrou menor finura Blaine e maior quantidade de resíduos retidas nas peneiras #200 e #325, em comparação com o aglomerante de mesmo tipo adquirido em Sergipe. A resistência mecânica do cimento paranaense também foi menor.

Técnicas analíticas adicionais, como FRX, DRX, análise térmica (DTA/TGA) e BET, serviram não só para confirmar algumas das características dos cimentos, mas também para classificá-los quanto à sua compatibilidade com as condições de uso propostas.

Da caracterização dos agregados miúdos, ficou constatado que a areia oriunda de Sergipe apresentou melhor qualidade que a obtida no Paraná, além de ser mais fina que esta última. A análise petrográfica indicou que ambos os agregados, de composições minerais bastante similares, podem reagir com os cimentos usados,

gerando expansões deletérias no concreto.

Em relação aos agregados graúdos, a situação se inverte, pois a brita 1 e o pedrisco do Paraná possuem menores teores de material pulverulento e de absorção de água. Além disso, nenhum dos agregados graúdos se enquadrou perfeitamente nas graduações granulométricas recomendadas pela NBR 7211/83[132]: enquanto os materiais trazidos de Aracaju demonstraram ser mais grossos que o padrão, os agregados de Curitiba resultaram mais finos. Também, a mineralogia dos materiais sergipanos propicia a ocorrência de reações expansivas do tipo álcali-silicato, quando os mesmos são combinados com cimento Portland.

Os resultados do ensaio de reatividade potencial confirmam a tendência de expansão de concretos confeccionados com os agregados citados, principalmente quando combinados com cimentos CPII-F 32 e CPV-ARI RS. A adição de 8% de sílica ativa às misturas promoveu uma drástica redução da expansibilidade, tornando-as inócuas, em termos de reatividade.

As características obtidas na análise da sílica atendem aos requisitos de norma, porém o tamanho dos grãos, verificado por técnica à laser, resultou bem maior que o especificado pelo fabricante.

Dos concretos obtidos na etapa preliminar de dosagens, aqueles confeccionados com cimento CPV-ARI RS apresentaram maiores resistências à compressão, tanto nas idades iniciais como nas mais avançadas. Também, as misturas contendo maior consumo de cimento resultaram mais resistentes mecanicamente. O envelhecimento dos cp's cilíndricos, pela sua imersão parcial em solução de NaCl, não demonstrou efeitos maléficos no ganho de resistência dos concretos.

O concreto contendo sílica ativa, preparado nas dosagens complementares, apresentou elevada resistência mecânica, quase chegando a atingir 50 MPa aos 28 dias. Tanto nesta quanto na mistura com resina epóxi, a imersão dos cp's em solução salina promoveu uma pequena queda de resistência com o avanço do envelhecimento.

Os concretos produzidos na etapa de dosagens piloto, destinados à

moldagem de artefatos para instalação em campo, apresentaram excelentes resistências, com valores acima de 25 MPa já aos 3 dias de idade. Porém, a influência da adição de sílica ativa ao material com CPII-F 32 foi maior que o simples uso de cimento de alta resistência inicial.

No ensaio de permeabilidade, os melhores resultados foram obtidos pelos concretos contendo cimento CPII-F 32. As misturas confeccionadas com CPV-ARI RS, cujo bom desempenho era esperado, apresentaram alta percolação de água, não permitindo a determinação do coeficiente K. Das dosagens complementares, o material com adição de sílica demonstrou baixa permeabilidade.

Os teores de índice de vazios dos materiais mostraram, em geral, comportamento dependente do a/c dos concretos, em que quanto maior a quantidade de água, maior o percentual de vazios na massa endurecida. A inclusão de resina epóxi ao concreto promoveu drástica redução do índice de vazios, com teor mais reduzido que o de concretos com a/c menores.

Em relação à absorção de água, determinada segundo metodologia da NBR 6124/80[43], os concretos da etapa preliminar atenderam aos requisitos da NBR 8451/98[42], com valores médios abaixo de 6%. Entretanto, pelo método descrito na NBR 9778/87[44], os resultados são 33% maiores. As misturas com resina epóxi e com sílica ativa e superplastificante tiveram os menores índices de absorção.

Análises por MEV e EDS indicaram que a exposição dos concretos ao ambiente litorâneo da região de Aracaju promoveu degradação dos materiais tão intensa quanto o envelhecimento artificial acelerado, em laboratório. Cristais aciculares de etringita, tobermorita e gel foram verificados na superfície de fratura do material produzido com CPV-ARI RS, o qual apresentou maior susceptibilidade à degradação no ambiente natural. A presença maciça de cloreto de sódio e traços de enxofre foi, também, detectada.

Por DRX, verificou-se que, praticamente, nenhuma alteração importante desenvolveu-se nos concretos das dosagens preliminares, em função do avanço do

tempo de cura. Na identificação das fases cristalinas, constatou-se a presença de quartzo, calcita, portlandita, CSH e, também, de etringita, mesmo nas idades iniciais.

Pela análise térmica dos concretos preparados na etapa preliminar foi possível a verificação das principais reações que ocorrem nos materiais devido ao aumento gradual da temperatura até 1500°C. As perdas de massa desenvolvidas também puderam ser determinadas.

A visualização dos cp's prismáticos de concreto armado pela técnica de radiografia industrial permitiu a detecção apenas de defeitos com dimensões maiores que 1 mm. Trincas capilares no concreto, originadas pela corrosão das armaduras, não puderam ser distinguidas.

A técnica de potencial de corrosão, aplicada aos cp's prismáticos durante o seu envelhecimento acelerado, mostrou-se uma importante ferramenta não-destrutiva na detecção de alterações do estado passivo das armaduras. Inesperadamente, os cp's com cobrimento de 10 mm demonstraram desempenho melhor que os de maior espessura. A análise do processo de moldagem elucidou que a causa deste efeito foi a posição em que as faces dos cp's permaneceram durante o adensamento do concreto.

Relativamente à composição dos concretos da etapa de dosagens preliminares, os melhores desempenhos eletroquímicos foram verificados, em geral, para as misturas fabricadas com cimento CPV-ARI RS e para os concretos com maior consumo de aglomerante. A mistura com 292 kg/m^3 de cimento CPII-F 32 e o concreto com 288 kg/m^3 de CPII-Z 32 resultaram as piores composições. Dois dos cp's correspondentes a esta última, inclusive, apresentaram trincamento do concreto após, aproximadamente, 110 dias de envelhecimento.

Os cp's referentes às misturas confeccionadas com adição de sílica ativa e de resina epóxi demonstraram, no período de análise, bom comportamento eletroquímico, com potenciais mais positivos que –275 mV, na maior parte do tempo.

A técnica de EIS é um método bastante eficaz na detecção de alterações eletroquímicas ocorridas na armadura de aço em decorrência de atividade corrosiva.

Esta técnica mostrou-se rápida e segura na avaliação de desempenho do concreto armado frente ao seu envelhecimento por agentes agressivos, no caso o íon Cl^-.

Por meio dos diagramas de Nyquist e Bode, percebeu-se que as alterações ocorridas no sistema eletroquímico analisado, em função do envelhecimento em solução salina, isto é, a corrosão da armadura, foram prontamente detectadas, por alteração das curvas de impedância e seus respectivos parâmetros eletroquímicos. Além disso, a precisão e a sensibilidade da técnica foram comprovadas pela incrível coincidência do instante em que ocorreram tais alterações com o momento em que o potencial de corrosão sofreu brusca variação. Desta forma, no que diz respeito ao monitoramento da variação dos parâmetros elétricos e dos potenciais de corrosão do sistema armadura-concreto, pode-se tranqüilamente recomendar a utilização da técnica de EIS para situações análogas às experimentadas neste trabalho.

A técnica de EIS mostra-se ainda ser bastante útil para avaliar tanto o estado quanto à corrosão como os mecanismos envolvidos na degradação das estruturas de concreto. Ela fornece não apenas dados relativos à corrosão do metal, mas também valiosas informações a respeito do concreto que o envolve. O *fitting* dos dados, utilizando-se o circuito elétrico equivalente proposto por GARCIA et al. (2001)[12] mostrou-se adequado e eficiente no acompanhamento dos parâmetros eletroquímicos, ao longo do período de envelhecimento dos cp's.

Nos estudos realizados em campo, no Estado de Sergipe, foi possível o levantamento de grande quantidade de informações a respeito do grave problema de degradação de materiais verificado na orla local. Constataram-se os efeitos da elevada salinidade atmosférica e das condições meteorológicas propícias (alta temperatura média, umidade relativa elevada, constância e direção dos ventos, etc.) no concreto e na armadura de postes e cruzetas instaladas na cidade de Aracaju, de maneira a ser possível a afirmação de que a região é uma das que apresentam maior agressividade ambiental no país.

Um detalhe interessante que foi verificado na inspeção da RDE instalada na orla sergipana diz respeito à corrosão e degradação mais acentuada da face dos postes voltada para o continente. Isto se deve à predominância de ventos que sopram do mar, tanto durante o dia quanto à noite, o que promove a secagem do concreto da face virada para a arrebentação, ao mesmo tempo em que há condensação de umidade contendo teor elevado de cloreto na face oposta.

O processo de fabricação de artefatos de concreto armado, por empresas locais, e a qualidade dos produtos finais foram também avaliados. Irregularidades em, praticamente, todas as etapas de produção foram presenciadas durante visitas técnicas aos fabricantes. A maior parte delas pode ser solucionada com pequenos investimentos financeiros, bastando para isso conscientização dos proprietários ou maiores exigências por parte da concessionária de energia elétrica que atende à região.

Em relação aos concretos confeccionados em Aracaju com base nos resultados dos estudos desenvolvidos em laboratório, excelentes propriedades físicas e mecânicas foram verificadas para a mistura contendo sílica ativa e aditivo superplastificante, como baixa absorção de água, reduzido teor de índice de vazios e resistência à compressão da ordem de 45 MPa aos 28 dias.

Os artefatos produzidos na capital sergipana, baseados nos estudos de laboratório, apresentaram desempenho mecânico muito melhor que os postes e cruzetas fabricados com o concreto habitualmente preparado pelas empresas locais. Em termos de durabilidade, avaliada pelo potencial de corrosão e por inspeção visual dos postes, as composições estudadas no trabalho mostraram prevalência sobre o concreto padrão.

5.1. SUGESTÕES PARA CONTINUIDADE DOS ESTUDOS

A compatibilidade entre os materiais utilizados na fabricação de concretos é um fator que deve ser considerado com seriedade, em qualquer estudo que contemple a sua utilização. Portanto, avaliações mais aprofundadas da reatividade potencial, por

meio de técnicas adicionais, poderão ser desenvolvidas com o intuito de se ter subsídios técnico-científicos para a seleção e aquisição dos insumos.

A análise da resina epóxi, bem como o entendimento do efeito plastificante por ela fomentado, pode se tornar uma linha de pesquisa, dependendo da complexidade dos resultados preliminares que venham a ser obtidos.

À parte os estudos de concretos envelhecidos por solução de NaCl já estarem bastante difundidos na comunidade científica, a sujeição dos materiais a novas formas de degradação artificial pode gerar dados interessantes sobre o desempenho dos mesmos.

Face à influência da posição, nos moldes, da espessura de cobrimento dos cp's prismáticos, deve-se prever a confecção de fôrmas que permitam a moldagem de corpos-de-prova em que esta diferenciação não seja introduzida.

Restam várias ramificações do presente trabalho, no que concerne aos ensaios eletroquímicos, que poderão ser estudadas em trabalhos futuros. Poder-se-á analisar com mais detalhe as propostas atuais para circuitos equivalentes, de forma a simplesmente aceitá-las ou propor modificações nos mesmos.

Uma outra etapa importante para a determinação precisa dos parâmetros eletroquímicos envolvidos consiste do ajuste matemático, a partir do circuito equivalente adotado, dos resultados numéricos obtidos com os ensaios de impedância. A realização de um *fitting* de todas as leituras obtidas por EIS, certamente, possibilitaria uma melhor e mais fiel caracterização do sistema de corrosão.

Apesar de apenas recentemente ter sua aplicação voltada para o concreto e demais materiais de engenharia civil, a impedância já se situa numa posição de grande destaque entre outros métodos de avaliação da corrosão no setor da construção civil. Contudo, ainda há muito caminho pela frente até esta técnica poder ser aplicada em situações de campo (*in situ*) com certa facilidade e comodidade, de forma que os direcionamentos de estudos e pesquisas científicas sobre a EIS são infindáveis.

Enfim, há ainda muito para ser feito...

REFERÊNCIAS

[1] MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. 1. ed. São Paulo: PINI, 1994. 573 p.

[2] JOUKOSKI, A. **Aplicação da técnica de espectroscopia de impedância eletroquímica para detecção e monitoramento da corrosão em armaduras metálicas inseridas em concreto**. Curitiba, 2001. Monografia (Especialização) - Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

[3] NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2. ed. Trad.: Salvador E. Giammusso São Paulo: PINI, 1997. 828 p.

[4] KOPSCH, W.; PADARATZ, I. J. Durabilidade de estruturas de concreto armado em ambiente marinho - estudo de caso. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 43., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2001. p. III-026. 1 CD-ROM.

[5] BORJA, F. **CAD: durabilidade com economia**. Disponível em <http://www.superobra.com/admin/news.asp?ID_News=874&ID_Sessao_New=1> Acesso em: 20 mar. 2003.

[6] JOUKOSKI, A.; PORTELLA, K. F.; GARCIA, C. M.; SALES, A.; CANTÃO, M. P.; BARON, O.; AZEVEDO, V. A. L. Desempenho elétrico de concreto armado com cimento Portland composto com pozolana, CPII-Z 32, em função do envelhecimento por íons cloreto. Parte I, estudo da corrosão da armadura. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 43., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2001. p. III-020. 1 CD-ROM.

[7] CASCUDO, O. Técnicas eletroquímicas no estudo e avaliação da corrosão de armaduras em concreto: uma revisão. In: SEMINÁRIO DE CORROSÃO NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 4., 1990, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABRACO, 1990. p. 64-77.

[8] PORTELLA, K. F.; GARCIA, C. M.; CANTÃO, M. P.; SALES, A.; RIBEIRO, C.; JOUKOSKI, A.; CARON, L. E.; STEFFEN, R. D.; BARON, O.; PAULA, J. F. **Avaliação da degradação, corrosão e sistemas de impermeabilização de estruturas de concreto armado. Relatório final de projeto**. Curitiba, LACTEC, 2001. Relatório técnico.

[9] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Lei nº 9991, de 24/07/2000, **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, 25/07/2000, Seção 1, p. 1, v. 138, nº 142. Disponível em <http://www.aneel.gov.br/cedoc/lei20009991.pdf> Acesso em: 10 jan. 2002.

[10] GARCIA, C. M.; PORTELLA, K. F.; VERGÉS, G. R.; FREIRE, K. R. R.; JOUKOSKI, A.; BARON, O.; MOTTA, H. N.; PAULA, J. F. **Estudo da degradação de materiais utilizados na rede de distribuição de energia instalada na orla de Aracaju. Relatório final**. Curitiba, LACTEC, 2003. Relatório técnico.

[11] JOUKOSKI, A.; PORTELLA, K. F.; GARCIA, C. M.; SALES, A.; PAULA, J. F. Estudo do processo de fabricação de postes de concreto armado destinados a redes de distribuição elétrica: principais falhas, suas conseqüências e correções. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 44., 2002, Belo Horizonte. **Apresentação dos trabalhos...** São Paulo, IBRACON, 2002, p. II-010. 1 CD-ROM.

[12] GARCIA, C. M.; JOUKOSKI, A.; PORTELLA, K. F.; BARON, O.; NOGUEIRA, J. R. G.; AZEVEDO, V. A. L. Corrosão de concreto armado utilizando a técnica de espectroscopia de impedância eletroquímica. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE ELETROQUÍMICA E ELETROANALÍTICA, 12., 2001, Gramado. **Anais...** Porto Alegre, UFRGS, 2001, p. 153-155. 1 CD-ROM

[13] PORTELLA, K. F.; JOUKOSKI, A.; GARCIA, C. M.; BARON, O.; PAULA, J. F. Corrosion of concrete reinforcement: influence of cement type and cement content. In: INTERNATION CORROSION CONGRESS, 15., 2002, Granada (SPA). **Proceedings...** ICC, 2002, v. 5, n. A, # 462.

[14] JOUKOSKI, A.; PORTELLA, K. F.; GARCIA, C. M.; SALES, A.; BARON, O.; PAULA, J. F. Study of the influence of cement type, cement content and concrete cover thickness on the resistance and durability of concretes subjected to chloride ion aging. In: ACI INTERNATIONAL CONFERENCE, 5., 2002, Cancún (MEX). **Innovations in design with emphasis on seismic, wind, and environmental loading; quality control and innovations in material/hot-weather concreting**. Farmington Hills, ACI International, 2002, v. SP-209, p. 279-296.

[15] JOUKOSKI, A.; PORTELLA, K. F.; BARON, O.; GARCIA, C. M.; VERGÉS, G. R.; SALES, A.; PAULA, J. F. The influence of cement type and admixture on life span of reinforced concrete utility poles subjected to the high salinity environment of Northeastern Brazil, studied by corrosion potential testing. **Cerâmica**. Trabalho completo submetido, 2003.

[16] PORTELLA, K. F.; JOUKOSKI, A. **Questionário para cadastro geral de fornecedores**. Documento AMAT. Curitiba, LACTEC, 2000.

[17] COMPOSITION and properties of cement. Disponível em: <http://www.global-cement.dk/files/cement.htm> Acesso em: 17 mar. 2001.

[18] VAN VLACK, L. H. **Princípios de ciência e tecnologia dos materiais**. 4. ed. Trad.: Edson Monteiro. Rio de Janeiro: Campus, 1984. 427 p.

[19] DICAS - Tipos de cimento. Disponível em: <http://www.engecalc.com.br /dica.htm> Acesso em: 22 mar. 2001.

[20] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5732**: Cimento Portland comum. São Paulo, 1991.

[21] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11578**: Cimento Portland composto. São Paulo, 1991.

[22] MEDEIROS, H. A. **A versatilidade do cimento brasileiro**. Disponível em: <http://www.abcp.com.br/versatilidade_cimento_brasileiro.htm> Acesso em: 23 mar. 2001.

[23] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5735**: Cimento Portland de alto-forno. São Paulo, 1991.

[24] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5736**: Cimento Portland pozolânico. São Paulo, 1991.

[25] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733**: Cimento Portland de alta resistência inicial. São Paulo, 1991.

[26] GOMES, A. O.; ALMEIDA, A. H. H. **Aglomerante**. Disponível em: <http://www.gemac.ufba.br/aulas/eng_101/aglomerante/aglomerante.htm> Acesso em: 02 fev. 2003.

[27] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12989**: Cimento Portland branco. São Paulo, 1993.

[28] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9831**: Cimento Portland destinado à cimentação de poços petrolíferos. São Paulo, 1993.

[29] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento Portland**. 7. ed. Boletim técnico BT-106. São Paulo: ABCP, 2002.

[30] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5737**: Cimentos Portland resistentes a sulfatos. São Paulo, 1992.

[31] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13116**: Cimento Portland de baixo calor de hidratação. São Paulo, 1994.

[32] TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry**. New York: Academic Press, 1990. 475 p.

[33] ALANIS, I. L.; BERARDO, L.; ALVAREZ, N. **Corrosión y protección del acero en el hormigón armado**. Argentina: Instituto Nacional de Tecnologia Industrial, 1990.

[34] THE HISTORY of concrete. Disponível em: <http://matse1.mse.uiuc.edu/~tw/concrete/hist.html> Acesso em: 21 mar. 2001.

[35] BICZOK, I. **Corrosión y protección del hormigón**. Espanã: Urmo S.A. de Ediciones, 1968. 716 p.

[36] PETRUCCI, E. G. **Concreto de cimento Portland**. Porto Alegre: Globo, 1971. 280 p.

[37] CUNHA, E. H.; TINÔCO, H. F. F.; CARASEK, H. **A influência das adições minerais na durabilidade do concreto**. Disponível em: <http://www.cesec.ufpr.br/~wtecnet/durabil/t00046.html> Acesso em: 04 fev. 2003.

[38] COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON (CEB). **Guia de diseño: durabilidad de estructuras de hormigón armado**. Lausanne: CEB, 1996.

[39] FREIRE, P. M. A palha de arroz na fabricação de cimento Portland. **Cerâmica**, v. 27, nº 135, p. 105-113, 1981.

[40] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE SERVIÇO DE CONCRETAGEM. **Manual do concreto dosado em central**. Disponível em: <http://www.abesc.org.br/pdf/manual.pdf> Acesso em: 13 jan. 2003.

[41] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11768**: Aditivos para concreto de cimento Portland. São Paulo, 1992.

[42] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8451**: Postes de concreto armado para redes de distribuição de energia elétrica – Especificação. São Paulo, 1998.

[43] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6124**: Determinação da elasticidade, carga de ruptura, absorção de água e da espessura do cobrimento em postes e cruzetas de concreto armado. São Paulo, 1980.

[44] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica. São Paulo, 1987.

[45] KURTIS, K. E.; MONTEIRO, P. J. M.; MADANAT, S. M. Empirical models to predict concrete expansion caused by sulfate attack. **ACI Materials Journal**, v. 97, nº 2, p. 156, 2000.

[46] SCRIVENER, K. L.; YOUNG, J. F. **Mechanisms of chemical degradation of cement-based systems**. 1. ed. London: E&FN Spon, 1997. 455 p.

[47] COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALIZATIÓN. **EN 206-1**: Concrete - Part 1 - Specification, performance, production and conformity. Brussels: CEN, 2000.

[48] JUCÁ, T. R. P.; TEIXEIRA, F. A.; PEREIRA, C. H. A. F.; GUIMARÃES, L. E.; FIGUEIREDO, E. J. P. Influência das adições minerais na corrosão de armaduras induzida por cloretos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 43., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2001. p. III-033. 1 CD-ROM.

[49] CENTRO DE INVESTIGACIÓN DE REGLAMENTOS NACIONALES DE SEGURIDAD PARA LAS OBRAS CIVILES. **Proyecto, cálculo y ejecución de estructuras de hormigón armado y pretensado**. Reglamento CIRSOC 201, v. 1. San Juan: INTI, 1982.

[50] PAGE, C. L.; TREADWAY, K. W. J. Aspects of the electrochemistry of steel in concrete. **Nature**, v. 297, nº 1982, p. 109-115, 1982.

[51] WHITING, D. Seminar solving rebar corrosion problems in concrete. In: CORROSION 82, 1982, Houston. **Proceedings...** Houston: NACE, 1982. p. 25-119.

[52] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto e execução de obras de concreto armado. São Paulo, 1980.

[53] ANDRADE, C. **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras**. 1. ed. Trad: Antonio Carmona; Paulo Helene. São Paulo: PINI, 1992. 104 p.

[54] CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas**. 1. ed. São Paulo: PINI, 1997. 237 p.

[55] PLANTE, M.; CAMERON, G.; TAGNIT-HAMOU, A. Influence of curing conditions on concrete specimens at construction site. **ACI Materials Journal**, v. 97, nº 2, p.120, 2000.

[56] GALVÃO, J. C. A.; PORTELLA, K. F.; BARON, O.; GARCIA, C. M.; JOUKOSKI, A. Desempenho elétrico e mecânico de concretos fabricados sob diferentes temperaturas de mistura e condições de cura: estudo preliminar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 44., 2002, Belo Horizonte. **Apresentação dos trabalhos...** São Paulo, IBRACON, 2002, p. III-031. 1 CD-ROM.

[57] ANDRADE, J.; DAL MOLIN, D. C. C. Manifestações patológicas em estruturas de concreto armado na região Nordeste. In: REUNIÃO ANUAL DO IBRACON, 38., 1996, Ribeirão Preto. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 1996, v. 1.

[58] RIBEIRO, F. H. M.; FIGUEIREDO, E. J. P. Desempenho de inibidores de corrosão como método de prevenção e reparo para estruturas de concreto armado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 43., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2001. p. III-019. 1 CD-ROM.

[59] FIGUEIREDO, E. P. **Avaliação do desempenho de revestimentos para proteção da armadura contra a corrosão através de técnicas eletroquímicas: contribuição ao estudo de reparo de estruturas de concreto armado**. São Paulo, 1994. 423 p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

[60] TINÔCO, H. F. F.; FIGUEIREDO, E. J. P.; SILVA, P. C. C. Caracterização de uma argamassa com inibidor de corrosão e de um microconcreto visando o emprego em reparos de estruturas de concreto armado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 43., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2001. p. III-013. 1 CD-ROM.

[61] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7480**: Barras e fios de aço destinados a armaduras para concreto armado. São Paulo, 1996.

[62] CARNEIRO, F. P.; MEDEIROS, M. H. F.; MONTEIRO, E. B.; BARKOKÉBAS JUNIOR, B. Pinturas utilizadas na armadura do concreto armado como método de prevenção da corrosão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 43., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2001. p. II-021. 1 CD-ROM.

[63] PIMENTA, G. S. **Uma abordagem geral: polarização, passivação, velocidade de corrosão**. Disponível em: <www.abraco.org.br/corros15.htm> Acesso em: 15 mar 2002.

[64] TUUTTI, K. **Corrosion of steel in concrete**. Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1982. 469 p.

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

[66] GARBOCZI, E. J. Permeability, diffusivity, and microstructural parameters: a critical review. **Cement and Concrete Research**, v. 20, p. 591-601, 1990.

[67] MCCARTER, W. J. **The application of impedance spectroscopy to cementitious systems**, 29. Solartron Instruments, 1995. Relatório técnico.

[68] ALONSO, C.; ANDRADE, C.; GONZÁLEZ, J. A. Relations between resistivity and corrosion rate of reinforcements in carbonated mortar made with several cement types. **Cement and Concrete Research**, v. 18, p.687-698, 1988.

[69] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C876-91**: Standard test method for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete. Philadelphia, 1999.

[70] KEDDAM, M.; TAKENOUTI, H.; NÓVOA, X. R.; ANDRADE, C.; ALONSO, C. Impedance measurements on cement paste. **Cement and Concrete Research**, v. 27, p. 1191-1201, 1997.

[71] FORD, S. J.; SHANE, J. D.; MASON, T. O. Assignment of features in impedance spectra of the cement-paste/steel system. **Cement and Concrete Research**, v. 28, p. 1737-1751, 1998.

[72] NOGUEIRA, R. P. **A corrosão do aço em concreto: influência do pH e do potencial de eletrodo**. Rio de Janeiro, 1989. 112 p. Dissertação (Mestrado) - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Resumo.

[73] VAN DAVEER, J. R. Techniques for evaluating reinforced concrete bridge decks. **Journal of the American Concrete Institute**, v. 72, n. 12, p. 697-704, Dec. 1975.

[74] ANDRADE, C. **Monitoring techniques**. In: SCHIESSL, P., ed. Corrosion of steel in concrete. London: Chapman and Hall, 1988. p.79-95.

[75] DAWSON, J. L. **Corrosion monitoring of steel in concrete**. In: CRANE, A. P., ed. Corrosion of reinforcement in concrete construction. London: Society of Chemical Industry Clichester, 1983, p. 175-191.

[76] CORROSION & PROTECTION CENTRE INDUSTRIAL SERVICES (CAPCIS). **CAPCIS services for monitoring and reducing corrosion of reinforced concrete**. Manchester, U.K.: Construction Weekly, June 1990.

[77] STRATFULL, R. F. Half-cell potentials and the corrosion of steel in concrete. **Highway Research Record**, n. 433, p. 12-21, 1973.

[78] MCKENZIE, S. G. Techniques for monitoring corrosion of steel in concrete. **Corrosion Prevention & Control**, n. 1, p. 11-17, Feb. 1987.

[79] HALFCELL potential testing of concrete to detect reinforcement corrosion. Disponível em: <http://www.mg-assoc.co.uk/halfcell.htm> Acesso em: 18 jan. 2001.

[80] FARIAS, R. F. S. **Corrosão das armaduras do concreto: mecanismos e controle**. São Paulo, 1991. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

[81] WOLYNEC, S.; ESCALANTE, E. Determination of "true" polarization curves for corrosion rate measurements of steel in NaCl stagnant solutions. **Corrosion**, v. 36, n. 7, p. 327-334, July 1980.

[82] GENTIL, V. **Corrosão**. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1982. 454 p.

[83] ELSENER, B. **Corrosion monitoring of steel in concrete: theory and practice**. In: PAGE, C. L.; TREADAWAY, K. W. J.; BAMFORTH, P. B., eds. Corrosion of reinforcement in concrete. London: Society of Chemical Industry, 1990, p. 348-357.

[84] FELIU, S.; ANDRADE, C., coord. **Manual de inspección de obras dañadas por corrosión de armaduras**. Madrid: Instituto Eduardo Torroja, 1988. 122 p.

[85] SLATER, J. E. Constraints on measurement techniques for corrosion of steel in concrete. In: CORROSION 78, 1978, Houston. **Proceedings...** Houston: NACE, 1978. p.121/1-6.

[86] GONZÁLEZ, J. A.; MOLINA, A.; ESCUDERO, M. L.; ANDRADE, C. Errors in the electrochemical evaluation of very small corrosion rates. Part I. Polarization resistance method applied to corrosion of steel in concrete. **Corrosion Science**, v. 25, n. 10, p. 917-930, 1985.

[87] MIRANDA, T. R. V. Aplicação da técnica de medida de impedância ao estudo da corrosão de armaduras. In: SEMINÁRIO DE CORROSÃO NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 4., 1990, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABRACO, 1990. p. 110-127.

[88] ALEXANDER, C. K.; SADIKU, M. N. O. **Fundamentos de circuitos elétricos**. Trad.: Gustavo G. Parma. Porto Alegre: Bookman, 2003. 857 p.

[89] HLADKY, K.; CALLOW, L. M.; DAWSON, J. L. Corrosion rates from impedance measurements: an introduction. **British Corrosion Journal**, v. 15, n. l, p. 20-25, 1980.

[90] SAGUÉS, A. A. Technical note: equivalent circuits representing the impedance of a corroding interface. **Corrosion**, v. 44, n. 8, p. 555-557, Aug. 1987.

[91] FILDES, J. M.; CHEN, P.; ZHAN, X. Application of electrochemical impedance spectroscopy, color visible imaging, and infrared imaging for non-destructive evaluation of anti-corrosion coatings. In: SENSORS EXPO CONFERENCE, 1995, Boston. **Proceedings...** Disponível em: <http://www.iti.northwestern. edu/publications/technical _reports/tr14.html> Acesso em: 18 jan. 2001

[92] MILLARD, S. G.; CHASSEMI, M. H.; BUNGEY, J. H. **Assessing the electrical resistivity of concrete structures for corrosion durability studies**. In: PAGE, C. L.; TREADAWAY, K. W. J.; BAMFORTH, P. B., eds. Corrosion of reinforcement in concrete. London: Society of Chemical Industry, 1990, p. 303-305.

[93] FONSECA, I. Métodos eletroquímicos em corrosão. **Corrosão e Proteção de Materiais**, v. 7, nº 4, p. 139-147, ago/out, 1988.

[94] GONZÁLEZ, J. A.; ANDRADE, C. Effect of carbonation, chlorides and relative humidity on the corrosion of galvanized rebars embedded in concrete. **British Corrosion Journal**, v. 17, p. 21-28, 1982.

[95] FELIU, V.; GONZÁLEZ, J. A.; ANDRADE, C.; FELIU, S. Equivalent circuit for modelling the steel-concrete interface. II. Complications in applying the Stern-Geary equation to corrosion rate determinations. **Corrosion Science**, v. 40, p. 995-1006, 1998.

[96] VELTER, K. J. **Electrochemical kinetics. Theoretical and experimental aspects**. New York: Academic Press, 1967. 789 p.

[97] D'ALKAINE, C. V.; SOUZA, L. M. M.; NART, F. C. The anodic behaviour of niobium - III. Kinetics of anodic film growth by potentiodynamic and galvanostatic techniques - general models, equations and their applications. **Corrosion Science**, v. 34, p.129-149, 1993.

[98] GARCIA, C. M.; PORTELLA, K. F.; JOUKOSKI, A.; RATTMANN, K. R. Commercial admixture corrosion inhibitors in concrete in Brazil. In: ISE Annual Meeting, 54, São Pedro, 2003. **Proceedings...** Geneva: ISE, 2003.

[99] ANDRADE, C.; CASTELO, V. Practical measurement of the AC impedance of steel bars embedded in concrete by means of a spectrum analyser: fast fourier transform. **British Corrosion Journal**, v. 19, nº 2, p. 99-101, 1984.

[100] DAWSON, J. L.; CALLOW, L. M.; HLADKY, K. Electrochemical impedance measurements applied to the corrosion of reinforcing steel in concrete. In: Corrosion 78, Houston, 1978. **Proceedings...** Houston: NACE, 1978. p. 125/1-19.

[101] PROENÇA, M. B.; **Deterioração de aços em refinaria de petróleo e seu controle por impedância eletroquímica**. Campinas, 1998. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas.

[102] JOHN, D. G.; SEARSON, P. C.; DAWSON, J. L. Use of AC impedance technique in studies on steel in concrete in immersed conditions. **British Corrosion Journal**, v. 16, n. 2, p. 103-106, 1981.

[103] GONZÁLEZ, J. A.; MOLINA, A.; ESCUDERO, M. L.; ANDRADE, C. Errors in the electrochemical evaluation of very small corrosion rates. Part II. Other electrochemical techniques applied to corrosion of steel in concrete. **Corrosion Science**, v. 25, n. 7, p. 519-530, 1985.

[104] LONGUET, P. The use of thermogravimetric measurements in cement chemistry. In: International Symposium on the chemistry of cement, 5, 1968, Tokyo. **Proceedings...** Tokyo: 1968. p. 239.

[105] KORMANN, A. C. M. **Estudo do desempenho de quatro tipos de materiais para reparo a serem utilizados em superfícies erodidas de concreto de barragens**. Curitiba, 2002. Dissertação (Mestrado) - Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

[106] PADILHA, A. F. **Materiais de engenharia: microestrutura e propriedades**. São Paulo: Hemus, 1997. 349 p.

[107] CANTÃO, M. P. **Ciência dos materiais**. Apostila do curso de Engenharia de Materiais PIPE - UFPR. Curitiba: UFPR, 2000.

[108] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5743**: Cimento Portland - Determinação da perda ao fogo. São Paulo, 1989.

[109] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5744**: Cimento Portland - Determinação de resíduo insolúvel. São Paulo, 1989.

[110] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5745**: Cimento Portland - Determinação de anidrido sulfúrico. São Paulo, 1989.

[111] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5747**: Cimento Portland - Determinação de óxido de sódio e óxido de potássio por fotometria de chama. São Paulo, 1989.

[112] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7227**: Cimento Portland - Determinação de óxido de cálcio livre pelo etileno glicol. São Paulo, 1989.

[113] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8347**: Cimento Portland pozolânico, cimento Portland comum e cimento Portland composto com adições de materiais pozolânicos - Análise química - Método de referência. São Paulo, 1992.

[114] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9203**: Cimento Portland comum e clínquer - Análise química por complexometria. São Paulo, 1985.

[115] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. São Paulo, 1996.

[116] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9202**: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura por meio da peneira 0,044 mm (número 325). São Paulo, 1985.

[117] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11579**: Cimento Portland - Determinação da finura por meio da peneira 75 micrômetros (número 200). São Paulo, 1991.

[118] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11581**: Cimento Portland - Determinação dos tempos de pega. São Paulo, 1991.

[119] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11582**: Cimento Portland - Determinação da expansibilidade de Le Chatelier. São Paulo, 1991.

[120] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 23**: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação de massa específica. São Paulo, 2001.

[121] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 76**: Cimento Portland - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine). São Paulo, 1998.

[122] COMPAGNIE INDUSTRIELLE DES LASERS. **Granulometer 1064 - User manual**. Manual NT-1060602. Marcoussis: CILAS, 1992.

[123] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7217**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. São Paulo, 1987.

[124] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7218**: Agregados - Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. São Paulo, 1987.

[125] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7219**: Agregados - Determinação do teor de materiais pulverulentos. São Paulo, 1987.

[126] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7251**: Agregado em estado solto - Determinação da massa unitária. São Paulo, 1982.

[127] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9776**: Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman. São Paulo, 1987.

[128] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 30**: Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. São Paulo, 2001.

[129] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 49**: Agregado fino - Determinação de impurezas orgânicas. São Paulo, 2001.

[130] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7810**: Agregado em estado compactado e seco - Determinação da massa unitária. São Paulo, 1983.

[131] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9937**: Agregado graúdo - Determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo. São Paulo, 1987.

[132] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregado para concreto. São Paulo, 1983.

[133] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6467**: Agregados - Determinação do inchamento de agregado miúdo. São Paulo, 1987.

[134] INSTITUTO DE TECNOLOGIA PARA O DESENVOLVIMENTO. **LAME 1.02.01.11**: Determinação da reatividade potencial pelo método acelerado. Procedimento LAME/LACTEC. Curitiba, 1999.

[135] OBERHOLSTER, R. E.; DAVIS, G. An accelerated method for testing the potential alkali reactivity of siliceous aggregates. **Cement and Concrete Research**, v. 16, nº 1, p. 181-189, 1986.

[136] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9773**: Agregados - Reatividade potencial de álcalis em combinações cimento-agregado. São Paulo, 1987.

[137] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C1260-01**: Standard test method for potential alkali reactivity of aggregates (mortar-bar method). Philadelphia, 2001.

[138] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13957**: Sílica ativa para uso em cimento Portland, concreto, argamassa e pasta de cimento Portland - Métodos de ensaio. São Paulo, 1997.

[139] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13956**: Sílica ativa para uso em cimento Portland, concreto, argamassa e pasta de cimento Portland - Especificação. São Paulo, 1997.

[140] CIBA SPECIALTY CHEMICALS. **Formulation FS-105 resins**. New York, 1997.

[141] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10908**: Aditivos para argamassa e concretos - Ensaios de uniformidade. São Paulo, 1990.

[142] GU, P.; BEAUDOIN, J. J.; ZHANG, M.-H.; MALHOTRA, V. M. Performance of steel reinforcement in Portland cement and high-volume fly ash concretes exposed to chloride solution. **ACI Materials Journal**, v. 96, n. 5, p. 551-558, Sep.-Oct. 1999.

[143] GU, P.; BEAUDOIN, J. J.; ZHANG, M.-H.; MALHOTRA, V. M. Performance of reinforcing steel in concrete containing silica fume and blast-furnace slag ponded with sodium chloride solution. **ACI Materials Journal**, v. 97, n. 3, p. 254-262, May-June 2000.

[144] ALMEIDA, A. E. F. de S.; FERREIRA, O. P. Avaliação da corrosão de armaduras embutidas em corpos de prova de argamassa de cimento Portland revestidos com sistemas poliméricos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 42., 2000, Fortaleza. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2000, não paginado. 1 CD-ROM.

[145] BAUER, E. Parâmetros e grandezas de importância no estudo da evolução da corrosão das armaduras no concreto. In: REUNIÃO DO IBRACON, 38., 1996, Ribeirão Preto, SP. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 1996. p. 413-426. 1 CD-ROM.

[146] ANDRADE, W. P. (Ed.). **Concretos: massa, estrutural, projetado e compactado com rolo: ensaios e propriedades**. São Paulo: PINI, 1997. 825 p.

[147] INSTITUTO DE TECNOLOGIA PARA O DESENVOLVIMENTO. **LAME 1.03.02.14**: Agregados para concreto e CCr - Determinação de umidade pelo método do fogareiro. Procedimento LAME/LACTEC. Curitiba, 1999.

[148] INSTITUTO DE TECNOLOGIA PARA O DESENVOLVIMENTO. **LAME 1.03.048**: Folha de dosagem - CCV - Cálculo do consumo por m3. Planilha LAME/LACTEC, versão 2. Curitiba, 2000.

[149] INSTITUTO DE TECNOLOGIA PARA O DESENVOLVIMENTO. **LAME 1.03.08.16**: Preparação de concreto em laboratório. Procedimento LAME/LACTEC. Curitiba, 1999.

[150] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12821**: Preparação de concreto em laboratório. São Paulo, 1993.

[151] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. São Paulo, 1998.

[152] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9833**: Concreto fresco - Determinação da massa específica e do teor de ar pelo método gravimétrico. São Paulo, 1987.

[153] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 47**: Concreto - Determinação do teor de ar em concreto fresco - Método pressométrico. São Paulo, 2002.

[154] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. São Paulo, 1994.

[155] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10786**: Concreto endurecido - Determinação do coeficiente de permeabilidade à água. São Paulo, 1989.

[156] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto. São Paulo, 1994.

[157] FRANCY, O.; FRANÇOIS, R. Measuring chloride diffusion coefficients from non-steady state diffusion tests. **Cement and Concrete Research**, v. 28, nº 7, p. 947-953, 1998.

[158] JENSEN, O. M.; HANSEN, P. F.; COATS, A. M.; GLASSER, F. P. Chloride ingress in cement paste and mortar. **Cement and Concrete Research**, v. 29, p. 1497-1504, 1999.

[159] SWAMY, R. N.; SURYAVANSHI, A. K.; TANIKAWA, S. Protective ability of an acrylic-based surface coating system against chloride and carbonation penetration into concrete. **ACI Materials Journal**, v. 95, nº 2, Mar.-Apr., 1998.

[160] ASRAR, N.; MALIK, A. U.; AHMAD, S.; MUJAHID, F. S. Corrosion protection performance of microsilica added concretes in NaCl and seawater environments. **Construction and Building Materials**, v. 13, p. 213-219, 1999.

[161] DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 052/94**: Solos e agregados miúdos - Determinação da umidade com emprego do "Speedy". Método de ensaio. Brasília, 1994.

[162] DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 196/98**: Agregados - Determinação do teor de umidade total, por secagem em agregado graúdo. Método de ensaio. Brasília, 1998.

[163] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8452**: Postes de concreto armado para redes de distribuição de energia elétrica - Padronização. São Paulo, 1998.

[164] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8454**: Cruzeta de concreto armado para redes de distribuição de energia elétrica - Dimensões. São Paulo, 1984.

[165] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8453**: Cruzeta de concreto armado para redes de distribuição de energia elétrica - Especificação. São Paulo, 1984.

[166] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6921**: Corrosão atmosférica - Taxa de sulfatação - Determinação pelo método da vela de dióxido de chumbo. São Paulo, 1981.

[167] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6211**: Corrosão atmosférica - Determinação de cloretos na atmosfera pelo método da vela úmida. São Paulo, 2001.

[168] AMERICAN ASSOCIATION FOR TESTING AND MATERIALS. **D1739-98**: Standard test method for collection and measurement of dustfall (settleable particulate matter). Philadelphia, 1998.

[169] DOLAR-MANTUANI, L. **Handbook of concrete aggregates: a petrographic and technological evaluation**. New Jersey: Noyes Publications, 1983. 345 p.

[170] SHA, W.; O'NEILL, E. A.; GUO, Z. Differential scanning calorimetry study of ordinary Portland cement. **Cement and Concrete Research**, v. 29, p. 1487-1489, 1999.

[171] FELIU, V.; GONZÁLEZ, J. A.; ANDRADE, C.; FELIU, S. Equivalent circuit for modelling the steel-concrete interface. I. Experimental evidence and theoretical predictions. **Corrosion Science**, v. 40, p. 975-993, 1998.

[172] DHOUIBI, L.; TRIKI, E.; RAHARINAIVO, A. The application of electrochemical impedance spectroscopy to determine the long-term effectiveness of corrosion inhibitors for steel in concrete. **Cement & Concrete Composites**, v. 24, p. 35-43, 2002.

[173] SCRIBNER ASSOCIATES, INC. **Equivalent circuits: circuit elements**. Disponível em: <http://www.scribner.com> Acesso em 12 jun. 2003.

[174] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14643**: Corrosão atmosférica - Classificação da corrosividade de atmosferas. São Paulo, 2001.

[175] PINTOS, S.; QUEIPO, N. V.; RINCÓN, O. T.; RINCÓN, A.; MORCILLO, M. Artificial neural network modeling of atmospheric corrosion in the MICAT project. **Corrosion Science**, v. 42, p. 35-52, 2002.

[176] SILVA, J. M.; PORTELLA, K. F. Exposição de materiais metálicos em estações atmosféricas no Paraná - Parte I: dois anos de experiência. In: CONGRESSO IBERO-AMERICANO DE CORROSÃO E PROTEÇÃO, 3, v. 1, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro. p. 471, 1989.

[177] MORCILLO, M.; CHICO, B.; MARIACA, L.; OTERO, E. Salinity in marine atmospheric corrosion: its dependence on the wind regime existing in the site. **Corrosion Science**, v. 42, p. 91-104, 2000.