unesp UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

**LUÍS GUSTAVO COSTA DE CASTRO**

# ESTUDO DA VELOCIDADE DE DESPASSIVAÇÃO DE AÇOS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO, EM MEIO DE CLORETO

Guaratinguetá - SP
2014

**LUIS GUSTAVO COSTA DE CASTRO**

# ESTUDO DA VELOCIDADE DE DESPASSIVAÇÃO DE AÇOS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO, EM MEIO DE CLORETO

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof. Dr. Heloisa Andréa Acciari
Co-Orientador: Prof. Dr. José Bento Ferreira

Guaratinguetá
2014

Castro, Luis Gustavo Costa de

C355e Estudo da velocidade de despassivação de aços em estruturas de concreto armado, em meio de cloreto / Luis Gustavo Costa de Castro. – Guaratinguetá , 2014

74 f.: il.

Bibliografia: f. 70-73

Trabalho de Graduação em Engenharia Civil – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2014

Orientadora: Profa. Dra. Heloisa Andréa Acciari

Coorientador: Prof. Dr. José Bento Ferreira

1. Aço – Corrosão 2. Eletroquímica I. Título

CDU 624.014.2

unesp UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

**LUÍS GUSTAVO COSTA DE CASTRO**

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE **"GRADUADO EM ENGENHARIA CIVIL"**

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Prof. Dr. YZUMI TAGUTI
Coordenador

**BANCA EXAMINADORA:**

Heloisa Andréa Acciari
Prof. Dr. HELOISA ANDRÉA ACCIARI
Orientadora/UNESP-FEG

Prof. Dr. JOSÉ BENTO FERREIRA
Co-Orientador/UNESP-FEG

Roberto Zenhei Nakazato
Prof. ROBERTO ZENHEI NAKAZATO
UNESP/FEG

**Agosto de 2014**

**DADOS CURRICULARES**

**LUÍS GUSTAVO COSTA DE CASTRO**

| | |
|---|---|
| **NASCIMENTO** | 30.07.1991 – SÃO JOSÉ DOS CAMPOS / SP |
| **FILIAÇÃO** | Benedito Luís de Castro<br>Rosilene Aparecida Costa de Castro |
| **2010/2014** | Curso de Graduação<br>Engenharia Civil - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista |

Dedico aos meus pais, pelo exemplo de vida, amor e família.
A meus irmãos, pela verdadeira amizade e convivência até hoje.
À minha namorada pelo amor, compreensão e companheirismo.

## AGRADECIMENTOS

Grato, primeiramente, a Deus pela dádiva da vida e de seu amor infinito. Junto a Ele, agradeço à intercessão poderosa de Nossa Senhora em minha vida. Obrigado por conceder-me saúde, inteligência e disposição até a presente jornada.

À minha orientadora, *Professora Doutora Heloisa Andrea Acciari* pela sua total dedicação e comprometimento com este trabalho. Por todos esses anos de transmissão segura e paciente de conhecimento, além da sincera amizade formada. Sem a sua orientação, o estudo aqui apresentado seria praticamente irrealizável.

À equipe do Laboratório de Eletroquímica e Corrosão (FEG/UNESP), coordenado pelo *Professor Doutor Eduardo Norberto Codaro,* pela infraestrutura e apoio técnico necessário para a realização das medidas eletroquímicas.

A esta universidade, direção, administração e a seu corpo docente que me incentivaram a trilhar nesta caminhada em busca de novos horizontes, em destaque ao *Professor Doutor José Bento Ferreira* que muito contribuiu e auxiliou para a etapa final deste estudo.

Um agradecimento especial a *Andrews Marques* (Djow), o melhor amigo que esta faculdade poderia ter me presenteado. Grato a você por todo aprendizado, parceria, convivência e por compartilhar momentos inesquecíveis durante estes 5 anos. Pelas risadas, estudos, viagens, noites sem dormir jogando game e pela amizade que não termina neste ponto final. Sentirei saudades "Djow, tu é o cara!"

Aos meus colegas de classe e com certeza futuros brilhantes profissionais, *Kauê de Paula, Fernando Moretto, Felipe Caldeira, Yuri Trivinho, Bruno Alves e Robson Trajano.* Agradeço a todos pela amizade fruto desta graduação.

Grato ao apoio incondicional dos amigos *Tulio Almeida, Luis Henrique e Carlos Augusto*. Amizade em que distância e tempo jamais separará, vocês fazem parte da minha família infindavelmente!

Agradeço novamente aos meus pais *Luís e Rosi*, meus maiores exemplos de vida, amor e família, que hoje, paradoxalmente, choram de felicidade e orgulho. Por terem me proporcionado a oportunidade de um futuro promitente. Dedico eternamente a vocês que se dispuseram inteiramente e, inúmeras vezes, abdicaram suas vontades em favor do meu sonho. Infelizmente não há palavras nem espaço que possam descrever minha gratidão, pois a vocês foi cumprido o dom divino, o dom de ser Pai, o dom de ser Mãe. Aproveito estas palavras para agradecer minha querida avó *Gercey* (Mimi), aonde quer que esteja você desempenhou um papel fundamental nesta conquista!

Aos meus melhores amigos, *Luís Guilherme* (Gui) *e Luís Felipe* (Lipe), os quais tive a felicidade de tê-los como irmãos e de compartilhar cada momento de nossas vidas de maneira ímpar. No tempo que estive ausente dedicando-me ao ensino superior, sempre respeitaram e fizeram entender que o futuro é modelado a partir do esforço realizado no presente. Ao meu irmão Gui em especial, por seu louvável caráter e responsabilidade. Como irmão mais novo, tento incorporar todos seus ensinamentos. Tenho você como um exemplo de vida!

Reservo significativas palavras, sobretudo, à minha namorada, *Nathalia Camargo*, mulher que adentrou em minha vida e me fez crescer como homem. Obrigado por vivenciar mais esta conquista pra nós. Por todo carinho, amor, compreensão, incentivo e confiança que deposita diariamente em mim. Espero tê-la sempre por perto, pois ao seu lado, os obstáculos que surgem são amenizados. E assim, passamos por todos juntos, escrevendo nossa história de mãos dadas, assim como um casal deve ser. Amo-te, obrigado por tudo minha princesa!

Por fim, agradeço a todos que contribuíram direta ou indiretamente para o desenvolvimento deste trabalho, pois me ajudaram a crescer, pessoalmente e profissionalmente.

Muito obrigado a todos!

“A mente que se abre a uma nova idéia jamais voltará ao seu tamanho original.”

Albert Einstein

CASTRO, L. G. C. **ESTUDO DA VELOCIDADE DE DESPASSIVAÇÃO DE AÇOS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO, EM MEIO DE CLORETO.** 2014. 74 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014.

## RESUMO

Neste trabalho foram utilizadas amostras dos aços CA-50 e CA-60 empregados na construção civil, para avaliar a corrosão pelos íons cloreto. Para tanto, medidas eletroquímicas foram realizadas em solução de NaCl 4,0 g/L, naturalmente aerada. Verificou-se um processo de dissolução ativa no potencial de circuito aberto dos aços CA-50 e CA-60. Neste estudo comparativo, as diferenças entre CA-50 e CA60 não foram significativas, uma vez que, os valores de resistência de polarização estimada por EIS foram da mesma ordem de magnitude para ambos os tipos de aço (oscilaram entre 200 e 500 Ohm). Para todas as espessuras de cobrimento avaliadas, estes valores oscilaram entre 2 e 9 kOhm, sendo os menores associados à menor espessura, sobretudo a 7, 21 e 35 dias. Quando comparados com aqueles determinados para CA-60 sem cobrimento, verifica-se que as camadas de cobrimento oferecem uma proteção contra a corrosão no meio de cloreto pelo menos dez vezes maior.

**PALAVRAS-CHAVE**: Aços CA-50 e CA-60, Cloreto, Técnicas Eletroquímicas, Corrosão.

CASTRO, L. G. C. **STUDY OF SPEED DEPASSIVATION OF STEEL IN REINDORCED CONCRETE STRUCTURES IN CHLORIDE MEDIUM.** 2014. 74 f. Graduate Work (Graduate in Civil Engineering) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014.

## ABSTRACT

The aim of the present study was to investigate the corrosion resistance in chloride medium of two cylindrical steel samples from civil construction (CA-50 and CA-60). For this purpose, electrochemical measurements were performed in NaCl solution, 4.0 g/L, naturally aerated. According to electrochemical responses, it was observed an active dissolution process at open circuit potential for both steels. In this comparative study, the differences between CA-50 and CA60 were not significant, since the values of polarization resistance estimated by EIS were the same order of magnitude for both types of steel (oscillating between 200 and 500 Ohm). For all evaluated thicknesses of concrete reinforcement, these values ranged between 2 and 9 kOhm, and the lower value was associated with lower thickness, particularly at 7, 21 and 35 days. When these results were compared with those determined for the CA-60, it was found that the layer of concrete reinforcement provide a protection against corrosion in chloride medium at least ten times larger.

**KEYWORDS:** Steels CA-50 and CA-60, Chloride, Electrochemical Techniques, Corrosion.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação esquemática de corrosão segundo Gentil (2003) ..... 24
Figura 2 – Tipos de corrosão e fatores que os provocam ..... 24
Figura 3 – Corrosão generalizada em chapa de aço carbono ..... 25
Figura 4 – Corrosão por pites em tubo de aço carbono ..... 25
Figura 5 – Modelo de vida útil (TUUTTI, 1982) ..... 29
Figura 6 – Processo de carbonatação em túnel ..... 31
Figura 7 – Esquema simplificado da pilha de corrosão (CEB 152, 1984) ..... 34
Figura 8 – Laje em corrosão, cuja sintomatologia típica é manchamento acentuado. ..... 34
Figura 9 – Remoção do revestimento e exposição das armaduras no encontro viga-pilar. ..... 35
Figura 10 – Pilar em fase final de corrosão, com perda de armadura e estribos. ..... 35
Figura 11 - Formas de onda AC, para o potencial aplicado (E) e corrente resultante (I). ..... 36
Figura 12 - a) Vetor em termos de ângulo ($\theta$) e magnitude ($|I|$); b) Vetor em termos de coordenadas real ($I'$) e imaginária ($I''$). ..... 37
Figura 13 – Circuito de Randles ..... 38
Figura 14 – Formato do plano complexo ..... 38
Figura 15 – Formato de Bode ..... 39
Figura 16 – Barras de aço (CA-50 e CA-60) ..... 41
Figura 17 – Lixa de SiC nº100 (3M) ..... 42
Figura 18 – Cloreto de sódio em cristais ..... 43
Figura 19 – Tábua de madeira compensada ..... 43
Figura 20 – Parafusos, porcas, arruelas e barras roscadas ..... 44
Figura 21 – Graute Fácil quartzolit ..... 44
Figura 22 – Vaselina sólida (DIMEC) ..... 46
Figura 23 – Preparo das soluções de NaCl ..... 46
Figura 24 - Célula eletroquímica convencional – Primeira etapa ..... 47
Figura 25 – Galvanostato Autolab ..... 47

Figura 26 – Representação hipotética, em planta, do corpo de prova ..... 48
Figura 27 – Corte AA ..... 49
Figura 28 – Corte BB ..... 49
Figura 29 – Corpo de prova em visão espacial (3 dimensões) ..... 49
Figura 30 – Tábuas de madeira ..... 50
Figura 31 – (a) Forma externa; (b) Forma interna ..... 50
Figura 32 – (a) Visão em planta das formas; (b) Visão em perspectiva das formas ..... 51
Figura 33 – Forma do cdp ..... 51
Figura 34 – Disposição das armaduras na forma ..... 52
Figura 35 – Aplicação do desmoldante às formas ..... 52
Figura 36 – (a) Preparo do graute; (b) Adição de água ao graute ..... 53
Figura 37 –Mistura manual do graute ..... 53
Figura 38 – Lançamento do graute – (a) Aplicação; (b) Forma preenchida ..... 54
Figura 39 – Corpo de prova ..... 54
Figura 40 – (a) Lançamento; (b) Adensamento manual ..... 55
Figura 41 – Rasamento da superfície ..... 55
Figura 42 – (a) Máquina de compressão; (b) Ruptura dos cdp's ..... 56
Figura 43 – Célula eletroquímica – Segunda etapa ..... 57
Figura 44 – Ensaios eletroquímicos – Segunda etapa ..... 58
Figura 45 – Cronograma experimental – Segunda etapa ..... 58
Figura 46 – Replicatas de OCP para os aços CA-50 (a) e CA-60 (b) em meio de NaCl 4,0 g/L ..... 60
Figura 47 – Replicatas de EIS no formato de Bode, log ($|Z|_{f \to 0}$), para os aços CA-50 (a) e CA-60 (b) em meio de NaCl (4,0 g/L) ..... 61
Figura 48 – Replicatas de EIS obtidas no plano complexo, para os aços CA-50 (a) e CA-60 (b) em meio de NaCl (4,0 g/L) ..... 61
Figura 49 – Curvas de OCP obtidas para o aço CA-60 com diferentes espessuras de cobrimento em meio de NaCl (4,0 g/L) ..... 63

Figura 50 – Monitoramento de OCP com o tempo para CA-60 com diferentes espessuras de cobrimento, em meio de NaCl 4,0 g/L ..... 65

Figura 51 – Espectros de EIS obtidos no formato de Bode para CA-60 com diferentes espessuras de cobrimento em meio de NaCl (4,0 g/L) ..... 66

Figura 52 – Espectros de EIS obtidos no formato do plano complexo para CA-60 com diferentes espessuras de cobrimento em NaCl (4,0 g/L) ..... 67

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação: Classe de agressividade ambiental e Cobrimento nominal ..... 27

Tabela 2 – Relação: Classes de agressividade ambiental e Risco de deterioração da estrutura 27

Tabela 3 – Relação: Qualidade do concreto e Classe de agressividade ..... 29

Tabela 4 – Variáveis independentes ..... 40

Tabela 5 – Variáveis dependentes ..... 41

Tabela 6 – Propriedades mecânicas dos aços CA-50 e CA-60 ..... 42

Tabela 7 – Quantidade de água – Graute Fácil quartzolit ..... 45

Tabela 8 – Dados técnicos – Graute Fácil quartzolit ..... 45

Tabela 9 – Cronograma experimental – Segunda etapa ..... 59

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|---|---|
| IUPAC | International Union of Pure and Applied Chemistry |
| CA | Concreto Armado |
| PIB | Produto Interno Bruto |
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| NBR | Norma Brasileira |
| CAA | Classe de Agressividade Ambiental |
| A/C | Relação Água/Cimento |
| Ddp | Diferença de Potencial Elétrico |
| ACI | American Concrete Institute |
| CEB | Comitê Euro-Internacional du Beton |
| OCP | Open Circuit Potential ou Potencial em Circuito Aberto |
| DC | Corrente Direta |
| EIS | Espectroscopia de Impedância Eletroquímica |
| AC | Corrente Alternada |

## LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|---|---|
| US$ | Dólar |
| $f_y$ | Resistência característica de escoamento |
| $\varrho_c$ | Resistividade elétrica do concreto |
| $c_{nom}$ | Cobrimento nominal |
| $c_{mín}$ | Cobrimento mínimo |
| $\Delta c$ | Tolerância de execução para o cobrimento |
| $i_{corr}$ | Densidade, Taxa, Corrente ou Velocidade de corrosão |
| E | Potencial |
| I | Corrente |
| R | Resistência |
| Z | Impedância eletroquímica |
| I(t) | Corrente de corrosão instantânea |
| t | Tempo |
| A | Amplitude |
| $\omega$ | Frequência |
| $\theta$ | Ângulo de fase |
| Z’ | Impedância real |
| Z’’ | Impedância imaginária |
| \|Z\| | Módulo da Impedância |
| $R_\Omega$ | Resistência da solução e do filme do produto de corrosão |
| $R_p$ | Resistência de polarização |
| $C_{DL}$ | Capacitância da dupla camada elétrica |
| $E_{corr}$ | Potencial de corrosão |

## LISTA DE ELEMENTOS E SUBTÂNCIAS QUÍMICAS

Os nomes dos elementos e substâncias químicas seguem as referências da IUPAC, seguidos, em parêntesis, por seus nomes tradicionais.

| | |
|---|---|
| $CO_2$ | Dióxido de Carbono (Gás Carbônico) |
| $Cl^-$ | Íon Cloreto |
| $H_2O$ | Monóxido de Dihidrogênio (Água) |
| $O_2$ | Oxigênio (Gás Oxigênio) |
| $Ca(OH)_2$ | Hidróxido de Cálcio (Cal Hidratada ou Cal Extinta) |
| NaOH | Hidróxido de Sódio (Soda Cáustica) |
| KOH | Hidróxido de Potássio (Potassa Cáustica) |
| $Fe_3O_4$ | Magnetita |
| $\gamma$-$Fe_2O_3$ | Óxido de Ferro III (Óxido Férrico) |
| $C_3S$ | Silicato Tricálcico |
| $C_2S$ | Silicato Dicálcico |
| $CaCl_2$ | Cloreto de Cálcio |
| $C_3A$ | Alumínio Tricálcico |
| $SO_2$ | Dióxido de Enxofre |
| $H_2S$ | Sulfeto de Hidrogênio (Ácido Sulfídrico) |
| $CaCO_3$ | Carbonato de Cálcio |
| $OH^-$ | Íon Hidroxila |
| $Fe(OH)_2$ | Hidróxido de Ferro II |
| $FeCl_2$ | Cloreto de Ferro II |
| $Fe^{+2}$ | Íon Ferroso |
| $NO^{-2}$ | Íon Nitrito |
| $\alpha$-FeOOH | Goetita |
| $\gamma$-(8FeOOH, FeOCl) | Lepidocrocita |
| NaCl | Cloreto de Sódio |
| SiC | Carbeto de Silício (Carborudum) |
| Pt | Platina |
| Ag | Prata |
| AgCl | Cloreto de Prata |
| $Fe(OH)_3$ | Hidróxido de Ferro III |

**SUMÁRIO**


**1 INTRODUÇÃO** ..... 19

1.1 JUSTIFICATIVA E IMPORTÂNCIA DO TEMA ..... 19

1.2 RELEVÂNCIA ECONÔMICA ..... 20

1.3 CENTROS DE PESQUISA E PESQUISADORES ..... 21

1.4 OBJETIVOS ..... 21

1.5 ORIGINALIDADE ..... 22

1.6 ORGANIZAÇÃO E CONTEÚDO ..... 22

**2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA** ..... 23

2.1 CONCEITOS BÁSICOS DE CORROSÃO ..... 23

**2.1.1 Definições** ..... 23

**2.1.2 Classificações** ..... 24

2.2 CORROSÃO – CASO ESPECÍFICO DA ARMADURA EM CONCRETO ..... 26

**2.2.1 Fatores intervenientes** ..... 26

2.2.1.1 Cobrimento ..... 26

2.2.1.2 Tipo de cimento e Adições ..... 28

2.2.1.3 Tipo de Aço ..... 28

2.2.1.4 Relação Água/Cimento ..... 28

**2.2.2 Mecanismo de corrosão** ..... 29

2.2.2.1 Período de Iniciação - Despassivação da Armadura ..... 30

2.2.2.1.1 Ação dos Íons Cloreto ($Cl^-$) ..... 30

2.2.2.1.2 Diminuição da Alcalinidade do Concreto ..... 31

2.2.2.2 Período de Propagação – Corrosão da Armadura ..... 32

**2.2.3 Produtos de corrosão** ..... 34

2.3 TÉCNICAS ELETROQUÍMICAS ..... 36

**2.3.1 Medidas de Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIS)** ..... 36

**3 PROGRAMA EXPERIMENTAL** ..... 40

3.1 VARIÁVEIS DA PESQUISA ..... 40
**3.1.1 Variáveis independentes** ..... 40
**3.1.2 Variáveis dependentes** ..... 40
3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS ..... 41
**3.2.1 Primeira etapa** ..... 41
3.2.1.1 Barras de aço ..... 41
3.2.1.2 Lixas de Carbeto de Silício (SiC) ..... 42
3.2.1.3 Solução de íons cloreto ..... 42
**3.2.2 Segunda etapa** ..... 43
3.2.1.1 Tábuas de madeira ..... 43
3.2.1.2 Parafusos, porcas, arruelas e barras roscadas ..... 44
3.2.2.3 Graute Fácil quartzolit ..... 44
3.2.2.4 Água ..... 45
3.2.2.5 Vaselina Sólida ..... 46
3.3 METODOLOGIA E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL ..... 46
**3.3.1 Primeira etapa** ..... 46
**3.3.2 Segunda etapa** ..... 48
3.3.2.1 Montagem da forma ..... 50
3.3.2.2 Concretagem ..... 53
3.3.2.3 Ensaio de Resistência Característica ($f_{ck}$) do Graute ..... 55
3.3.2.4 Ensaios Eletroquímicos ..... 57
**4 RESULTADOS E DISCUSSÃO** ..... 60
4.1 PRIMEIRA ETAPA ..... 60
4.2 SEGUNDA ETAPA ..... 61
**5 CONCLUSÃO** ..... 69
**REFERÊNCIAS** ..... 70
**APÊNDICE – RESULTADOS: ENSAIO ($f_{ck}$) DO GRAUTE** ..... 74

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 JUSTIFICATIVA E IMPORTÂNCIA DO TEMA

Em razão de seu satisfatório comportamento mecânico associado a um custo relativamente baixo, o concreto é o material de maior versatilidade e utilização na construção civil. As estruturas de concreto são projetadas para manter as condições mínimas de segurança, estabilidade e funcionalidade durante um tempo de vida útil, sem custos não previstos de manutenção e de reparos. Contudo, no século XX, o surgimento de manifestações patológicas de grandes intensidades e incidências ameaçam o setor da construção civil, principalmente, devido à corrosão das armaduras em concreto (GENTIL, 2003).

Uma questão pertinente à incidência do processo corrosivo das armaduras reside no fato de que as construções do passado eram mais robustas, isto é, as largas espessuras de cobrimento forneciam à estrutura um caráter mais protetor e, consequentemente maior durabilidade. Com o decorrer do tempo, a evolução dos materiais e das metodologias de cálculo concebeu um caráter mais esbelto a um menor custo. Em contrapartida, proporcionou menor durabilidade às construções. Associado a isto, não se pode negligenciar o aumento da agressividade ambiental devido ao crescimento da industrialização das cidades, favorecendo, desta forma, o encurtamento da vida útil das estruturas de concreto (CASCUDO, 1997).

Segundo Cascudo (1997), a corrosão pode ser definida como a interação que implica inutilização para uso, de um material com o ambiente, seja por reação química, ou por eletroquímica. Em se tratando de armaduras em concreto, os efeitos degenerativos vão além da questão estética revelada na forma de manchas superficiais. Em geral, os produtos de corrosão são expansivos, exercendo deste modo, uma pressão sobre a cobertura de concreto. Como resultado, fissuras podem aflorar na superfície. Sua evolução pode culminar no destacamento do cobrimento e, principalmente, na perda de aderência e de seção resistente das armaduras, representando sério comprometimento à durabilidade, à segurança e à estabilidade estrutural na construção civil.

Nas obras de concreto armado, em destaque àquelas que se localizam em regiões próximas ao mar, em atmosferas salinas, ou em lugares muito úmidos e com atmosferas contaminadas, é habitual o desenvolvimento do fenômeno patológico. No Brasil, a situação é particularmente séria, tendo em vista suas principais cidades se situarem em regiões litorâneas, submetidas à ação extremamente agressiva das atmosferas marinhas, ricas em

cloretos. Por outro lado, cidades como São Paulo e Belo Horizonte sofrem ações contundentes de ambientes urbano-industriais (CASCUDO, 1997).

Em condições normais, as armaduras no interior do concreto estão protegidas da deterioração pela barreira física proporcionada pelo cobrimento das armaduras, que limitam a entrada de agentes agressivos desencadeadores do processo. Além disso, a proteção dos aços é garantida pela formação de uma película protetora de caráter passivo, promovida pela própria alcalinidade do concreto (HELENE, 1993).

No entanto, agentes promotores ou causadores da corrosão, como o dióxido de carbono ($CO_2$) e os íons cloreto ($Cl^-$), incorporados durante a etapa de preparação do concreto, ou provenientes do meio ambiente podem romper a capa protetora, despassivando a armadura.

Uma vez descaracterizada, para as mesmas condições dadas pelo tipo de concreto e ambiente, a intensidade de corrosão pode ser diferenciada em função do tipo de aço empregado. Dependendo do processamento durante a fabricação e do teor de carbono, um determinado tipo de aço pode ser mais suscetível à corrosão em comparação com outros. Os aços CA-50 e CA-60 são categorias de vergalhões utilizados em obras de concreto armado. São identificados pela sigla CA (Concreto Armado) e número na sequencia indica os valores mínimos de resistência de escoamento ($f_y$), obtidos no ensaio de tração, ou seja, 500 MPa para o CA-50 e 600 MPa para o CA-60.

Estas considerações visam ressaltar a importância dos estudos desses fatores no problema da proteção das armaduras de concreto, como aspectos inerentes à engenharia preventiva e corretiva. Neste sentido, o destaque é dado às técnicas eletroquímicas, uma vez que a corrosão é um fenômeno eletroquímico. Quando esta análise é combinada com o conhecimento das propriedades básicas dos materiais de construção civil, possibilita maiores detalhes nas inspeções das estruturas e nas pesquisas em nível laboratorial.

## 1.2 RELEVÂNCIA ECONÔMICA

O grande impacto no desempenho, durabilidade e segurança das estruturas de concreto estão relacionados aos processos corrosivos. Além disso, as perdas financeiras ocasionadas pelos processos de degradação das estruturas metálicas e de concreto são, em geral, muito elevadas (REOU, 2009). Nos Estados Unidos o custo anual da corrosão chega a 3,1% do Produto Interno Bruto (PIB), o que totaliza US$ 276 bilhões, contra 3,5% no Brasil, sem contar os custos indiretos, como interrupções no funcionamento de estabelecimentos

industriais, contaminação de produtos, problemas de segurança (incêndios, explosões, liberação de produtos tóxicos, etc.), acidentes pessoais, entre outros (PORTELLA, 2006).

Medeiros (2008) analisa o custo destas intervenções, o qual pode chegar a ser superior ao da construção da estrutura nova, devido aos gastos com a intervenção para aumentar a durabilidade de uma estrutura no período de manutenção corretiva. Neste sentido, o referido autor alega que estabelecer uma estimativa para o custo, exige a consideração de uma série de parâmetros, que por sua vez alteram-se para cada país. Além disso, o custo final dependerá também da disponibilidade do método na região e adequação à estrutura.

## 1.3 CENTROS DE PESQUISA E PESQUISADORES

Este trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Eletroquímica e Corrosão, do Departamento de Física e Química, da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, sob a supervisão dos professores Heloisa A. Acciari e Eduardo N. Codaro, além do apoio técnico da Dra. Marinalda Claudete Pereira, assistente acadêmica junto ao Departamento de Engenharia Civil desta faculdade. Os professores Heloisa e Eduardo têm experiência na aplicação de técnicas eletroquímicas ao estudo da corrosão de materiais metálicos e ofereceram o suporte necessário durante a elaboração da parte experimental. A viabilidade deste projeto foi complementada no Laboratório de Materiais de Construção Civil, do Departamento de Engenharia Civil da mesma faculdade, segundo a orientação do professor Dr. José Bento Ferreira, que colaborou com as discussões no âmbito da escolha dos materiais, da metodologia e das variáveis estudadas nesta pesquisa.

No Brasil há grandes centros de pesquisa (Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e IPT-Instituto de Pesquisas Tecnológicas), além de muitos outros, onde pesquisadores da área de corrosão investigam novas alternativas de aumentar a resistência à corrosão das armaduras no concreto.

## 1.4 OBJETIVOS

Neste trabalho comparou-se a resistência à corrosão de dois tipos de aço amplamente utilizados na construção civil, CA-50 e CA-60, sob o efeito de íons cloreto, através de técnicas eletroquímicas. Além disso, o presente trabalho consiste na análise dos efeitos do cobrimento de concreto na resistência ao processo corrosivo.

Na primeira etapa, a ênfase foi dada ao comportamento eletroquímico para definir o tipo de aço mais resistente à corrosão por íons cloreto. Para completar o estudo, a metodologia elaborada avalia o efeito das espessuras de cobrimento na velocidade de despassivação do aço obtido na primeira etapa.

## 1.5 ORIGINALIDADE

De acordo com levantamento bibliográfico realizado, a ideia de comparar dois aços utilizados na construção civil e investigar os efeitos de diferentes condições de preparação das armaduras em concreto na resistência à corrosão dos mesmos em meio de cloreto, não encontram precedentes na literatura completamente definidos.

## 1.6 ORGANIZAÇÃO E CONTEÚDO

O presente estudo estrutura-se em cinco capítulos, conforme a descrição a seguir.

Esta introdução compreende a importância e justificativa do desenvolvimento deste estudo, bem como sua relevância à economia mundial. Além disso, destaca os objetivos a serem atingidos e as originalidades do trabalho em relação às atividades dos principais pesquisadores e centros de pesquisa deste assunto.

O segundo capítulo expõe uma revisão sucinta da literatura com o intuito de compreender e avaliar a corrosão do aço em concreto. Para tal, inicialmente há uma descrição das definições e classificações a respeito do tema pelos especialistas mais difundidos na área. Em sequência, o destaque é dado à fundamentação teórica do fenômeno como um todo, ressaltando os fatores intervenientes e o mecanismo eletroquímico da corrosão do aço em concreto. A segunda parte deste capítulo apresenta as técnicas eletroquímicas para avaliação da manifestação patológica.

O programa experimental, o qual descreve as variáveis envolvidas neste estudo, a caracterização dos materiais utilizados na pesquisa, o planejamento e a metodologia dos ensaios realizados encontram-se detalhadas no terceiro capítulo.

No penúltimo capítulo, encontram-se a apresentação e a discussão dos resultados obtidos do programa experimental.

Por fim, o quinto capítulo destina-se à exposição das conclusões do trabalho. Além disso, apresenta sugestões para realização de atividades futuras.

# 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Há um grande número de informações e dados publicados na literatura por diversos especialistas a respeito da problemática corrosão das armaduras em estruturas de concreto (TUUTTI, 1982; HELENE, 1993; CASCUDO, 1997; GENTIL, 2003; ANDRADE, 1992; entre outros). Dispondo-se, portanto, de um vasto legado no assunto, vale destacar uma síntese concisa dos conceitos básicos do tema para compreender o mecanismo bem como seus fatores intervenientes e suas condições básicas para propagação da corrosão, em específico, da armadura no interior do concreto.

Em sequência, será apresentada uma fundamentação teórica das técnicas eletroquímicas que permitem avaliar e fornecer parâmetros do processo corrosivo.

## 2.1 CONCEITOS BÁSICOS DE CORROSÃO

Serão apresentadas a seguir, algumas definições e classificações do fenômeno da corrosão mais difundidas entre os especialistas do tema em todo o mundo.

### 2.1.1 Definições

Conforme os autores estudados, parece haver uma unanimidade quanto à definição de corrosão. Cascudo (1997) define o fenômeno como a interação que implica inutilização para uso, de um material com o ambiente, seja por reação química ou eletroquímica.

Helene (1993), de modo semelhante, alega ser a interação destrutiva de um material com o meio ambiente, seja por ação física, química, eletroquímica ou a combinação destas, que pode ser acelerada pela presença de agentes químicos externos ou internos ao concreto.

Gentil (2003) apresenta uma definição menos clássica, representada pela Figura 1, alegando textualmente que:

> Em alguns casos, pode-se admitir a corrosão como o inverso do processo metalúrgico, cujo objetivo principal é a extração do metal a partir de seus minérios ou de outros compostos, ao passo que a corrosão tende a oxidar o metal. Assim, muitas vezes o produto da corrosão de um metal é bem semelhante ao minério do qual foi originalmente extraído (GENTIL, 2003, p.1).

Figura 1 – Representação esquemática de corrosão segundo Gentil (2003)




Fonte: (GENTIL, 2003)

### 2.1.2 Classificações

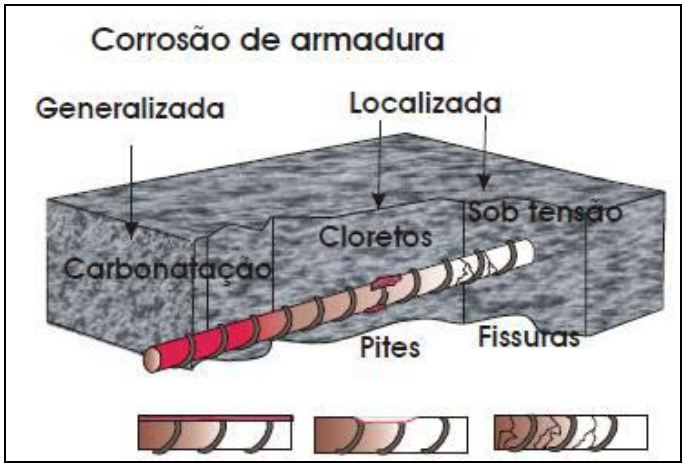
Segundo a natureza do processo corrosivo no aço, o mesmo pode ser químico ou eletroquímico. O primeiro geralmente dá-se por uma reação gás-metal, com formação de uma película de óxido. Trata-se de um processo lento, à temperatura ambiente, que não provoca deterioração substancial das superfícies metálicas. Neste tipo de corrosão, os átomos de ferro contidos no aço reagem diretamente com oxigênio.

Por outro lado, na corrosão eletroquímica, o ataque ocorre em meio aquoso, como resultado da formação de uma pilha ou célula de corrosão, fonte geradora de corrente onde há duas zonas: anódica e catódica, caracterizada pelas reações de oxidação e redução, respectivamente. Além disso, é substancial ao processo a presença de eletrólito e diferença de potencial entre trechos da superfície do aço (CASCUDO, 1997).

Fica evidente que a corrosão eletroquímica é o tipo de interação destrutiva que efetivamente traz problemas às construções. O engenheiro civil deve, portanto, inteirar-se e importar-se a fim de prevenir e recuperar as estruturas de concreto armado.

Segundo a morfologia, a corrosão dos aços pode, genericamente, ser classificada em: corrosão generalizada, corrosão por pite e corrosão sob tensão fraturante (Figura 2).

Figura 2 – Tipos de corrosão e fatores que os provocam




(Fonte: CASCUDO, 1997)

A primeira, conforme sua própria denominação ocorre de maneira generalizada em toda superfície do aço, podendo ser uniforme, com a superfície tendendo ser lisa e regular, ou não uniforme, exibindo superfície rugosa e irregular (Figura 3).

Figura 3 – Corrosão generalizada em chapa de aço carbono



(Fonte: GENTIL, 2003)

A corrosão por pite representa um tipo de corrosão localizada, caracterizada pela presença de pontos de desgaste definidos na superfície metálica (Figura 4). Na maior parte das situações, os aços-carbono salientam depressões mais rasas e de maior diâmetro, em contraposição ao pite clássico, caracterizado por pontos de pequeno diâmetro e grande profundidade (CASCUDO, 1997).

Figura 4 – Corrosão por pites em tubo de aço carbono



(Fonte: GENTIL, 2003)

Por fim, a corrosão sob tensão fraturante pode promover a propagação de fissuras na estrutura do aço. Gentil (2003) trata o fenômeno de natureza transgranular, em que a corrosão se desenvolve nos grãos da rede cristalina do material metálico; ou intergranular, caracterizado pelo desenvolvimento entre os grãos da rede cristalina do material metálico.

## 2.2 CORROSÃO – CASO ESPECÍFICO DA ARMADURA EM CONCRETO

A corrosão de armaduras em concreto é um caso específico de corrosão eletroquímica em meio aquoso, em que o eletrólito apresenta características de resistividade elétrica ($\varrho_c$) significativamente maior a dos eletrólitos típicos (CASCUDO, 1997).

### 2.2.1 Fatores intervenientes

Levando em consideração os objetivos a serem atingidos nesta pesquisa, serão aprofundados teoricamente algumas características e propriedades dos materiais de construção civil bem como sua interação com o meio que interferem na degradação das estruturas de concreto armado.

#### 2.2.1.1 Cobrimento

O concreto, desde que executado corretamente, apresenta particularidades de grande importância para a construção civil, oferecendo comportamento mecânico eficaz, sendo capaz de proteger a armadura da corrosão causada pelo meio. Essa proteção baseia-se em dois aspectos relevantes: o físico e o químico.

A proteção física é devida à barreira assegurada pelo cobrimento das armaduras, que restringe a introdução de agentes agressivos externos que desencadeiam a deterioração do aço. Além disso, limita a entrada dos elementos básicos à ocorrência da corrosão eletroquímica: a água ($H_2O$) e oxigênio ($O_2$) (HELENE, 1993).

Quanto à proteção química, mais importante e efetiva, decorre da basicidade do concreto (pH em torno de 12,5). Esta alcalinidade deriva da fase líquida constituinte nos poros do concreto, a qual, nas primeiras idades, trata-se basicamente de uma solução de hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$) sendo esta oriunda das reações de hidratação do cimento. Em idades mais avançadas, por via de regra, o concreto continua propiciando um meio alcalino, sendo neste caso, uma solução composta principalmente por hidróxido de sódio (NaOH) e hidróxido de potássio (KOH) oriundos dos álcalis do cimento (CASCUDO, 1997).

A alcalinidade proporciona, espontaneamente, a formação de uma capa ou película protetora de caráter passivo denominada proteção química, altamente polarizada anodicamente, envolvendo a armadura (CASCUDO, 1997).

Em suma, o papel do cobrimento é proteger essa capa passivante que envolve a armadura, contra danos físicos e mecânicos e, simultaneamente, manter sua estabilidade química (HELENE, 1993).

Embora haja diversas pesquisas, a composição precisa dessa película ainda é objeto de pesquisa. Contudo, Sato[1] (1978 apud HELENE, 1993, p.43) propõe que a teoria mais aceita é a da formação de um filme transparente, fino, aderente e estável, composto de duas camadas de óxido, uma interna onde predomina a magnetita ($Fe_3O_4$) e outra externa de óxido férrico ($\gamma$-$Fe_2O_3$).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), conforme a NBR 6118 (2004), estipula inicialmente a espessura do cobrimento nominal ($c_{nom}$), sendo este a soma do cobrimento mínimo ($c_{mín}$) com a tolerância de execução ($\Delta c$) de 10 mm, em função da Classe de Agressividade do Ambiental (CAA), conforme ilustra a Tabela 1.

Tabela 1 - Relação: Classe de agressividade ambiental e Cobrimento nominal

| **Tipo de estrutura** | **Componente ou elemento** | **Classe de agressividade ambiental** | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | **I** | **II** | **III** | **IV** |
| | | **Cobrimento nominal (mm)** | | | |
| Concreto armado | Laje | 20 | 25 | 35 | 45 |
| | Viga/Pilar | 25 | 30 | 40 | 50 |
| Concreto protendido | Todos | 30 | 35 | 45 | 55 |

(Fonte: Adaptada da NBR 6118, 2004)

Segundo a NBR 6118 (2004) a CAA está relacionada às ações físicas e químicas que atuam sobre as estruturas de concreto, independentemente das ações mecânicas, das variações volumétricas de origem térmica, da retração hidráulica, entre outras. A agressividade pode ser classificada, simplificadamente, correlacionando com o risco de deterioração, segundo as condições de exposição da estrutura, como explicitado na Tabela 2.

Tabela 2 – Relação: Classes de agressividade ambiental e Risco de deterioração da estrutura

| **Classe de agressividade ambiental (CAA)** | **Agressividade** | **Risco de deterioração da estrutura** |
|---|---|---|
| I | Fraca | Insignificante |
| II | Moderada | Pequeno |
| III | Forte | Grande |
| IV | Muito forte | Elevado |

(Fonte: Adaptada da NBR 6118, 2004)

[1] SATO, N. **Passivity of Metals.** R. P. Frankenthal and J. Kruger, eds. Princenton, Eletrochemical Society, 1978, p.29.

### 2.2.1.2 Tipo de cimento e Adições

É de grande importância o conhecimento da influência do tipo de cimento sobre a estrutura de poros da pasta de cimento e à permeabilidade e resistividade (NEVILLE, 1997).

Concretos com adições de escória de alto-forno ou com adições de materiais pozolânicos, geralmente, apresentam estruturas de pasta mais compactas. Sendo assim, o desempenho destes quanto à penetração de líquidos, gases e, principalmente, íons cloreto são melhores quando comparados a concretos de cimento Portland comum. (CASCUDO, 1997).

Além disso, Ferreira (2005), analisando as reações de hidratação de compostos anidros originados do cozimento, alega que o silicato tricálcico ($C_3S$) gera uma maior quantidade Cal Livre que o silicato dicálcico ($C_2S$). Por essa razão, cimentos com teor mais alto de $C_3S$ ficam mais sujeitos a ataques químicos que aqueles com teor significativo de $C_2S$.

### 2.2.1.3 Tipo de Aço

A velocidade de corrosão também pode ser influenciada em função do tipo de aço empregado nas peças estruturais, pois são submetidos a diferentes tratamentos térmicos e mecânicos. Além disso, a composição química e os diversos níveis de inclusão apresentados pelos tipos de aço alteram a microestrutura do material, tornando-o mais ou menos susceptível à corrosão. Neste pensamento, Cascudo (1997), acrescenta textualmente que:

> "Aços com maior teor de carbono, por exemplo, são reconhecidamente mais susceptíveis a desenvolver corrosão em comparação com outros tipos de aço de menor dureza e de baixa resistência mecânica" (CASCUDO, 1997, p.72).

### 2.2.1.4 Relação Água/Cimento

Cascudo (1997) estabelece que a relação Água/Cimento (A/C) é um dos fatores de maior importância na análise de corrosão, visto que determina a qualidade do concreto. Este fator define as características de compacidade ou porosidade da pasta de cimento endurecida. Um valor baixo desta relação retardará a difusão de cloretos, dióxido de carbono e oxigênio, além de dificultar a inserção de umidade e agentes agressivos para o interior do concreto devido à redução no volume de poros e na permeabilidade.

A NBR 6118 (2004), a partir da existência de uma forte correspondência entre a relação (A/C), a resistência à compressão do concreto e sua durabilidade, permite a adoção dos

requisitos mínimos expressos na Tabela 3. A referida norma também ressalva a proibição do uso de aditivos à base de cloreto na sua composição.

Tabela 3 – Relação: Qualidade do concreto e Classe de agressividade

| Concreto | Tipo | Classe de Agressividade (Tabela 2) | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | I | II | III | IV |
| Relação A/C | Concreto Armado | ≤ 0,65 | ≤ 0,60 | ≤ 0,55 | ≤ 0,50 |
| | Concreto Protendido | ≤ 0,60 | ≤ 0,55 | ≤ 0,50 | ≤ 0,45 |
| Classe de Concreto | Concreto Armado | ≥ C20 | ≥ C25 | ≥ C30 | ≥ C35 |
| | Concreto Protendido | ≥ C25 | ≥ C30 | ≥ C35 | ≥ C40 |

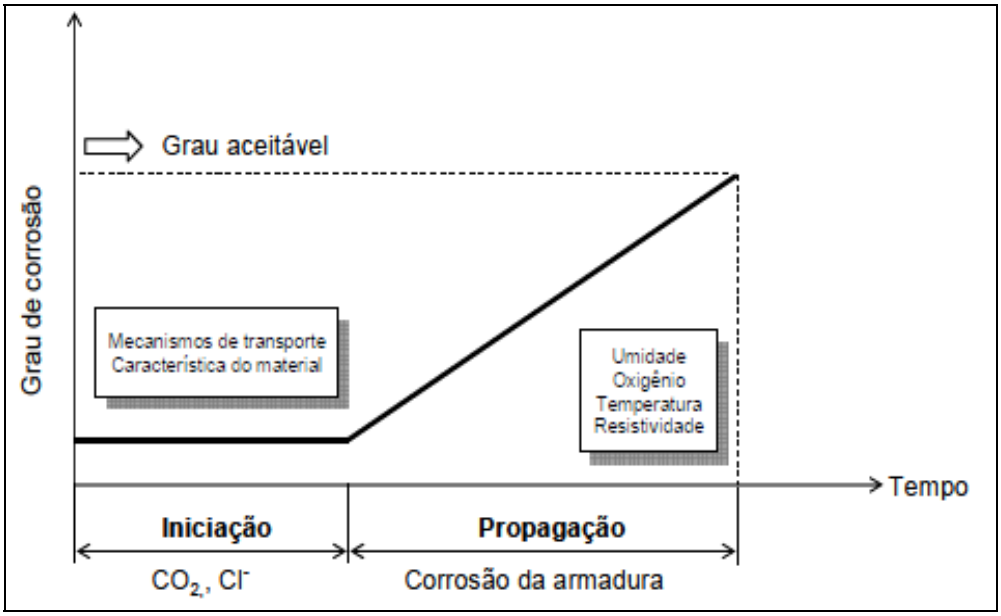
(Fonte: Adaptada da NBR 6118, 2004)

Além dos citados, outros fatores também influenciam o processo corrosivo, tais como: temperatura, fissuração do cobrimento, tipo de cura, permeabilidade e absorção e, por fim, resistividade elétrica do concreto. Fica claro, portanto, que quanto maior a qualidade e mais inalterado permanecer o concreto, mais protegida estará sua armadura. (HELENE, 1993).

### 2.2.2 Mecanismo de corrosão

Com o intuito de estudar a vida útil, com foco na durabilidade das armaduras em concreto, e expor todo o mecanismo da corrosão, é oportuno um entendimento do modelo clássico adotado (Figura 5). Proposto por Tuutti (1982), o modelo é subdividido em duas etapas, denominadas iniciação e prograpação.

Figura 5 – Modelo de vida útil (TUUTTI, 1982)




(Fonte: VIEIRA, 2003)

A iniciação corresponde ao período de tempo desde a execução da estrutura até a ação do agente agressivo (íons cloreto ou carbonatação) em atravessar a barreira proporcionada pelo cobrimento de concreto, atingir a armadura e despassivá-la. A esta etapa pode-se associar a vida útil de projeto;

A propagação consiste no desenvolvimento da corrosão até que se alcance um grau inaceitável do processo, em que são necessários reparos para que a vida útil ou de serviço não seja comprometida.

#### 2.2.2.1 Período de Iniciação - Despassivação da Armadura

A película passiva é a grande defesa da armadura e a garantia de que esta não está sofrendo corrosão. Entretanto, ela pode ser descaracterizada, frente a duas condições substanciais: ação dos íons cloreto e diminuição da alcalinidade do concreto. Ademais, fatores mecânicos (vibrações e erosão), físicos (variação de temperatura), biológicos (bactérias) e químicos (ácidos e sais) podem contribuir para a despassivação (GENTIL, 2003).

##### 2.2.2.1.1 Ação dos Íons Cloreto ($Cl^-$)

Os especialistas mais difundidos na área alegam que corrosão da armadura desencadeada por íons cloreto é a principal causa da deterioração das estruturas de concreto armado. O Comitê 222 do ACI (1990), em especial, ratifica-os responsáveis pela maior incidência de corrosão prematura do aço.

A estrutura porosa da pasta de cimento endurecida é um fator de extrema influência no transporte de íons e demais substâncias dissolvidas. Neste sentido, a interconexão, distribuição e tamanho dos poros, constituem-se em fatores de suma importância (CASCUDO, 1997).

Os íons cloreto podem provir tanto do meio externo, onde penetram nos poros por difusão ou absorção capilar, quanto já podem estar presentes no interior do concreto devido à água de amassamento ou agregados contaminados, ou ainda à presença de aditivos aceleradores à base de cloreto de cálcio ($CaCl_2$).

Andrade (1992) alega que a descaracterização do filme passivo desencadeada por íons cloreto ocorre de forma localizada por pites, através de uma dissolução pontual. Contudo, diversos pesquisadores, são unânimes em admitir que o mecanismo exato não está

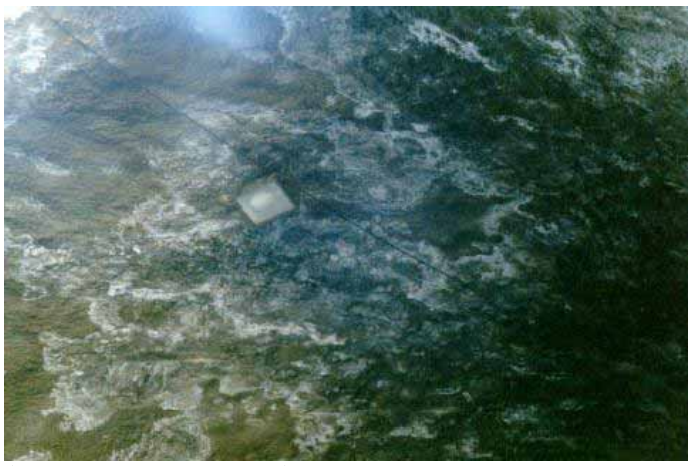
completamente conceituado. Há inclusive, segundo o relatório do Comitê 222 do ACI (1990), teorias modernas que procuram explicar os efeitos dos íons cloreto sobre a corrosão do aço.

É polêmica e de importante ressalva a discussão entre os pesquisadores sobre o limite de íons cloreto para despassivação da armadura. Muito embora algumas normas ou recomendações estipularem um valor limite, a quantidade crítica de íons $Cl^-$ não está associada a um valor fixo. Associado a isto, Helene (1993) acrescenta que o teor de íons cloreto para despassivar a armadura não deve ser estudado isoladamente, pois a resistividade elétrica e a disponibilidade de oxigênio exercem um papel essencial no processo de corrosão.

#### 2.2.2.1.2 Diminuição da Alcalinidade do Concreto

A alta alcalinidade do concreto proporcionada pela presença de $Ca(OH)_2$, pode ser reduzida com o tempo. Isto decorre das reações de carbonatação ou penetração de substâncias ácidas, como dióxido de enxofre ($SO_2$) e ácido sulfídrico ($H_2S$). Eventualmente, quando há certa pressão hidráulica no concreto associada à ação das águas, situação típica de túneis (Figura 6), a queda na basicidade do pH pode ser oriunda da lixiviação da camada de concreto, caracterizada pelo escurecimento da superfície acompanhado de eflorescências de carbonato de Cálcio ($CaCO_3$) (CASCUDO, 1997; FERREIRA, 2005).

Figura 6 – Processo de carbonatação em túnel



(Fonte: FERREIRA, 2005)

O processo denominado de carbonatação ocorre essencialmente pela ação do $CO_2$ do ar atmosférico com os compostos alcalinos da hidratação do cimento a uma velocidade lenta, atenuando-se com o tempo. Pode ainda ser explicado pelos próprios produtos da reação de carbonatação ($CaCO_3$) que colmatam os poros superficiais, dificultando a entrada de $CO_2$ presente na atmosfera, ao interior do concreto (CASCUDO, 1997).

O processo citado, em meio aquoso, pode ser simplificado através da reação (1):

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_20 \quad (1)$$

A reação apresentada é, na realidade, uma simplificação de diversas etapas secundárias, embora seja certo que um dos produtos finais seja sempre o $CaCO_3$. Desta maneira, há uma modificação essencial das condições de estabilidade química da película passivadora do aço, uma vez que, em temperatura ambiente, o pH de precipitação do $CaCO_3$ é da ordem de 9,4 (CASCUDO, 1997).

É importante registrar que a carbonatação está sujeita a uma barreira física, devido ao concreto ser um material microporoso. Neste sentido a entrada de $CO_2$ será determinada pela estrutura da rede de poros e se estes estão preenchidos por água ou não, uma vez que a difusão do $CO_2$ é aproximadamente $10^4$ vezes mais baixa que no ar. Assim, em concretos saturados a carbonatação será insignificante, devido à baixa difusão de $CO_2$ na água. Em concretos secos, por sua vez, a carbonatação também não ocorrerá, mas neste caso, devido à falta de água, ou seja, o $CO_2$ permanece na forma de gás e não reage com o cimento hidratado (VIEIRA, 2003).

Contudo, se os poros estiverem parcialmente preenchidos com água, que é o caso mais semelhante à superfície do concreto, a carbonatação atinge profundidades onde os poros do concreto apresentem essa condição favorável. Esta é a situação efetivamente deletéria para despassivação da armadura (CASCUDO, 1997).

Uma vez descaracterizada a película de passivação, o aço corrói de forma generalizada, tal como se estivesse simplesmente exposto à atmosfera. Este período demarca o início do período de propagação.

#### 2.2.2.2 Período de Propagação – Corrosão da Armadura

A corrosão do aço, conforme o modelo de Tuutti (1982) apresentado na Figura 5, inicia-se após despassivação da armadura, pela ação deletéria dos íons cloreto ou pelo processo de carbonatação. Contudo, Helene (1993), afirma que para o desenvolvimento da manifestação de natureza eletroquímica em meio aquoso deve haver três elementos básicos: eletrólito, diferença de potencial (ddp) e oxigênio. Eventualmente, a presença de elementos agressivos pode ter influência decisiva, originando reações precoces de corrosão.

O eletrólito, fase líquida contida nos poros do concreto, constitui-se em sua maior parte de solução saturada de $Ca(OH)_2$, embora também contenha NaOH, KOH e íons agressivos do meio externo. Apresenta-se sob a forma de uma película sobre a superfície do aço e é

fornecido pela presença de umidade no concreto (CASCUDO, 1997). A água sempre está presente no concreto e, na maior parte dos casos, em quantidade suficiente para atuar como eletrólito (HELENE, 1993).

A ddp é responsável pela formação da pilha eletroquímica, pois as zonas catódicas e anódicas são estabelecidas a partir desta diferença entre regiões adjacentes do condutor metálico. Cascudo (1997) faz a ressalva de que a aeração diferencial é a principal fonte geradora de ddp. Além disso, sua origem pode advir de solicitações mecânicas diferentes no aço e no concreto, diferenças na composição química e superficial do aço, concentração salina diferencial, etc.

Por fim, a presença de $O_2$ é substancial ao processo, participando da reação de formação dos produtos de corrosão (ferrugem), em especial, do hidróxido ferroso ($Fe(OH)_2$), conforme a reação (2):

$$2Fe + O_2 + 2H_2O \rightarrow 2Fe(OH)_2 \qquad (2)$$

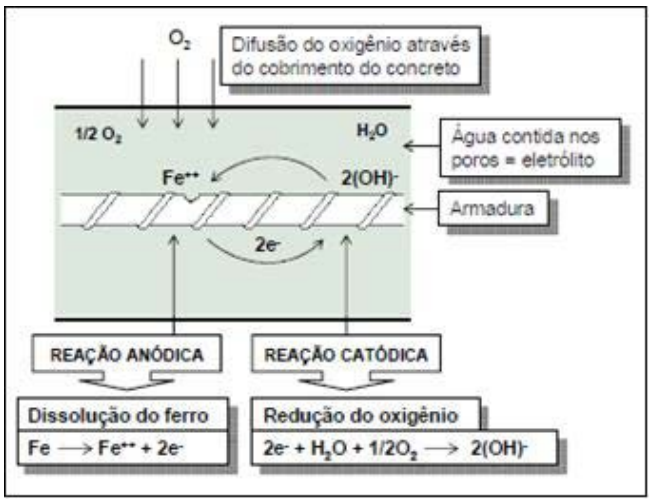
Na realidade as reações são mais complexas e nem sempre forma-se como produto de corrosão o $Fe(OH)_2$. Há uma infinidade óxidos e hidróxidos de ferro resultantes das reações catódicas e anódicas (HELENE, 1993). A grande dificuldade no processo reside na disponibilidade de $O_2$ nas regiões catódicas, pois a taxa de difusão do $O_2$ é função de um determinado estado de umidade no concreto. Por essa razão, o Comitê 222 do American Concrete Institute (ACI, 1990) alega que todo processo eletroquímico de corrosão do aço é controlado pelo acesso de oxigênio dissolvido no eletrólito às regiões catódicas.

É essencial constatar a ação deletéria dos íons cloreto, que atuam tanto na despassivação da armadura (período de iniciação), aumentando a condutividade elétrica do eletrólito, quanto no processo de degradação (período de propagação) para formação dos produtos de corrosão. Outros agentes agressivos também podem desencadear e intensificar a manifestação patológica, como os íons sulfeto ($S^{-2}$), dióxido de carbono ($CO_2$), íons nitrito ($NO_2^-$), entre outros (CASCUDO, 1997).

Para sintetizar o mecanismo da corrosão eletroquímica das armaduras em concreto, é válida a análise de um esquema simplificado (Figura 7) proposto pelo Comitê Euro-Internacional du Beton (CEB, 1984). Nele, percebe-se a formação de uma pilha de corrosão, a partir de uma diferença de potencial entre duas regiões adjacentes ao longo da armadura, visto que o próprio aço funciona como um condutor metálico, sendo essencial para o fluxo eletrônico no sentido ânodo-cátodo. A solução contida nos poros do concreto (eletrólito) é substancial ao processo, pois permite o fluxo iônico e a realização das reações anódicas

(Oxidação do Ferro) e catódicas (Redução do Oxigênio). De acordo com a magnitude da corrente e o acesso de oxigênio dissolvido, haverá ou não corrosão da armadura, podendo ser intensificada e acelerada pelos agentes agressivos.

Figura 7 – Esquema simplificado da pilha de corrosão (CEB 152, 1984)

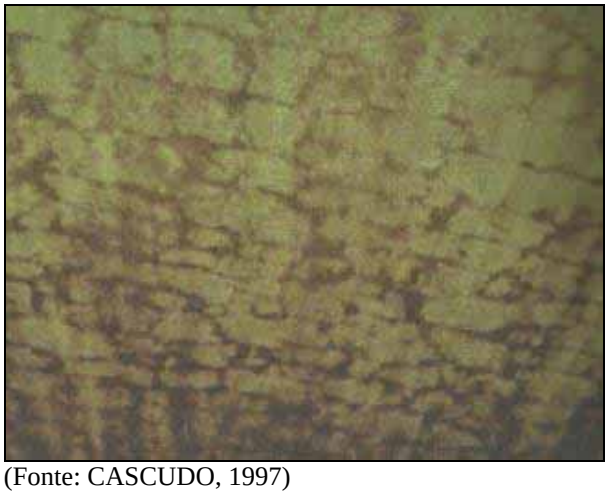



(Fonte: VIEIRA, 2003)

### 2.2.3 Produtos de corrosão

Como resultado de todo mecanismo e propagação da corrosão, são formados óxidos e hidróxidos de ferro, denominados comumente de ferrugem. Caracterizam-se pela coloração marrom-avermelhada (Figura 8), a qual pode variar em função da temperatura e presença de elementos agressivos, principalmente, dos íons cloreto (CASCUDO, 1997).

Figura 8 – Laje em corrosão, cuja sintomatologia típica é manchamento acentuado.



(Fonte: CASCUDO, 1997)

Fundamentalmente, os produtos encontrados são a goetita (αFeOOH), a lepidocrocita (γ(8FeOOH, FeOCl)) e a magnetita ($Fe_3O_4$). Em geral, os produtos da corrosão são

expansivos, podendo atingir volumes de 3 a 10 vezes superiores ao volume original do aço. Em decorrência, tensões internas são originadas, podendo culminar na fissuração das peças de concreto (CASCUDO, 1997).

As fissuras se estabelecem na direção paralela à barra corroída. Com efeito, sua intensificação pode resultar no lascamento do concreto, comprometendo seu monolitismo estrutural, dado pela aderência com as armaduras (Figura 9).

Figura 9 – Remoção do revestimento e exposição das armaduras no encontro viga-pilar.



(Fonte: CASCUDO, 1997)

Além disso, pode ocorrer o destacamento da camada de cobrimento, deixando as armaduras expostas, com possível deformação e perda da seção resistente do aço (Figura 10).

Figura 10 – Pilar em fase final de corrosão, com perda de armadura e estribos.



(Fonte: FERREIRA, 2005)

## 2.3 TÉCNICAS ELETROQUÍMICAS

### 2.3.1 Medidas de Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIS)

A teoria da impedância eletroquímica é um campo da teoria de Corrente Alternada (AC) que descreve a resposta de um circuito a uma corrente ou potencial alternado, como função da frequência. A teoria DC (corrente direta, ou contínua) é um caso especial da teoria AC onde a frequência é nula e a resistência é definida pela lei de Ohm, dada pela fórmula (1):

$$E = I\,R \tag{1}$$

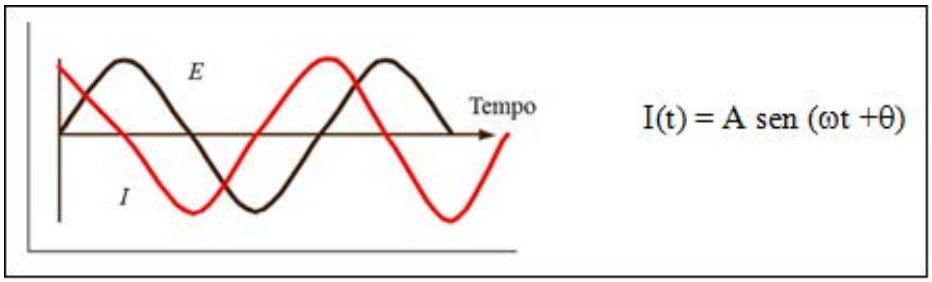
Usando a lei de Ohm, pode-se aplicar um potencial ($E$) a um circuito, medir a corrente resultante ($I$) e calcular a resistência ($R$). Na teoria AC, onde a frequência não é nula, a situação é análoga e pode ser relacionada através da fórmula (2):

$$E = I\,Z \tag{2}$$

Nesta fórmula, o termo Z é definido como impedância. Neste caso, além dos resistores, capacitores ou indutores também impedem o fluxo de elétrons.

A Figura 11 registra uma perturbação aplicada no potencial, na forma de onda senoidal, através de um circuito, e a corrente AC resultante. Neste caso, as duas ondas, referentes ao sinal de entrada e saída, encontram-se defasadas entre si. Assim, corrente instantânea ($I$(t)) pode ser determinada no decorrer do tempo (t) sendo função da amplitude máxima da onda (A), frequência (ω) e do ângulo de mudança de fase (θ):

Figura 11 - Formas de onda AC, para o potencial aplicado (E) e corrente resultante (I).

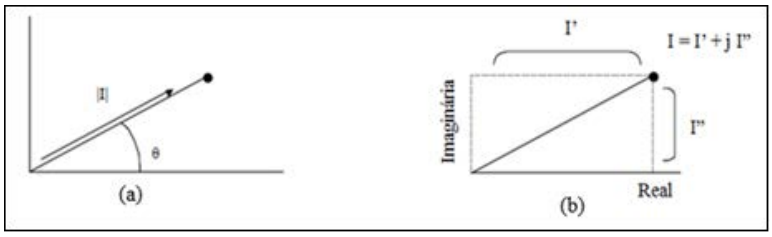



(Fonte: EG&G Princeton Applied Research, 1989)

A análise vetorial fornece um método conveniente de caracterização de uma forma de onda AC, em termos de suas características de fase e amplitude. O vetor da onda de corrente pode ser descrito graficamente em uma variedade de caminhos. Na Figura 12 (a), o vetor é definido pelo ângulo de fase (θ) e pela magnitude de corrente ($I$). Uma segunda aproximação,

Figura 12 (b), frequentemente mais conveniente para analise numérica, os eixos são definido em real (*I*') e imaginário (*I*").

Figura 12 - a) Vetor em termos de ângulo (θ) e magnitude (|*I*|); b) Vetor em termos de coordenadas real (*I*') e imaginária (*I*").




(Fonte: EG&G Princeton Applied Research, 1989)

Usando esta convenção de número complexo, um vetor corrente e um vetor potencial AC podem ser definidos como a soma de suas componentes real e imaginária.

Similarmente, a expressão do vetor resultante para a impedância AC pode ser definida pela fórmula (3) em termos do mesmo eixo de coordenadas dos vetores potencial e corrente.

$$Z_{total} = Z' + Z'' j \tag{3}$$

Pela análise da Figura 12 a magnitude absoluta da impedância (|Z|) e o ângulo de fase (θ) podem ser determinados através das fórmulas (4) e (5), respectivamente.

$$|Z| = \sqrt{Z'^2 + Z''^2} \tag{4}$$

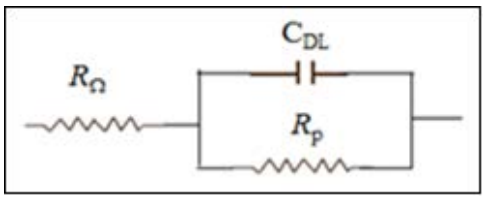
$$\tan \theta = \frac{Z''}{Z'} \tag{5}$$

Através da técnica de impedância podem ser extraídas inúmeras informações a respeito da cinética do processo corrosivo (velocidade de corrosão instantânea), identificação da morfologia do ataque (corrosão localizada, generalizada, etc), identificação e caracterização do estado da armadura (ativa ou passiva).

Ademais, a principal vantagem de EIS é que esta técnica permite usar um modelo puramente eletrônico para representar uma célula eletroquímica. Um eletrodo pode ser assim considerado análogo a um circuito eletrônico, consistindo de uma combinação específica de resistores e capacitores. Na escolha de um modelo em particular, procura-se correlacionar as propriedades físicas e químicas com elementos do circuito e extrair valores numéricos pelo ajuste dos dados experimentais a este modelo. O circuito de Randles, Figura 13, modela a impedância eletroquímica de uma interface e se ajusta muitos sistemas químicos. Neste

circuito, identificam-se: a resistência ôhmica ou não compensada da solução entre o eletrodo de referência e de trabalho ($R_\Omega$), resistência de polarização ou de transferência de carga na interface eletrodo/solução ($R_p$) e a capacitância da dupla camada nesta interface ($C_{DL}$).

Figura 13 – Circuito de Randles

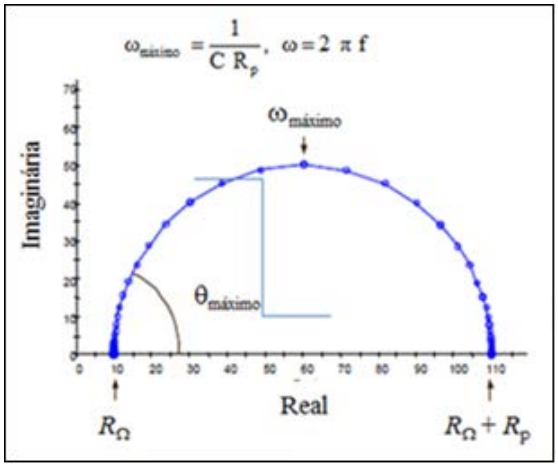



(Fonte: EG&G Princeton Applied Research, 1989)

Após uma medida eletroquímica de impedância, os dados obtidos a cada frequência consistem das seguintes componentes: parte real e imaginária do potencial, bem como a parte real e imaginária da corrente. A partir destes resultados é possível computar dθ e Z para cada frequência aplicada. Há uma variedade de formatos de gráficos utilizados para representar estes resultados, cada qual oferece vantagens específicas para revelar certas características de um dado sistema químico.

O formato do plano complexo, ilustrado na Figura 14, tem como abscissa e ordenada, as componentes real (*Z*') e imaginária (*Z*") da impedância, respectivamente, e representa a resposta esperada de um circuito simples. Este formato apresenta várias vantagens, entre elas, destaca-se a facilidade de obter os efeitos da resistência ôhmica, uma vez que, a mesma pode ser lida diretamente no gráfico, extrapolando o semicírculo à esquerda (na região de altas freqüências) interceptando o eixo real.

Figura 14 – Formato do plano complexo



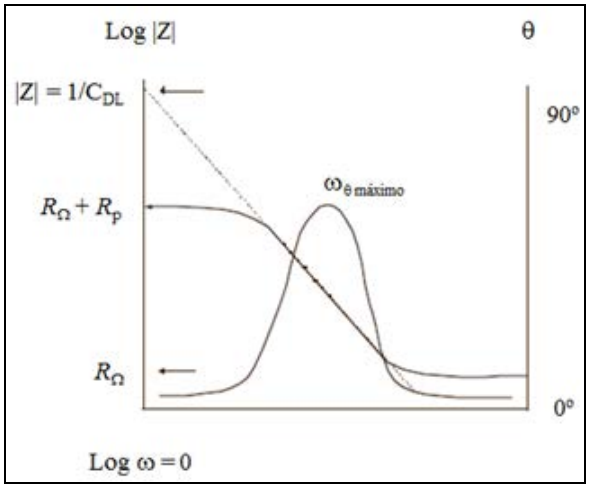

(Fonte: EG&G Princeton Applied Research, 1989)

A forma da curva (frequentemente um semicírculo) não varia quando a resistência ôhmica varia. Além disso, o mesmo enfatiza componentes do circuito que estão em série, tal

como $R_\Omega$. Contudo, este formato também apresenta desvantagens, por exemplo, a frequência não aparece explícita. Embora a resistência ôhmica e a resistência de polarização possam ser lidas diretamente no gráfico pela extrapolação do semicírculo interceptando o eixo real a baixas frequências, a capacitância do eletrodo pode ser calculada somente após a freqüência ser conhecida. Como mostrado na Figura 14, a frequência correspondendo ao topo do semicírculo, $\omega_{(\theta=máximo)}$, pode ser usada para calcular a capacitância se $R_p$ for conhecida.

Na Figura 15 está mostrado o formato de Bode, para os mesmos resultados representados no formato do plano complexo, Figura 14. Este formato conduz ao exame da impedância absoluta, |Z|, como calculada pela fórmula (4), e da mudança de fase (θ) da impedância, ambos os termos expressos como função da frequência. O gráfico usa o logaritmo da frequência para permitir que uma ampla faixa de frequência seja representada no gráfico. A curva de log |Z| vs. Log ω pode mostrar valores de $R_\Omega$ e $R_p$. Às frequências mais elevadas, a resistência ôhmica domina a impedância e, log ($R_\Omega$) pode ser lida a partir do platô horizontal a altas freqüências. Às frequências menores, a resistência de polarização também contribui e, log ($R_\Omega + R_p$) podem ser lidas a partir do platô horizontal a baixas frequências. Às frequências intermediárias, esta deve ser uma linha reta com uma inclinação -1.

Figura 15 – Formato de Bode




(Fonte: EG&G Princeton Applied Research, 1989)

Em alguns processos eletroquímicos há mais de uma etapa determinante da velocidade da reação. Cada etapa representa uma componente da impedância do sistema e contribui para a taxa da reação global.

# 3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

## 3.1 VARIÁVEIS DA PESQUISA

Considerando os inúmeros fatores intervenientes na corrosão de armaduras de concreto armado e a complexidade de estudá-los simultaneamente em uma única pesquisa, houve uma discussão sobre as variáveis a serem avaliadas, respeitando tanto sua originalidade bem como a limitação de recursos financeiros para exequibilidade deste programa experimental.

Adiante serão estabelecidas as variáveis independentes e as variáveis dependentes para execução da presente pesquisa.

### 3.1.1 Variáveis independentes

O programa experimental subdivide-se em duas avaliações, as quais integralizam o objetivo desta pesquisa.

Na primeira etapa, compara-se qual tipo de aço, CA-50 ou CA-60, é mais resistente à deterioração por íons cloreto, em solução de NaCl 4,0g/L.

Posteriormente, analisa-se o efeito de diferentes espessuras de cobrimento na velocidade de despassivação da armadura por íons cloreto, em solução de NaCl 4,0g/L. Nesta etapa, adotou-se o aço de melhor resistência à corrosão (CA-60), segundo os resultados obtidos na primeira avaliação experimental deste trabalho.

Pode-se, portanto, limitar as variáveis independentes bem como seus níveis, esquematizado através da Tabela 4 a seguir:

Tabela 4 – Variáveis independentes

| Etapa | Variáveis independentes | Níveis | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Tipo de aço | CA-50 | | CA-60 | |
| 2 | Espessuras de cobrimento | 15mm | 20mm | 25mm | 30mm |

(Fonte: AUTOR)

### 3.1.2 Variáveis dependentes

Tratam-se das variáveis que caracterizam a resposta da avaliação experimental. Estão relacionadas às técnicas por fornecer parâmetros que permitem avaliar os efeitos das variáveis independentes.

Sendo assim, as deste estudo são citadas na Tabela 5 a seguir:

Tabela 5 – Variáveis dependentes

| Variáveis dependentes | Abreviatura |
|---|---|
| Potencial em Circuito Aberto | OCP |
| Módulo da Impedância Eletroquímica | \|Z\| |

(Fonte: AUTOR)

## 3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS

As próprias barras de aço (CA-50 e CA-60) foram utilizadas como eletrodos de trabalho nas medidas eletroquímicas. Para o lixamento foram empregadas lixas de SiC e o eletrólito foi composto pela solução de íons cloreto.

A segunda etapa, por sua vez, exigiu o emprego dos seguintes materiais: tábua de madeira, parafusos, porcas, arruelas e barras roscadas para confecção da forma. A concretagem, por sua vez, foi realizada utilizando água, o aço CA-60 e o Graute Fácil quartzolit, isto é, o produto com os três componentes ensacados e misturados (cimento, areia e brita), pronto para uso. Como desmoldante, utilizou-se a vaselina sólida.

### 3.2.1 Primeira etapa

#### 3.2.1.1 Barras de aço

Foram avaliadas barras de aço do tipo CA-50 e CA-60 com 6 mm e 5 mm de diâmetro, respectivamente, Figura 16.

Figura 16 – Barras de aço (CA-50 e CA-60)




(Fonte: AUTOR)

A Tabela 6 abaixo fornece as propriedades mecânicas das barras de aço utilizadas.

Tabela 6 – Propriedades mecânicas dos aços CA-50 e CA-60

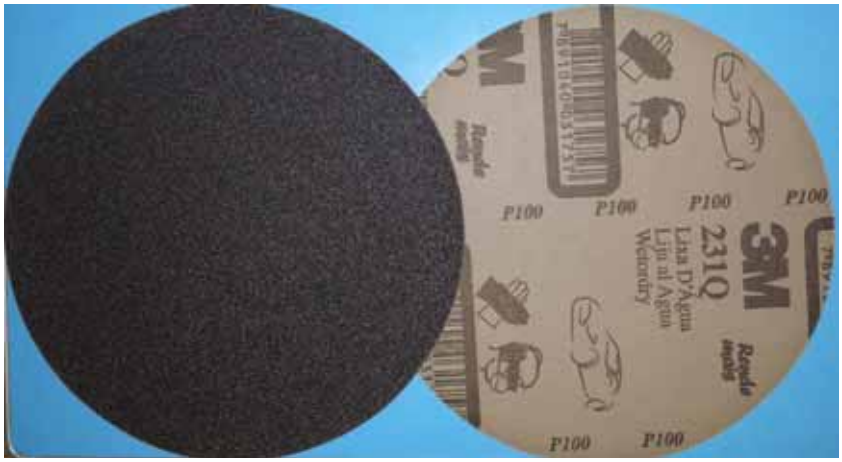
| Categoria | Ensaio de tração (Valores mínimos) | | | Ensaio de dobramento a 180° | | Aderência |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Resistência característica de escoamento $f_y$ (MPa) | Limite de Resistência $f_{st}$ (MPa) | Alongamento em 10 Φ (%) | Diâmetro do pino (mm) | | Coeficiente de conformação superficial mínimo Φ ≥10 mm η |
| | | | | Φ<20 | Φ>20 | |
| CA-50 | 500 | 1,10 $f_y$ | 8 | 4Φ | 6Φ | 1,5 |
| CA-60 | 600 | 1,05 $f_y$ | 5 | 5Φ | - | 1,5 |

(Fonte: FERREIRA, 2005)

### 3.2.1.2 Lixas de Carbeto de Silício (SiC)

O lixamento das amostras visa obter uma superfície plana com o mínimo de deformações. Para tal, foram utilizadas lixas de SiC nº100 de diâmetro 200mm (3M).

Figura 17 – Lixa de SiC nº100 (3M)




(Fonte: AUTOR)

### 3.2.1.3 Solução de íons cloreto

Foram preparadas soluções de íons cloreto naturalmente aeradas em concentração de 4,0 g/L, a partir cloreto de sódio em cristais (Figura 18 - Sodium Chloride, Crystal; J.T.Baker, 36 24-19).

Figura 18 – Cloreto de sódio em cristais




(Fonte: AUTOR)

### 3.2.2 Segunda etapa

#### 3.2.1.1 Tábuas de madeira

A tábua utilizada na confecção da forma possui espessura de 1cm. Amplamente utilizada na construção civil, a madeira é do tipo laminada compensada, Figura 19. Caracteriza-se pela composição em 3 lâminas coladas umas às outras, dispostas alternadamente, visando equilibrar tensões e reduzir riscos de empenamento.

Figura 19 – Tábua de madeira compensada



(Fonte: AUTOR)

### 3.2.1.2 Parafusos, porcas, arruelas e barras roscadas

A barra de ancoragem é o travamento mais simples e versátil para formas na construção civil. O conjunto adotado neste trabalho é composto por barras roscadas, porcas borboletas e arruelas. Os parafusos também auxiliam a fixação correta das tábuas de madeira.

Figura 20 – Parafusos, porcas, arruelas e barras roscadas



(Fonte: AUTOR)

### 3.2.2.3 Graute Fácil quartzolit

São inúmeras as razões e vantagens por este tipo de material. Neste trabalho optou-se pelo Graute Fácil 25kg quartzolit (Figura 21), primeiramente devido à praticidade e ao controle de uso, reduzindo desperdícios em transporte e utilização; ao serviço limpo e; principalmente, por se tratar de um material com uniformidade de resistência. Além disso, a relação água/cimento é perfeitamente determinada evitando desperdício de água.

Figura 21 – Graute Fácil quartzolit




(Fonte: AUTOR)

Composto por cimento, agregados minerais e aditivos químicos não tóxicos, o produto é indicado para regularização de pisos e calçadas; aplicação como concreto pré-misturado em vigas, pilares e lajes; grauteamento de alvenaria estrutural e, sobretudo; para diversos para preenchimentos que necessitem de grande fluidez.

Segundo o fabricante, para cada saco (25kg) de Graute Fácil quartzolit deve-se utilizar a quantidade de água limpa estabelecida conforme a Tabela 7.

Tabela 7 – Quantidade de água – Graute Fácil quartzolit

| Consistência | Quantidade de Água (L) |
|---|---|
| Concreto | 2,5 |
| Graute | 2,75 |

(Fonte: Graute Fácil quartzolit - Weber, Saint Gobain)

Por fim, segue a Tabela 8, fornecida pelo fabricante, a qual fornece os dados técnicos do produto.

Tabela 8 – Dados técnicos – Graute Fácil quartzolit

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Tempo de utilização da argamassa** | | | < 60 min |
| **Tempo de mistura mecânica** | | | 3 a 4 min |
| **Cor** | | | Cinza |
| **Cura** | | | Úmida |
| **Exposição aos raios solares** | | | Após 72 horas |
| **Temperatura de trabalho** | **Ambiente** | | +5ºC até +40ºC |
| | **Superfície de Trabalho** | | +5ºC até +27ºC |
| **Consumo** | **Concreto** | | 2.100 kg/m³ |
| | **Graute** | | 2.000 kg/m³ |
| **Resistência à Compressão** | **Concreto** | **3 dias** | 15 MPa |
| | | **7 dias** | 20 MPa |
| | | **28 dias** | 22 MPa |
| | **Graute** | **3 dias** | 8 MPa |
| | | **7 dias** | 11 MPa |
| | | **28 dias** | 15 MPa |
| **Densidade** | **Aparente** | | 1,7 g/cm³ |
| | **Fresca** | **Concreto** | 2,3 g/cm³ |
| | | **Graute** | 2,1 g/cm³ |

(Fonte: Graute Fácil quartzolit - Weber, Saint Gobain)

### 3.2.2.4 Água

A preparação dos corpos-de-prova foi realizada com água potável, proveniente da rede de abastecimento local.

### 3.2.2.5 Vaselina Sólida

Como desmoldante, utilizou-se a vaselina sólida de uso industrial (DIMEC, 90g), amplamente utilizada para lubrificação de fiações, tubulações e construção civil em geral.

Figura 22 – Vaselina sólida (DIMEC)




(Fonte: AUTOR)

## 3.3 METODOLOGIA E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

### 3.3.1 Primeira etapa

As amostras cilíndricas dos aços constituíram o próprio eletrodo de trabalho. Previamente aos ensaios eletroquímicos, as amostras foram submetidas ao lixamento, com o auxílio das lixas de SiC nº100. Em seguida as amostras foram enxaguadas para serem introduzidas na célula eletroquímica.

As medidas eletroquímicas foram realizadas em solução de NaCl 4,0 g/L naturalmente aerada. A concentração do eletrólito foi obtida utilizando uma balança semianalítica de precisão ±0,001g (Marte; Modelo: AL500C; Ano: 2008), Figura 23.

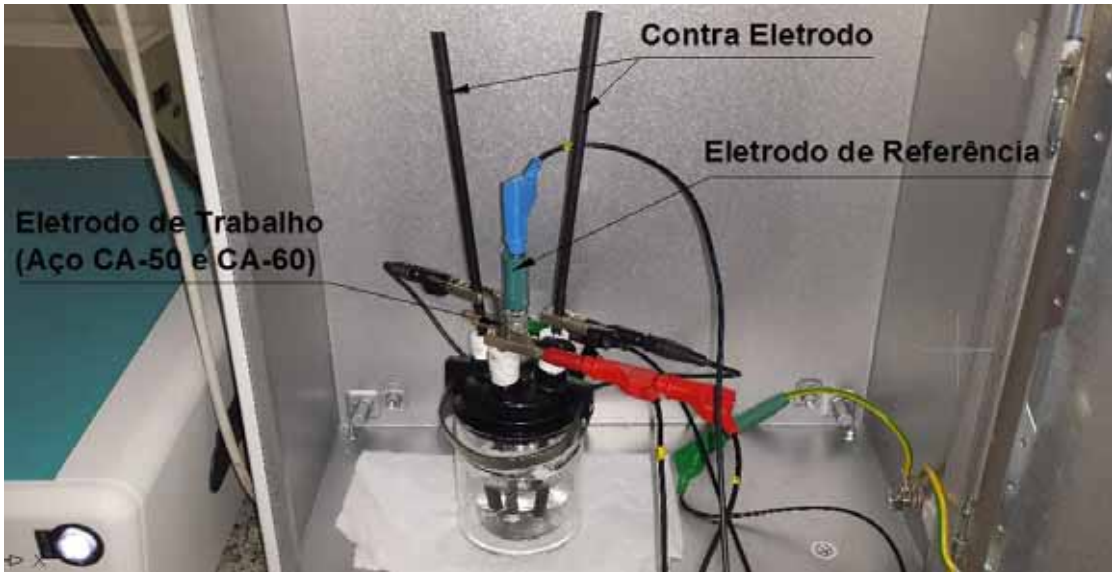
Figura 23 – Preparo das soluções de NaCl



(Fonte: AUTOR)

Para avaliar a corrosão pelos íons cloreto utilizou-se uma célula eletroquímica convencional contendo quatro eletrodos: além do eletrodo de trabalho constituído pelo próprio aço (CA-50 ou CA-60), foram utilizados dois cilindros de grafite conectados em série entre si que constituíram o contra eletrodo e, como referencia, foi utilizado o eletrodo Ag/AgCl, conforme ilustrado através da Figura 24. Para analisar a repetibilidade dos ensaios nesta primeira etapa, foram utilizados 85mL de solução de NaCl 4,0 g/L, a fim de reproduzir em uma menor escala os ensaios a serem feitos com a armadura (segunda etapa).

Figura 24 - Célula eletroquímica convencional – Primeira etapa




(Fonte: AUTOR)

Com a utilização do software NOVA 1.8, medidas de potencial em circuito aberto com o tempo (OCP), além da espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS) foram realizadas por meio de um potenciostato/galvanostato AUTOLAB (Eco. Chemie B. V., Utrecht, Netherlands), modelo PGSTAT302N, Figura 25.

Figura 25 – Galvanostato Autolab

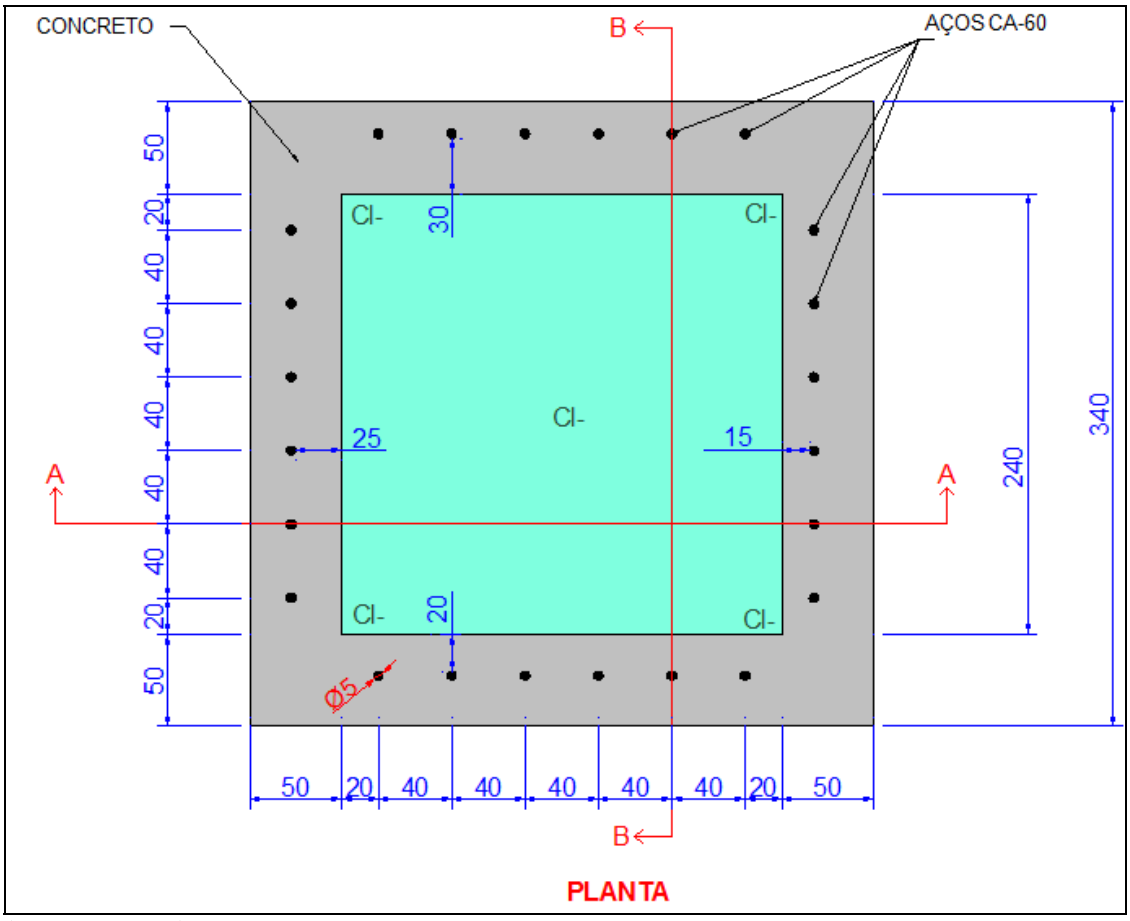


(Fonte: AUTOR)

### 3.3.2 Segunda etapa

A metodologia foi amplamente discutida para analisar o efeito do cobrimento de concreto na velocidade de despassivação da armadura sob o efeito de íons cloreto. A Figura 26 a seguir ilustra, hipoteticamente, o corpo de prova (cdp) proposto, com as medidas expressas em milímetros.

Figura 26 – Representação hipotética, em planta, do corpo de prova




(Fonte: AUTOR)

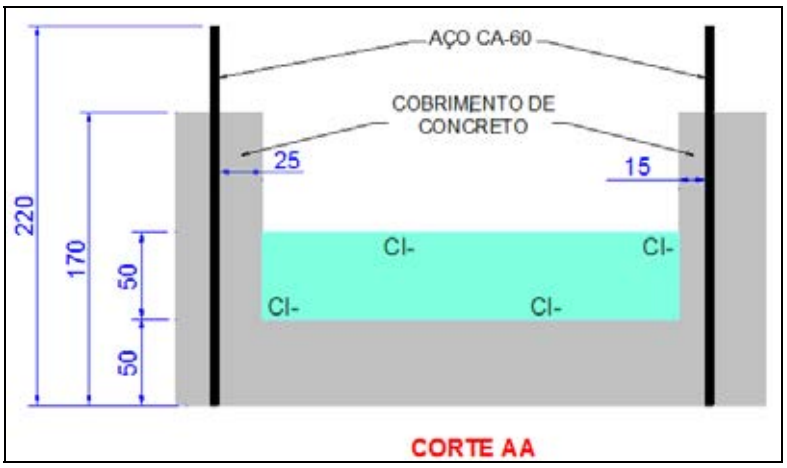
Propõe-se, segundo este modelo, que em cada lado do tanque de concreto serão posicionados seis vergalhões (aço CA-60) de diâmetro 5mm, distantes entre si por 40mm.

De acordo com esta metodologia, os aços serão submetidos a 4 situações distintas, isto é, os vergalhões possuirão cobrimentos de concreto diferentes, onde cada lado do cdp representa a uma variável independente no estudo da corrosão. Assim, este protótipo engloba as seguintes espessuras de cobrimento: 15mm, 20mm, 25mm e 30mm.

A solução salina (íons cloreto), por sua vez, localiza-se no centro do cdp, atuando sobre a barreira física de concreto.

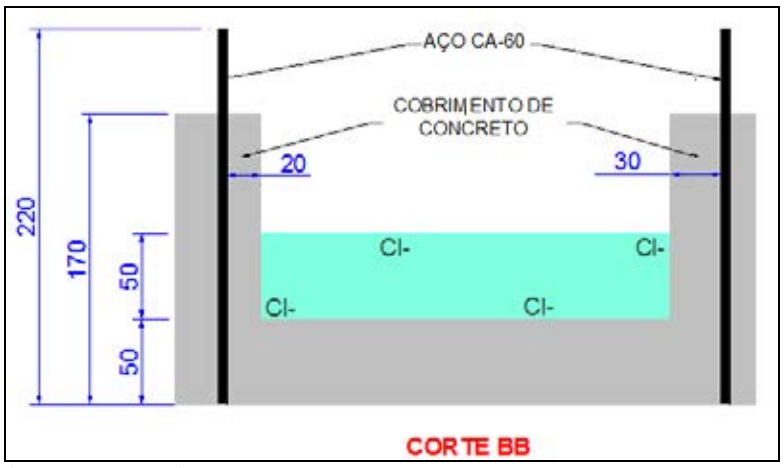
As Figuras 27 e 28, Cortes AA e BB, a seguir auxiliam a compreensão do modelo a ser estudado.

Figura 27 – Corte AA




(Fonte: AUTOR)

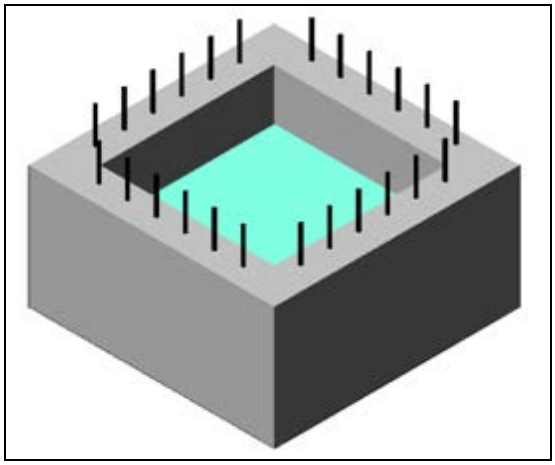
Figura 28 – Corte BB




(Fonte: AUTOR)

Por fim, segue a Figura 29 que ilustra espacialmente, o corpo de prova confeccionado.

Figura 29 – Corpo de prova em visão espacial (3 dimensões)



(Fonte: AUTOR)

### 3.3.2.1 Montagem da forma

Para garantir a qualidade da concretagem e a geometria do cdp, o primeiro passo nesta etapa foi a montagem minuciosa da forma de madeira. A partir das informações precisas do projeto do corpo de prova pôde-se extrair as medidas e a quantidade necessária de madeira para elaboração e montagem das peças.

Com o auxílio de uma serra manual a tábua de madeira foi cortada nas dimensões determinadas no projeto e, com um esquadro, garantiu-se o corte sob ângulos retos, Figura 30.

Figura 30 – Tábuas de madeira



(Fonte: AUTOR)

O preparo das formas interna e externa do cdp, Figuras 31 (a) e (b), foi executado com a assistência de um martelo e uma furadeira, os quais permitiram a fixação dos devidos pregos, parafusos e barras de ancoragem necessários ao travamento das mesmas.

Figura 31 – (a) Forma externa; (b) Forma interna




(Fonte: AUTOR)

Pode-se perceber, segundo a Figura 31 (a), a demarcação exata dos locais, nas quatro extremidades do cdp, onde os aços serão concretados, respeitando o respectivo cobrimento de concreto estabelecido em projeto. Além disso, nota-se a definição precisa da forma interna sobre a externa. Para uma melhor visualização, seguem as Figuras 32 (a) e (b).

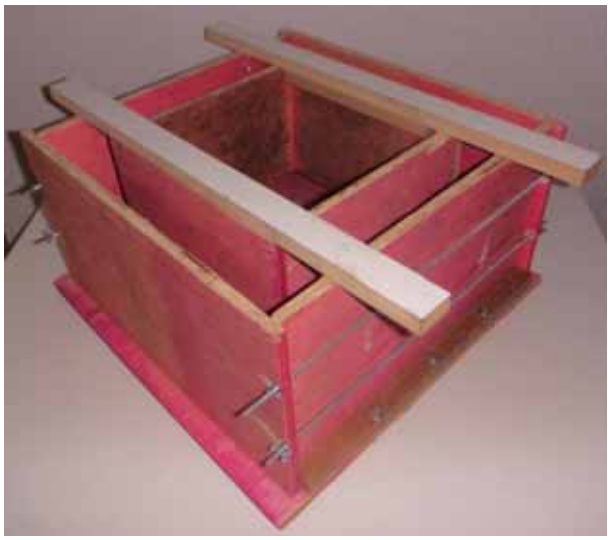
Figura 32 – (a) Visão em planta das formas; (b) Visão em perspectiva das formas




(Fonte: AUTOR)

Por fim, conforme exigência do projeto, a forma interna foi fixada a uma altura de 50mm da base. Para isto, uma madeira do tipo MDF foi pregada às duas formas, sucedendo na estrutura da Figura 33.

Figura 33 – Forma do cdp

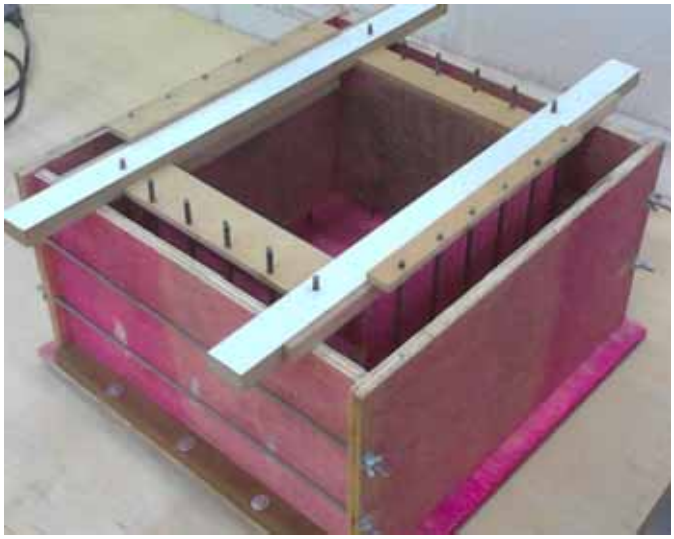


(Fonte: AUTOR)

Na sequência, realizou-se o sistema de colocação da armadura, o qual consistiu na fixação de seis vergalhões (CA-60, Φ5mm) em cada um dos quatros lados do corpo de prova,

através da demarcação exata de seus respectivos cobrimentos e da fixação em madeiras do tipo MDF, Figura 34.

Figura 34 – Disposição das armaduras na forma



(Fonte: AUTOR)

Previamente à concretagem, aplicou o desmoldante (vaselina sólida) para impedir a aderência entre o concreto e as formas de madeira. Esta operação, ilustrada na Figura 35, é indispensável, pois facilita a limpeza e a remoção do concreto, sem danificar suas arestas e superfícies. Além disso, proporciona um maior reaproveitamento e durabilidade às formas.

Figura 35 – Aplicação do desmoldante às formas



(Fonte: AUTOR)

É importante mencionar que durante a operação de concretagem, a estrutura provisória (forma) deverá suportar uma carga de trabalho caracterizada pelo peso do concreto fresco e pelas ações decorrentes do seu lançamento (descarga, espalhamento e adensamento) (FERREIRA, 2007).

### 3.3.2.2 Concretagem

Primeiramente, o produto foi preparado em uma caixa limpa e impermeável, protegida do sol, vento e chuva, próximo ao local do lançamento, Figura 36 (a). A adição de água Figura 36 (b) foi realizada lentamente, conforme especificação e quantidade (2,75L) recomendada pelo fabricante. Contudo, a consistência desejada de graute só foi obtida com a adição de 3,05L.

Figura 36 – (a) Preparo do graute; (b) Adição de água ao graute




(Fonte: AUTOR)

Posteriormente, realizou-se a mistura manual do produto (Figura 37) dada o pequeno volume a ser produzido. O procedimento foi executado até a observação do umedecimento uniforme do graute, priorizando por sua integridade e homogeneidade.

Figura 37 –Mistura manual do graute



(Fonte: AUTOR)

Subsequentemente, o concreto foi vertido sob a forma de pasta, preenchendo a totalidade da forma e envolvendo a armadura, a fim de se obter o corpo de prova projetado aos ensaios de corrosão, Figura 38 (a). Para delimitar a altura estabelecida em projeto da base de concreto uma placa de poliestireno expandido (isopor) foi fixada a 50 mm, conforme a Figura 38 (b).

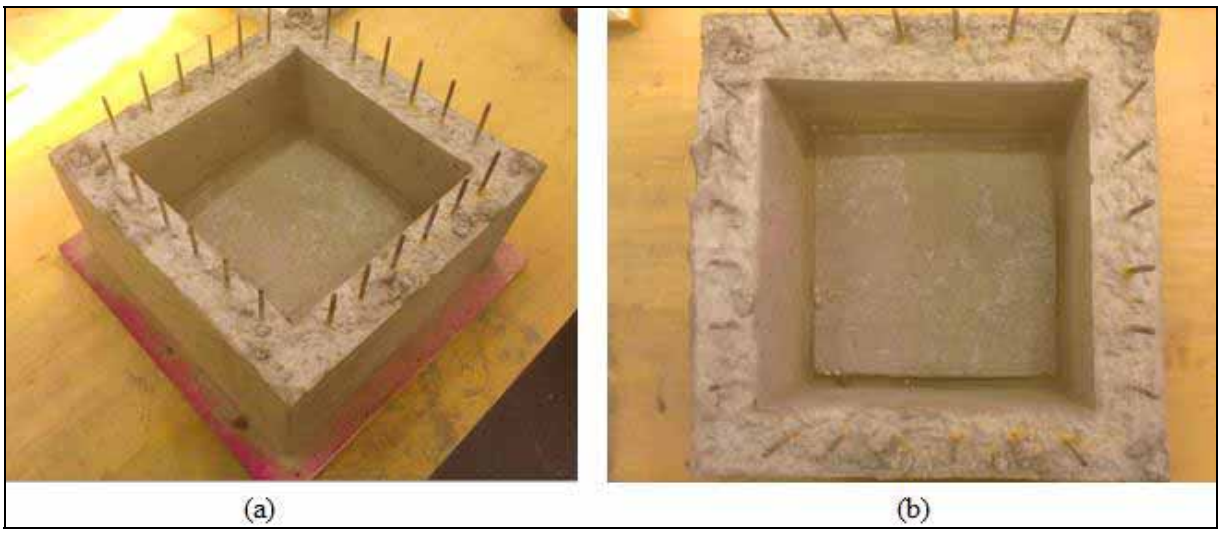
Figura 38 – Lançamento do graute – (a) Aplicação; (b) Forma preenchida




(Fonte: AUTOR)

O Graute foi molhado constantemente nos primeiros dias de idade e estabelecido o período de cura (28 dias), o qual a estrutura apresenta sua resistência final, em decorrência das reações hidratação dos compostos químicos do cimento, a forma foi cuidadosamente removida. Por fim, obteve-se o cdp, Figuras 39 (a) e (b), o qual será submetido aos ensaios eletroquímicos.

Figura 39 – Corpo de prova




(Fonte: AUTOR)

### 3.3.2.3 Ensaio de Resistência Característica ($f_{ck}$) do Graute

Para completar o estudo do graute utilizado foi realizado o controle estatístico por amostragem parcial. Com o auxílio de um técnico especializado e com cuidados especiais na cura e transporte, o ensaio consistiu na confecção de seis corpos de prova (seis exemplares), os quais foram moldados e preparados segundo a ABNT NBR 5738 (2003).

O corpo de prova cilíndrico adotado admite as medidas de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura. Previamente à moldagem, as bases e os moldes foram revestidos internamente com óleo mineral. Procedeu-se à mistura uniforme do concreto, assegurando uma distribuição simétrica dentro dos moldes, Figura 40 (a). Conforme a referida norma, o adensamento manual foi realizado em três camadas, através de 25 golpes com a haste, Figura 40 (b).

Figura 40 – (a) Lançamento; (b) Adensamento manual




(Fonte: AUTOR)

Após o adensamento da última camada foi feito o rasamento da superfície com a borda, empregando uma colher de pedreiro, sucedendo no molde ilustrado na Figura 41.

Figura 41 – Rasamento da superfície

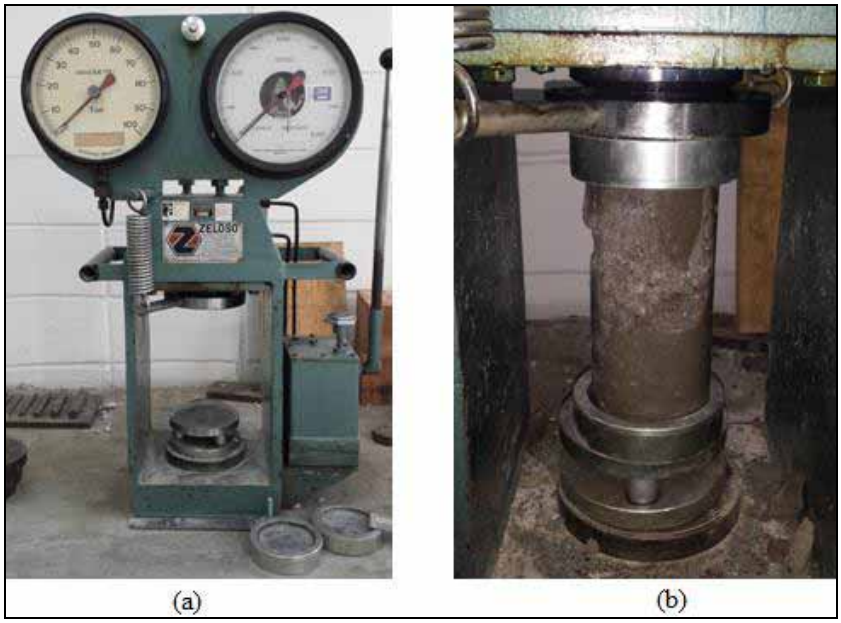


(Fonte: AUTOR)

Evitando qualquer movimento que pudesse perturbar o concreto, os corpos de prova foram desmoldados, identificados e transportados até o tanque de cura do Departamento de Engenharia Civil (DEC) da FEG/UNESP, local protegido de intempéries, onde permaneceram durante 28 dias.

A máquina utilizada no ensaio (Zeloso - Número: 335; Série: 1277; Capacidade: 100 toneladas) possui classificação 02, disponível no Laboratório de Materiais de Construção do DEC desta faculdade, Figura 42 (a). O cdp foi cuidadosamente centralizado no prato inferior, com o auxílio dos círculos concêntricos, observando o sentido de moldagem e garantindo que a resultante das forças passasse pelo centro. Conforme a ABNT NBR 5739 (2007), os corpos de prova foram rompidos, imediatamente a remoção do local de cura, Figura 42 (b).

Figura 42 – (a) Máquina de compressão; (b) Ruptura dos cdp's




(Fonte: AUTOR)

Segundo esta norma o cálculo da resistência à compressão ($f_c$) é dado pela fórmula (06).

$$fc = \frac{4F}{\pi D^2} \qquad (06)$$

Nesta fórmula, F representa a força máxima alcançada, em newtons (N) e; D o diâmetro do cdp, em milímetros (mm). Assim, $f_c$ é obtido em megapascal (MPa).

O valor médio dos resultados experimentais denomina-se resistência à compressão média do concreto ($f_{cm}$). Resistência característica do concreto à compressão ($f_{ck}$), por sua vez, é o valor mínimo estatístico acima do qual ficam situados 95% dos resultados experimentais. Para o caso desta pesquisa, caracterizada por uma quantidade de seis exemplares (n=6), a ANT NBR 12655 (1996) define o valor de $f_{ck}$ pela fórmula (07).

$$\text{fck} = 2\ \frac{f1 + f2 + \cdots + fm - 1}{\text{m} - 1} - fm;\ para\ 6 \leq n < 20 \quad (07)$$

Para este caso, m é dado por:

$$\text{m} = \frac{\text{n}}{2} = \frac{6}{2} = 3 \quad (08)$$

Logo, o valor de $f_{ck}$ se reduz à fórmula (09):

$$\text{fck} = 2\ \frac{f1 + f2}{2} - f3 \quad (09)$$

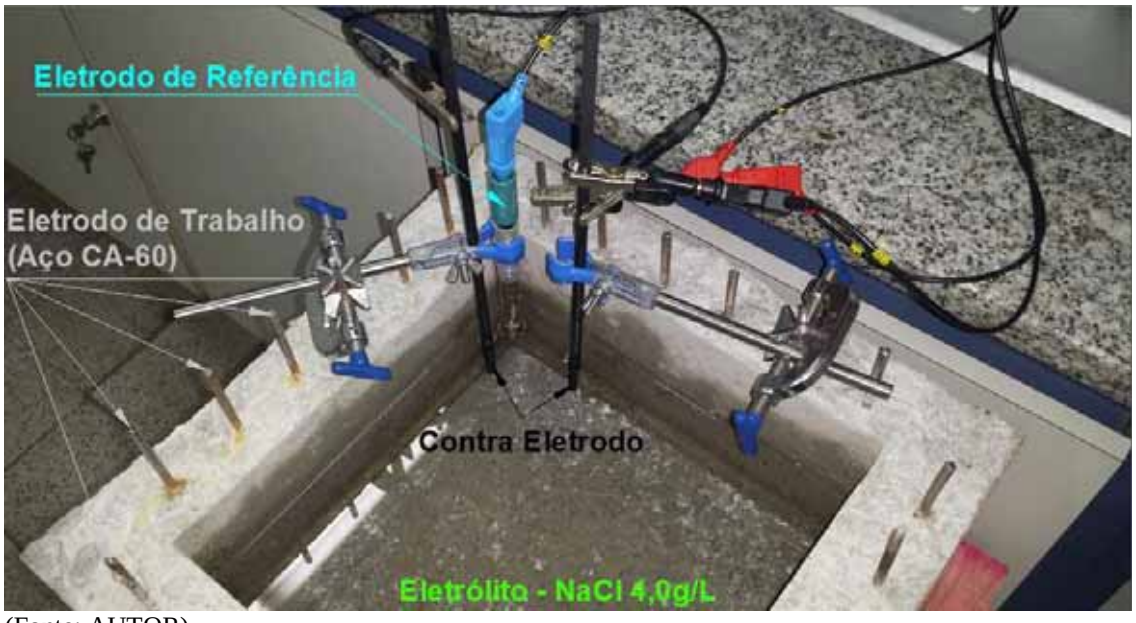
Os valores de $f_1$, $f_2$ e $f_3$ representam os valores das resistências dos exemplares, em ordem crescente. Assim, o valor estimado de $f_{ck}$ para o graute utilizado foi de 36,925MPa.

O relatório completo deste ensaio encontra-se no Apêndice.

### 3.3.2.4 Ensaios Eletroquímicos

Para avaliar a corrosão pelos íons cloreto nesta segunda etapa foram repetidas as mesmas condições experimentais dos ensaios eletroquímicos da primeira etapa com exceção do volume da solução na célula que neste ultimo caso foi de 4L, Figura 43. Como o monitoramento foi feito por um longo período de imersão (cinco semanas) tomou-se o cuidado de trocar o eletrólito semanalmente, a fim de evitar a sua própria degradação.

Figura 43 – Célula eletroquímica – Segunda etapa




(Fonte: AUTOR)

Detalhes da montagem da célula eletroquímica no potenciostato podem ser observados na Figura 44.

Figura 44 – Ensaios eletroquímicos – Segunda etapa

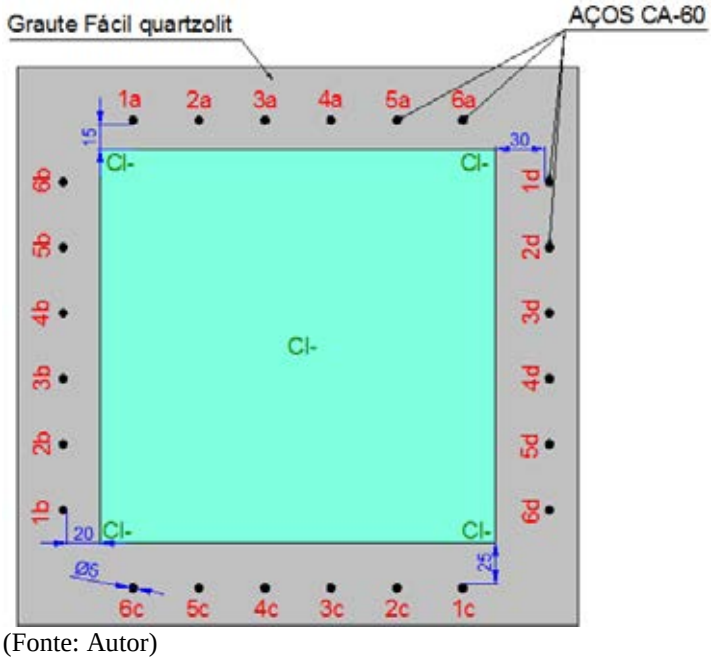


(Fonte: AUTOR)

As 24 hastes de aços foram devidamente identificadas (Figura 45), segundo o cronograma experimental pré-estabelecido. De acordo com esta nomenclatura, o número (de 1 a 6) representa a quantidade de vergalhões a uma mesma distância do eletrólito e as letras (“a”, “b”, “c” e “d”) representam, respectivamente, as diferentes espessuras de cobrimento: 15mm, 20mm, 25mm e 30mm.

As medidas eletroquímicas foram realizadas semanalmente, tomando-se um vergalhão de cada espessura de cobrimento como eletrodo de trabalho, a fim de avaliar o efeito da espessura de cobrimento por um longo período de imersão.

Figura 45 – Cronograma experimental – Segunda etapa




(Fonte: Autor)

A Tabela 9, a seguir, tem como intuito auxiliar o entendimento e apresentar detalhadamente todo cronograma experimental realizado na segunda etapa desta pesquisa.

Tabela 9 – Cronograma experimental – Segunda etapa

| **Cronograma Experimental** | | | |
|---|---|---|---|
| **Laboratório de Eletroquímica e Corrosão - FEG/UNESP**<br>**Técnicas Eletroquímicas: OCP / EIS**<br>**Aço: CA-60**<br>**Graute Fácil quartzolit**<br>**Eletrólito: Solução de íons cloreto (NaCl - 4,0 g/L)** | | | |
| **Data do Ensaio** | **Tempo de imersão** | **Identificação** | **Cobrimento (mm)** |
| 01/07/2014 | 1 dia | 1a | 15 |
| | | 1b | 20 |
| | | 1c | 25 |
| | | 1d | 30 |
| 07/07/2014 | 7 dias | 2a | 15 |
| | | 2b | 20 |
| | | 2c | 25 |
| | | 2d | 30 |
| 14/07/2013 | 14 dias | 3a | 15 |
| | | 3b | 20 |
| | | 3c | 25 |
| | | 3d | 30 |
| 21/07/2014 | 21 dias | 4a | 15 |
| | | 4b | 20 |
| | | 4c | 25 |
| | | 4d | 30 |
| 28/07/2014 | 28 dias | 5a | 15 |
| | | 5b | 20 |
| | | 5c | 25 |
| | | 5d | 30 |
| 04/08/2014 | 35 dias | 6a | 15 |
| | | 6b | 20 |
| | | 6c | 25 |
| | | 6d | 30 |

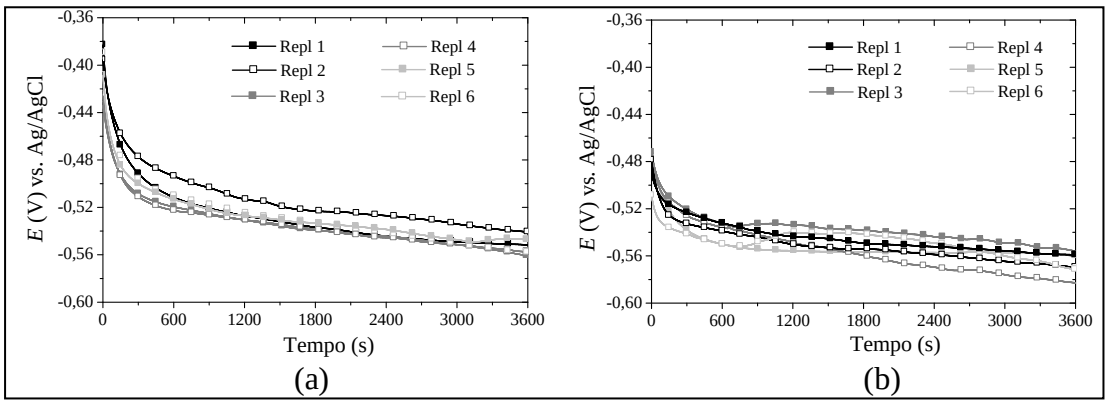
(Fonte: AUTOR)

# 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

## 4.1 PRIMEIRA ETAPA

Na Figura 46 são mostrados os gráficos de OCP obtidos em meio de NaCl 4,0 g/L para os aços CA-50 e CA-60, a partir dos quais pode ser observado um comportamento descendente da variação do potencial com o aumento do tempo de imersão, caracterizando um sistema tipicamente ativo, sem formação de filme de passivação. Boa concordância foi observada entre as replicatas obtidas, com valores de OCP que oscilaram entre -0,52 e -0,56 V para ambos os aços.

Figura 46 – Replicatas de OCP para os aços CA-50 (a) e CA-60 (b) em meio de NaCl 4,0 g/L



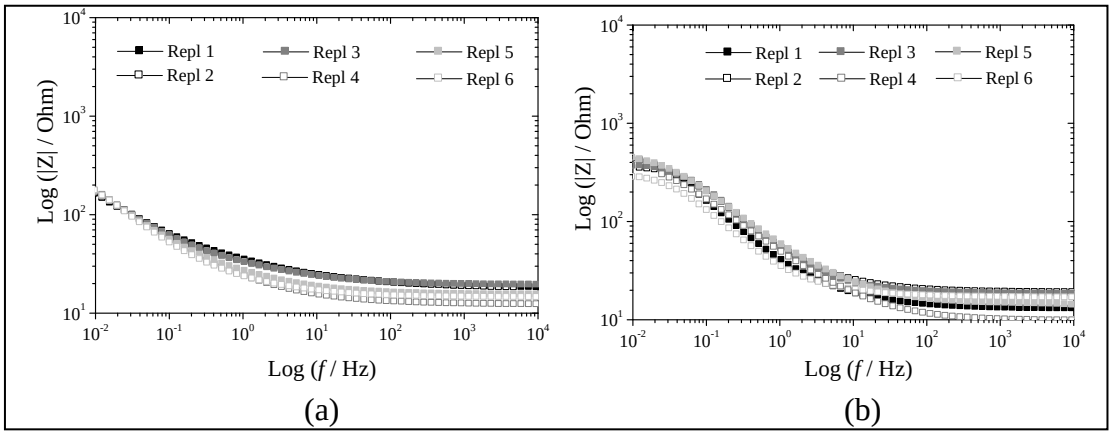

(Fonte: AUTOR)

Na análise dos espectros de EIS no formato de Bode para os aços CA-50 e CA-60, Figura 47, foram observados valores de (log $|Z|_{f\rightarrow 0}$) que variaram de 200 a 500 Ohm, ligeiramente menores para CA-50, indicando baixa resistência à corrosão no meio de cloreto.

Na representação dos mesmos espectros no formato do plano complexo, Figura 48, foram observados semicírculos distorcidos em relação ao semicírculo ideal, que representa o circuito de Randles (Figura 13). O diâmetro do arco capacitivo foi consideravelmente menor para CA-50, o que denota uma estimativa de $R_p$, a resistência de polarização, menor neste último caso, pelo fato desta representar a intersecção do arco capacitivo com o eixo real, na região de baixas frequências. Apesar disso, os valores obtidos correspondem à mesma ordem de magnitude, variando de 200 a 500 Ohm entre as replicatas, para ambos os aços. Também foi observada maior dispersão a baixas frequências para CA-60. Além disso, a forma dos semicírculos obtida para este aço mostra um retraimento dos pontos à medida que os arcos aproximam-se do eixo real, em direção a valores menores de Z'. Em geral este

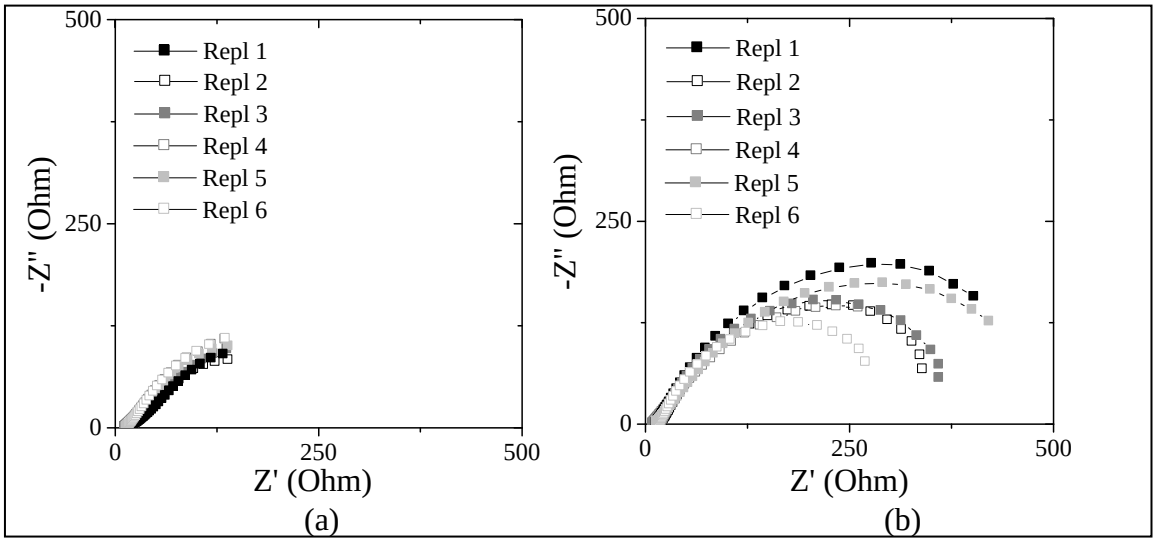
comportamento está associado a um processo de corrosão localizada, com a formação de pites sobre a superfície (GABRIELLI, 1992). Isto explica a maior dispersão entre estes resultados.

Figura 47 – Replicatas de EIS no formato de Bode, log ($|Z|_{f\rightarrow 0}$), para os aços CA-50 (a) e CA-60 (b) em meio de NaCl (4,0 g/L)




(Fonte: AUTOR)

Figura 48 – Replicatas de EIS obtidas no plano complexo, para os aços CA-50 (a) e CA-60 (b) em meio de NaCl (4,0 g/L)




(Fonte: AUTOR)

## 4.2 SEGUNDA ETAPA

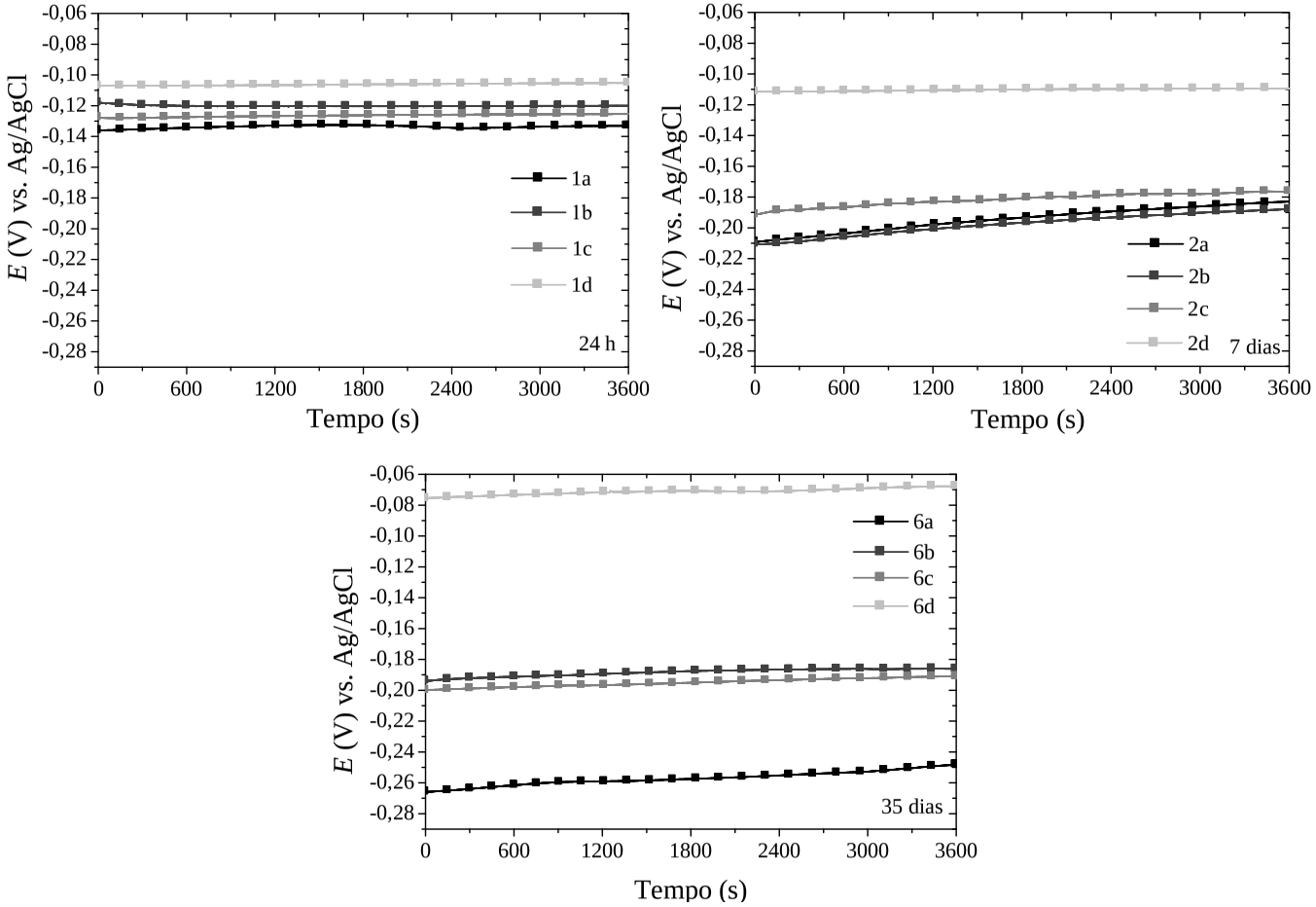
Após a análise dos resultados eletroquímicos obtidos numa primeira etapa, verificou-se que o aço CA-60 apresentou resistência à corrosão em meio de cloreto ligeiramente superior à do aço CA-50. Por este motivo, os ensaios programados para a segunda etapa, com a célula de concreto, foram realizados utilizando-se armaduras de CA-60.

Na Figura 49 estão ilustrados os gráficos de OCP obtidos para avaliar o efeito da espessura de cobrimento, na corrosão do aço CA-60 em meio de cloreto. De acordo com esta figura, verificou-se a possibilidade de realizar medidas de potencial logo após as primeiras 24 h de imersão, indicando que mesmo dentro deste curto período de tempo houve migração dos íons cloreto pelos poros do concreto. Nos estágios iniciais do monitoramento, os valores de OCP oscilaram entre -0,10 e -0,14 V, comparando-se as quatro espessuras de cobrimento. Após 7 dias houve uma diminuição significativa no potencial para as camadas menos espessas, permanecendo no valor inicial de OCP somente aquela de 30 mm de espessura.

O efeito da espessura de cobrimento na corrosão do aço torna-se mais evidente à medida que o período de imersão torna-se cada vez maior, como pode ser observado nesta mesma figura, para o gráfico com as curvas de OCP obtidas após 35 dias de monitoramento. Comparando-se este gráfico com aquele correspondente ao período de 24 h, nota-se uma diferença de mais de 0,10 V nos valores de OCP do cobrimento menos espesso (15 mm).

Verifica-se deste modo, que OCP permite estabelecer uma comparação relativa do caráter nobre de um material metálico no meio considerado, similar a uma série galvânica. Este potencial é irreversível pela própria natureza da interface metal-solução, que em um processo de corrosão, varia com o tempo. Nesta série, os valores mais positivos correspondem ao metal ou liga metálica menos susceptível à corrosão. Por outro lado, os valores de OCP menos positivos estão relacionados aos metais ou ligas com maior tendência à oxidação no meio avaliado. Assim, a analogia com uma série galvânica, mesmo mantendo o mesmo tipo de aço, torna-se elucidativa para avaliar o efeito da espessura da camada de cobrimento.

Figura 49 – Curvas de OCP obtidas para o aço CA-60 com diferentes espessuras de cobrimento em meio de NaCl (4,0 g/L)




(Fonte: AUTOR)

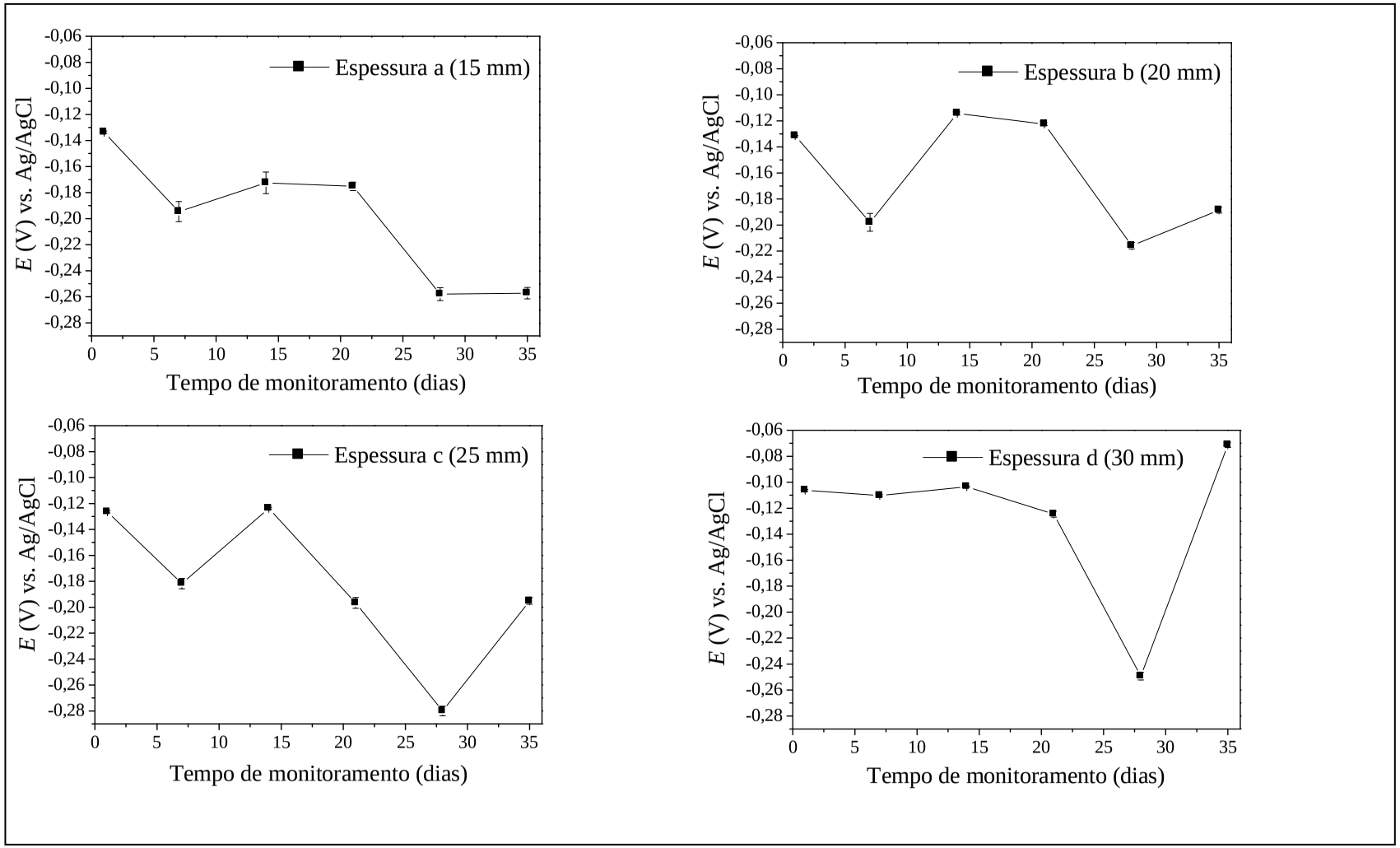
Os valores médios de cada registro de OCP com o tempo, juntamente com os respectivos valores de desvios-padrão, foram combinados de acordo com a Figura 50 para avaliar as variações no potencial durante todo o tempo de monitoramento investigado, a fim de se determinar uma relação entre esta variação com a espessura do cobrimento. De acordo com estes gráficos, tomando-se a diferença entre o maior e o menor valor de potencial, verificou-se uma diferença significativamente elevada, superior a 0,10 V para todas as espessuras estudadas, mas somente o cobrimento de maior espessura manteve as menores variações durante a maior parte do tempo (até 21 dias).

Na Figura 51 estão ilustrados os espectros de EIS obtidos no formato de Bode, que mostra a variação do módulo da impedância com a frequência. Neste formato é possível ver o efeito da resistência ôhmica ($R_\Omega$), que pode ser lida no platô a altas frequências. Verificou-se para todos os períodos de imersão avaliados que o aumento de $R_\Omega$ está associado ao aumento da espessura do cobrimento. De fato, a maior espessura torna ainda mais difícil a migração dos íons cloreto até o vergalhão, bem como dificulta a difusão de $O_2$(g) proveniente do ar atmosférico ou dissolvido na solução.

Na região de baixas frequências destes espectros pode-se estimar a resistência à corrosão, pela determinação de Log ($|Z|_{f\to 0}$). Para todas as espessuras de cobrimento avaliadas, estes valores oscilaram entre 2 e 9 kOhm, ou seja, da mesma ordem de magnitude, sendo os menores aqueles associados à menor espessura, sobretudo a 7, 21 e 35 dias. Quando os mesmos são comparados com aqueles determinados para CA-60 (1ª etapa, Figura 47), cujos resultados oscilaram entre 200 e 500 Ohm, verifica-se que as camadas de cobrimento oferecem uma proteção contra a corrosão no meio de cloreto pelo menos dez vezes maior.

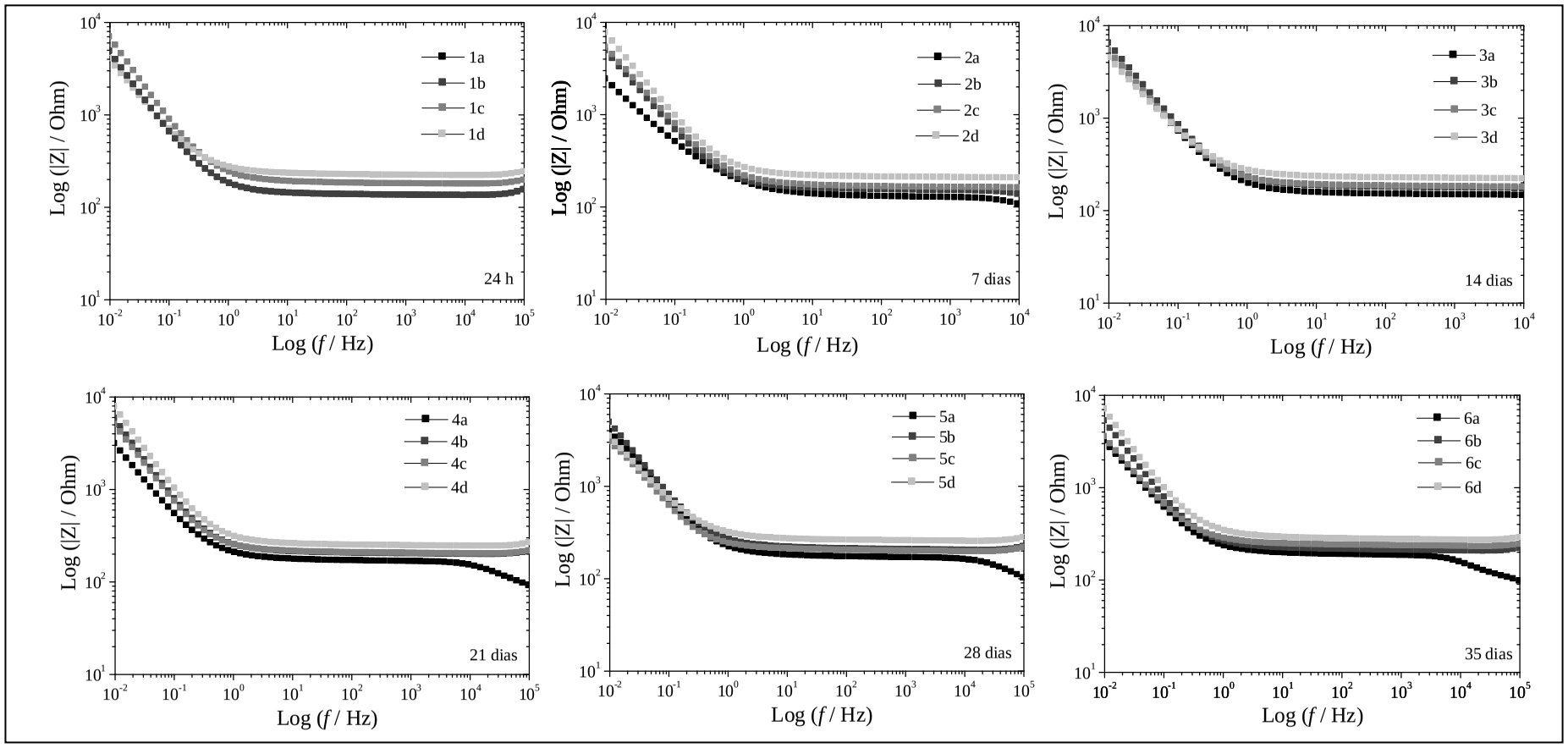
Embora a resistência de polarização, $R_p$, que pode ser estimada por EIS, não tenha variado significativamente durante o período de monitoramento investigado, na análise dos espectros de EIS representados no plano complexo, Figura 52, foram observadas variações na forma dos arcos capacitivos. Pode-se observar, por exemplo, um comportamento retilíneo a 24 horas, similar ao de um capacitor ideal (COGGER; EVANS, 1999). À medida que o tempo de imersão aumenta, observa-se um afastamento deste comportamento ideal, pois o ângulo de fase diminui, dando lugar à forma dos arcos capacitivos com diâmetros cada vez menores.

Figura 50 – Monitoramento de OCP com o tempo para CA-60 com diferentes espessuras de cobrimento, em meio de NaCl 4,0 g/L



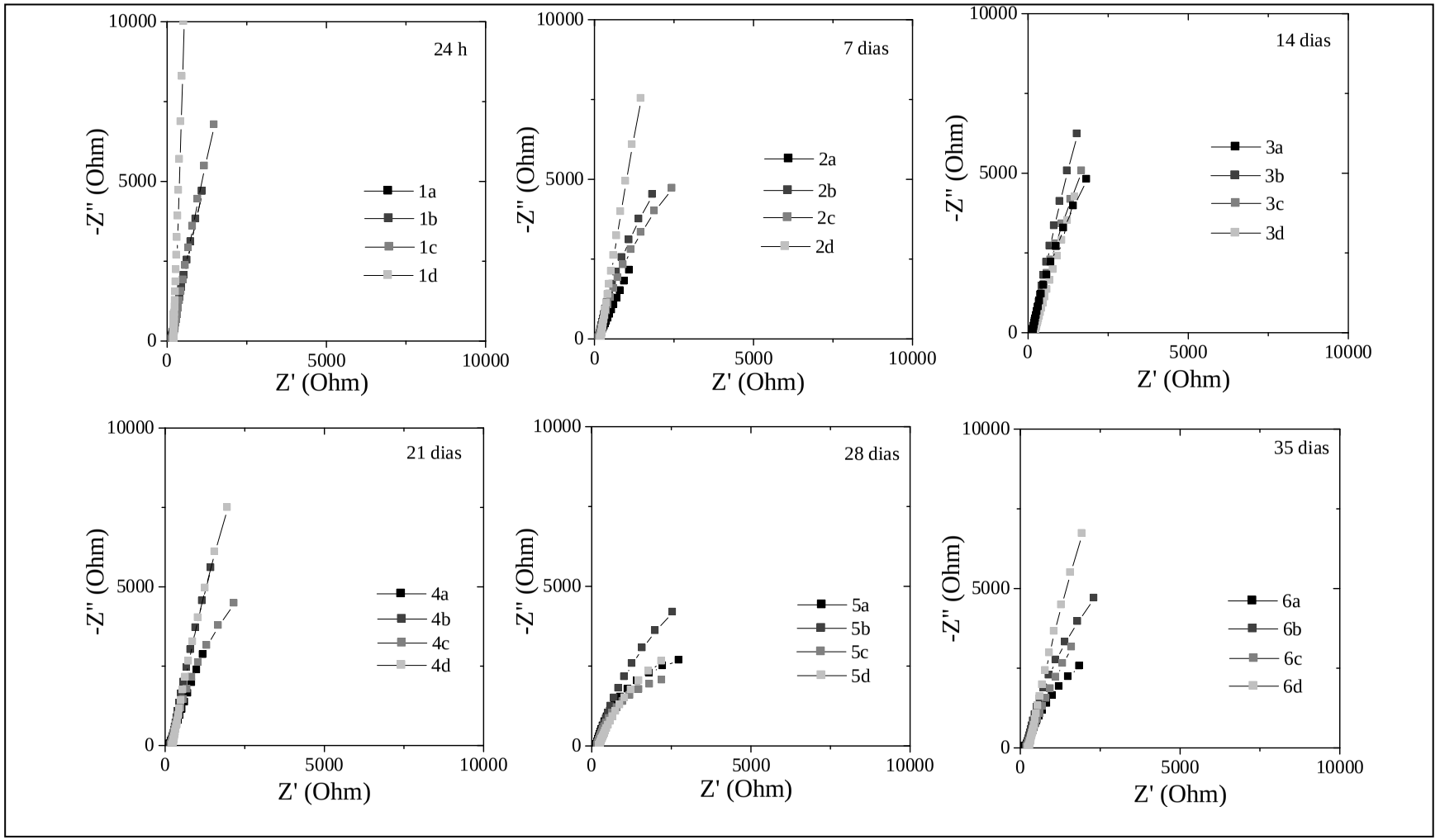

(Fonte: AUTOR)

Figura 51 – Espectros de EIS obtidos no formato de Bode para CA-60 com diferentes espessuras de cobrimento em meio de NaCl (4,0 g/L)




(Fonte: AUTOR)

Figura 52 – Espectros de EIS obtidos no formato do plano complexo para CA-60 com diferentes espessuras de cobrimento em NaCl (4,0 g/L)




(Fonte: AUTOR)

Para o aço, o mecanismo eletroquímico do processo corrosivo origina-se em inúmeras células de ação local da superfície metálica (CASCUDO, 1997). Na área anódica, inicia-se com a oxidação do ferro segundo a reação (3):

$$Fe(s) \rightarrow Fe^{2+}(aq) + 2e- \quad (3)$$

Considerando o meio neutro e aerado, a reação catódica pode ser representada pela seguinte reação (4):

$$H_2O(l) + ½\ O_2(g) + 2e- \rightarrow 2\ OH^-(aq) \quad (4)$$

Como produto de corrosão tem-se o hidróxido de ferro (II), $Fe(OH)_2$, que em meio aerado transforma-se lentamente em hidróxido de ferro (III), $Fe(OH)_3$, castanho-alaranjado, que é também escrito sob a forma de $Fe_2O_3.nH_2O$. Portanto, a coloração alaranjada tão desagradável que aparece no concreto indica que a armadura está sofrendo corrosão com uma intensidade que pode ser relacionada com a extensão dessa coloração (CASCUDO, 1997).

Os aços-carbono comuns contêm mais de 97% de Fe, até 2% de C e outros elementos remanescentes do processo de fabricação. O $O_2(g)$ e a $H_2O(l)$ constituem o meio no qual os materiais estão mais frequentemente expostos. Como os potenciais-padrão de redução do $Fe^{2+}(aq)/Fe(s)$ [$E^0$=-0,44 V] e do $Fe^{3+}(aq)/Fe^{2+}(aq)$ [$E^0$=+0,77 V] são menores que aquele para a redução de $O_2(g)$ [$E^0$=+1,23 V], o Fe(s) pode ser oxidado pelo $O_2(g)$. Para que essas reações ocorram de forma simultânea, a transferência de elétrons tem que ser através do aço, desde uma região onde acontece a oxidação do Fe(s) (anódica) até outra onde acontece a redução do $O_2(g)$ (catódica), como nas pilhas. O produto de corrosão resultante é a ferrugem, cuja formação pode ser sucintamente representada pela reação (5):

$$4Fe(s) + 3O_2(g) + 2nH_2O(l) \rightarrow 2Fe_2O_3.nH_2O(s);\ n = 1, 2, 3 \quad (5)$$

Assim, a caracterização eletroquímica do aço das armaduras pode ser representada pela resposta de um processo de corrosão que ocorre no potencial de circuito aberto, devida à ocorrência de reações paralelas, anódica (oxidação do aço) e catódica (redução do oxigênio).

# 5 CONCLUSÃO

Verificou-se pela resposta eletroquímica um processo de dissolução ativa, medida no potencial de circuito aberto, dos aços CA-50 e CA-60 em meio de NaCl 4,0 g/L.

A estimativa da resistência de polarização por EIS conduziu a resultados ligeiramente diferentes, porém dentro da mesma ordem de magnitude para ambos os aços, indicando que, apesar dos mesmos serem submetidos a processamentos distintos durante a etapa de fabricação, o comportamento eletroquímico não se altera substancialmente.

Pelo fato desta análise incluir técnicas não destrutivas (OCP e EIS), o monitoramento da corrosão das armaduras tornou-se possível durante períodos relativamente longos, como dias ou semanas, indicando que este estudo pode ser estendido para períodos de imersão ainda maiores, como meses ou anos, até a despassivação do aço.

# REFERÊNCIAS

ALANIS, I. L.; BERARDO, L. N.; VALENTINI, C. **Construção civil: corrosão do aço em estruturas de concreto armado.** Guia Prático da Corrosão. Programa Iberoamericano de Ciência e Tecnologia para o Desenvolvimento – CYTED. Rio de Janeiro: Ricorr, 1994.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Corrosion of metals in concrete: reported by ACI Committee 222. **ACI Manual of Concrete practice**. Detroit, 1990. v.1.

ANDRADE, C. **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras.** São Paulo: Ed. Pini, 1992. 104p.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto – Preparo, controle e recebimento:** NBR 12655. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova:** NBR 5738. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto de estruturas de concreto:** NBR 6118. Rio de Janeiro, 2003.

BAKKER, R. F. M. Initiation period. In: Schiessl, P., ed. **Corrosion of steel in concrete.** London, Chapman and Hall, 1988. Cap. 3, p.22-55.

BOUTEILLER, V.; CREMONA, C.; BAROGHEL-BOUNY, V.; MALOULA, **A. Corrosion initiation of reinforced concretes based on Portland or GGBS cements: Chloride contentes and electrochemical characterizations versus time.** Cement and Concrete-Research. Lausanne, 2012. 42: 1456-1467.

CÁNOVAS, F. M. **Patologia e terapia do concreto armado.** São Paulo: Ed. Pini, 1988.

CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto.** Inspeção e técnicas eletroquímicas. São Paulo: Ed. Pini, 1997.

CASTRO, P.; CASTILHO, R. M.; CARPIO, J. J.; GENESCÁ, J.; HELENE, P; LÓPEZ, W.; PAZINI, E. J.; SANJUAN, M. A. **Corrosión em estructuras de concreto armado – Teoria, inspección, diagnóstico, vida útil y reparaciones.** Instituto Mexicano Del Cemento y Del Concreto, A. C., México, 1998.

CHEN, W.; DU, R-G.; YE, C-Q.; ZHU, Y-F.; LIN, C-J. **Study on the corrosion behavior of reinforcing steel in simulated concrete pore solutions using in situ Raman spectroscopy assisted by electrochemical techniques.** Electrochimica Acta. Leicester, 2010. 55: 5677-5682.

COGGER, N. D.; EVANS, N. J. **An Introduction to Electrochemical Impedance Measurement.** Technical Report No. 6.Solartron Limited. Hampshire, 1999.

COMITÉ EURO–INTERNATIONAL DU BETÓN – CEB. **Durability of concrete structures.** Report of CEB-RILEM International workshop. Copenhague, May, 1983 (Bulletin d'information, 152, 1984).

EG&G, Princeton Applied Research. B**asic of Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS).** AC-1. Princeton, 1989.

FERREIRA, J. B. **Patologias e recuperação de estruturas de concreto armado (Notas de Aula).** Guaratinguetá, 2005 - Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá.

FERREIRA, J. B. **Tecnologia da Construção Civil (Notas de Aula).** Guaratinguetá, 2007 - Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá.

GABRIELLI, G. C.; KEDDAM, M. **Review of applications of impedance and noise analysis to uniform and localized corrosion.** Corrosion, Houston, 1992. v. 48, p. 794-799.

GAUTO, M.; ROSA, G. **Química Industrial.** Porto Alegre: Ed. Bookman, 2013.

GENTIL, V. **Corrosão.** 4ªed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2003. 341p.

HELENE, P. e TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto.** São Paulo: Ed. Pini, 1992. 349 p.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado.** São Paulo, 1993. 231p. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
HELENE, P. R. L. **Corrosão em armaduras para concreto armado.** São Paulo: Ed. Pini, 1986.

JAMIL, H. E.; SHIRI, A.; BOULIF, R.; MONTEMOR, M. F.; FERREIRA, M. G. S. **Corrosion behavior of reinforcing steel exposed to an amino alcohol based corrosion inhibitor.** Cement & Concrete Composites. Vancouver, 2005. 27: 671-678.

MANERA, M.; VENNESLAND, Y.; BERTOLINI, L. **Chloride threshold for rebar corrosion in concrete with addition of silica fume.** Corrosion Science. Cambridge, 2008. 50: 554-560.

MEDEIROS, M. H. F. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos com proteção superficial frente à ação de cloretos.** São Paulo, 2008.

MONTEIRO, E. C. B. **Avaliação do método de extração eletroquímica de cloretos para reabilitação de estructuras de concreto com problemas de corrosão de armaduras.** São Paulo, 2002.

ORMELLESE, M.; LAZZARI, L.; GOIDANICH, S.; FUMAGALLI, G.; BRENNA, A. **A study of organic substances as inhibitors for chloride-induced corrosion in concrete.** Corrosion Science. Cambridge, 2009. 51: 2959-2968.

PORTELLA, K. F.; GARCIA, C. M.; VERGÉS, G. R.; JOUKOSKI, A.; FREIRE, K. R. R.; CORRÊA, A. P. **Desempenho físico-químico de metais e estruturas de concreto de redes de distribuição de energia: estudo de caso na região de Manaus.** Química Nova. São Paulo, 2006. 29: 724-734.

REOU, J. S.; ANN, K. Y. **Electrochemical assessment on the corrosion risk of steel embedment in OPC concrete depending on the corrosion detection techniques.** Materials Chemistry and Physics. Sydney, 2009. 113: 78-84, 2009.

RIBEIRO, J. L. S. **Contribuição para a avaliação da compatibilidade eletroquímica entre argamassas de reparo e concreto carbonatado.** São Paulo, 2009.

SERRA, E. T. **Corrosão e proteção anticorrosiva dos metais no solo.** Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL). Rio de Janeiro, 2006.

TAIT, W. S. **An introduction to electrochemical corrosion testing for practicing engineers and scientists.** PairODocs Publications. Racine, Wis, 1994.

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

VIEIRA, F. M. P. **Contribuição ao estudo da corrosão de armaduras em concretos com adição de sílica ativa.** Porto Alegre, 2003.

# APÊNDICE – RESULTADOS: ENSAIO ($f_{ck}$) DO GRAUTE

**RESULTADOS - ENSAIO DE RESISTÊNCIA CARACTERÍSTICA DO GRAUTE**
**ABNT NBR 5739 - ENSAIO DE COMPRESSÃO DE CORPOS-DE-PROVA CILÍNDRICOS**

Número de Amostras: 6
Data de Moldagem: 23/06/2014
Idade do CDP's: 28 dias
Data do Ensaio: 21/07/2014
Tipo de Capeamento Empregado: Base de aço em Neoprene
Classe da Máquina de Ensaio: 02

| CDP | Dimensões (mm) | | Relação h/d | Força Máxima Alcançada (N) | Resistência à compressão individual (MPa) |
|---|---|---|---|---|---|
| | Altura (h) | Diâmetro (d) | | | |
| 1 | 200 | 100 | 2,00 | 290000,000 | 36,925 |
| 2 | 200 | 100 | 2,00 | 295000,000 | 37,562 |
| 3 | 200 | 100 | 2,00 | 295000,000 | 37,562 |
| 4 | 200 | 100 | 2,00 | 300000,000 | 38,198 |
| 5 | 200 | 100 | 2,00 | 295000,000 | 37,562 |
| 6 | 200 | 100 | 2,00 | 300000,000 | 38,198 |

**$f_1$ = 36,925 MPa**

**$f_2$ = 37,562 MPa**

**$f_3$ = 37,562 MPa**

$$fck = 2\ \frac{f1 + f2}{2} - f3$$

**∴ fck = 36,925 MPa**