UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

ESCOLA DE QUÍMICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA
DE PROCESSOS QUÍMICOS E BIOQUÍMICOS

Lisiane Gonçalves Lima

AVALIAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA DOS CRITÉRIOS DE PROTEÇÃO CATÓDICA EM MEIOS DE DIFERENTES RESISTIVIDADES

RIO DE JANEIRO, RJ

2007

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

ESCOLA DE QUÍMICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA
DE PROCESSOS QUÍMICOS E BIOQUÍMICOS

Lisiane Gonçalves Lima

AVALIAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA DOS CRITÉRIOS DE PROTEÇÃO CATÓDICA EM MEIOS DE DIFERENTES RESISTIVIDADES

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências.

Orientadores: Simone Louise Delarue Cezar Brasil e Walmar Baptista

Rio de Janeiro, RJ

2007

Lima, Lisiane Gonçalves
Avaliação Técnico-econômica dos critérios de proteção catódica em meios de diferentes resistividades / Lisiane Gonçalves Lima. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2007.
xv, 116 f.: il.

Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2007.

Orientadores: Simone Louise Delarue Cezar Brasil e Walmar Baptista

1. Corrosão. 2. Proteção Catódica. 3. Critérios de proteção. 4. Escola de Química – Teses. I. Brasil, Simone Louise Delarue Cezar e Baptista, Walmar (Orient.). II. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Programa de Pós Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos. III. Título.

AVALIAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA DOS CRITÉRIOS DE PROTEÇÃO CATÓDICA EM MEIOS DE DIFERENTES RESISTIVIDADES

Lisiane Gonçalves Lima

Tese submetida ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, da Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências.

Aprovado por:

_____
Simone Louise D. Cezar Brasil, D. Sc. – EQ/UFRJ
(orientadora – presidente da banca)

_____
Walmar Baptista, D.Sc. – CENPES/PETROBRAS
(orientador)

_____
Denise Souza de Freitas, Ph. D. – LACOR/INT

_____
Eliana Flávia C. Sérvulo, D. Sc. – EQ/UFRJ

_____
Ladimir José de Carvalho, D. Sc. – EQ/UFRJ

Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Fevereiro, 2007

Ao meu pai, Allan Kardec, e às minhas irmãs, Aline e Lidia, forças que me trouxeram até aqui.

E, em especial, à minha mãezinha Nicéa ("in memorian"), sempre presente em todos os passos desta caminhada.

AGRADECIMENTOS

A Deus por sua permanente presença nesta trajetória terrena, através de pessoas tão especiais e queridas como meus amigos, mestres e familiares.

Ao meu amor e melhor amigo, Renato Serra, pela compreensão nos momentos de ausência e incentivo nos momentos de crise.

À minha mestra e amiga Simone Brasil, peça fundamental desta conquista, por todo apoio, motivação, orientação e confiança depositados em mim e neste trabalho.

Ao Dr. Walmar Baptista, do Centro de Pesquisas da Petrobrás (CENPES), por sua valiosa contribuição no enriquecimento técnico deste trabalho.

Ao técnico Flávio Maia, pela confecção dos eletrodos de trabalho, indispensáveis à realização dos ensaios experimentais.

À pesquisadora Rosane Brito, do CENPES, pelo auxílio técnico prestimoso na fase de elaboração do método experimental.

Às pesquisadoras Milagros e Helga, do Instituto Nacional de Tecnologia (INT), pela preciosa ajuda nas fotografias microscópicas e análises de pite.

Às professoras Lídia Yokoyama e Valéria Castro e toda equipe técnica do Laboratório de Processos Inorgânicos, da Escola de Química (EQ/UFRJ), por toda ajuda e boa-vontade, durante os ensaios experimentais.

Às amigas de jornada Michele Pires, Aline Marta e Aline Ramos, pelo “ouvido”, amizade e carinho nos momentos agradáveis e, principalmente, nos mais difíceis.

A todos os meus familiares e amigos, pela paciência e por acreditarem em mim. Só vocês sabem as dificuldades enfrentadas durante este caminho.

Aos mestres e diretores da Escola de Química, UFRJ, pela formação em Química Industrial e pelo curso de Mestrado, bases desta conquista.

E, por fim, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ), pelo apoio financeiro.

O insucesso é apenas uma oportunidade para
começar de novo, com mais inteligência.
Henry Ford

RESUMO

LIMA, Lisiane Gonçalves. **Avaliação Técnico-econômica dos Critérios de Proteção Catódica em meios de diferentes resistividades**. Rio de Janeiro, 2007. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

O aço constitui a base da civilização moderna e, por isso, a sua resistência à corrosão é a grande preocupação dos pesquisadores, que buscam tornar este material imune à destruição. Dentre os métodos de combate à corrosão, a proteção catódica (PC) ocupa lugar de destaque como a técnica que, termodinamicamente, através de corrente galvânica ou impressa, impede os processos corrosivos. Um dos parâmetros básicos do projeto de PC é a corrente de proteção requerida para a manutenção de um potencial eletroquímico no qual a estrutura adquira taxa de corrosão desprezível. A literatura apresenta diferentes critérios para estabelecer esta corrente de proteção, entretanto, existem poucos estudos que comprovem a eficiência e viabilidade técnico-econômica destes critérios. Dentro deste cenário, o presente trabalho analisou os dois critérios de proteção catódica mais utilizados em campo: o potencial eletroquímico mínimo (-850 $mV_{Cu/CuSO4}$ ou -800 $mV_{Ag/AgCl}$) e a variação de 100 mV catódicos. Foram estudados quatro diferentes eletrólitos, caracterizados pela resistividade: *areia, com 35% e 5% de umidade*; *água destilada* e *solução de NaCl 3,5% p/v*, empregando a técnica da proteção catódica por corrente impressa em amostras cilíndricas de aço-carbono SAE 1020, sem revestimento, com área de 2,6 cm^2, aproximadamente. Para este estudo, utilizou-se um potenciostato automatizado no registro da corrente de proteção, em função dos potenciais aplicados em cada critério, durante 30 dias. Preliminarmente, foram obtidas as curvas de polarização nos diferentes meios, a fim de prever a corrente requerida para manutenção do potencial de proteção dos critérios analisados. A eficiência dos sistemas de PC foi avaliada através de ensaios de perda de massa e análise de pite. Por último, foram projetados sistemas simplificados de proteção catódica para avaliar o custo da aplicação de cada critério. Os resultados dos ensaios de polarização catódica apresentaram, como esperado, valores mais elevados de densidade de corrente para o critério do potencial mínimo, em relação ao critério dos 100 mV catódicos, para todos os meios analisados, embora, para os eletrólitos de menor resistividade, não tenha sido observada diferença significativa dos valores de densidade de corrente entre os dois critérios. De acordo com os resultados de perda de massa e análise de pite, o aço foi protegido integralmente em todos os casos, constatando, desta forma, a eficiência da proteção catódica por corrente impressa, em ambos os critérios, para os eletrólitos investigados. Entretanto, a perda de massa está relacionada à resistividade, podendo estabelecer-se a seguinte ordem crescente de corrosividade, para os critérios estudados: areia com 5% de umidade < areia com 35% de umidade < água destilada < solução de NaCl 3,5% p/v. A água destilada apresentou maior taxa de corrosão frente à areia com 35% de umidade, devido à difusão do oxigênio no meio, que se mostrou um fator preponderante, para os meios líquidos. A análise dos custos dos projetos de PC revelou que a aplicação do critério dos 100 mV catódicos é a menos onerosa para todos os meios investigados, em especial nas areias.

ABSTRACT

LIMA, Lisiane Gonçalves. **Technical and economic evaluation of cathodic protection criteria in different electrolytes.** Rio de Janeiro, 2007. Thesis (Master of Science in Technology of Chemical and Biochemists Processes) – School of Chemistry, Federal University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

Steel is the base of the modern civilization and, therefore, its resistance to corrosion is very important in order to guarantee the integrity of metallic structures. Cathodic protection (CP), by galvanic or impressed current, is a only technique that eliminates, completely, the corrosion processes. The current requirement to keep the electrochemical potential in a adequate level is one of the most important parameters of CP design. Some different criteria to establish the protection can be found in the literature. However, a few number of research works have been reported about the viability and efficiency of these criteria. This work analyzed two criteria applied in real systems: minimum electrochemical potential criterion (-850 $mV_{Cu/CuSO4}$ or -800 $mV_{Ag/AgCl}$) and 100 mV cathodic polarization criterion. Four different electrolytes were considered: *sand, with 35% and 5% of humidity; distilled water and 3,5% w/v NaCl solution*. An impressed current CP system was used in order to polarize cylindrical steel-carbon SAE 1020 samples without coatings and area of 2,6 cm^2. For this study, an equipment was used to control the potential values, by means of current source, being these values registered during 30 days. Initially, polarization curves were obtained in order to verify the current level necessary to keep the potential within each criterion analyzed. The efficiency of the CP systems was evaluated through weight loss and pitting analysis. At last, CP systems simplified projects were made in order to evaluate the cost of the application of each criterion.The results of polarization have shown, as expected, higher current density values when the minimum potential criterion was considered, in relation to the 100 mV criterion. For low resistivity electrolytes, a small difference between the current density needed to maintain the potential within the level adopted for each criterion was observed. According to the weight loss and pitting results, it was verified the protection of the steel in all electrolytes, for both criteria. However, the weight loss could be related to resistivity, were estabilished the crescent corrosivity order: sand with 5% of humidity < sand with 35% of humidity < distilled water < 3,5% w/*v* NaCl solution. The distilled water have shown higher corrosion rate values, in relation to the sand with 35% of humidity, due to oxygen difusion in the electrolyte, preponderant factor in liquid eletrolytes. The aplication of 100 mV criterion is the least onerous, according to evaluation of the costs of the CP systems projects.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

2.1 – Representação esquemática de uma pilha de corrosão. 7

2.2 – Esquema ilustrativo das ligações usadas para medição do potencial estrutura / solo (a); estrutura / água do mar (b). 10

2.3 – Esquema ilustrativo de pilhas de ação local. 12

2.4 – Pilha de corrosão, em solo de diferentes concentrações. 13

2.5 – Corrosão do aço em contato com o concreto. 14

2.6 – Pilha de corrosão causada por estradas de ferro eletrificadas. 15

2.7 – Corrosão eletrolítica em tubulação enterrada. 15

2.8 – Desenho esquemático das principais formas de corrosão. 17

2.9 – Diagrama de Pourbaix para o sistema Fe-H_2O, a 25ºC e 1 atm. 21

2.10 – Aspecto geral das curvas de polarização anódica e catódica. 23

2.11 – Aspecto da curva de polarização anódica obtida pelo método potenciostático para um metal que apresenta transição ativo / passivo. 24

2.12 – Esquema de sistemas de medições com o potenciostato. 24

2.13 – Sistema típico de proteção galvânica, por anodo de magnésio. 34

2.14 – Sistema típico de proteção por corrente impressa. 36

2.15 – Variação do potencial com aplicação da proteção catódica. 42

2.16 – Esquema da instalação para medir resistividade do solo. 46

2.17 – Variação da densidade de corrente de proteção do aço, em função da resistividade elétrica do meio. 50

2.18 – Fator “f”, em função da velocidade relativa estrutura / meio. 51

2.19 – Exemplos de leitos de anodos. 55

3.1 – Amostra de aço-carbono SAE 1020 usada nos ensaios experimentais. 59

3.2 – Representação esquemática de uma “soil box”. 62

3.3 – Contra-eletrodo de aço inoxidável, utilizado nos ensaios de polarização. 64

3.4 – Eletrodo de trabalho, de aço-carbono, utilizado nos ensaios de polarização. 64

3.5 – Esquema simplificado do sistema célula / potenciostato para os ensaios de polarização. 65

3.6 – Células utilizadas nos ensaios de aplicação do critério do potencial mínimo de proteção: (a) amostra; (b) branco. 66

3.7 – Células utilizadas nos ensaios de aplicação do critério dos 100 mV catódicos: (a) amostra; (b) branco. 67

3.8 – Esquema típico de um sistema de proteção catódica por corrente impressa para uma tubulação enterrada. 69

3.9 – Esquema típico de um sistema de proteção catódica por corrente impressa para um emissário submarino. 70

4.1 – Variação da resistividade da areia de rio lavada, em função da umidade. 72

4.2 – Curvas de polarização anódica e catódica, obtidas para o aço-carbono SAE 1020, eletrólito: água destilada. 75

4.3 – Curvas de polarização anódica e catódica, obtidas para o aço-carbono SAE 1020 – eletrólito: solução de NaCl 3,5% p/v. 76

4.4 – Curvas de polarização anódica e catódica, obtidas para o aço-carbono SAE 1020 – eletrólito: areia. 77

4.5– Curvas de polarização anódica e catódica, obtidas para o aço-carbono SAE 1020 – eletrólito: areia com 5% de umidade. 78

4.6 – Curvas de polarização anódica e catódica, obtidas para o aço-carbono SAE 1020 – eletrólito: areia com 35% de umidade. 79

4.7 – Polarização catódica do aço-carbono SAE 1020, para meios de diferentes resistividades, utilizando o critério do potencial mínimo. 80

4.8 – Comparação da densidade de corrente obtida na polarização catódica do aço em areias de diferentes umidades, utilizando o critério do potencial mínimo. 82

4.9 – Polarização catódica do aço-carbono SAE 1020, para meios de diferentes resistividades, utilizando o critério dos 100 mV catódicos. 83

4.10 – Comparação da densidade de corrente obtida na polarização catódica do aço em areias de diferentes umidades, aplicando-se o critério dos 100 mV catódicos. 85

4.11 – Comparação entre os critérios de proteção para o aço-carbono SAE 1020, eletrólito: água destilada. 86

4.12 – Comparação entre os critérios de proteção para o aço-carbono SAE 1020, eletrólito: solução de NaCl 3,5% p/v. 86

4.13 – Comparação entre os critérios de proteção para o aço-carbono SAE 1020, eletrólito: areia com 5% de umidade. 87

4.14 – Comparação entre os critérios de proteção para o aço-carbono SAE 1020, eletrólito: areia com 35% de umidade. 88

4.15 – Comparação entre as taxas de corrosão, em **mm/ano**, do aço-carbono SAE 1020, nos quatro meios estudados, em cada critério empregado. 90

4.16 – Comparação entre as taxas de corrosão, em **mpy**, do aço-carbono SAE 1020, nos quatro meios estudados, em cada critério empregado. 90

4.17 – Comparação entre as taxas de corrosão, em **mdd**, do aço-carbono SAE 1020, nos quatro meios estudados, em cada critério empregado. 91

4.18 – Micrografia do corpo-de-prova de aço-carbono SAE 1020, antes dos ensaios de polarização e perda de massa (aumento: 6x). 93

4.19 – Micrografias dos corpos-de-prova de aço-carbono SAE 1020, após ensaio em areia com 5% de umidade em: **(a)** -850 mV; **(b)** -100 mV; **(c)** sem polarização (aumento: 6x). 93

4.20 – Micrografias dos corpos-de-prova de aço-carbono SAE 1020, após ensaio em areia com 35% de umidade em: **(a)** -850 mV; **(b)** -100 mV; **(c)** sem polarização (aumento: 6x). 94

4.21 – Micrografias dos corpos-de-prova de aço-carbono SAE 1020, após ensaio em solução de NaCl 3,5% p/v em: **(a)** -800 mV; **(b)** -100 mV; **(c)** sem polarização (aumento: 6x). 95

4.22 – Micrografias dos corpos-de-prova de aço-carbono SAE 1020, após ensaio em água destilada em: **(a)** -800 mV; **(b)** -100 mV; **(c)** sem polarização (aumento: 6x). 96

4.23 – Micrografias dos corpos-de-prova de aço-carbono SAE 1020, após os ensaios de polarização e perda de massa, nos 4 meios e nos dois critérios investigados (aumento: 50x). 97

4.24 – Micrografias dos corpos-de-prova de aço-carbono SAE 1020, antes dos ensaios de polarização e perda de massa (aumento: 50x). 98

4.25 – Micrografias e gráficos 3D dos principais pites observados nos corpos-de-prova de aço-carbono SAE 1020, após 30 dias de contato com a areia com 35% de umidade (aumento: 50x). 99

4.26 – Micrografias e gráficos 3D dos principais pites observados nos corpos-de-prova de aço-carbono SAE 1020, após 30 dias de contato com a solução de NaCl 3,5% p/v (aumento: 50x). 99

4.27 – Micrografias e gráficos 3D dos principais pites observados nos corpos-de-prova de aço-carbono SAE 1020, após 30 dias de contato com água destilada (aumento: 50x). 100

LISTA DE TABELAS

2.1 – Principais constituintes da água do mar. 9

2.2 – Série Galvânica Prática. 11

2.3 – Série Prática de Nobreza em água do mar. 11

2.4 – Classificação da resistência relativa à corrosão de ligas típicas de ferro e níquel, de acordo com a taxa de corrosão, em mpy. 27

2.5 – Corrosividade em função da resistividade e do potencial para o aço. 47

2.6 – Anodos inertes para sistemas de corrente impressa. 53

2.7 – Massa unitária de anodos. 54

3.1 – Composição química percentual do aço-carbono SAE 1020. 59

4.1 – Caracterização dos meios analisados, segundo valores de pH, resistividade e condutividade elétrica, à temperatura ambiente. 72

4.2 – Corrosividade em função da resistividade e do potencial para o aço 73

4.3 – Evolução do potencial de corrosão, durante as 4 semanas de ensaio. 83

4.4 – Taxas de corrosão das "**amostras**" de aço-carbono SAE 1020, expressas em **mm/ano**, **mdd** e **mpy**, para os quatro meios analisados: água destilada, solução de NaCl 3,5% p/v, areias com 5% e 35% de umidade após 30 dias de polarização. 89

4.5 – Taxas médias de corrosão dos "**brancos**" de aço-carbono SAE 1020, expressas em **mm/ano**, **mdd** e **mpy**, para os quatro meios analisados: água destilada, solução de NaCl 3,5% p/v, areias com 5% e 35% de umidade após 30 dias de polarização. 89

4.6 – Características aplicadas à instalação de um sistema de proteção catódica por corrente impressa para estruturas enterradas ou submersas, utilizando-se o critério do potencial mínimo de proteção. 102

4.7 – Características aplicadas à instalação de um sistema de proteção catódica por corrente impressa para estruturas enterradas ou submersas, utilizando-se o critério dos 100 mV catódicos. 103

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO 1

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 6

2.1 CORROSÃO EM INSTALAÇÕES ENTERRADAS E SUBMERSAS 7

2.1.1 MECANISMOS DA CORROSÃO..... 7

2.1.1.1 Contato Elétrico entre Dois Metais Diferentes 9

2.1.1.2 Heterogeneidades do Metal 12

2.1.1.3 Heterogeneidades do Eletrólito 13

2.1.1.4 Corrosão Eletrolítica 14

2.1.1.5 Corrosão Microbiológica 16

2.1.2 FORMAS DE CORROSÃO 16

2.1.3 VELOCIDADE DE CORROSÃO 18

2.1.3.1 Fatores Influentes na Velocidade 18

2.1.3.2 Polarização 19

2.1.3.3 Diagramas de Pourbaix 20

2.1.4 AVALIAÇÃO DA CORROSIVIDADE 22

2.1.4.1 Ensaios Eletroquímicos 22

2.1.4.2 Perda de Massa 25

2.2 MÉTODOS DE PREVENÇÃO E COMBATE À CORROSÃO 27

2.2.1 REVESTIMENTOS PROTETORES 27

2.2.2 PROTEÇÃO CATÓDICA 28

2.3 PRINCÍPIOS BÁSICOS DA PROTEÇÃO CATÓDICA 29

2.3.1 MECANISMO BÁSICO 30

2.3.2 CAMPOS DE APLICAÇÃO 32

2.3.3 TIPOS DE PROTEÇÃO 33

2.3.3.1 Proteção Catódica Galvânica 33

2.3.3.2 Proteção Catódica por Corrente Impressa 36

2.3.4 INFLUÊNCIA DOS REVESTIMENTOS PROTETORES 38

2.3.5 CÁLCULO DA CORRENTE 38

2.3.6 CRITÉRIOS DE PROTEÇÃO CATÓDICA 39

2.3.6.1 Potencial Mínimo de Proteção 40

2.3.6.2 Variação de 100 mV Catódicos 41

2.3.7 MANUTENÇÃO DOS SISTEMAS DE PROTEÇÃO CATÓDICA 43

2.3.8 CUSTOS DA PROTEÇÃO CATÓDICA 44

2.4 ELABORAÇÃO DO PROJETO DE PROTEÇÃO CATÓDICA 45

2.4.1 LEVANTAMENTO DE DADOS DAS INSTALAÇÕES 45

2.4.2 LEVANTAMENTO E MEDIÇÕES DE CAMPO 45

2.4.2.1 Resistividade Elétrica 46

2.4.2.2 Potenciais Estrutura / eletrólito 47

2.4.2.3 Acidez do Eletrólito 48

2.4.2.4 Pesquisa de Corrosão Microbiológica 48

2.4.2.5 Medições de Corrente 49

2.5 DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS DE PROTEÇÃO CATÓDICA POR CORRENTE IMPRESSA 49

2.5.1 CÁLCULO DA CORRENTE DE PROTEÇÃO CATÓDICA 49

2.5.2 DEFINIÇÃO DO NÚMERO DE PONTOS DE INJEÇÃO DE CORRENTE 52

2.5.3 SELEÇÃO DOS ANODOS 53

2.5.4 ESCOLHA DO ARRANJO E DISPOSIÇÃO DOS ANODOS 54

2.5.5 CÁLCULO DA RESISTÊNCIA DO CIRCUITO 55

2.5.6 VERIFICAÇÃO DO NÚMERO DE ANODOS 57

2.5.7 AUXÍLIO DE MICROCOMPUTADORES 57

CAPÍTULO 3 – MATERIAL E MÉTODO 58

3.1. MATERIAL UTILIZADO 59

3.1.1 AMOSTRAS 59

3.1.1.1 Escolha das Amostras 59

3.1.2 MEIOS ESTUDADOS 60

3.1.2.1 Escolha dos Meios Resistivos 60

3.2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL 60

3.2.1 PREPARO DOS MEIOS 60

3.2.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MEIOS 61

3.2.2.1 Condutividade Elétrica e pH 61

3.2.2.2 Resistividade Elétrica 62

3.2.2.3 Potencial Natural Aço / eletrólito 62

3.2.3 ENSAIOS ELETROQUÍMICOS 63
3.2.3.1 Curvas de Polarização 63
3.2.3.2 Polarização Catódica 63
3.2.4 PERDA DE MASSA 67
3.2.5 ANÁLISE DE PITE 68

3.3. LEVANTAMENTO DE CUSTOS DOS PROJETOS DE PC 69

CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO 71

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MEIOS 72
4.2 ENSAIOS ELETROQUÍMICOS 74
4.2.1 CURVAS DE POLARIZAÇÃO 74
4.2.2 POLARIZAÇÃO CATÓDICA 80
4.2.2.1 Critério do Potencial Mínimo de Proteção 80
4.2.2.2 Critério dos 100 mV catódicos 83
4.2.2.3 Comparação entre os Critérios de Proteção 85

4.3 ENSAIOS DE PERDA DE MASSA 88
4.4 ANÁLISE DE PITE 97
4.5 LEVANTAMENTO DE CUSTOS DOS PROJETOS DE PC 101
4.5.1 CRITÉRIO DO POTENCIAL MÍNIMO DE PROTEÇÃO **102**
4.5.2 CRITÉRIO DOS 100 mV CATÓDICOS **103**

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES 105
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 108
ANEXOS 111

A – ANÁLISE DA UMIDADE GRAVIMÉTRICA DA AREIA 35% 112
B – ANÁLISE DA UMIDADE GRAVIMÉTRICA DA AREIA 5% 113
C – VALORES MÉDIOS DIÁRIOS DA DENSIDADE DE CORRENTE - CRITÉRIO DO POTENCIAL ELETROQUÍMICO MÍNIMO 114
D – VALORES MÉDIOS DIÁRIOS DA DENSIDADE DE CORRENTE - CRITÉRIO DOS 100 mV CATÓDICOS 115
E – DADOS EXPERIMENTAIS PARA CÁLCULO DA PERDA DE MASSA E TAXAS DE CORROSÃO 116

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Com o avanço tecnológico alcançado mundialmente, torna-se cada vez mais freqüente a utilização de instalações metálicas enterradas ou submersas, tais como: tubulações (oleodutos, emissários submarinos, gasodutos, adutoras, minerodutos), piers de atracação, tanques de armazenamento, navios, redes de incêndio, cabos telefônicos, armadura de aço do concreto, entre outras.

Devido ao baixo custo e diversidade de aplicações, o aço-carbono tem sido o material mais empregado na maioria destas instalações e, consequentemente, o campo de exposição e os custos devido à corrosão também ocorrem de maneira ampla, sendo um fator de grande importância, a ser considerado na fase de projeto das instalações industriais.

Os prejuízos causados pela corrosão atingem custos extremamente altos, traduzidos em perdas econômicas diretas (substituição de peças e equipamentos, gastos com a manutenção da proteção, energia e mão-de-obra) e indiretas (lucros cessantes por paralisações acidentais, superdimensionamento de projetos, perdas de eficiência e produto), resultando em considerável desperdício de investimento; sem falar de acidentes e perdas de vidas humanas, provocadas por contaminações, poluição e, principalmente, falta de segurança da estrutura e dos equipamentos (MAINIER & LETA, 2001; GENTIL, 2003).

Segundo Gentil (2003), o processo corrosivo é o principal responsável por uma série de problemas, como explosões de caldeiras, rompimentos de adutoras de água ou derramamentos de petróleo, devido a furos em tanques e oleodutos. Nas instalações de refino de petróleo e petroquímicas, cerca de 50% das falhas de materiais são creditadas à corrosão.

No último estudo encomendado pelo Congresso Americano, intitulado "Corrosion Costs and Preventive Strategies in the United States of America", elaborado em parceria pela CC Technologies Laboratories Inc., FHWA e NACE, estimou-se que o custo total (direto e indireto) da corrosão é de US$ 276 bilhões anuais, correspondente a 3,1% do Produto Interno Bruto (PIB) dos Estados Unidos (EUA), enquanto os custos associados aos diferentes meios de combate à corrosão são de US$ 121 bilhões, por ano (1,38% do PIB EUA).

Com base neste estudo e considerando o PIB brasileiro da ordem de US$ 500 bilhões, estima-se que o custo total anual da corrosão no Brasil seja de, aproximadamente, US$ 16 bilhões e os custos diretos dos meios de combate à corrosão corresponda a US$ 6,9 bilhões, por ano (COELHO, 2005).

Adotando-se as práticas já conhecidas, adequadas ao controle e combate à corrosão, seriam economizados de 25 a 30% deste custo total (KOCH et al., 2002). O que, no caso do Brasil, representa uma economia de US$ 5 bilhões anuais, ou seja, 1% do seu PIB.

O fato é que quanto mais industrializado um país, mais elevado é seu custo com a corrosão, ou seja, esse processo avança paralelamente ao desenvolvimento tecnológico. Conscientes disso, as grandes indústrias vêm investindo em pesquisas de prevenção e combate à corrosão, no sentido de repensar projetos e processos, em busca de soluções, ao mesmo tempo, mais eficazes e menos onerosas (MAINIER & MATA, 1995; GENTIL, 2003).

Neste cenário, a proteção catódica (PC) destaca-se como uma solução capaz de garantir a proteção integral contra os processos corrosivos que destroem as instalações de aço-carbono enterradas e submersas. É devido à PC que milhões de quilômetros de tubulações enterradas para a condução de água, combustíveis,

minérios e produtos químicos, além de instalações portuárias e embarcações de aço, operam ao longo dos anos de maneira segura e econômica (RIZZO, 1997; DUTRA & NUNES, 1999).

Além disso, o custo da proteção catódica, quando devidamente projetado, varia de 0,5 a 5% do investimento global do projeto, dependendo do seu dimensionamento, complexidade e sofisticação (ESTEIO, 2006).

Esta técnica de proteção pode ser obtida a partir de dois sistemas: corrente impressa ou galvânica. Ambos se fundamentam no princípio de tornar a superfície a proteger o catodo de uma célula de corrosão, pela injeção de corrente na estrutura através do meio em que se encontra, a fim de manter um potencial eletroquímico no qual a estrutura se situe em nível de taxa de corrosão desprezível.

Apesar do maior custo de instalação e manutenção, em relação ao sistema galvânico, a proteção catódica por corrente impressa é a mais viável em estruturas enterradas, devido ao fato de não haver limitação de corrente em meios de alta resistividade como o solo (BAECKMANN, 1997).

Tão importante quanto a correta aplicação da PC é certificar-se de que a estrutura encontra-se realmente protegida contra a corrosão. Vários critérios podem ser adotados para a avaliação da eficiência de um sistema de proteção catódica, baseando-se na densidade de corrente aplicada ou no potencial da estrutura. No entanto, o mais indicativo e aceito é a aplicação do potencial eletroquímico mínimo de -850 $mV_{Cu/CuSO4}$ ou -800 $mV_{Ag/AgCl}$, entre a estrutura e o eletrólito, medido através de um eletrodo de referência. Outro critério bastante difundido é o “critério dos 100 mV catódicos”, que consiste na aplicação de um potencial eletroquímico tal que seja assegurado um decaimento mínimo de 100 mV no potencial estrutura / meio, em um determinado período de despolarização (DUTRA & NUNES, 1999; NACE, 2002).

Apesar da utilização, em larga escala, da técnica de proteção catódica e dos critérios de proteção mencionados, poucos estudos foram realizados no sentido de comparar os mesmos.

Desta maneira, o presente trabalho pretende avaliar a viabilidade técnica e econômica da aplicação destes critérios, identificando aquele que permita menor gasto de energia com maior eficiência de proteção, em quatro diferentes meios, caracterizados pela resistividade: *areia, com 35% e 5% de umidade*; *água destilada* e *solução de NaCl 3,5% p/v*, empregando a técnica da proteção catódica por corrente impressa em amostras cilíndricas de aço-carbono SAE 1020, sem revestimento, com área exposta de, aproximadamente, 2,6 cm^2.

Com este objetivo, o trabalho está dividido em quatro capítulos: no capítulo *Revisão Bibliográfica*, são definidos os conceitos teóricos sobre corrosão, polarização, proteção catódica e os critérios de proteção. Em *Material e Método*, estão descritos o material e os equipamentos utilizados, bem como a metodologia empregada. No capítulo *Resultados e Discussão*, tem-se a apresentação e avaliação técnico-econômica dos resultados de polarização catódica, perda de massa e análise de pite. Por último, no capítulo *Conclusões e Sugestões*, são apresentadas as conclusões a respeito dos resultados, bem como sugestões para futuros trabalhos.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta os fundamentos teóricos e termos importantes para a compreensão da proteção catódica e seus critérios. Primeiramente, no entanto, é feita uma revisão sobre o processo corrosivo em instalações enterradas e submersas, principais aplicações práticas da PC.

2.1 CORROSÃO EM INSTALAÇÕES ENTERRADAS E SUBMERSAS

2.1.1 MECANISMOS DA CORROSÃO

Quando não protegidas, todas as estruturas metálicas enterradas ou submersas, em águas doces ou salgadas, interagem com o meio em que estão instaladas, sofrendo um processo de deterioração. Isto porque praticamente todos os ambientes são corrosivos em algum grau (RIZZO, 1997).

Excetuando tipos não usuais de corrosão, como a microbiológica e o ataque químico direto, pode-se afirmar que a corrosão é, basicamente, um processo eletroquímico que envolve reações de oxirredução entre metais e um eletrólito, composto, geralmente, por substâncias químicas e água, os quais se combinam formando pilhas capazes de gerar uma corrente elétrica. O funcionamento desta pilha (Figura 2.1) requer quatro elementos (HUHN, 2006):

a) uma área anódica (onde se passa a reação de oxidação);

b) uma área catódica (onde se passa a reação de redução);

c) uma ligação metálica entre ambas as áreas (fluxo de elétrons);

d) um eletrólito em contato com ambas as áreas (fluxo de íons).

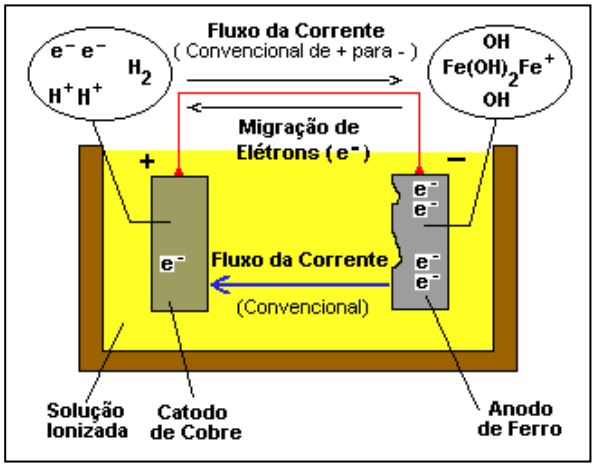


Figura 2.1 – Representação esquemática de uma pilha de corrosão (HUHN, 2006).

A tensão elétrica resulta numa migração de elétrons do anodo para o catodo. No anodo, com a perda de elétrons, permanecem átomos de carga positiva de ferro que se combinam com íons do ambiente de carga negativa (OH^-), formando hidróxido ferroso que, por sua vez, normalmente reage para formar hidróxido férrico (ferrugem). No catodo, o acréscimo de cargas negativas, oriundas do anodo, se combinam com íons carregados positivamente, formando um filme de polarização, que será discutido mais adiante (GENTIL, 2003).

Para uso prático, o fluxo de corrente é definido em termos do conceito convencional (contrário ao fluxo de elétrons), e devem ser lembrados os seguintes pontos (HUHN, 2006):

a) no circuito metálico, o fluxo será no sentido do catodo para o anodo;

b) no eletrólito, o fluxo será no sentido do anodo para o catodo;

c) o metal é consumido no anodo e protegido no catodo, onde recebe corrente suficiente do eletrólito.

Uma instalação enterrada ou submersa é, essencialmente, um pedaço de metal envolvido por um eletrólito. Isto porque a água do mar é um eletrólito por excelência, em virtude da presença acentuada de sais (Tabela 2.1) e os solos, por mais secos que pareçam, sempre contêm água e atuam, normalmente, como eletrólitos para a passagem da corrente, que é afetada principalmente por sua resistividade. Assim, ao longo do tempo, os potenciais elétricos variam de um ponto a outro da estrutura, como resultado da existência de áreas anódicas e catódicas, afastadas entre si por alguns centímetros ou metros, dependendo da origem da diferença de potencial entre esses pontos (HUHN, 2006).

Tabela 2.1 – Principais constituintes da água do mar (HUHN, 2006).

Constituintes	g/L
Cloreto (Cl^-)	18,9799
Sulfato (SO^-)	2,6486
Bicarbonato (HCO_3^-)	0,1397
Brometo (Br^-)	0,0646
Fluoreto (F^-)	0,0013
Ácido Bórico (H_3BO_3)	0,0260
Sódio (Na^+)	10,5561
Magnésio (Mg^{2+})	1,2720
Cálcio (Ca^{2+})	0,4001
Potássio (K^+)	0,3800
Estrôncio (Sr^{2+})	0,0133

As pilhas de corrosão, nestes casos, podem ser causadas por (1) contato elétrico entre dois metais diferentes; (2) heterogeneidades do metal; (3) heterogeneidades do eletrólito; (4) eletrólise causada por correntes elétricas de fuga ou, como acontece na maioria das vezes, pela combinação de alguns ou de todos esses fatores atuando ao mesmo tempo. Em casos menos comuns, a estrutura enterrada pode sofrer a ação de microorganismos (IEC, 1990).

2.1.1.1 Contato Elétrico entre Dois Metais Diferentes

A imersão de um metal em um eletrólito determina o estabelecimento de uma diferença de potencial entre as fases sólida e líquida. Essa diferença de potencial é, simultaneamente, de natureza química e elétrica e, por isso, denomina-se potencial eletroquímico natural, ou potencial de corrosão. Este potencial pode ser medido com facilidade, por meio de um voltímetro e um eletrodo de referência, como mostrado na Figura 2.2. Na prática, utiliza-se, como referência, o eletrodo de

cobre/sulfato de cobre ($Cu/CuSO_4$) para medidas em solos e o de prata/cloreto de prata (Ag/AgCl) em água do mar (GENTIL, 2003).

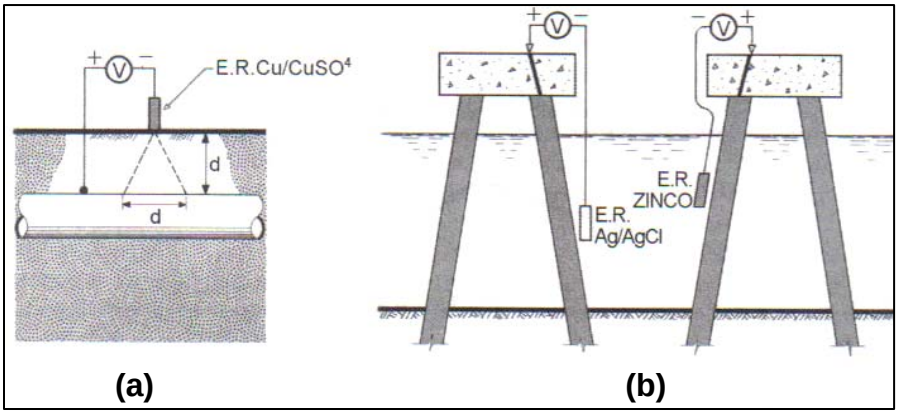


Figura 2.2 – Esquema ilustrativo das ligações usadas para medição do potencial estrutura / solo (a); estrutura / água do mar (b), (DUTRA & NUNES, 1999).

Para um determinado eletrólito, cada metal apresenta um potencial de corrosão diferente e através do valor deste potencial, encontrado nas Tabelas 2.2 e 2.3, conhecidas como séries galvânicas práticas, pode-se indicar a tendência do material se corroer em determinado meio (RIZZO, 1997). Isto proque, quando dois metais diferentes encontram-se imersos no mesmo eletrólito, o sentido convencional da corrente se estabelece sempre a partir do metal de potencial mais negativo para o metal de potencial menos negativo, formando a chamada pilha de corrosão galvânica, na qual o metal que libera corrente para o eletrólito se corroe (anodo) e o metal que recebe a corrente do solo fica protegido (catodo) (IEC, 1990).

A partir deste conceito é fácil concluir que se deve evitar, sempre que possível, o contato elétrico entre metais dissimilares na construção de instalações industriais, principalmente em estruturas enterradas ou submersas.

Tabela 2.2 – Série Galvânica Prática (GENTIL, 2003).

METAL	POTENCIAL (VOLTS)[1]
Magnésio comercialmente puro	- 1,75
Liga de magnésio (6% Al, 3% Zn, 0,15% Mn)	- 1,60
Zinco	- 1,10
Liga de alumínio (5% Zn)	- 1,05
Alumínio comercialmente puro	- 0,80
Aço limpo	- 0,50 a - 0,80
Aço enferrujado	- 0,20 a - 0,50
Ferro fundido (não grafitizado)	- 0,50
Chumbo	- 0,50
Aço em concreto	- 0,20
Cobre, bronze, latão	- 0,20
Ferro fundido com alto teor de silício	- 0,20
Carbono, grafite, coque	+ 0,30

(1) Potenciais típicos observados em solos neutros e água, medidos em relação ao eletrodo de $Cu/CuSO_4$. Valores um pouco diferentes podem ser encontrados em outros tipos de solo.

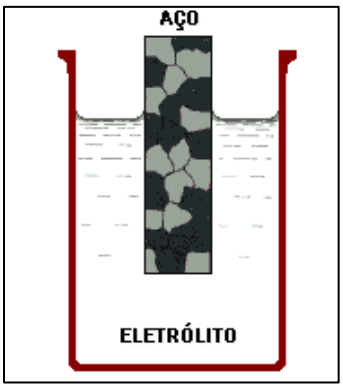
Tabela 2.3 – Série Prática de Nobreza em água do mar (GENTIL, 2003).

Extremidade anódica (corrosão)	
1. Magnésio	24. Latão Almirantado
2. Ligas de Magnésio	25. Latão Alumínio
3. Zinco	26. Latão Vermelho
4. Alclad 38	27. Cobre
5. Alumínio 3S	28. Bronze
6. Alumínio 61S	29. Cupro-níquel 90/10
7. Alumínio 63 S	30. Cupro-níquel 70/30 (baixo teor de Fe)
8. Alumínio 52	31. Cupro-níquel 70/30 (alto teor de Fe)
9. Cádmio	32. Níquel (passivo)
10. Aço Doce (1010/1020)	33. Inconel (passivo)
11. Aço de baixo teor de liga	34. Monel
12. Aço liga	35.Hastelloy C
13. Ferro Fundido	36. Aço AISI 410 (passivo)
14. Aço AISI 410 (ativo)	37. Aço AISI 430(passivo)
15. Aço AISI 430 (ativo)	38. Aço AISI 304(passivo)
16. Aço AISI 304 (ativo)	39. Aço AISI 316 (passivo)
17. Aço AISI 316 (ativo)	40.Titânio
18. Chumbo	41. Prata
19. Estanho	42. Grafite
20. Níquel (ativo)	43. Ouro
21. Inconel (ativo)	44. Platina
22. Metal Muntz	**Extremidade catódica (proteção)**
23. Latão Amarelo	

2.1.1.2 Heterogeneidades do Metal

Os metais utilizados em instalações enterradas e submersas não são homogêneos, possuindo irregularidades, tais como inclusões não metálicas, tensões internas diferentes, variações de composição química e tamanho do grão, resultantes dos processos de conformação e de soldagem.

Essas variações fazem com que as superfícies do aço se comportem como se fossem constituídas de materiais metálicos diferentes, ocasionando pilhas micro ou macroscópicas de corrosão, como, por exemplo, pilha galvânica; ativa/passiva e de ação local (Figura 2.3), nas quais a intensidade do processo corrosivo dependerá da magnitude da diferença de potencial estabelecido por estas irregularidades (DUTRA & NUNES, 1999)



*As áreas escuras são anódicas e as claras são catódicas

Figura 2.3 – Esquema ilustrativo de pilhas de ação local (PIMENTA, 2006).

A superfície corroída apresenta irregularidades com aspecto rugoso, resultante da alternância das áreas anódicas e catódicas, sendo comum incidir em zonas preferenciais, com o desenvolvimento de alvéolos mais profundos, que podem perfurar a parede metálica. Assim, o ataque corrosivo, nestes casos, pode ser generalizado, porém nunca uniforme (GENTIL, 2003).

2.1.1.3 Heterogeneidades do Eletrólito

Os eletrólitos também possuem heterogeneidades que, em conjunto com as do aço, agravam os problemas de corrosão, dentre os quais destacam-se (DUTRA &NUNES, 1999):

a) *pilha de resistividade elétrica diferencial*: embora uma tubulação seja construída ao longo de uma faixa de alta resistividade elétrica (corrosão suave), esta atravessa alguns locais de resistividade elétrica mais baixa, onde são formadas macro-pilhas de corrosão, nas quais os trechos em contato com os solos de mais baixa resistividade funcionam como áreas anódicas severas, corroendo-se em benefício dos trechos de resistividade mais alta;

b) *pilha de concentração diferencial*: ocorre quando dois solos de diferentes concentrações estão em contato com uma peça metálica. A parte do metal em contato com o solo que possui maior concentração de sais dissolvidos funciona como área anódica, enquanto o solo de menor concentração, age como área catódica (Figura 2.4);

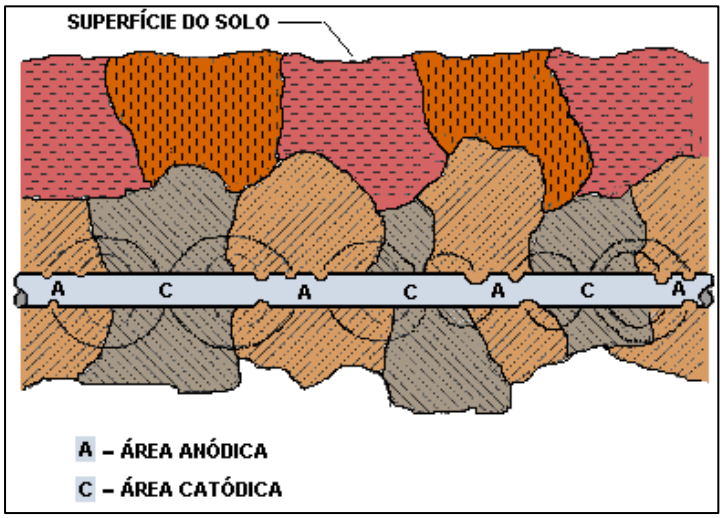


Figura 2.4 – Pilha de corrosão, em solo de diferentes concentrações (HUHN, 2006).

c) *pilha de aeração diferencial*: ocorre, principalmente, em tubulações enterradas de grande diâmetro, onde a corrosão é acentuada nas regiões mais pobres em oxigênio que se comportam como áreas anódicas.

Um caso clássico de solos dissimilares envolve aço no solo em contato com aço no concreto, exemplificado na Figura 2.5. O ambiente eletrolítico do concreto, usualmente úmido e básico, é totalmente diferente do ambiente do solo circunvizinho, resultando em diferenças significativas no aço, em relação ao potencial do ambiente, onde o aço no solo age como região anódica, em relação ao aço embutido no concreto (HUHN, 2006).

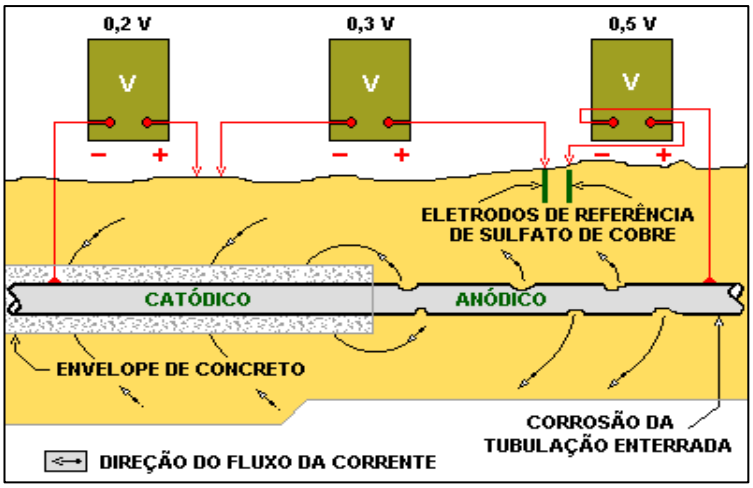


Figura 2.5 – Corrosão do aço em contato com o concreto (HUHN, 2006).

2.1.1.4 Corrosão Eletrolítica

Este tipo de corrosão é consequência da existência de correntes elétricas de interferência (correntes de fuga), que abandonam seu circuito original e fluem pelo eletrólito, atingindo as estruturas metálicas e ocasionando processos corrosivos nos locais onde a corrente deixa estas instalações (pontos de baixa resistividade - anodo) e retornam ao circuito original (GENTIL, 2003).

Essas correntes, independentes de quaisquer dissimilaridades dos metais, solos ou águas, podem ser oriundas de várias fontes, sendo as mais danosas e comuns, na prática, as provenientes das ferrovias eletrificadas em corrente contínua, como ilustrado na Figura 2.6. Nesses casos, a parte da tubulação que é corroída funciona como anodo ativo de uma cuba eletrolítica, rigorosamente de acordo com a Lei de Faraday da Eletrólise, onde o peso teórico de metal destruído é proporcional à intensidade de corrente, ao tempo de descarga para o solo e ao equivalente eletroquímico do metal (IEC, 1990).

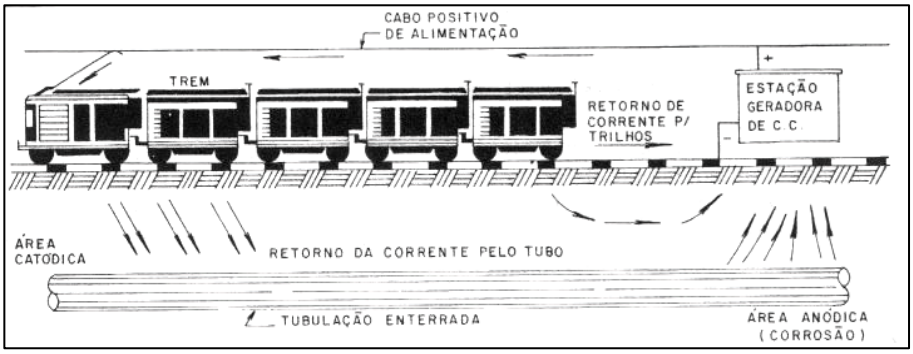


Figura 2.6 – Pilha de corrosão causada por estradas de ferro eletrificadas (IEC, 1990).

A corrosão, nessas circunstâncias, é extremamente severa pois, para o caso das tubulações de aço revestidas, as fugas de corrente para o solo se processam nas falhas do revestimento, podendo ocasionar furos na tubulação (Figura 2.7), até mesmo em poucos dias, com perda de poucos gramas do metal (corrosão por pite).

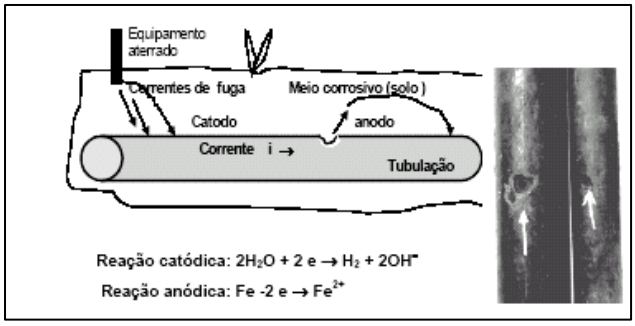


Figura 2.7 – Corrosão eletrolítica em tubulação enterrada (MAINIER & LETA, 2001).

2.1.1.5 Corrosão Microbiológica

A corrosão microbiológica em instalações enterradas resulta da ação de microorganismos, especialmente, algumas bactérias, que modificam quimicamente o ambiente, liberando produtos de seus metabolismos, como ácidos, que aceleram o processo corrosivo, além da formação de filmes aderidos a superfície metálica, que promovem corrosão por aeração diferencial (GENTIL, 2003). Este tipo de corrosão pode ser facilmente eliminada com a utilização dos sistemas de proteção catódica, convenientemente ajustados.

2.1.2 FORMAS DE CORROSÃO

A caracterização dos diferentes modos de ataque sobre o material auxilia no esclarecimento do mecanismo e aplicação de medidas adequadas de proteção. A Figura 2.8 apresenta as principais formas de corrosão, cujas características são descritas a seguir (DUTRA & NUNES, 1999; GENTIL, 2003):

a) *uniforme*: comum em metais que não formam películas protetoras, esta forma de corrosão se processa em toda a extensão da superfície atacada, com perda uniforme de espessura e ocorre, em geral, devido à formação de micropilhas de ação local;

b) *por placas*: ocorre em metais que formam película inicialmente protetora, mas que, ao se tornar espessa, fratura, formando placas que se desprendem progressivamente, expondo novas regiões da estrutura a outros ataques;

c) *alveolar*: freqüente em metais formadores de películas semiprotetoras ou quando se tem corrosão sob depósito, o desgaste se dá sob forma localizada, com o aspecto de alvéolos (fundo arredondado e profundidade menor que o diâmetro);

d) *puntiforme ou por pite*: destruição da película protetora passiva, pela ação de certos agentes agressivos em pontos localizados, que se tornam ativos, possibilitando a corrosão de alta intensidade em forma de pites (cavidades com profundidade maior que o diâmetro e bordos angulosos);

e) *intergranular ou intercristalina*: ocorre quando existe um caminho preferencial para a corrosão, na região dos contornos de grão. O exame metalográfico, geralmente, não é capaz de detectar a susceptibilidade à corrosão intergranular, sendo necessária realização de testes específicos para esta finalidade;

f) *transgranular ou transcristalina*: o fenômeno se manifesta sob a forma de trincas que se propagam pelo interior dos grãos do material, como no caso da corrosão sob tensão de aços inoxidáveis austeníticos.

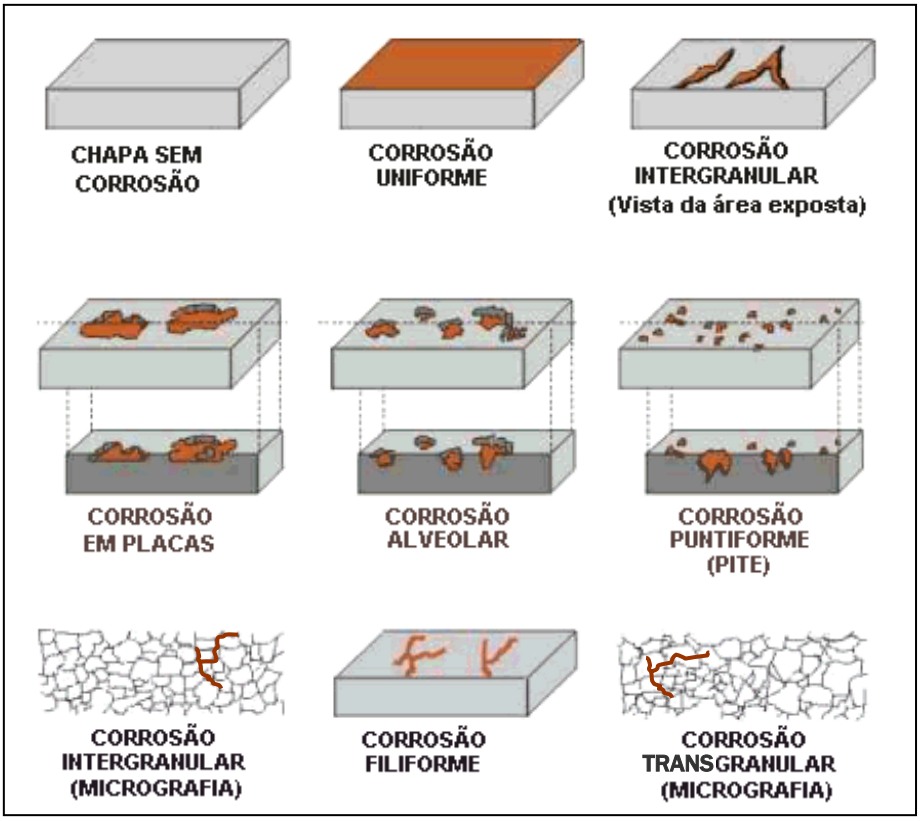


Figura 2.8 – Desenho esquemático das principais formas de corrosão (PIMENTA, 2006).

2.1.3 VELOCIDADE DE CORROSÃO

A velocidade com que se processa a corrosão é dada pela massa de material desgastado em uma determinada área durante determinado tempo, ou seja, pela taxa de corrosão. A massa deteriorada pode ser calculada pela Lei de Faraday (Eq. 2.1) (DUTRA & NUNES, 1999; GENTIL, 2003):

$$m = e.I.t \qquad \text{Eq. 2.1}$$

onde ***m*** é a massa desgastada (g); ***e*** , o equivalente eletroquímico do metal; ***I***, a corrente de corrosão (A); e ***t*** é o tempo em que se observou o processo (s).

A corrente ***I*** de corrosão é, portanto, um fator fundamental na intensidade do processo corrosivo e depende fundamentalmente de dois fatores: a diferença de potencial das pilhas e a resistência de contato dos eletrodos das pilhas. A diferença de potencial é influenciada pela resistividade do eletrólito, superfície de contato do anodo e do catodo e fenômenos de polarização e passivação (PIMENTA, 2006).

2.1.3.1 Fatores Influentes na Velocidade

Outros fatores atuam nos fenômenos de polarização e passivação, influenciando a velocidade de corrosão, a saber (GENTIL, 2003; PIMENTA, 2006):

a) *aeração do meio*: normalmente, a velocidade de corrosão aumenta com o acréscimo da taxa de oxigênio dissolvido, pois o oxigênio é um elemento despolarizante que desloca a curva de polarização catódica no sentido de maior corrente de corrosão;

b)*pH do eletrólito*: geralmente, as taxas de corrosão aumentam com a diminuição do pH do eletrólito, pois a maioria dos metais passiva-se em meios

básicos. Em pH inferior a 4, verifica-se, normalmente, uma corrosão severa e rápida dos metais expostos, devido à possibilidade de redução de H^+;

c) *temperatura*: as taxas de corrosão aumentam com o aumento da temperatura, devido à aceleração das reações químicas e diminuição da resistividade do eletrólito a temperaturas mais elevadas;

d) *efeito de sais dissolvidos*: os sais podem agir acelerando (ação despolarizante, aumento da condutividade) ou retardando (precipitação de produtos de corrosão, ação inibidora ou passivadora) a velocidade de corrosão.

2.1.3.2 Polarização

Denomina-se polarização a variação do potencial de um eletrodo, a partir do potencial de corrosão, causada pela passagem de uma corrente elétrica. Em função da variação do potencial no sentido anódico ou catódico, tem-se o que se conhece como polarização anódica ou polarização catódica (ASTM G31-72, 2004). A polarização de um metal pode se dar por (GENTIL, 2003; PIMENTA, 2006):

a) *concentração*: é causada pela variação da concentração entre a área do eletrólito que está em contato com o eletrodo e o resto da solução, onde o oxigênio é o agente determinante da reação, por isso este tipo de polarização ocorre, freqüentemente, em eletrólitos parados ou com pouco movimento e decresce com a agitação / aeração do eletrólito;

b) *ativação*: causada pelo retardamento das reações na superfície do eletrodo, decorrente da barreira energética para a transferência eletrônica (energia de ativação), devido a sobrevoltagem do gás hidrogênio (H_2) nos eletrodos, havendo acúmulo de cargas negativas no eletrodo, que acarreta a mudança do seu potencial;

c) *queda ôhmica*: conseqüência da resistência elétrica oferecida pela presença de uma película de produtos de corrosão sobre a superfície do eletrodo, diminuindo o fluxo de elétrons para a interface, onde se dão as reações com o meio.

Os fenômenos de polarização assumem grande importância na cinética dos processos de corrosão eletroquímica e muito particularmente para a proteção catódica, a qual consiste essencialmente na polarização catódica da estrutura a proteger (DUTRA & NUNES, 1999).

2.1.3.3 Diagramas de Pourbaix

Considerando dados termodinâmicos, Marcel Pourbaix descobriu a existência de relações entre o potencial de eletrodo (em relação ao potencial de hidrogênio) e o pH das soluções, para sistemas em equilíbrio. Essas relações, foram traduzidas graficamente, dando origem aos Diagramas de Pourbaix, que possibilitam a previsão das condições termodinâmicas sob as quais se pode ter corrosão, imunidade ou passividade dos metais puros. No caso das ligas, os diagramas são apenas indicativos.

O Diagrama de Pourbaix para o ferro em água é mostrado na Figura 2.9, onde as linhas paralelas de inclinação –0,0591 V/pH, em destaque, representam as condições de equilíbrio das reações eletroquímicas da água (GENTIL, 2003):

$2\,H^+ + 2\,e^- \rightarrow H_2$ ou $2\,H_2O + 2\,e^- \rightarrow H_2 + 2\,OH^-$ (linha *a*)

$2\,H_2O \rightarrow O_2 + 4\,H^+ + 4\,e^-$ (linha *b*)

Abaixo da linha ***a***, a água tende a se decompor por redução a H_2. Acima da linha ***b***, a água tende a se decompor por oxidação a O_2. A região compreendida entre as linhas é o domínio de estabilidade termodinâmica da água.

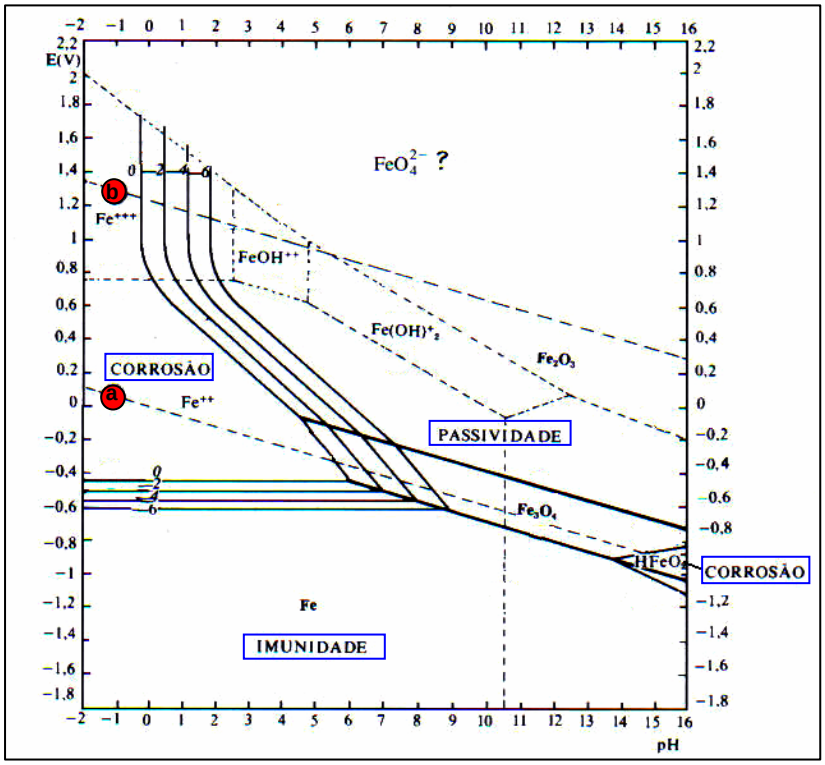


Figura 2.9 – Diagrama de Pourbaix para o sistema Fe-H_2O, a 25ºC e 1 atm (GENTIL, 2003).

O diagrama potencial versus pH define as regiões onde o ferro está dissolvido, principalmente, sob a forma de íons Fe^{2+}, Fe^{3+} e $HFeO_2^-$ e aquelas onde o metal está estável, sob a forma de uma fase sólida, tal como o metal puro ou um de seus óxidos. Se o pH e o potencial de eletrodo na interface metal / solução são tais que correspondem à região onde os íons Fe^{2+} são estáveis, o ferro se dissolverá até que a solução atinja a concentração de equilíbrio. Se as condições correspondem a uma região onde o metal é estável (sob a forma Fe), o metal não sofrerá corrosão. Finalmente, se as condições de interface correspondem a uma região de estabilidade de um óxido (Fe_2O_3 e Fe_3O_4), e se este é suficientemente aderente à superfície e compacto, formará na superfície do metal uma barreira contra a ação corrosiva da solução. Tal situação é chamada de passivação (GENTIL, 2003).

Embora não forneça as taxas de corrosão do metal e não seja aplicável a ligas, o diagrama de Pourbaix é uma ferramenta muito importante para prever possíveis estratégias de proteção contra a corrosão, estabelecendo condições termodinâmicas que garantam a imunidade do metal (GUMMOW, 1993).

2.1.4 AVALIAÇÃO DA CORROSIVIDADE

A agressividade de um eletrólito pode ser avaliada através do acompanhamento do processo de corrosão, por duas maneiras confiáveis e seguras: (1) ensaios eletroquímicos e (2) ensaios de perda de massa.

2.1.4.1 Ensaios Eletroquímicos

Segundo Gentil (2003), o principal ensaio eletroquímico para análise da corrosividade de um eletrólito é a aquisição das curvas de polarização, que permitem a obtenção de parâmetros importantes para avaliação do desempenho dos diferentes materiais frente à corrosão.

Como já foi dito, quando dois metais diferentes são ligados e imersos em um eletrólito, estabelece-se uma diferença de potencial entre eles, que diminui com o tempo. Em princípio, pensa-se que quanto menor esta diferença de potencial, menor a velocidade de corrosão, no entanto, o potencial é um parâmetro termodinâmico e, utilizá-lo na análise cinética de processos eletroquímicos, sem levar em consideração outros fatores pode levar a conclusões errôneas. Assim, a velocidade das reações anódicas e catódicas dependerá das características de polarização do sistema. Os fenômenos de polarização se caracterizam pela variação dos potenciais de eletrodo em função da uma corrente circulante no meio (GENTIL, 2003).

A determinação experimental da curva de polarização de certo material, em um dado eletrólito, pode ser feita a partir de dois métodos (DUTRA & NUNES, 1999):

a) *galvanostático:* que possui como variável de controle a intensidade da corrente que circula no sistema, a qual é variada por meio de uma resistência, utilizando-se um instrumento denominado galvanostato. O aspecto das curvas de polarização anódica e catódica é apresentado na Figura 2.10;

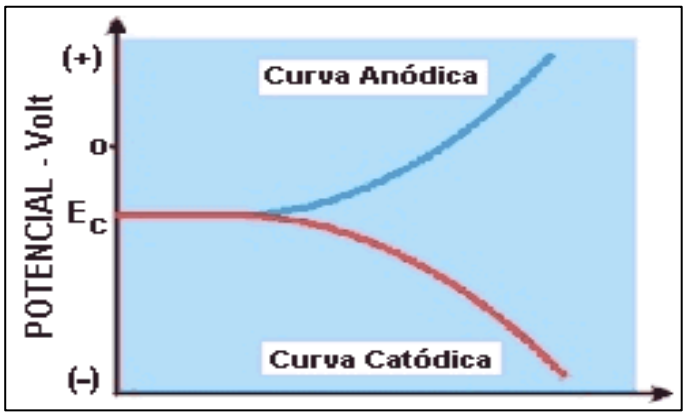


Figura 2.10 – Aspecto geral das curvas de polarização (PIMENTA, 2006).

b) *potenciostático*: tem como variável de controle o potencial. A célula de polarização é semelhante à anterior, porém a aparelhagem requerida é diferente, pois é necessário um potenciostato, um aparelho bem mais complexo, por meio do qual se varia no sentido anódico ou catódico o potencial do metal em relação ao eletrodo de referência. Para cada valor do potencial imposto, o sistema demanda a corrente necessária à manutenção do potencial.

A curva de polarização catódica que se obtém por este método é semelhante à obtida pelo método galvanostático, porém a curva anódica para metais que apresentam a transição ativo / passivo, tem aspecto completamente diferente (Figura 2.11), e não poderiam ser obtidas pelo método galvanostático (DUTRA & NUNES, 1999; PIMENTA, 2006).

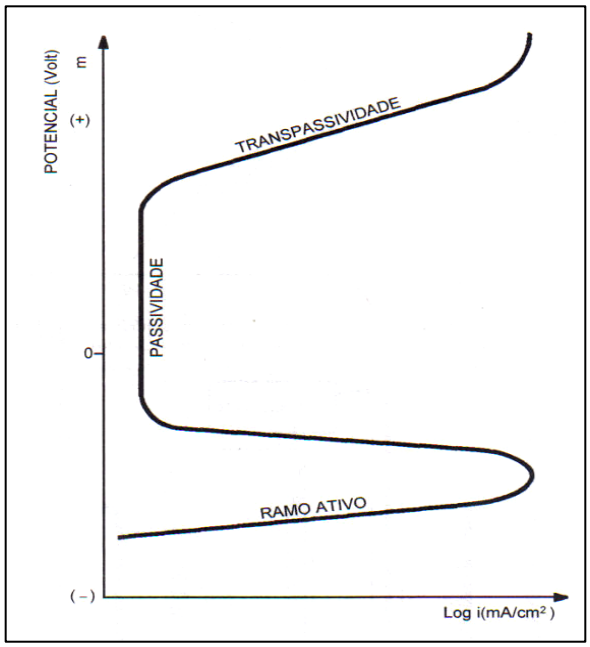


Figura 2.11 – Aspecto da curva de polarização anódica obtida pelo método potenciostático para um metal que apresenta transição ativo / passivo (PIMENTA, 2006).

Uma montagem clássica da célula de polarização é a chamada célula de três eletrodos: (1) eletrodo de trabalho, no qual se aplica corrente; (2) eletrodo de referência, a partir do qual se lê o potencial correspondente à corrente aplicada e (3) contra-eletrodo (ou eletrodo auxiliar), que distribui a corrente através do eletrólito. A medida do potencial é efetuada na interface metal-solução, procurando-se eliminar toda a possível contribuição ôhmica do meio (Figura 2.12) (GENTIL, 2003).

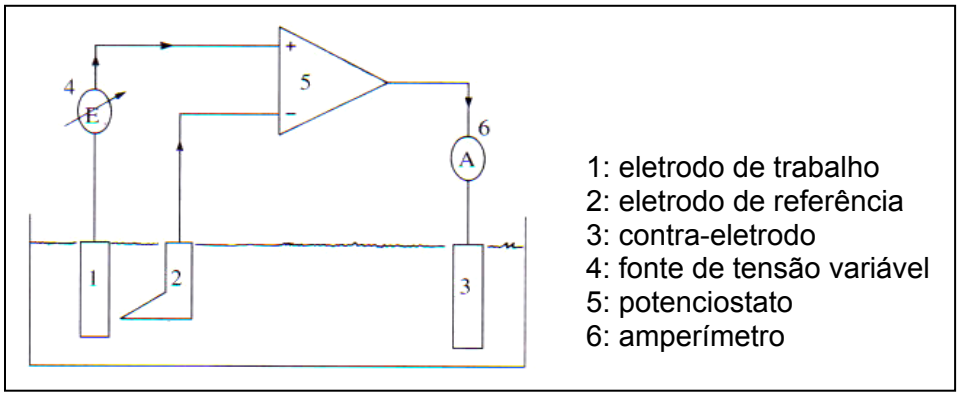


Figura 2.12 – Esquema de sistemas de medições com o potenciostato (GENTIL, 2003).

2.1.4.2 Perda de Massa

É o método de avaliação da corrosão mais simples e extensivamente utilizado, que consiste na observação do comportamento de um corpo-de-prova metálico em função do tempo, pela determinação da perda de massa por unidade de superfície. Este teste fornece valores úteis para o estudo profundo da agressividade do eletrólito, para casos de corrosão generalizada (NACE, 2004).

Normalmente os corpos-de-prova (cupons) são submetidos a duas análises: a primeira é visual, quando se deseja buscar caracterizar a forma de corrosão e a segunda de caráter quantitativo, que permite a determinação da taxa de corrosão por medição da perda de massa (diferença entre a massa inicial e a final do cupom). Todavia existem algumas limitações, a saber (GENTIL, 2003; NACE, 2004):

a) os corpos-de-prova não devem ser utilizados em avaliação de mudanças bruscas de processos corrosivos, pois o tempo de exposição é um fator determinante do ensaio;

b) corrosão localizada não deve ser determinada por este método, pois o valor da taxa de corrosão não representa o perigo desta forma de corrosão;

c) as taxas de corrosão calculadas a partir de cupons de corrosão não podem ser associadas diretamente ao sistema como um todo e sim às regiões cujas características são similares às do teste;

d) algumas formas de corrosão não são detectáveis por cupons de corrosão, por exemplo, processos associados a tipo de fluxo, transferência de calor, mecanismos de danos combinados e corrosão-erosão.

Verifica-se a perda de massa, após a limpeza do corpo-de-prova exposto ao meio estudado, subtraindo-se da sua massa original a massa após o ensaio. Como a

perda de massa é influenciada pela área e tempo de exposição, essas variáveis são expressas pelas taxas de corrosão (TC), em milímetros por ano (mm/ano), através da equação Eq. 2.2 (ASTM G-1, 2003):

$$TC = \frac{87{,}6.\Delta W}{A..t.\rho} \qquad \text{Eq. 2.2}$$

onde ***ΔW*** é a diferença entre as massas antes e após a exposição (mg); ***A*** é a área exposta (cm²); ***t*** é o tempo de exposição (h) e ***ρ*** é a densidade do corpo-de-prova (g/cm³).

Uma das unidades usadas para expressar a taxa de corrosão é o mdd (miligramas por decímetro quadrado de área exposta por dia), através da equação Eq. 2.3. Mas, como é difícil visualizar a profundidade do ataque em mdd, é comum converter-se esta unidade para outras que indicam penetração (profundidade), como, por exemplo, a de milésimo de polegada por ano (mpy), que é popularmente usada nos Estados Unidos para expressar as taxas de corrosão em termos de penetração e pode ser calculada pela equação Eq. 2.4 (ASTM G-1, 2003):

$$mdd = \frac{mpy.\rho}{1{,}44} \qquad \text{Eq. 2.3}$$

$$mpy = \frac{534.W}{A.t.\rho} \qquad \text{Eq. 2.4}$$

onde ***W*** é a perda de massa (mg); ***ρ*** é a densidade do corpo-de-prova metálico (g/cm^3); ***A*** é a área exposta (pol^2) e ***t*** é o tempo de exposição (h).

A Tabela 2.4 relaciona a taxa de corrosão em mpy de ligas típicas de ferro e níquel com a sua resistência à corrosão, segundo Fontana (1986).

Tabela 2.4 – Classificação da resistência relativa à corrosão de ligas típicas de ferro e níquel, de acordo com a taxa de corrosão, em mpy (FONTANA, 1986).

Resistência relativa à corrosão	**mpy**
Excelente	< 1
Muito boa	1 – 5
Boa	5 – 20
Média	20 - 50
Pouca	50 - 200
Inaceitável	> 200

Considerando-se entendidas todas as condições que causam corrosão em tubulações enterradas e submersas, as técnicas empregadas para prevenção e controle da corrosão destas estruturas podem ser mais facilmente compreendidas.

2.2 MÉTODOS DE PREVENÇÃO E COMBATE À CORROSÃO

Os principais métodos utilizados para mitigação da corrosão eletroquímica de instalações enterradas e submersas são: (1) Revestimentos Protetores e (2) Proteção Catódica.

2.2.1 REVESTIMENTOS PROTETORES

O revestimento possui a finalidade específica de formar um filme contínuo, constituído de material isolante, entre o metal e o solo ou água, impedindo com isso o funcionamento das pilhas de corrosão.

Para que possam cumprir suas finalidade, os revestimentos devem possuir as seguintes características: a) boa e permanente adesão à estrutura; b) baixa

absorção de água; c) boa e permanente resistência elétrica; d) boa resistência mecânica; e) boa estabilidade à temperatura; f) resistência à água, vapor e produtos químicos; g) facilidade de aplicação e reparo (HUHN, 2006).

As tubulações enterradas ou submersas são, em geral, protegidas por revestimentos de alto desempenho, como fitas plásticas; espumas rígidas de poliuretano; polietileno extrudado; polipropileno extrudado; tinta epóxi em pó para fusão (*Fusion Bonded Epoxy* (FBE)) e o polietileno tripla camada (PE3L) (DUTRA & NUNES, 1999).

Acontece, porém que, mesmo os revestimentos de boa qualidade, bem especificados e aplicados com o máximo rigor, possuem falhas, devido à porosidade normal dos materiais utilizados e aos danos decorrentes do transporte, manuseio e instalação. Além disso, as variações das condições do solo contribuem para o envelhecimento da camada isolante, diminuindo progressivamente sua eficiência. Assim, sempre acontece que um revestimento com excelente eficiência, imediatamente após a construção da obra, fica sujeito a várias falhas, em tempo relativamente curto. As correntes de corrosão fluindo através dessas falhas, normalmente em pontos concentrados, contribuem para corrosão localizada, podendo furar a parede metálica (RIZZO, 1997, BRASIL, 2000).

2.2.2 PROTEÇÃO CATÓDICA

O método mais seguro e econômico para a proteção contra a corrosão de instalações metálicas enterradas ou submersas consiste no uso de um revestimento adequado, complementado pela proteção catódica, que protegerá as pequenas áreas de falhas do revestimento (RIZZO, 1997; BRASIL, 2000; HUHN, 2006).

A correta aplicação de um sistema de proteção catódica equivale à obtenção de um revestimento perfeito, ou seja, totalmente isento de falhas, sendo que os revestimentos e a proteção catódica estão intimamente ligados. Quanto melhor o revestimento, mais baixo o custo da proteção catódica, devido a menor quantidade de corrente necessária para proteger a estrutrura (BRASIL, 2000).

Em foco neste trabalho, a proteção catódica será detalhada no próximo item.

2.3 PRINCÍPIOS BÁSICOS DA PROTEÇÃO CATÓDICA

Utilizada há muitos anos, a técnica da proteção catódica foi experimentada pela primeira vez, na Inglaterra, em 1824, por Sir Humphrey Davy, para retardar a corrosão das chapas de cobre que revestiam os cascos de madeira de navios, mediante a fixação de pequenos pedaços de materiais como ferro, estanho e zinco, nestas estruturas (IEC, 1990; DUTRA & NUNES, 1999).

No Brasil, o início efetivo de sua utilização se deu por volta de 1964, com a construção do oleoduto Rio-Belo Horizonte (ORBEL), da Petrobrás. Mais recentemente, graças à aplicação eficiente das técnicas de proteção catódica, as companhias de águas, mineração, energia elétrica, as petroquímicas e indústrias de um modo geral, têm encontrado maior facilidade para resolver os problemas de corrosão causados pelo solo, água ou corrente de fuga. (IEC, 1990).

Por tudo isso, atualmente, o emprego da PC no Brasil já se encontra bastante disseminado, sendo fabricados aqui todos os materiais e equipamentos utilizados nos sistemas de proteção, dentro das técnicas mais atualizadas.

2.3.1 MECANISMO BÁSICO

Como já visto, em uma instalação metálica enterrada ou submersa, existe sempre um fluxo de corrente da área anódica à área catódica, através do eletrólito. Quando esta corrente deixa o anodo e penetra no eletrólito, produz uma reação eletroquímica na sua superfície entre os íons positivos do metal nas áreas anódicas e os íons negativos do eletrólito, resultando, como produto de corrosão, o composto do metal. A corrente migra, então, através do eletrólito e penetra na área catódica, onde os íons positivos, provenientes da solução, são liberados. Frequentemente há o desprendimento de hidrogênio gasoso ou formação de outros compostos, como hidroxilas, carbonatos e cloretos. Assim, nas áreas catódicas, as reações não se processam com o metal e sim com o eletrólito, razão pela qual existe ausência de corrosão (JONES, 1971,1972).

A formação de hidrogênio e outros compostos sobre a superfície do catodo é conhecida como polarização catódica, fenômeno que tende a reduzir a atividade da pilha de corrosão. Porém, agentes despolarizantes, como o oxigênio, combinam-se com o hidrogênio, formando íons hidroxila ou água, que mantém a atividade das pilhas de corrosão. As reações típicas que ocorrem, para o caso do aço, são (IEC, 1990; DUTRA & NUNES, 1999):

a) reação que Ocorre com o Metal: $Fe \rightarrow Fe^{+2} + 2e^{-}$

b) reações que Podem Ocorrer no Meio:

- meio neutro não aerado: $2H_2O + 2e^{-} \rightarrow H_2 + 2OH^{-}$

- meio ácido não aerado: $2H^{+} + 2e^{-} \rightarrow H_2$

- meio ácido aerado: $2H^{+} + \frac{1}{2}O_2 + 2e^{-} \rightarrow H_2O$

- meio neutro aerado: $H_2O + \frac{1}{2}O_2 + 2e^{-} \rightarrow 2OH^{-}$

c) evolução das reações, em meio aerado, até a formação da ferrugem:

$Fe^{+2} + 2OH \rightarrow Fe(OH)_2$

$2Fe(OH)_2 + H_2O + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow 2Fe(OH)_3$

$2Fe(OH)_3 \xrightarrow{-2H_2O} 2FeO.OH$ ou $Fe_2O_3.H_2O$ (Ferrugem)

A partir deste princípio, conclui-se que se toda a superfície da estrutura enterrada ou submersa adquirir comportamento catódico, a estrutura não sofrerá ataque corrosivo, devido à "proteção catódica". Isso pode ser conseguido provendo-se a estrutura de um fluxo de corrente, proveniente de uma fonte externa, com uma intensidade tal que seja capaz de anular as correntes de corrosão das diversas pilhas existentes na superfície metálica (DUTRA & NUNES, 1999).

Com a proteção, a corrosão não é eliminada e sim transferida para um material metálico de custo baixo, enquanto a valiosa instalação metálica, que pode ser uma tubulação, um casco de navio, uma plataforma de petróleo ou a armadura de aço de uma obra de concreto, fica protegida (GENTIL, 2003).

Para melhor entender o fenômeno da proteção catódica, é preciso examinar a equação fundamental da corrosão (Eq. 2.5) (DEARING, 1994):

$$I = \frac{E_a - E_c}{R} \qquad \text{Eq. 2.5}$$

onde ***I*** é a corrente de corrosão (A); E_a-E_c é a diferença de potencial entre o anodo e o catodo (V) e ***R*** é a soma da resistência de saída da corrente do anodo e da resistência de entrada da corrente no catodo (ohm).

Quando existe a diferença de potencial sobre a superfície da estrutura ou a resistência possui um valor finito, a corrente de corrosão flui, com o aparecimento do processo corrosivo, no anodo. Assim, proteger catodicamente a estrutura significa cessar a corrente de corrosão, fazendo com que a diferença de potencial seja nula ou aumentar infinitamente o valor da resistência, mediante a aplicação de um revestimento perfeito sobre a superfície da estrutura, que só pode ser conseguido com utilizando-se um revestimento, com boas qualidades isolantes, complementado com a instalação de um sistema de proteção catódica.

2.3.2 CAMPOS DE APLICAÇÃO

Entendidos os princípios da PC, fica evidente que a estrutura a proteger deve estar em contato com o eletrólito. Por isso algumas das aplicações mais comuns de sistemas de PC são (DUTRA & NUNES, 1999; ESTEIO, 2006):

a) tubulações enterradas ou submersas, superfícies externa, quando conduz eletrólitos, tais como adutoras, gasodutos, linhas industriais, etc.;

b) tanques de armazenamento: enterrados ou com fundo em contato com o solo (proteção da superfície externa);

c) estruturas "offshore": como plataformas, tubulações, bóias e outras instalações portuárias;

d) embarcações: superfície externa do costado e interna do tanque de lastro;

e) estacas metálicas: de fundações, portos e ancoradouros;

Mais recentemente, também as armaduras de aço das obras de concreto armado estão sendo protegidas catodicamente, com bastante sucesso.

2.3.3 TIPOS DE PROTEÇÃO

Existem dois métodos para a aplicação do sistema de proteção catódica: (1) galvânico (ou por anodos de sacrifício) e (2) por corrente impressa, sendo ambos fundamentados no princípio de injeção de corrente na estrutura, através do eletrólito.

Quando uma quantidade adequada de fluxo de corrente é descarregada dos anodos, ela é coletada na tubulação e sobrecarrega as correntes naturais que estavam se descarregando das áreas anódicas, formando uma rede de fluxo de corrente sobre todas as áreas na superfície da tubulação, que se torna o catodo da pilha formada e a proteção da corrosão é completada (HUHN, 2006).

A escolha, na prática, do método a ser utilizado, depende da análise de várias considerações técnicas e econômicas, sendo que cada qual tem suas vantagens e desvantagens.

2.3.3.1 Proteção Catódica Galvânica

Como visto anteriormente, quando dois metais dissimilares estão em contato, dentro de qualquer eletrólito, o metal mais anódico se corrói. Em um sistema de PC utilizando anodos galvânicos, a vantagem desse efeito é obtida estabelecendo-se, intencionalmente, uma célula de metal dissimilar (Figura 2.13) suficientemente forte para se contrapor à célula de corrosão naturalmente existente na instalação enterrada ou submersa. O que é facilmente obtido pela seleção de um

material eletronegativo em relação à tubulação de aço e, assim, quando ligado a ela, dentro de um eletrólito, age como anodo, liberando a corrente de proteção.

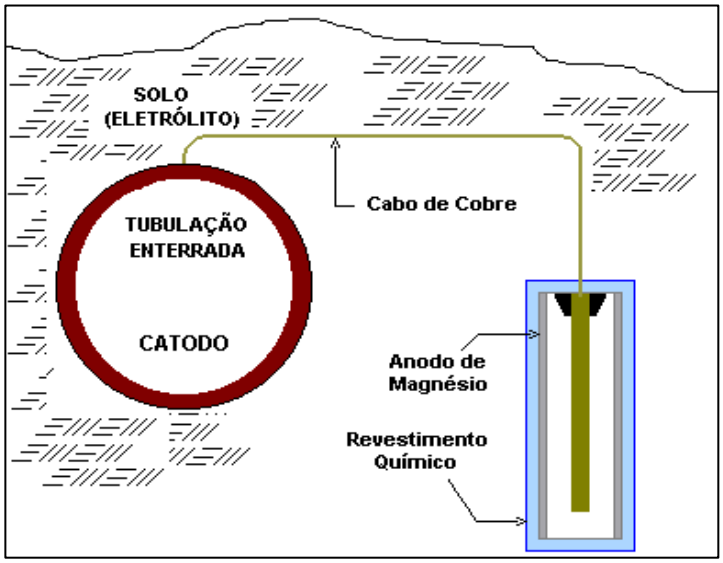


Figura 2.13 – Sistema típico de proteção galvânica, por anodo de magnésio (HUHN, 2006).

A corrente emitida pelo anodo penetra na tubulação através do solo ou da água, bloqueia as correntes de corrosão e retorna ao seu ponto inicial, fechando o circuito por intermédio do fio de cobre. Esses materiais são chamados de anodo de sacrifício, já que eles serão corroídos para proteger a estrutura.

Os anodos galvânicos são, geralmente, enterrados envoltos em uma mistura de gesso, bentonita e sulfato de sódio, que é utilizada como enchimento condutor. Esse enchimento permite a diminuição da resistividade elétrica anodo/solo, reduz os efeitos da polarização do anodo e distribui uniformemente o seu desgaste. Para a utilização em solos, o magnésio e o zinco são bastante eficientes, sendo que para a água do mar, zinco e alumínio são os anodos mais adequados. Esses metais, utilizados em ligas apropriadas, são eletronegativos em relação ao aço, podendo protegê-lo com facilidade (DUTRA & NUNES, 1999; GENTIL, 2003).

Pela "Série Galvânica Prática" (vide Tabela 2.2), pode-se observar que a tensão direcionada entre a tubulação de aço e o magnésio é, normalmente, menor que 1 V. Assim, se os anodos forem especificados para criar uma quantidade útil de corrente, a resistência de contato entre os anodos e o solo deve ser baixa. Por isso, este sistema só é o escolhido quando precisa-se de baixas correntes para proteger a estrutura ou o solo possui baixa resistividade elétrica (HUHN, 2006)

As principais vantagens da utilização de anodos galvânicos para proteger, por exemplo, um oleoduto enterrado, são as seguintes (IEC, 1990):

a) não requer suprimento de corrente alternada no local;

b)os custos de manutenção, após o sistema instalado, são mínimos;

c) raramente aparecerão problemas de interferência com outras instalações;

d) os custos de instalação são baixos.

Por outro lado, as desvantagens são:

a) a quantidade de corrente fornecida à estrutura é limitada pela diferença de potencial, bastante baixa, entre os anodos e a tubulação;

b) a proteção é ineficiente, caso as resistividades elétricas do solo não sejam suficientemente baixas (no máximo 6.000 ohm.cm);

c) se o revestimento dos tubos não for muito bom ou se o oleoduto tiver grande diâmetro e grande comprimento, a proteção com anodos galvânicos ficará muito cara devido à grande quantidade de anodos a ser utilizada;

d) se a tubulação estiver influenciada por correntes de fuga, dificilmente os anodos galvânicos serão eficientes.

2.3.3.2 Proteção Catódica por Corrente Impressa

Este método se caracteriza pelo fornecimento de corrente ao sistema, através de uma fonte externa de força eletromotriz sendo, por isso, denominado de "proteção por corrente impressa". Como pode ser visto na Figura 2.14, os sistemas de corrente impressa são um pouco mais complexos que os de anodos galvânicos.

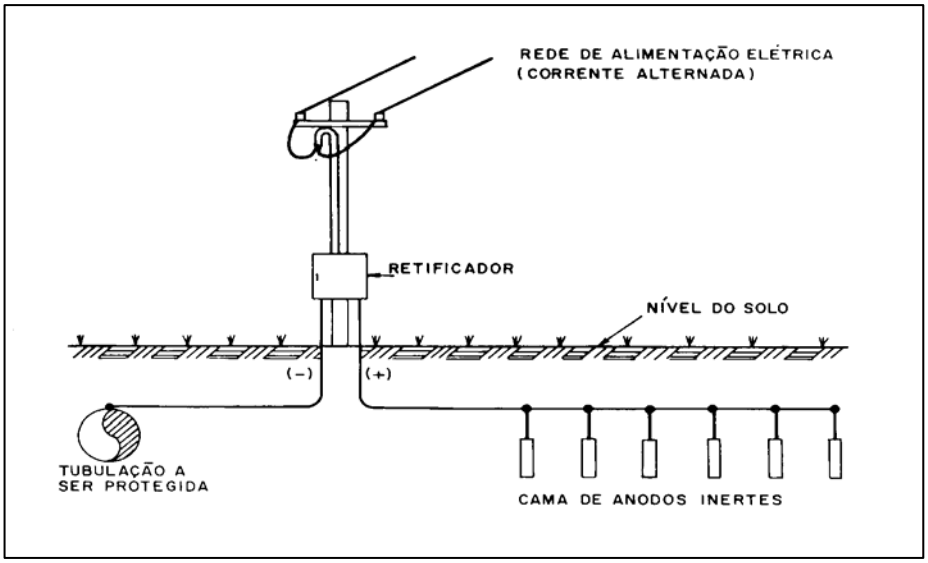


Figura 2.14 – Sistema típico de proteção por corrente impressa (HUHN, 2006).

A fonte externa de força eletromotriz, largamente utilizada na prática, é oriunda de um retificador que constitui-se, basicamente, de um transformador, que abaixa a tensão de alimentação para o valor desejado no circuito de proteção catódica, de uma coluna retificadora, que pode ser construída com placas de selênio ou com diodos de silício, de instrumentos para as medições das voltagens e das correntes de saída, de um horímetro, de dispositivos convencionais de proteção elétrica, como para-raios, fusíveis e disjuntores, além de taps para a regulagem da tensão de saída em corrente contínua. (IEC, 1990; ESTEIO, 2006; HUHN, 2006).

Para que a corrente seja liberada através do eletrólito até a estrutura é necessário que se utilizem anodos, de desgaste controlado, que terão sua

quantidade e disposição determinadas em projeto. Os anodos são instalados em paralelo e podem ser enterrados horizontal ou verticalmente, sendo comum o uso de enchimento condutor de coque metalúrgico moído, que quando convenientemente compactado em torno do anodo, obtém-se menor resistência de saída da corrente para o solo, além da diminuição do consumo do anodo. (IEC, 1990; HUHN, 2006)

Os anodos inertes utilizados na prática são constituídos de grafite ou de ligas metálicas ferro e silício ou chumbo, antimônio e prata; titânio, nióbio ou tântalo platinizados; magnetita; ferrita e, ainda, materiais poliméricos (anodeflex) (GENTIL, 2003). Com excessão do anodo de chumbo, antimônio e prata e os metais platinizados, que devem ser utilizados apenas em água do mar (sem tocar no fundo), todos os outros possuem área de aplicação ampla, incluindo diversos eletrólitos, como o solo, água do mar e água doce.

As vantagens para a aplicação do método por corrente impressa são:

a) possibilidade de fornecer maiores quantidades de corrente às estruturas;

b) possilidade de controlar as quantidades de corrente fornecidas;

c) possibilidade de ser aplicado em qualquer eletrólito, mesmo naqueles de elevada resistividade elétrica;

d) possibilidade de ser aplicado, com eficácia, para a proteção de estruturas ou pobremente revestidas;

e) possilidade de ser aplicado, com economia, para a proteção de instalações de grande porte.

As desvantagens para a utilização desse método são: a necessidade de manutenção periódica, ainda que de fácil realização, o dispêndio com a energia elétrica consumida, embora de pouca monta e a possibilidade de criar problemas de

interferência com outras estruturas metálicas enterradas nas proximidades, o que deve ser evitado (IEC, 1990; DUTRA & NUNES, 1999).

2.3.4 INFLUÊNCIA DOS REVESTIMENTOS PROTETORES

O processo de controle de corrosão só tem sentido se empregado em associação com o uso de revestimentos protetores, pois *o* revestimento reduz, de forma considerável, a superfície exposta à corrosão, diminuindo a intensidade da corrente necessária à proteção da estrutura. Desta forma, é fundamental o emprego de revestimento em tubulações enterradas. Para as estruturas submersas, dependendo de suas características, ele poderá ser usado ou não. Tubulações submarinas e casco de embarcações são exemplos típicos de estruturas que utilizam revestimentos (DUTRA & NUNES, 1999).

Os diversos tipos de revestimentos utilizados em combinação com proteção catódica apresentam vários graus de efíciência média, ao longo da vida útil, que devem ser considerados para efeito de cálculo de proteção catódica. No entanto, o mais importante a considerar na seleção do revestimento é que ele resista bem às condições alcalinas que surgirão no catodo, bem como à sobrevoltagem resultante do processo (DUTRA & NUNES, 1999; GENTIL, 2003).

2.3.5 CÁLCULO DA CORRENTE

A corrente necessária para proteção catódica depende, fundamentalmente, de seguintes fatores: a) área a proteger e condições do revestimento; b) resistividade elétrica do solo; c) dificuldades de polarização da estrutura; d) forma geométrica da estrutura.

Devido às grandes variações existentes nos fatores acima relacionados, a única maneira de se avaliar, com precisão, a corrente necessária para a proteção, é por intermédio do "teste de corrente", no campo.

Por outro lado, em muitos casos existem vantagens técnicas e econômicas que ditam a necessidade de se projetar o sistema de proteção catódica antes mesmo da obra ter sido construída (IEC, 1990). Nessas circunstâncias recorre-se a valores disponíveis na literatura especializada.

Alguns autores (IEC, 1990; DUTRA & NUNES, 1999) citam valores de densidade de corrente variando de 3 a 60 mA/m^2 de superfície, sem revestimento, para tubulações enterradas. Em solos de alta resistividade elétrica essa variação pode ser considerada de 3 a 10 mA/m^2 e de 10 a 60 mA/m^2 para o caso de solos de baixa resistividade elétrica. Para água do mar, podem ser usadas densidades de corrente de até 600 mA/m^2.

2.3.6 CRITÉRIOS DE PROTEÇÃO CATÓDICA

Após a aplicação dos sistemas de proteção catódica, é imprescindível verificar se a estrutura encontra-se realmente protegida. Em virtude disso, foram estabelecidos critérios pela norma NACE RP0169-2002, com a finalidade de avaliar a eficiência do sistema de proteção, com os dados levantados em campo.

Embora existam outros critérios, o procedimento normalmente adotado consiste em medir as mudanças que ocorrem no potencial da estrutura / solo (vide Figura 2.2), utilizando-se os seguintes eletrodos de referência:

a) para instalações enterradas ou embutidas no concreto: $Cu/CuSO_4$ (cobre/sulfato de cobre) ou eletrodo de zinco, com composição igual à dos anodos;

b) instalações submersas: Ag/AgCl (prata/cloreto de prata) ou de zinco;

c) experiências em laboratório: eletrodo de calomelano saturado (ECS).

A norma NACE RP0169-2002 estabelece como critérios de medida de potencial: (1) potencial mínimo de proteção e (2) variação de 100 mV catódicos, descritos a seguir e empregados no presente trabalho.

2.3.6.1 Potencial Mínimo de Proteção

"Potencial negativo (catódico) de, pelo menos, -850 mV entre a estrutura e o eletrólito, relativo ao eletrodo de referência de $Cu/CuSO_4$, com aplicação da Proteção Catódica." (NACE, 2002)

É o critério mais usado na prática. Entretanto, como se baseia na interpretação da leitura de potencial, sua validade é questionável, por não se considerar a queda ôhmica, a princípio, já que a medida é feita com a aplicação da corrente de proteção. Baeckmann (1997), no entanto, considera que, se o eletrodo de referência estiver um ponto suficientemente próximo à superfície da estrutura, pode-se minimizar o erro associado à queda ôhmica.

Há questionamentos ainda a respeito do limite do potencial (GUMMOW, 1993), pois, mesmo quando aplicado, o processo corrosivo ainda pode apresentar uma cinética expressiva (MATTEDI, 1999).

Este critério é bem aplicado e definido para o aço, no entanto, quando se trata dos limites do potencial medido para outros metais e ligas, a própria norma NACE RP0169-2002, abre discussões:

"Em algumas situações, como presença de sulfeto, bactérias, altas temperaturas, ambientes ácidos e metais não similares, o critério descrito pode não ser suficiente."

"Quando a tubulação está dentro de concreto ou enterrada em solos secos, de alta resistividade, podem ser requeridos valores mais negativos que -850 mV."

Alguns autores (GLASS, 1994; BAZZONI; LAZZARI apud MATTEDI, 1999), apresentam valores experimentais de potencial mínimo de -1 V para o concreto.

Algumas precauções são citadas na norma NACE RP0169-2002:

> No critério do potencial mínimo, deve-se ter cuidado com tubulações sob pressão, para evitar corrosão por estresse. O uso de potenciais excessivos em tubulações revestidas externamente deve ser evitado para minimizar o desprendimento de revestimento, por empolamento por hidrogênio. (NACE, 2002)

2.3.6.2 Variação de 100 mV catódicos

"Variação catódica de 100 mV, medida entre a superfície da estrutura e um eletrodo de referência contatando o eletrólito, determinada por interrupção da corrente de proteção." (NACE, 2002)

É um critério mais fundamentado cientificamente, visto que considera somente o potencial de polarização, eliminando, deste modo, a queda ôhmica. No entanto, o uso deste critério só é possível caso haja registros de potencial da estrutura antes da polarização (MATTEDI, 1999; NACE, 2002).

Se o sistema for por corrente impressa e, não havendo nenhum registro prévio, deve-se desligar o sistema de proteção para que a estrutura se despolarize e comparar o valor do potencial de corrosão com o medido assim que a corrente for interrompida. Com uma variação de 100 mV, o critério está satisfeito (Figura 2.15).

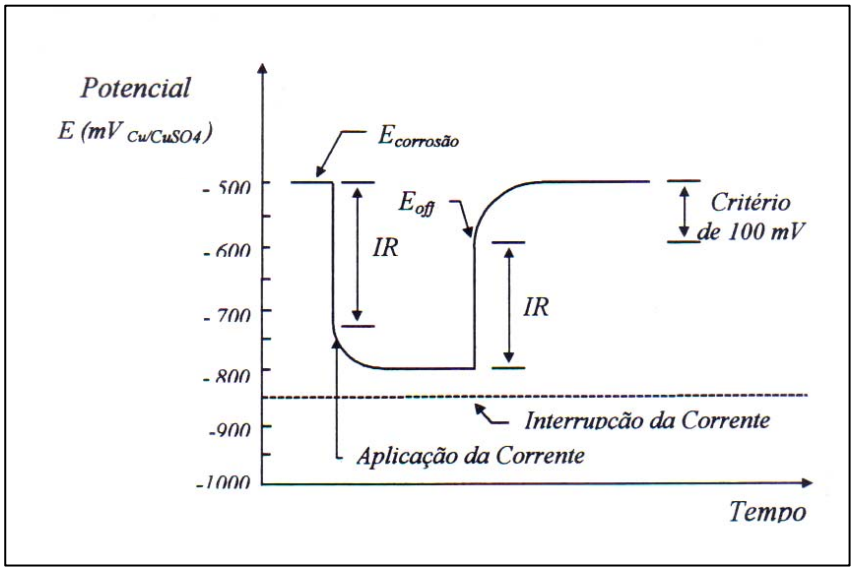


Figura 2.15 – Variação do potencial com aplicação da proteção catódica (MATTEDI, 1999).

Muitos autores (BARLO, 1984; DEARING, 1994; RIZZO, 1997; GUMMOW, 1998; HOLTSBAUM, 2003; MATTER, 2004) têm registrado ótimos resultados, que validam a utilização deste critério, em comparação com o critério do potencial mínimo. Barlo (1984) testou a eficácia do critério dos 100 mV catódicos em 6 diferentes solos, representando 21 meios e somente em um solo o critério não foi satisfatório para a proteção do metal. Glass (1999) registrou densidades de corrente elevadas para alguns casos, onde foi observada corrosão, enfatizando a necessidade de associar-se a variação do potencial com a corrente aplicada.

No início de 2006, a NACE abriu as discussões para efetivação de uma norma exclusiva a respeito do critério dos 100 mV catódicos, com todas as considerações, teorias e aplicações deste critério. Estima-se que, em dez anos, o uso deste critério suba de 26% para 76%, dentro das indústrias que possuem projetos de proteção catódica (NACE, 2006).

Todos os critérios descritos se baseiam na leitura e interpretação de potenciais, no entanto para se determinar qual (quais) critério (s) são mais indicados

para um sistema de proteção catódica, deve-se considerar a presença de correntes de interferência, a resistividades do meio e o tipo de material utilizado. Mas, o fator que realmente determina o uso de um critério é o custo referente à sua aplicação e o grau de dificuldade para a obtenção das medidas de potencial, em detrimento da interpretação ou validade do critério adotado (MATTEDI, 1999).

2.3.7 MANUTENÇÃO DOS SISTEMAS DE PROTEÇÃO CATÓDICA

Ainda existe uma crença de que sistemas de proteção catódica, principalmente por anodos galvânicos, não necessitam de manutenção, entretanto, isto é infundado, uma vez que a proteção catódica das estruturas depende do funcionamento permanente do sistema instalado.

A interrupção no sistema de proteção não provoca, a curto prazo, grandes prejuízos. Entretanto, se as paralizações forem constantes, a médio e a longo prazo pode-se contar com prejuízos dessa natureza. Além dos prejuízos materiais, pode também ocorrer perda de vidas humanas, como já observado e, no caso de companhias concessionárias de serviços públicos, descrédito perante os usuários.

Qualquer que seja o sistema instalado, proteção catódica por anodos galvânicos ou por corrente impressa, deve-se estabelecer um programa de acompanhamento que possibilite os ajustes necessários em tempo útil. Promover a instalação de um sistema de proteção catódica sem cuidar de sua manutenção é desperdício de recursos (GENTIL, 2003).

2.3.8 CUSTOS DA PROTEÇÃO CATÓDICA

O custo total de um sistema de proteção catódica é composto, principalmente de gastos relacionados a levantamento de dados de campo; projeto; materiais; instalação e manutenção. O custo do levantamento de dados de campo e de projeto variam pouco, entretanto, os seguintes acarretam a impossibilidade da precisão no cálculo antecipado do custo de um sistema de proteção catódica.

Esses componentes dependem basicamente do projeto que, por sua vez, está ligado aos dados obtidos nos levantamentos de campo. Verificamos, então, que uma vez realizado o levantamento de campo é perfeitamente possível estabelecer-se o custo da proteção catódica.

Os dados que mais influem na composição do custo são: a) resistividade elétrica do solo, principalmente dos locais disponíveis para colocação dos leitos de anodos; b) qualidade do revestimento empregado; c) disponibilidade de corrente alternada para alimentação dos retificadores; d) correntes de interferência na região; e) dimensões e tipo da instalação a proteger (DUTRA & NUNES, 1999).

Dispondo desses dados, o engenheiro de proteção catódica pode definir o sistema mais adequado técnica e economicamente para o caso em estudo. Constata-se, assim, a dificuldade de prever-se com precisão o custo de um sistema de proteção catódica. Entretanto, para fins orçamentários pode-se indicar, que esse custo pode variar desde 5% do valor global da obra, para pequenas instalações, até menos que 1% (ESTEIO, 2006) para as obras de grande porte. Valores baixos, principalmente se analisarmos os aspectos relativos à segurança operacional, por tempo ilimitado, que os sistemas de proteção catódica proporcionam.

2.4 ELABORAÇÃO DO PROJETO DE PROTEÇÃO CATÓDICA

Um projeto de proteção catódica, para ser bem executado, deve ser baseado em um cuidadoso levantamento de dados das instalações a proteger e medições de campo.

2.4.1 LEVANTAMENTO DE DADOS DAS INSTALAÇÕES

Constitui-se, basicamente, no estudo das características físicas da estrutura, que além de auxiliarem na previsão dos problemas de corrosão, permitem planejar o programa das medições de campo a serem realizadas. As mais importantes são (DUTRA & NUNES, 1999; GENTIL, 2003):

a) material da estrutura a ser protegida, bem como suas propriedades;

b) propriedades do revestimento a ser utilizado;

c) características dimensionais e geométricas da estrutura;

d) histórico dos furos ou problemas sérios de corrosão, já experimentados;

e) especificação e propriedades do revestimento utilizado;

f) localização de outras instalações metálicas enterradas ou submersas;

g) levantamento das linhas de transmissão elétrica em alta tensão.

2.4.2 LEVANTAMENTO E MEDIÇÕES DE CAMPO

São realizados na fase preliminar de qualquer projeto, levando em consideração se as estruturas estão de fase de projeto (não instaladas), onde se faz o levantamento de resistividade do meio e pesquisa de locais para instalação da PC ou se são existentes, realizando-se as seguintes medidas descritas a seguir.

2.4.2.1 Resistividade Elétrica

A resistividade do solo é um indicador comumente usado para avaliar a corrosividade do solo ao metal enterrado. A baixa resistividade do solo indica que há abundância de corrente fluindo entre as áreas anódicas e catódicas na superfície do metal, enquanto que solos de alta resistividade as suprimem (LOUREIRO, 2005).

Para o solo, a resistência pode ser medida através de sua relação com a resistividade, segundo a equação Eq. 2.6:

$$R = \rho \frac{L}{A} \qquad \text{Eq. 2.6}$$

onde ***R*** é a resistência do solo (ohms); ***L*** é o comprimento do caminho elétrico (cm); ***A*** é a área da seção transversal por onde flui a corrente (cm^2) e ***ρ*** é a resistividade do solo em estudo (ohm.cm).

Para a medição da resistividade do solo, em campo, é usual a aplicação da técnica do Método de Wenner (Método dos Quatro Pinos) que consiste na colocação de quatro pinos (eletrodos) no solo em linha reta, distanciados igualmente um do outro (Figura 2.16). A corrente é passada através dos dois pinos externos enquanto que a voltagem é medida nos 2 pinos internos (DUTRA & NUNES, 1999).

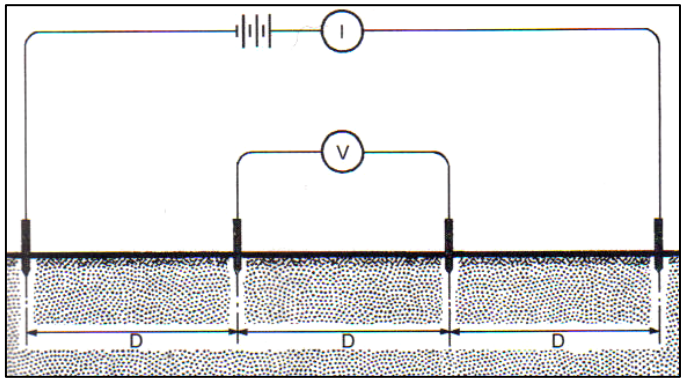


Figura 2.16 – Esquema da instalação para medir resistividade do solo (DUTRA & NUNES, 1999).

O potencial é medido com a corrente alternada ligada e depois com a mesma desligada, e a diferença de potencial é determinada. A resistência *R* entre os pinos internos é definida pela equação Eq. 2.7:

$$R = \frac{\Delta V}{I} \qquad \text{Eq. 2.7}$$

onde $\boldsymbol{\Delta V}$ é a diferença de potencial obtida (V) e $\boldsymbol{I}$ é a corrente aplicada (A).

2.4.2.2 Potenciais Estrutura / eletrólito

O levantamento de potencial só é executado para estruturas já instaladas e contribui para a determinação do seu estado de corrosão. A análise destes potenciais permite, ainda, determinar a existência de macropilhas de corrosão e de correntes de interferência. Em função dos potenciais medidos e valores da resistividade, pode-se fazer uma avaliação mais criteriosa da corrosividade de um eletrólito. Especialmente para os solos, os critérios apresentados na Tabela 2.5 são muito úteis (DUTRA & NUNES, 1999).

Tabela 2.5 – Corrosividade em função da resistividade e do potencial para o aço (DUTRA & NUNES, 1999).

Potencial ($Cu/CuSO_4$) (V)	**Resistividade (ohm. cm)**		
	De 500 a 1.000	**De 1.000 a 10.000**	**De 10.000 a 100.000**
Até -0,4	Pouco corrosivo	Muito pouco corrosivo	Não corrosivo
-0,4 a -0,5	Moderadamente corrosivo	Pouco corrosivo	Muito pouco corrosivo
-0,5 a -0,6	Corrosivo	Moderadamente corrosivo	Pouco corrosivo
Além de -0,6	Muito corrosivo	Corrosivo	Moderadamente corrosivo

A Tabela 2.5 apresenta como limitação o fato de que, para grandes estruturas, principalmente oledutos, o contato com solos de resistividades diferentes, mesmo valores elevados, dará origem a pilhas de resistividade diferencial. Outra limitação é a existência de pilhas galvânicas muito comuns entre estruturas de aço enterradas em áreas industriais e aterramentos em cobre.

2.4.2.3 Acidez do Eletrólito

O pH do eletrólito tem um efeito direto na vida útil de tubulações de aço. Quanto menor o pH, maior será a taxa de corrosão, resultando na diminuição da vida útil da tubulação, pois um solo com pH menor promove um nível maior de despolarização das células de corrosão naturais, aumentando assim a taxa de corrosão (LOUREIRO, 2005).

Para efeito de projeto e aplicações em proteção catódica, é preferível pH na faixa de 5.0 e 9.0. Solos com pH inferior a 5 podem contribuir para uma corrosão severa e uma rápida deterioração dos metais expostos. Solos com pH entre 6,5 e 7,5 em condição de ausência de oxigênio e que possuem bactérias redutoras de sulfato promovem corrosão microbiológica nos metais. Solos com pH acima de 8 (alcalinos ou calcários) contêm altas concentrações de sais dissolvidos resultando numa baixa resistividade (IEC, 1990).

2.4.2.4 Pesquisa de Corrosão Microbiológica

A presença de íons sulfato no solo, nutriente para as bactérias redutoras de sulfato (BRS) ou sulfeto, resultante do processo metabólico de redução de íons sulfato ou sulfito indica presença destas bactérias que aumentam, significativamente,

a taxa de corrosão do aço. Uma concentração maior que 0,5 ppm de sulfeto indica que o solo é muito corrosivo (ROBINSON apud LOUREIRO, 2005).

2.4.2.5 Medições de Corrente

A corrente é o fator primário na corrosão eletrolítica. A intensidade da corrente gerada é diretamente proporcional à taxa da perda de metal do anodo. Um ampère de corrente, descarregando diretamente no eletrólito pode remover, aproximadamente, 10 Kg de aço, em um ano. Outros metais possuem taxas diferentes de consumo, expressas em termos de Kg/A/ano, como será visto adiante.

Felizmente, é raro se encontrar correntes de corrosão em tubulações que sequer se aproximam de um ampère num ponto. Na maioria dos casos encontram-se correntes em valores de miliampères (IEC, 1990, LOUREIRO, 2005).

2.5 DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS DE PROTEÇÃO CATÓDICA POR CORRENTE IMPRESSA

Mediante a análise criteriosa dos dados obtidos em campo, o projetista de possui condições de determinar a quantidade total de corrente a ser instalada, o uso de anodos galvânicos ou de retificadores, o número, tipo, dimensões, profundidade e espaçamento dos anodos e todas as outras variáveis envolvidas.

2.5.1 CÁLCULO DA CORRENTE DE PROTEÇÃO CATÓDICA

A corrente necessária à proteção de determinada estrutura independe de sistema que se utiliza, seja galvânico ou por corrente impressa, sendo calculada pela equação a seguir (Eq. 2.8) (DUTRA & NUNES, 1999; GENTIL, 2003):

$$I = A.Dc.F(1 - E) \qquad \text{Eq. 2.8}$$

onde ***I*** é a corrente necessária (mA); ***A***, a área da superfície ser protegida (exposta ao eletrólito) (m^2); ***Dc*** é a densidade de corrente (mA/m^2); ***F*** é o fator de velocidade (admensional) e ***E***, a eficiência do revestimento (em fração decimal).

Estes parâmetros são calculados da seguinte forma (GENTIL, 2003):

a) *densidade de corrente*: é a corrente de proteção necessária à estrutura sem revestimento, por unidade de área, obtida em função da resistividade do eletrólito, pode ser calculada pela equação Eq. 2.9 ou ainda, através do gráfico da Figura 2.17.

$$Dc = 73{,}73 - 13{,}35 \log \rho \qquad \text{Eq. 2.9}$$

onde ρ é a resistividade do eletrólito.

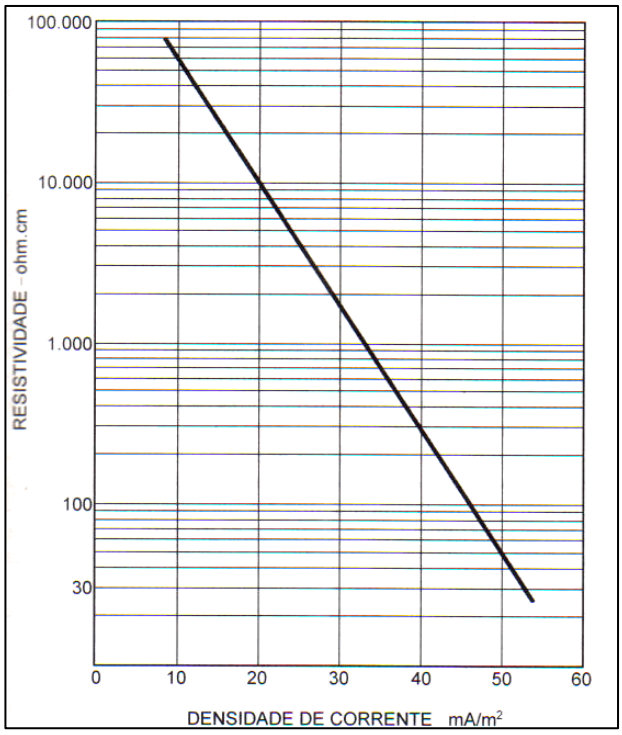


Figura 2.17 – Variação da densidade de corrente de proteção do aço, em função da resistividade elétrica do meio (DUTRA & NUNES, 1999).

Para o caso das instalações marítimas, a densidade de corrente depende, além da resistividade elétrica do eletrólito, de outros fatores tais como: velocidade das correntes marítimas, turbulência, teor de oxigênio dissolvido na água e presença de incrustrações na estrutura.

b) *fator de correção da velocidade*: é um coeficiente adotado quando existe movimento relativo entre a estrutura e o eletrólito. Este coeficiente pode ser obtido através do Gráfico da Figura 2.18.

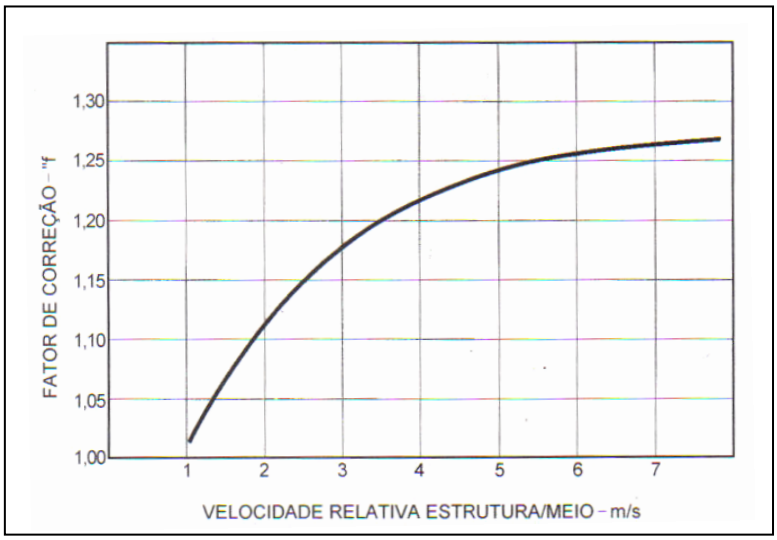


Figura 2.18 – Fator "f", em função da velocidade relativa estrutura / meio (DUTRA & NUNES, 1999).

c) *eficiência do Revestimento*: uma estrutura revestida necessita, para sua proteção, de uma quantidade de corrente bem menor do que uma estrutura nua, por isso é importante estimar da eficiência do revestimento corretamente no projeto de proteção catódica. A eficiência do revestimento pode ser determinada, no campo, através de testes de injeção de corrente. Calcula-se a eficiência do revestimento pela seguinte expressão (Eq. 2.10):

$$E = (1 - \frac{I}{A.d}).100 \qquad \text{Eq. 2.10}$$

onde ***E*** é a eficiência (%); ***I***, a intensidade de corrente empregada; ***A***, a área da superfície ser protegida (m^2); ***d*** é a densidade de corrente (mA/m^2).

A estimativa da eficiência dos revestimentos que se estabelece o maior ou menor coeficiente de segurança que se adota no dimensionamento de um sistema de proteção catódica. Neste particular, a experiência do projetista é fator fundamental para um perfeito dimensionamento da corrente de proteção.

Nos sistemas por corrente impressa, uma vez determinada a corrente necessária de proteção, adota-se o procedimento descrito a seguir.

2.5.2 DEFINIÇÃO DO NÚMERO DE PONTOS DE INJEÇÃO DE CORRENTE

São constituídos de conjuntos retificador/leito de anodos. O número de retificadores a ser utilizado deve ser suficiente para fornecer e distribuir, de modo econômico e eficiente, toda a corrente de proteção catódica necessária à estrutura. As características principais dos retificadores a serem selecionados são (IEC, 1990):

a) as tensões de saída podem variar desde 10V até 100V, sendo que, em alguns casos, podem ser usados até 140V, com restrições de segurança;

b) as correntes de saída podem variar de 10A a 500A (as correntes maiores são usadas em instalações marítimas);

c) a potência de saída deve ser limitada, em l0kVA;

d) os retificadores mais comumente utilizados são: (1) instalações terrestres: 50V/30A, 50V/50A, 100V/30A e 100V/50A; (2) instalações marítimas: 20V/200A, 20V/300A e 20V/400A; (3) armaduras de aço de concreto: 30V/10A e 30V/15A.

Para a instalação dos conjuntos retificador/leito de anodos devem ser escolhidos locais com baixa ou média resistividade elétrica (sempre que possível, inferior a 12.000 ohm.cm), com fácil acesso para montagem e inspeção, com

disponibilidade de energia elétrica em baixa ou média tensão (máximo de 15kV) e com espaço suficiente para a instalação do leito de anodos, que algumas vezes precisa ser extenso (faixa de 300m x 5m) (IEC, 1990).

2.5.3 SELEÇÃO DOS ANODOS

A seleção dos anodos em sistemas por corrente impressa, consiste na escolha do material e tipo de anodo a ser utilizado. Os anodos inertes mais comumente utilizados são apresentados na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 – Anodos inertes para sistemas de corrente impressa (GENTIL, 2003).

Material do anodo	**Densidade de corrente no anodo (A/m^2)**	**Desgaste (kg/A . ano)**
Grafite	Até 5	0,40
Fe-Si	Até 15	0,35
Fe-Si-Cr	Até 15	0,35 (em água do mar)
Pb-Sb-Ag	50 a 100	0,1
Ti-Pt	Ampla faixa	Desprezível
Nb-Pt	Ampla faixa	Desprezível
Ta-Pt	Ampla faixa	Desprezível
Ti-revestido com óxidos de metais nobres	Ampla faixa	Desprezível
Magnetita	Até 115	0,04
Ferrita	Até 115	0,002
Polímeros	Ampla faixa	Desprezível

O desgaste indicado na Tabela 2.6 é o esperado para a faixa de densidade de corrente recomendada, devendo-se, portanto, verificar se ela é atendida. O uso de densidade acima do limite superior pode provocar desgaste mais acelerado e, abaixo, tornar o leito de anodos antieconômico (DUTRA & NUNES, 1999).

A escolha do tipo de anodos é feita em função das características do sistema de proteção e das propriedades do material do anodo. Dentre essas propriedades, destaca-se a taxa de desgaste, a qual influi no cálculo da massa necessária, que é calculada pela expressão (Eq. 2.11):

$$M = \frac{d.t.I}{f} \qquad \text{Eq. 2.11}$$

onde ***M*** é a massa de anodo (kg); ***d*** é o desgaste do material do anodo (kg/A.ano); ***t***, o tempo de vida útil desejada para o leito (ano); ***I***, a corrente requerida pelo sistema (A) e ***f*** é o fator de utilização (a critério do projetista varia de 0,5 a 0,85).

Determinada a massa, estabelece-se o número mínimo de anodos, a partir da massa de cada um, para garantir a vida do sistema durante o tempo t. Para anodos com diâmetro de 75 mm e comprimento de 1,5 m (área externa de 0,36 m^2), mais usados, têm-se as massas indicadas na Tabela 2.7 (DUTRA & NUNES, 1999).

Tabela 2.7 – Massa unitária de anodos (DUTRA & NUNES, 1999).

Material do anodo	Massa (kg/anodo)
Grafite	12
Fe-Si	52
Fe-Si-Cr	52
Pb-Sb-Ag	72

2.5.4 ESCOLHA DO ARRANJO E DISPOSIÇÃO DOS ANODOS

Determinado o número mínimo de anodos, em termos de massa, deve-se estabelecer o arranjo apropriado para o conjunto de anodos. Este arranjo envolve o posicionamento e a disposição dos anodos, que dependem do tipo de estrutura, da resistividade do meio e da disponibilidade de espaço útil. A experiência do projetista

é fundamental no estabelecimento de um arranjo e disposição convenientes. A Figura 2.19 apresenta alguns tipos de arranjo de leitos para proteção catódica por corrente impressa (DUTRA & NUNES, 1999).

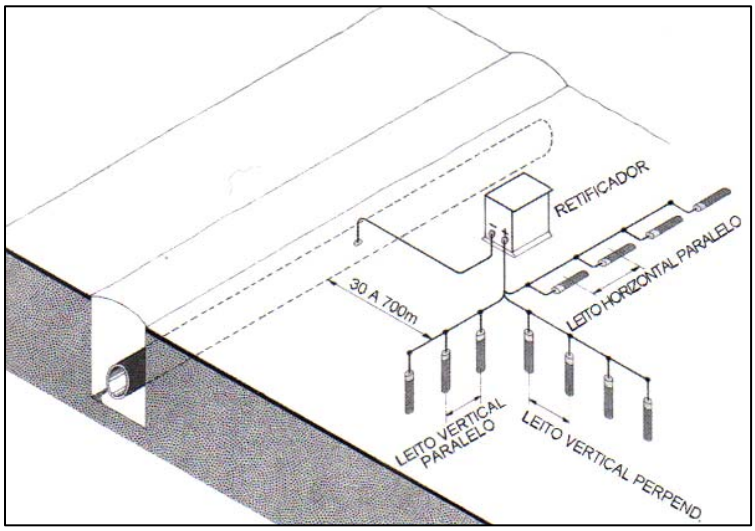


Figura 2.19 – Exemplos de leitos de anodos (DUTRA & NUNES, 1999).

2.5.5 CÁLCULO DA RESISTÊNCIA DO CIRCUITO

Para o cálculo da resistência do circuito retificador/anodo/eletrólito/estrutura/retificador, pode ser adotada a equação Eq. 2.12 (DUTRA & NUNES, 1999):

$$RM \geq 1{,}2(Rc + Rpc + Rca + Rn) \qquad \text{Eq. 2.12}$$

onde ***RM*** é a resistência máxima que deve ter o circuito externo de modo que, com a tensão nominal do retificador, a corrente nominal possa ser injetada (V/I); ***1,2*** é um fator de segurança; ***Rc***, a resistência de contato catodo/eletrólito (ohm), que depende da área de contato da estrutura com o eletrólito, da eficiência do revestimento da estrutura e da resistividade elétrica do eletrólito. É, na grande maioria das vezes, muito pequena, podendo ser desprezado; ***Rpc***, a resistência do próprio catodo (ohm), é usada para o caso de tubulações e depende da resistência

do tubo por metro linear, da resistividade elétrica do metal e da massa do tubo (seu valor também é muito pequeno, podendo ser desprezado); ***Rca*** é a resistência dos cabos elétricos de interligação (ohm), podendo ser facilmente calculada, em função das bitolas e comprimentos dos cabos elétricos, mediante consulta das tabelas fornecidas pelos fabricantes e ***Rn*** é a resistência de contato anodo/eletrólito (ohm), sendo a parcela mais significativa no cálculo, podendo ser calculada com o auxílio das seguintes expressões de resistência de:

a) *um anodo cilíndrico instalado na vertical*: $Rn = \frac{\rho}{2\pi L}(\ln\frac{8L}{D} - 1)$, onde:***R*** é a resistência (ohm); ρ, a resistividade elétrica do solo (ohm.cm.); ***L***, o comprimento do anodo (cm); ***D***, o diâmetro do anodo (cm);

b) *um leito de anodos cilíndricos instalados na vertical*: $Rn = \frac{\rho}{2NL}[\ln(\frac{8L}{D}) - 1 + \frac{2L}{S}\ln(0{,}656N)]$, onde ***N*** é o Número de anodos; ***S***, o Espaçamento entre anodos (cm);

c) *um anodo cilíndrico instalado na horizontal*: $Rn = \frac{\rho}{2NL}[\ln(\frac{4L^2 + 4L\sqrt{P^2 + L^2}}{DP}) + \frac{P}{L} - \sqrt{P^2 + L^2} - 1]$, onde ***P*** é o dobro da profundidade do anodo (cm);

d) *um leito de anodos cilíndricos instalados na horizontal*: $Rn = \frac{RH.RA}{RV}$, onde ***RH*** é a resistência de um anodo cilíndrico instalado na posição horizontal (ohm); ***RA***, a resistência calculada pela fórmula usada para um leito de anodoscilíndricos na posição vertical e ***RV***, a resistência calculada pela fórmula usada para um anodo cilíndrico i posição vertical;

e) um leito de anodos cilíndricos instalados na posição horizontal, com coluna de enchimento condutor contínua: $R = \frac{\rho}{2\pi L}(\ln\frac{8L^2}{DP} - 2)$;

f) leitos de anodos não cilíndricos: quando os anodos não são cilíndricos ou são instalados em coluna de enchimento condutor de seção transversal quadrada ou retangular, como ocorre com frequência na instalação dos anodos inertes horizontais, o diâmetro equivalente do anodo ou da coluna de enchimento pode ser calculado por: $De = 2\sqrt{a/\pi}$, onde ***De*** é o diâmetro equivalente (cm) e ***A*** é a área da seção transversal (cm^2).

2.5.6 VERIFICAÇÃO DO NÚMERO DE ANODOS

O número mínimo de anodos calculado pelo critério da massa mínima, precisa ser verificado, tendo em vista a resistência do circuito. O número de anodos a ser usado em determinado leito tem que ser, sempre, igual ou maior que o número mínimo de anodos calculado pelo critério da massa e da resistência (IEC, 1990).

2.5.7 AUXÍLIO DE MICROCOMPUTADORES

Todos os cálculos para o dimensionamento dos sistemas de proteção catódica podem ser extremamente facilitados mediante o uso de microcomputadores. O cálculo, por exemplo, da corrente total necessária para a proteção de tubulações enterradas pode ser feito, com boa precisão, se forem adotadas pequenas seções do tubo, utilizando-se o valor de resistividade elétrica do solo, medido em cada uma das seções e somando-se as várias correntes parciais.

CAPÍTULO 3

MATERIAL E MÉTODO

O presente capítulo descreve todo o material utilizado e a metodologia empregada neste estudo. Os ensaios de polarização e perda de massa foram realizados no Laboratório de Processos Inorgânicos, EQ/UFRJ. A análise de pite foi executada no Laboratório de Corrosão do Instituto Nacional de Tecnologia (LACOR/INT).

3.1. MATERIAL UTILIZADO

3.1.1 AMOSTRAS

Foram utilizadas amostras cilíndricas de aço-carbono SAE 1020, como a apresentada na Figura 3.1, com as seguintes dimensões aproximadas: 0,5 cm de diâmetro e 1,5 cm de comprimento.

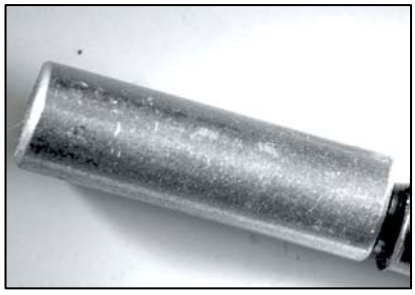


Figura 3.1 – Amostra de aço-carbono SAE 1020 usada nos ensaios experimentais.

3.1.1.1 Escolha das Amostras

Estas amostras foram usadas simultaneamente como corpos-de-prova, para determinação de perda de massa e como eletrodo de trabalho, para os ensaios de polarização. Por esta razão foram confeccionadas em formato cilíndrico e de maneira que pudessem ser rosqueadas em uma haste, mantendo o contato do metal com a célula de polarização, como será visto mais adiante neste capítulo.

O aço-carbono SAE 1020 (Tabela 3.1) foi escolhido como matéria-prima para confecção dos corpos-de-prova por possuir composição química semelhante ao usualmente empregado para confecção de dutos, a serem enterrados ou submersos.

Tabela 3.1 – Composição química percentual do aço-carbono SAE 1020 (NBR NM87).

C (%)	Mn (%)	Si (%)	$P_{máx.}$ (%)	$S_{máx.}$ (%)
0,17-0,23	0,3-0,6	0,25	0,040	0,050

As dimensões das amostras foram escolhidas de tal forma que sua altura fosse a maior possível para obtenção de maior área exposta e menor massa possível, a fim de que mesmo perdas de massa muito pequenas pudessem ser "percebidas" na balança analítica, de quatro casas decimais.

3.1.2 MEIOS ESTUDADOS

Foram estudados quatro meios diferentes, caracterizados pela resistividade:

a) areia de rio lavada, com 5% de umidade=> altíssima resistividade;

b) água destilada => alta resistividade;

c) areia de rio lavada, com 35% de umidade => média resistividade;

d) solução de NaCl 3,5% p/v => baixíssima resistividade.

3.1.2.1 Escolha dos Meios

Os meios foram escolhidos segundo os seguintes parâmetros: (1) serem de fácil obtenção e operação; (2) constituírem meios representativos das condições reais a que são expostos os materiais, a fim de que os resultados obtidos possam ser aplicáveis em campo e (3) resistividades variadas, de maneira a englobar uma ampla faixa de resistividade.

3.2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.2.1 PREPARO DOS MEIOS

Para preparo dos solos nas umidades requeridas, colocou-se em um recipiente de peso conhecido, aproximadamente 1 Kg da areia de rio lavada, como recebida. Pesou-se o conjunto, que foi levado a estufa, a 105-110 ^{0}C, por 24 horas.

Após este período, colocou-se em dessecador até esfriar e pesou-se o conjunto, que foi novamente levado à estufa por 2 horas, deixado em dessecador e pesado. Repetiu-se este procedimento até que o peso final se mantivesse constante.

Considerando que a areia estava completamente livre de umidade, pesou-se a quantidade suficiente de areia para cada ensaio e adicionou-se, gradativamente, a quantidade de água necessária para obter a amostra de areia, na umidade desejada, homogeneizando-a com bastão de vidro.

Para a obtenção da solução de NaCl, na concentração desejada, pesou-se 35 gramas de NaCl e dissolveu-se em becher, transferindo, quantitativamente, para balão volumétrico de 1000 mL, avolumando, por fim, a solução.

Para cada ensaio experimental, foram preparados novos meios de areia (5 e 35% de umidade) e solução de NaCl 3,5% p/v.

3.2.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MEIOS

Os meios estudados foram caracterizados segundo as medidas de pH, condutividade, resistividade elétrica e potencial aço/eletrólito, através das metodologias descritas a seguir.

3.2.2.1 Condutividade Elétrica e pH

Em pequenos becheres, colocou-se pequena quantidade de cada um dos meios a estudar e mediu-se o pH e condutividade, diretamente, utilizando o medidor portátil de pH e condutividade Multi 340i, da WTW.

A condutividade foi medida somente nas amostras de água destilada e de solução de NaCl 3,5% p/v. Para as amostras de solo, foi medida a resistividade (inversamente proporcional à condutividade), cujo procedimento é descrito a seguir.

3.2.2.2 Resistividade Elétrica

A resistividade dos solos estudados foi medida em uma caixa padrão de acrílico com laterais metálicas de cobre, chamada "soil box" (Figura 3.2), cujas dimensões são tais que seu comprimento (L) é numericamente igual à área (A) transversal ao fluxo de corrente no solo, de modo que o valor da resistência (R) lida seja igual ao da resistividade (ρ) do solo, tendo em vista a relação expressa na equação Eq. 2.6.

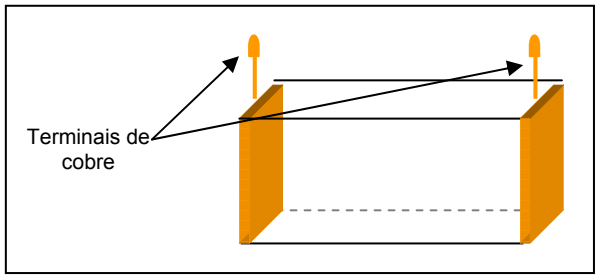


Figura 3.2 – Representação esquemática de uma "soil box".

O solo analisado foi compactado e nivelado dentro da "soil box", de modo a não haver espaços vazios. Então, procedeu-se a leitura da resistividade do meio, conectando aos terminais metálicos de cobre, os fios do equipamento medidor de resistividade SMARTEC MI2124, da METREL.

3.2.2.3 Potencial Natural Aço / eletrólito

Este potencial foi medido conectando-se um dos pólos do multímetro digital ET-2033 da Minipa ao corpo-de-prova e o outro a um eletrodo de referência (vide item 2.1.1.1). Para as medidas nas areias, utilizou-se como referência eletrodo de Cobre/Sulfato de Cobre ($Cu/CuSO_4$) e para a água destilada e solução de NaCl 3,5% p/v, foi usado Prata/Cloreto de Prata (Ag/AgCl).

3.2.3 ENSAIOS ELETROQUÍMICOS

3.2.3.1 Curvas de Polarização

Inicialmente, foram obtidas as curvas de polarização anódica e catódica do aço-carbono SAE 1020, nos quatro meios estudados, a fim de identificar a corrente requerida para manutenção dos critérios a serem aplicados à proteção catódica. Estes ensaios foram realizados à temperatura ambiente, utilizando o potenciostato / galvanostato Omnimetra, modelo PG-40, operando no modo potenciostato, a uma taxa de varredura de 20 mV/min.

O sistema foi montado em uma célula de vidro com 600 mL de eletrólito, onde foram inseridos 3 eletrodos: (1) um contra eletrodo (grafite para os solos e platina para os outros meios); (2) eletrodo de referência ($Cu/CuSO_4$ para solos e Ag/AgCl para os outros meios); e (3) um eletrodo trabalho de aço-carbono SAE 1020, embutido em resina, com 1 cm^2 de área exposta ao meio corrosivo.

Os valores de corrente e potencial, registrados pela interface do PG-40, foram plotados e tratados no software Excel 2003.

3.2.3.2 Polarização Catódica

Para o estudo da eficiência dos critérios de proteção catódica, os corpos-de-prova, sem revestimento, foram polarizados catodicamente durante 30 dias. Devido ao grande volume de amostras, foram utilizados dois potenciostato/galvanostatos: o MQPG-01, da Microquimica e o modelo PG-40, da Omnimetra, tornando possível polarizar duas amostras, simultaneamente. Ambos operaram no modo potenciostático à temperatura ambiente, em configuração de 3 eletrodos:

a) contra-eletrodo: grade de aço inoxidável (Figura 3.3);

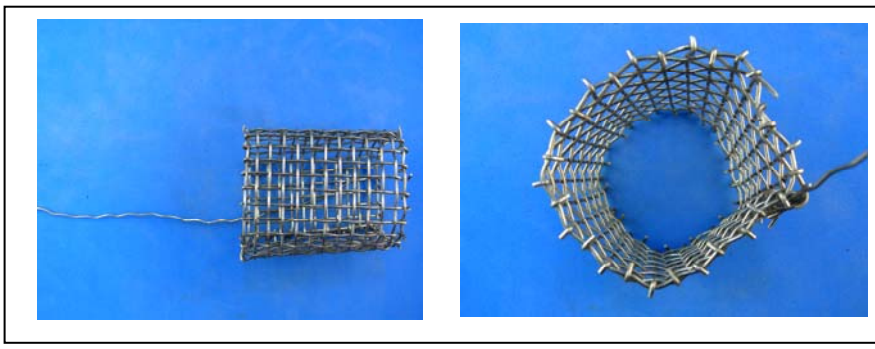


Figura 3.3 – Contra-eletrodo de aço inoxidável, utilizado nos ensaios de polarização.

b) eletrodo de referência: para estudos na solução de NaCl 3,5% p/v e água destilada, utilizou-se eletrodo de Ag/AgCl e para os solos arenosos, utilizou-se um eletrodo de $Cu/CuSO_4$;

c) eletrodo de trabalho: amostras cilíndricas de aço-carbono SAE 1020, de área exposta aproximada de 2,6 cm^2, "rosqueados" em uma haste de aço inoxidável, revestida de teflon com 15 cm de comprimento, aproximadamente (Figura 3.4).

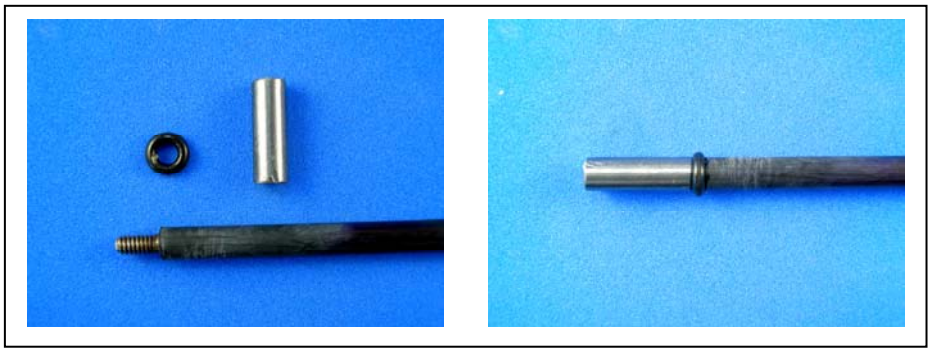
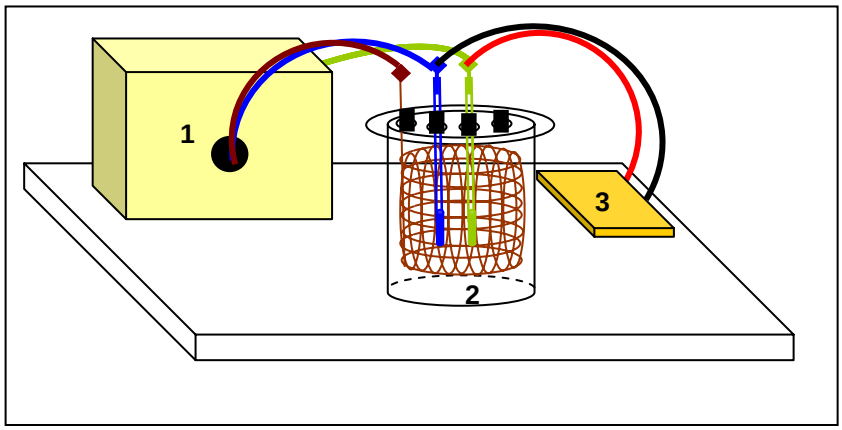


Figura 3.4 – Eletrodo de trabalho, de aço-carbono, utilizado nos ensaios de polarização.

Estes eletrodos foram inseridos nos meios resistivos, colocados em células de vidro de 600 mL, próprias para este fim, e conectados aos terminais do potenciostato.

Foi conectado ainda, um multímetro digital ET-2033 da Minipa, nos eletrodos de trabalho e referência, a fim de monitorar o potencial aplicado em cada critério. A Figura 3.5 apresenta um esquema representativo desta montagem.



1- Potenciostato	**Eletrodo azul: trabalho**
2- Célula (Sistema fechado)	**Eletrodo verde: referência**
3- Multímetro	**Eletrodo marrom: contra-eletrodo**

Figura 3.5 – Esquema simplificado do sistema célula / potenciostato para os ensaios de polarização.

Após montagem do sistema, foi aplicado o potencial requerido, entre a amostra e o eletrólito, para cada um dos critérios de proteção:

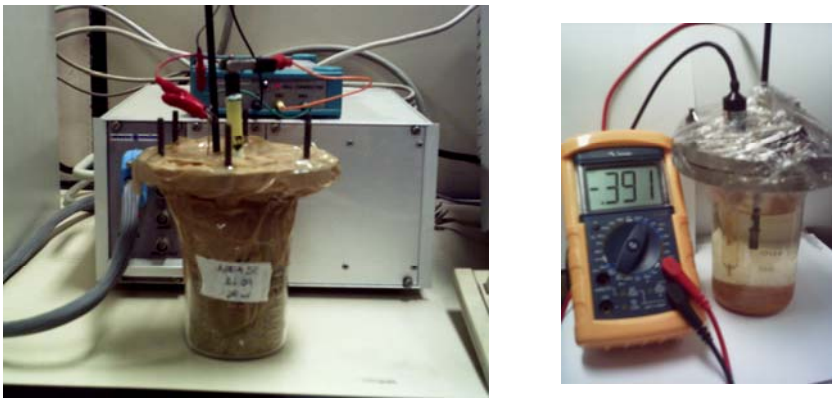
a) *critério do potencial eletroquímico mínimo*: um potencial de -850 $mV_{Cu/CuSO4}$ (para as amostras em solo) e -800 $mV_{Ag/AgCl}$ (para as amostras em NaCl 3,5% p/v e água destilada), medido através do eletrodo de referência, foi aplicado e mantido, por meio do potenciostato, onde foi registrada a corrente necessária para manutenção do potencial. Além da amostra, foi avaliado o corpo-de-prova não polarizado (branco), mantido em contato com meio durante os 30 dias de ensaio em copos plásticos vedados (Figura 3.6), para evitar a perda de umidade do meio, servindo como contraprova do ensaio de perda de massa;

(a) **(b)**

Figura 3.6 – Células utilizadas nos ensaios de aplicação do critério do potencial mínimo de proteção: (a) amostra; (b) branco.

b) *"critério dos 100 mV catódicos"*: foi aplicado um potencial, entre a estrutura e o meio, de tal modo que o potencial lido no multímetro, no instante imediato ao desligamento do potenciostato (potencial "instant-off"), fosse 100 mV mais negativo que o potencial de corrosão. Assim, a cada 5 ou 7 dias (tempo máximo de funcionamento contínuo do potenciostato), o sistema era desligado e os potenciais de corrosão e "instant-off" eram lidos, para verificação do decaimento de 100 mV, modificando-se o potencial empregado quando necessário. O potencial de corrosão foi medido, por meio de multímetro digital ET-2033, Minipa de alta resistência, simultaneamente ao ensaio, em uma célula considerada o "branco" do ensaio, onde outro corpo-de-prova foi enterrado ou submerso, sem sofrer polarização (Figura 3.7).

Embora a célula de polarização fosse bem vedada, esta foi envolvida com filme de PVC e fita adesiva, para manter-se a umidade do meio, como pode ser visto nas Figuras 3.6 e 3.7. Mesmo com estes cuidados, após a polarização ensaio, foi verificada a umidade, através da análise de umidade gravimétrica do meio, no início e final da polarização catódica, cujos dados encontram-se nos ANEXOS A e B.



(a) **(b)**

Figura 3.7 – Células utilizadas nos ensaios de aplicação do critério dos 100 mV catódicos: (a) amostra; (b) branco.

O registro de corrente e potencial, através da interface MQI12/8PC-C e PG-40, durante os ensaios de polarização foram salvos e tratados, posteriormente, no software Excel 2003, plotando-se as curvas: corrente versus tempo de polarização.

3.2.4 PERDA DE MASSA

O ensaio de perda de massa consiste em monitorar a massa do corpo-de-prova antes e depois de um ensaio eletroquímico, para avaliar da taxa de corrosão e, conseqüentemente, para este trabalho, a eficiência da proteção.

Os corpos-de-prova utilizados foram confeccionados para esta tese, por isso, não foi necessário nenhum processo de decapagem para remoção de depósitos, sendo apenas limpos com acetona, no momento do uso, para remoção da graxa de armazenamento. Logo após o desengraxe, o corpo-de-prova foi pesado, cuidadosamente, sem contato manual, em balança analítica Gehaka, modelo AG200, ao décimo de miligrama. Anotada a sua massa inicial, o mesmo foi inserido na célula de polarização ou na do “branco” e submetida ao contato com o meio.

Passado o tempo de exposição de 30 dias, os corpos-de-prova foram retirados do meio corrosivo e lavados com água corrente. Em seguida, procedeu-se a decapagem por imersão na solução de Clark (ASTM G1-03, 2003), durante 30 segundos (tempo definido através de curva de decapagem, nas condições de análise). Em seguida, foram lavados com álcool anidro, secos por secador e colocados em dessecador, por 45 minutos, para esfriar. Então, pesou-se em balança analítica ao décimo de miligrama, com os mesmos cuidados da pesagem inicial, e anotou-se o valor da massa final.

Subtraindo-se o valor da massa inicial o valor da massa final, tem-se a perda de massa, e através das equações apresentadas no item 2.1.4.2, pode-se calcular a taxa de corrosão.

3.2.5 ANÁLISE DE PITE

A verificação da extensão do processo corrosivo, nem sempre pode ser determinado somente pela perda de massa. Quando se trata de corrosão localizada, a perda de massa é muito pequena, o que levaria a crer num processo brando, mas os danos são gravíssimos, levando a ruptura do metal. Por isso é de extrema importância a análise do número de pites, seu diâmetro e profundidade. Os dois primeiros valores são facilmente determinados, entretanto a profundidade só pode ser medida: a) com micrômetro: cortando-se a seção transversal do pite e b) medindo diretamente ou com auxílio do microscópio (GENTIL, 2003).

Neste trabalho, os pites foram focalizados e fotografados em estereoscópio Carl Zeiss, modelo Stemi 200-C, em aumento de 50x, de maneira a avaliar a forma da corrosão processada no corpo-de-prova.

3.3. LEVANTAMENTO DE CUSTOS DOS PROJETOS DE PC

De posse dos resultados dos ensaios experimentais de polarização e das equações apresentadas no item 2.5, foram elaborados projetos de proteção catódica por corrente impressa para duas estruturas hipotéticas: uma enterrada e outra submersa, com 1200 m^2 de área exposta a eletrólito similar aos meios estudados:

a) solução de NaCl 3,5% p/v: instalações submersas em água do mar;

b) água destilada: instalações enterradas em solos de alta resistividade;

c) areia com 35% de umidade: instalações enterradas em solos encharcados (média resistividade);

d) areia com 5% de umidade: instalações enterradas em solos secos (altamente resistivos).

Como exemplo destas estruturas, pode-se considerar um duto de distribuição enterrado (Figura 3.8) e o trecho tubular submerso de um emissário submarino (Figura 3.9), com 15 polegadas de diâmetro e 1000 metros de extensão.

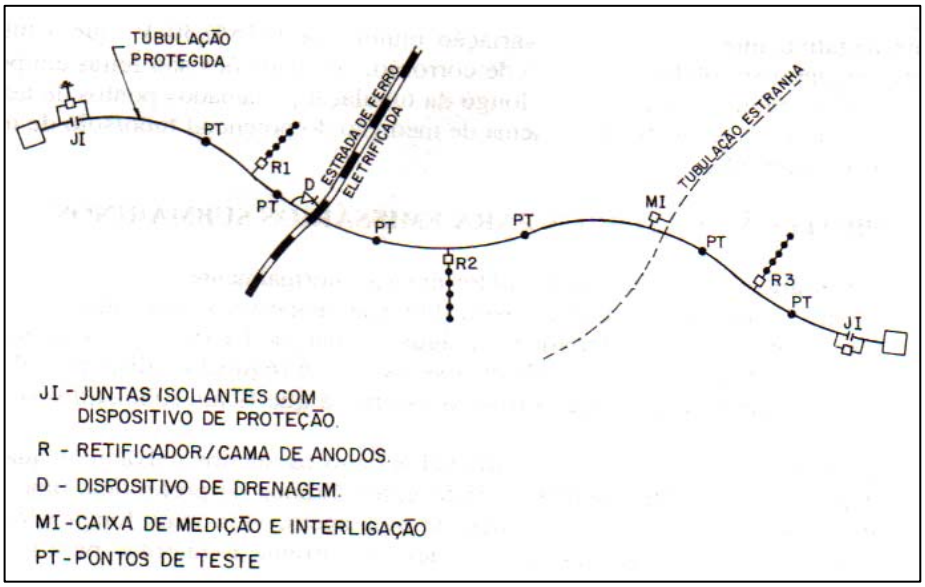


Figura 3.8 – Esquema típico de um sistema de proteção catódica por corrente impressa para uma tubulação enterrada.

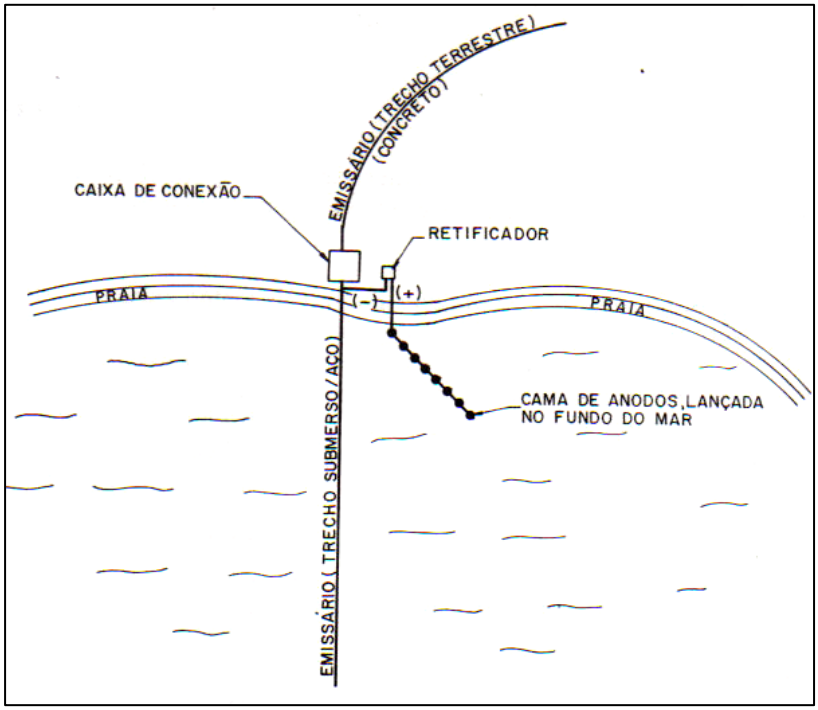


Figura 3.9 – Esquema típico de um sistema de proteção catódica por corrente impressa para um emissário submarino.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Serão apresentados, neste capítulo, os resultados obtidos para os ensaios eletroquímicos, de perda de massa e análise de pite, para os quatro meios analisados, bem como avaliação econômica dos critérios de proteção aplicados.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MEIOS

Os resultados de pH, resistividade, potencial de corrosão e condutividade dos meios analisados são apresentados na Tabela 4.1. O valor da resistividade da areia com 5% de umidade foi estimado pela curva experimental da areia lavada (Figura 4.1), feita, anteriormente, com auxílio do resistivímetro Nilsson 400, pois o valor extrapolou o limite de leitura do aparelho da Metrel (>19,99 kΩ.cm), utilizado para as demais medidas, feitas à temperatura ambiente, conforme o procedimento descrito no item 3.2.2.2.

Tabela 4.1 – Caracterização dos meios analisados, segundo valores de pH, resistividade e condutividade elétrica, à temperatura ambiente.

	RESISTIVIDADE (ohm.cm)	pH	POTENCIAL DE CORROSÃO (mV)
ÁGUA DESTILADA	9869	6,75	-391
NaCl 3,5% p/v	17,45	6,07	-595
AREIA 5%	37500	6,45	-576
AREIA 35%	8560	7,10	-760

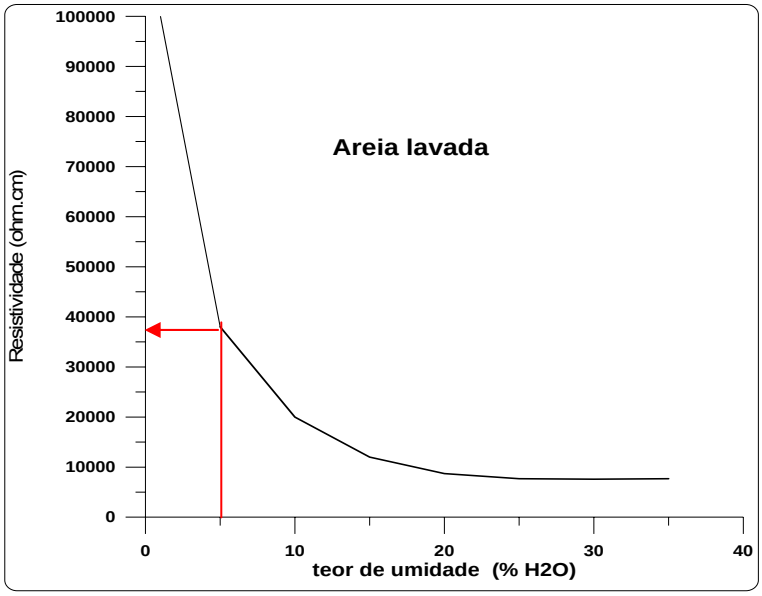


Figura 4.1 – Variação da resistividade da areia de rio lavada, em função da umidade.

De acordo com os dados obtidos e a classificação da Tabela 4.2, foi possível estimar a corrosividade dos meios analisados, relacionando sua resistividade e o potencial de corrosão. Assim, a princípio, os meios mais agressivos seriam a solução de NaCl 3,5% p/v e areia com 35% de umidade e, comparativamente, a água destilada e areia com 5% de umidade, apresentariam menor corrosividade.

Tabela 4.2 – Corrosividade em função da resistividade e do potencial para o aço (DUTRA & NUNES, 1999).

Potencial ($Cu/CuSO_4$) (V)	**Resistividade (ohm. cm)**		
	De 500 a 1.000	**De 1.000 a 10.000**	**De 10.000 a 100.000**
Até -0,4	Pouco corrosivo	Muito pouco corrosivo	Não corrosivo
-0,4 a -0,5	Moderadamente corrosivo	Pouco corrosivo	Muito pouco corrosivo
-0,5 a -0,6	Corrosivo	Moderadamente corrosivo	Pouco corrosivo
Além de -0,6	Muito corrosivo	Corrosivo	Moderadamente corrosivo

Os valores de pH também dão uma indicação da corrosividade do meio. Segundo Robinson “apud” Loureiro (2005), quanto menor o pH, maior a taxa de corrosão, devido a um nível maior de despolarização das células de corrosão naturais. Analisando este parâmetro e comparando-o com o anterior, tem-se a solução de NaCl 3,5% p/v como o meio mais corrosivo, entretanto, a areia com 35% de umidade aparece como o meio menos corrosivo.

4.2 ENSAIOS ELETROQUÍMICOS

4.2.1 CURVAS DE POLARIZAÇÃO

A partir dos dados registrados no potenciostato Omnimetra PG-40, foram plotadas as curvas de polarização catódica e anódica (E versus i) do aço-carbono SAE 1020, nos quatro meios estudados. Estas curvas são apresentadas nas Figuras 4.2 a 4.6, onde na ordenada encontram-se os valores de potencial, em mV, e na abscissa, a densidade de corrente aplicada, em mA/m^2.

De posse destes resultados, foi possível estimar o valor da densidade de corrente necessária para polarizar catodicamente os corpos-de-prova de, aproximadamente, 0,00026 m^2 de área exposta, em cada critério estabelecido.

Desta forma, para o critério do potencial mínimo traçou-se uma reta a partir do potencial aplicado até a curva obtida, onde foi lido o valor da densidade de corrente correspondente na ordenada. E, a partir do ponto onde as curvas anódica e catódica se interceptam é possível determinar o potencial de corrosão do aço no eletrólito e, conseqüentemente, o potencial "instant-off" a ser empregado para estabelecimento do critério dos 100 mV catódicos.

Para as curvas de polarização do aço em água destilada (Figura 4.2), observou-se um aumento de, aproximadamente, 50 mA/m^2 na densidade de corrente para cada decréscimo de 100 mV no potencial.

Como foi utilizado o eletrodo de referência de Ag/AgCl, o potencial aplicado no critério do potencial mínimo foi igual a -800 mV. Assim, estima-se uma densidade de corrente de proteção um pouco menor que 200 mA/m^2, o que corresponde à aplicação de uma corrente aproximada de 0,052 mA à área exposta do corpo-de-

prova. Embora um pouco além do esperado, este valor encontra-se dentro dos padrões para meios de alta resistividade (vide item 2.3.5) (DUTRA & NUNES, 1999).

Segundo os resultados obtidos, o potencial de corrosão do aço na água destilada é de, aproximadamente, -400 mV, o que sugere a aplicação de um potencial "instant-off" de -500 mV para o critério dos 100 mV catódicos, requerendo uma densidade de corrente um pouco maior que 30 mA/m^2.

Neste caso, o critério dos 100 mV catódicos demandou uma densidade de corrente cerca de 6 vezes menor que a necessária para manter o potencial mínimo.

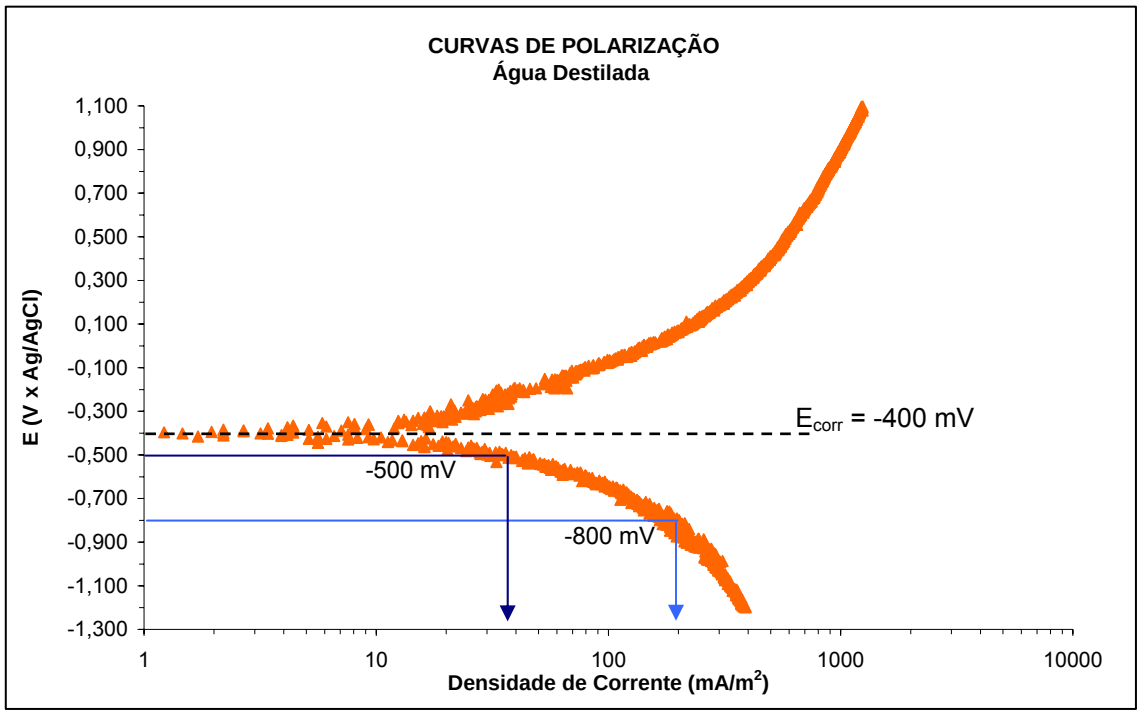


Figura 4.2 – Curvas de polarização anódica e catódica, obtidas para o aço-carbono SAE 1020, eletrólito: água destilada.

Na Figura 4.3 são apresentadas as curvas de polarização do aço em solução de NaCl 3,5% p/v, onde se observou que até cerca de -1V, a curva catódica apresenta um comportamento semelhante ao da água destilada, porém, depois deste valor, a cada decréscimo de 100 mV, a densidade de corrente triplica.

Neste sistema, o potencial aplicado para o critério do potencial mínimo foi o mesmo que aplicado para a água destilada (- 800 mV $_{Ag/AgCl}$), onde se estimou uma densidade de corrente de proteção de cerca de 700 mA/m^2, correspondente a uma corrente de 0,182 mA sobre o corpo-de-prova ensaiado. O valor da corrente encontrado foi condizente com os valores encontrados na literatura para meios de baixa resistividade, que registram correntes de 600 mA/m^2 para sistemas em água do mar (DUTRA & NUNES, 1999).

O potencial de corrosão do aço na solução de NaCl 3,5% p/v foi de -550 mV, o que sugere um potencial "instant-off" de -650 mV, para o critério dos 100 mV catódicos, o que, segundo os resultados obtidos, demanda uma densidade de corrente próxima de 400 mA/m^2, ou seja, aproximadamente, metade daquela requerida para o critério do potencial mínimo.

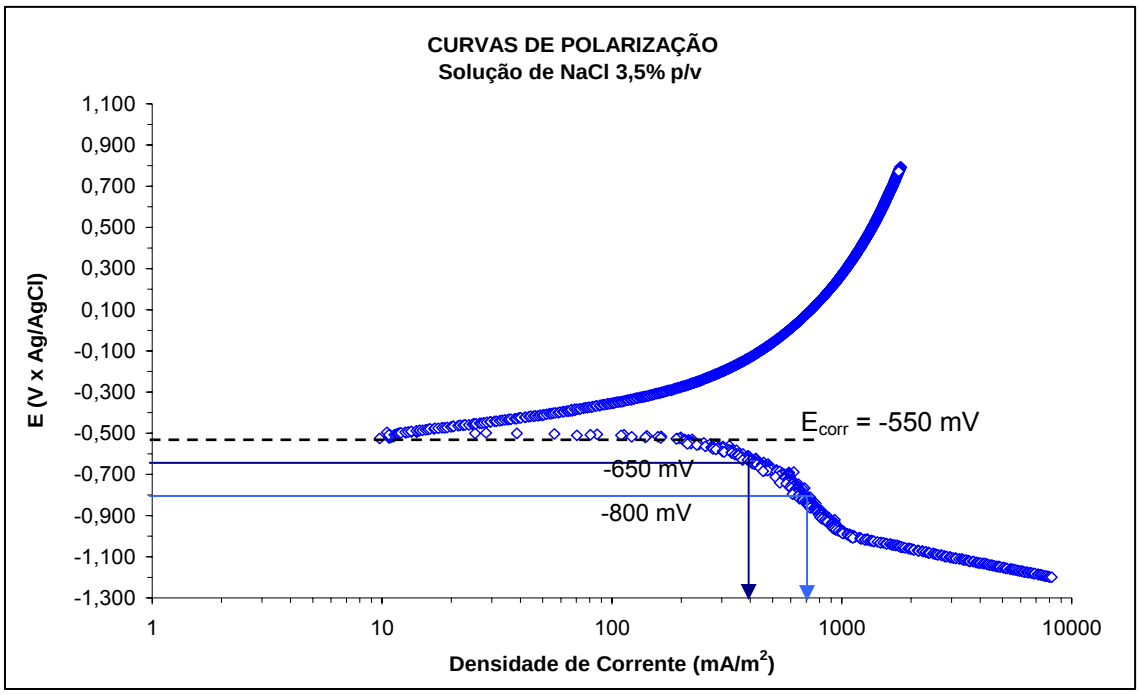


Figura 4.3 – Curvas de polarização anódica e catódica, obtidas para o aço-carbono SAE 1020 – eletrólito: solução de NaCl 3,5% p/v.

Para o sistema aço-areia foram obtidas, primeiramente, curvas de polarização para areias com vários teores de umidade, com a finalidade de escolher aquelas nas quais a umidade imprimisse maior diferença de densidade de corrente nos critérios estudados para facilitar a comparação entre ambas.

Analisaram-se, então, areias com 5%, 15%, 20% e 35% de umidade. As curvas de polarização destas areias podem ser observadas na Figura 4.4, onde se verificou que apesar dos comportamentos das curvas não seguirem um padrão, as curvas de 5 e 35% apresentaram valores de potencial de corrosão mais distantes entre si e densidade de corrente com comportamentos mais variados, sendo, por isso escolhidas para os ensaios de proteção catódica.

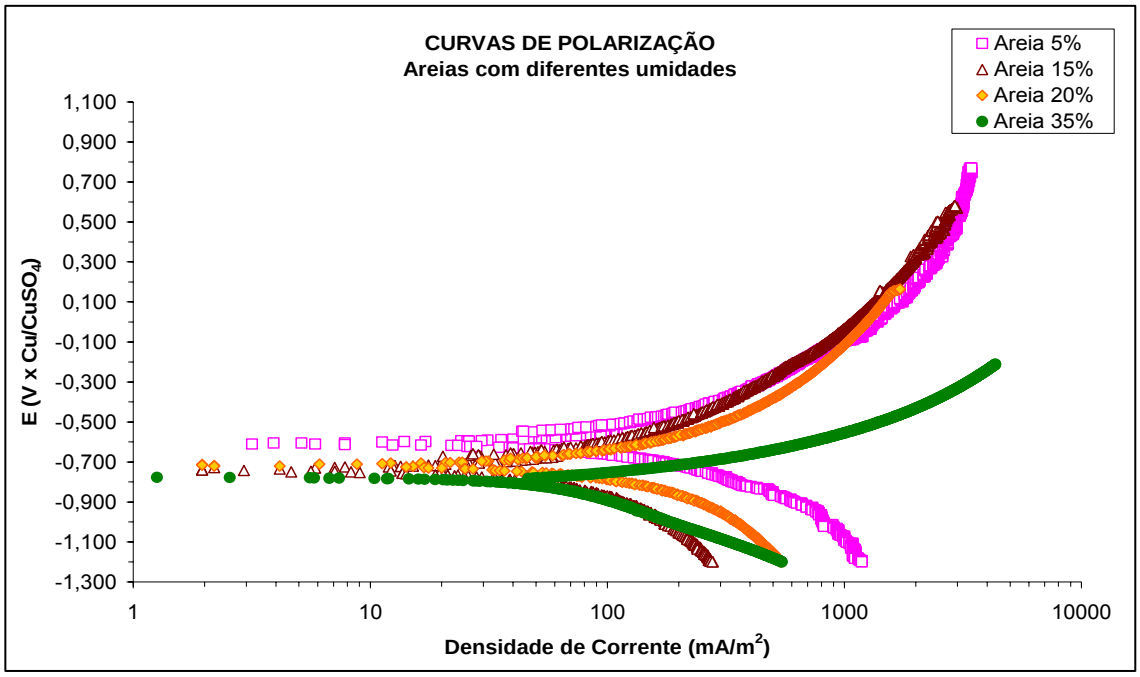


Figura 4.4 – Curvas de polarização anódica e catódica, obtidas para o aço-carbono SAE 1020 – eletrólito: areia.

As Figuras 4.5 e 4.6 apresentam, respectivamente, as curvas de polarização do aço em areia com 5 e 35% de umidade, para uma análise mais detalhada.

Nas curvas de polarização do aço / areia com 5% de umidade (Figura 4.5), a cada decréscimo de 100 mV, observou-se o triplo do valor da densidade de corrente.

O potencial aplicado para o critério do potencial mínimo, neste sistema, foi de -850 mV, pois foi utilizado eletrodo de $Cu/CuSO_4$. Desta forma, a densidade de corrente necessária à manutenção deste potencial é de cerca de 400 mA/m^2, ou seja, aplicação de uma corrente de 0,10 mA ao corpo-de-prova ensaiado. Embora incoerente com a teoria, onde são esperadas densidades de correntes muito pequenas para meios de alta resistividade (DUTRA & NUNES, 1999), este resultado pode ser justificado pelo alto valor da queda ôhmica observada em meios altamente resistivos, como a areia 5%, que dificultam a distribuição da corrente.

O potencial de corrosão do aço na areia com 5% de umidade é de -600 mV, o que sugere um potencial "instant-off" de -700 mV, para o critério dos 100 mV catódicos, demandando uma densidade de, aproximadamente, 150 mA/m^2, ou seja, quase três vezes menor que a demandada para o critério do potencial mínimo.

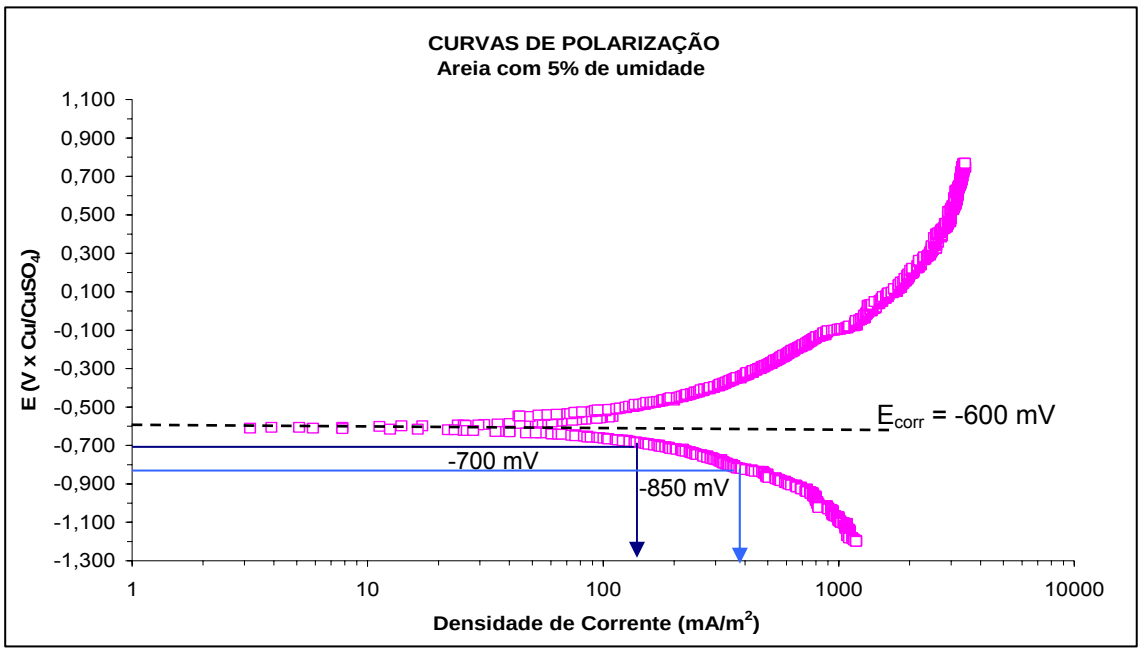


Figura 4.5 – Curvas de polarização anódica e catódica, obtidas para o aço-carbono SAE 1020 – eletrólito: areia com 5% de umidade.

Na Figura 4.6 são apresentados os resultados para a polarização do aço em areia com 35% de umidade, onde se observou que a cada decréscimo de 100 mV, a densidade de corrente duplicou de valor.

O potencial aplicado para o critério do potencial mínimo foi de -850 mV e a densidade de corrente observada foi de, aproximadamente, 70 mA/m^2, correspondente à aplicação de uma corrente de 0,018 mA a área exposta do corpo-de-prova ensaiado. O potencial de corrosão do aço na areia 35% é de, aproximadamente, -780 mV e o potencial "instant-off" de -870 mV, para o critério dos 100 mV catódicos, o que requer, segundo a curva de polarização catódica, uma densidade de corrente da ordem de 90 mV/m^2. Devido à proximidade do potencial de corrosão ao potencial mínimo de corrosão, para este meio a densidade de corrente requerida ao critério dos 100 mV catódicos apresentou valor maior que para critério do potencial mínimo.

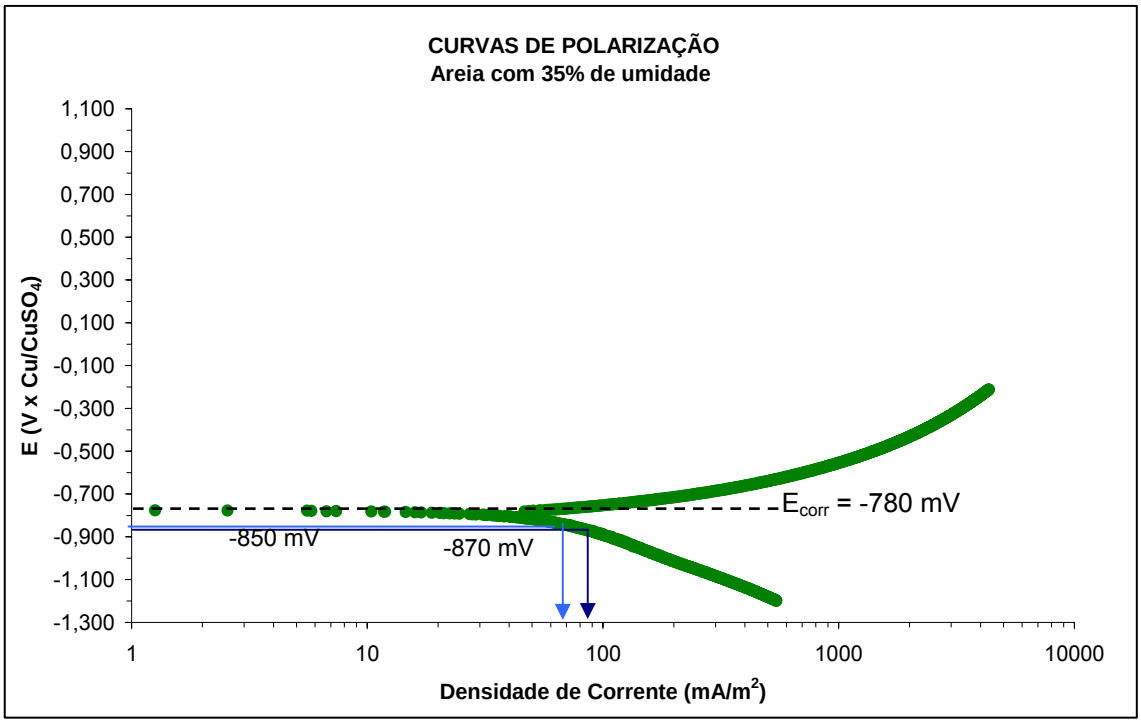


Figura 4.6 – Curvas de polarização anódica e catódica, obtidas para o aço-carbono SAE 1020 – eletrólito: areia, com 35% de umidade.

4.2.2 POLARIZAÇÃO CATÓDICA

4.2.2.1 Critério do Potencial Mínimo de Proteção

Na Figura 4.7 são apresentados, graficamente, os valores de densidade de corrente obtidos pela aplicação do critério do potencial mínimo, para os meios analisados (-850 mV $_{Cu/CuSO4}$, para as areias e -800 mV $_{Ag/AgCl}$, para a água destilada e solução de NaCl 3,5% p/v), durante o tempo de ensaio.

O registro da corrente pelo potenciostato era feito a cada 2 minutos, gerando quase 1000 valores diários, por isso, os pontos apresentados nas curvas consistem nos valores médios diários da densidade de corrente (ANEXO C). As retas horizontais marcam a média mensal dos valores de densidade de corrente, exceto para areia com 5% de umidade, em que a média apresentada refere-se aos valores nos 15 últimos dias, onde a densidade de corrente tendeu a estabilização em valores mais baixos e coerentes com a curva de polarização (Figura 4.5).

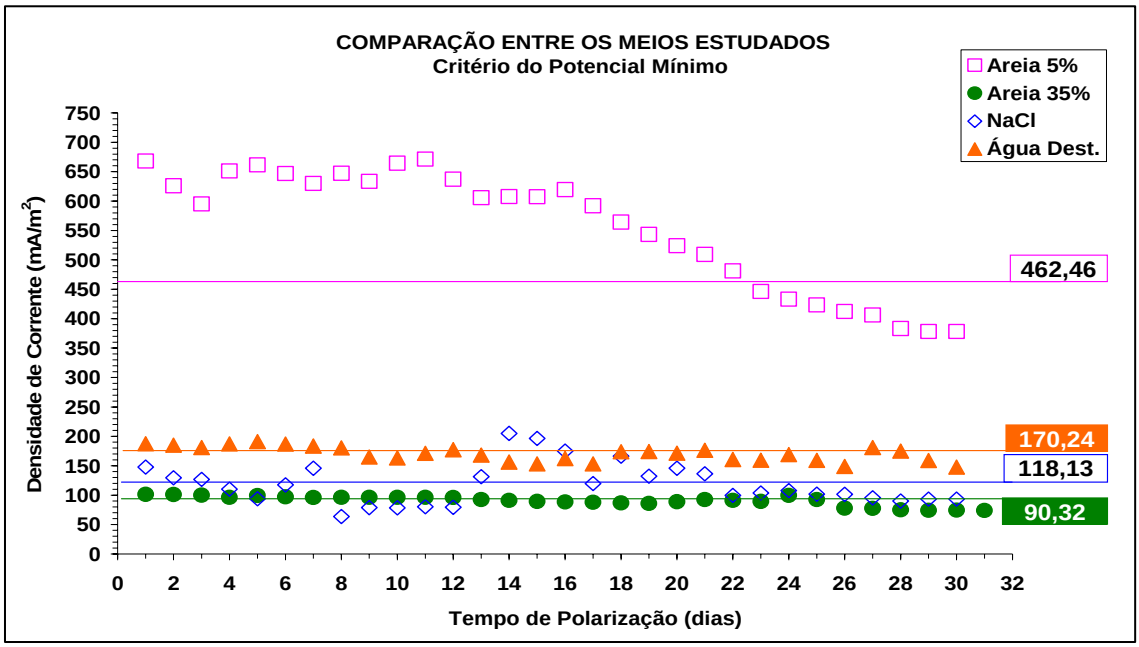


Figura 4.7 – Polarização catódica do aço-carbono SAE 1020, para meios de diferentes resistividades, utilizando o critério do potencial mínimo de proteção.

Foram observados os maiores valores de densidades de corrente para o meio de areia com 5% de umidade, seguida pela água destilada e a solução de NaCl 3,5% p/v, e os menores valores para o solo arenoso com 35% de umidade.

De acordo com o gráfico teórico da Figura 2.17, em meio de areia com 5% umidade deveria apresentar menor densidade de corrente dentre os meios, devido à sua altíssima resistividade, porém foram observados os mais altos valores. Este resultado, no entanto, está coerente com as curvas de polarização obtidas para este eletrólito, onde se verificou valor igualmente alto de densidade de corrente.

A discrepância entre os valores experimentais e o teórico pode ser explicada pela elevada queda ôhmica em eletrólitos resistivos, como a areia com 5% de umidade, cujo efeito não é considerado no critério do potencial mínimo (vide item 2.3.6.1). Embora os eletrodos de trabalho e de referência tenham sido aproximados ao máximo, a alta resistência entre eles compromete a distribuição da corrente através do meio pelo contra-eletrodo e, assim, é registrada uma corrente maior do que aquela efetivamente necessária para a polarização do metal.

A ordem observada para os demais meios pode ser justificada pela reação observada na interface do catodo (metal), em meios neutros aerados: $H_2O + \frac{1}{2}O_2 + 2e^- \rightarrow 2OH^-$, vista no item 2.3.1, cuja intensidade é controlada pela difusão de oxigênio. Sendo nos meios líquidos esta difusão favorecida, a reação é facilitada e necessita de valores mais elevados de densidade de corrente. Em meio de NaCl 3,5% p/v, entretanto, observou-se valores de densidade de corrente menores que para a água destilada, isto se deve ao fato dos dados para a solução de NaCl 3,5% p/v apresentarem valores bastante dispersos, entre 50 e 400 mA/m^2, que trouxeram as médias diárias para densidades para valores mais baixos.

Comparando-se somente as areias, onde a única diferença reside no grau de umidade, obtém-se o gráfico da Figura 4.8.

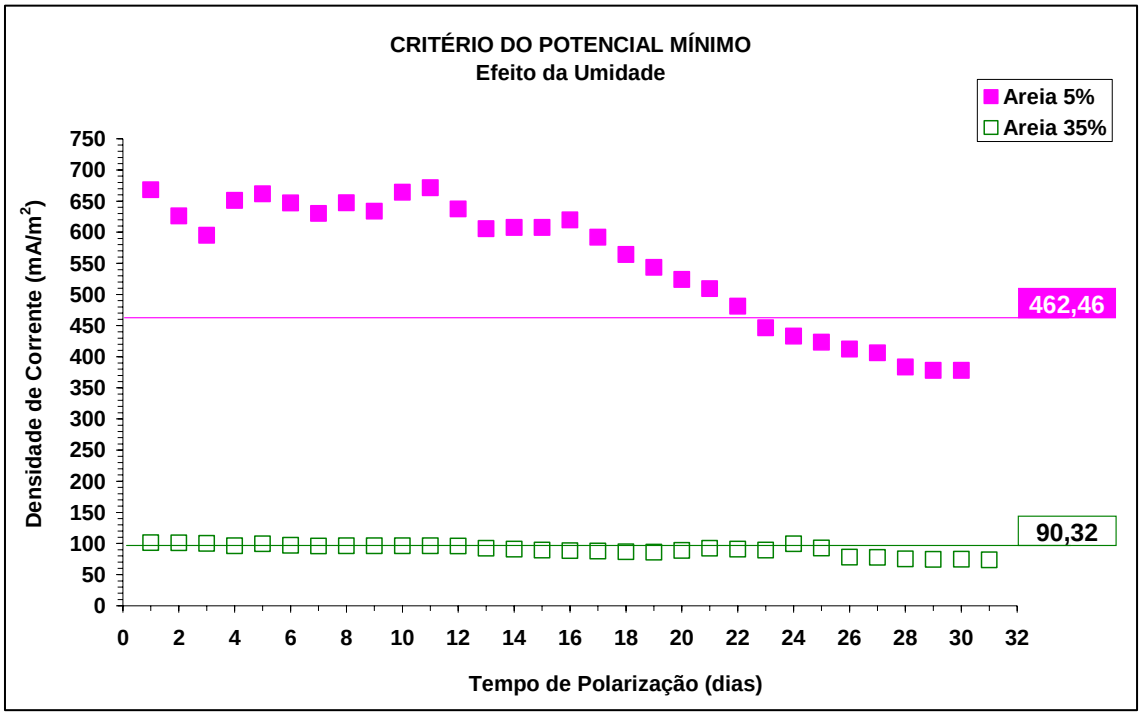


Figura 4.8 – Comparação da densidade de corrente obtida na polarização catódica do aço-carbono em areias de diferentes umidades, utilizando o critério do potencial mínimo.

Como visto anteriormente, no gráfico da Figura 2.17, quanto maior a umidade, menor a resistividade, devido à inserção de água que permite maior mobilidade dos íons presentes no solo e, conseqüentemente, aumento do processo corrosivo. Porém, verificou-se o inverso, onde para a areia com maior umidade, a densidade de corrente foi, aproximadamente, seis vezes menor do que para a areia mais resistiva (seca). Novamente, atribuem-se os altos valores de densidade corrente para a areia com 5% de umidade a grande queda ôhmica (IR) apresentada neste meio, como conseqüência dos altos valores de resistência.

4.2.2.2 Critério dos 100 mV catódicos

Sendo o potencial de corrosão o dado mais importante para o estabelecimento do critério dos 100 mV catódicos (vide item 2.3.6.2), tem-se na Tabela 4.3 a variação do potencial de corrosão, através das semanas de ensaio.

Tabela 4.3 – Evolução do potencial de corrosão, durante as 4 semanas de ensaio.

SEMANA	AREIA 35%	AREIA 5%	NACL	Água dest.
1	-760	-576	-595	-391
2	-775	-581	-591	-391
3	-800	-543	-593	-458
4	-770	-530	-590	-465

A Figura 4.9 apresenta o gráfico dos valores médios diários de densidade de corrente versus o tempo de polarização, para os meios analisados, através da aplicação do critério dos 100 mV catódicos (ANEXO D). As retas em destaque apresentam o valor médio da densidade de corrente, durante os 30 dias de ensaio.

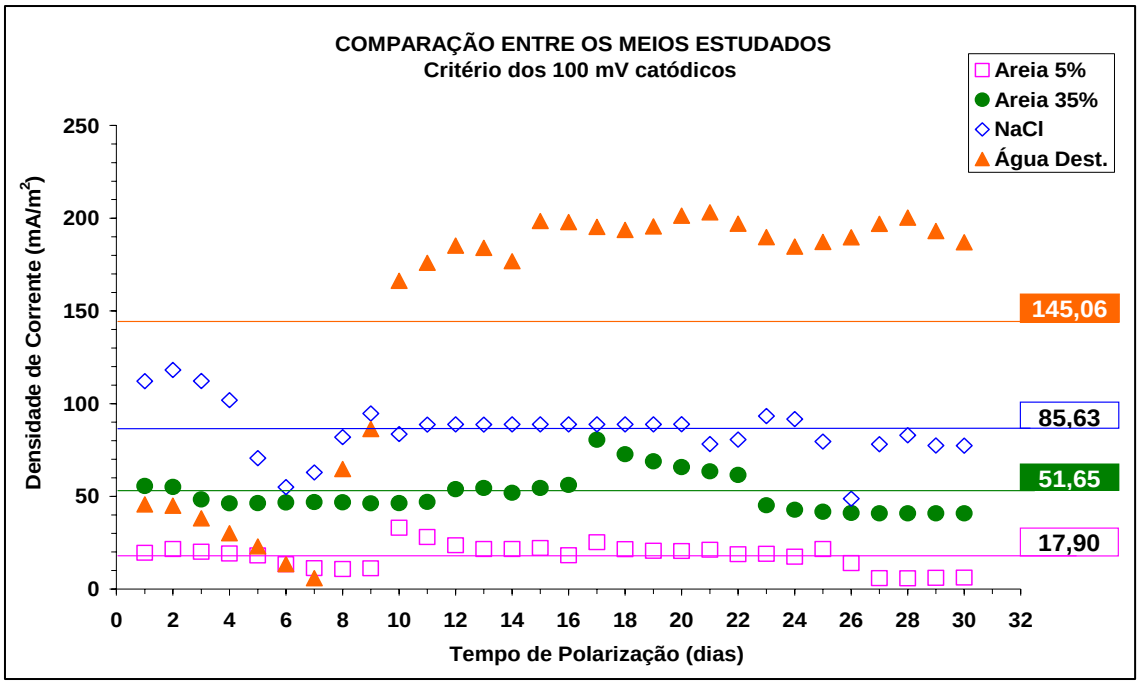


Figura 4.9 – Polarização catódica do aço-carbono SAE 1020, para meios de diferentes resistividades, utilizando o critério dos 100 mV catódicos.

Observaram-se maiores valores de densidade de corrente para a água destilada, seguida da solução de NaCl 3,5% p/v e areia com 35% de umidade, sendo os menores valores verificados para a areia com 5% de umidade.

Estes resultados apresentaram maior concordância com a teoria, se observado o aumento da densidade de corrente segundo o decréscimo da resistividade e o aumento da difusão do oxigênio no meio. Isto se deve ao fato de, neste critério, a medida do potencial ser feita em “instant-off”, ou seja, no instante de despolarização, o que elimina a influência da queda ôhmica na corrente requerida para a proteção (MATTEDI, 1999; NACE, 2002).

Houve uma leve discrepância, entretanto, entre os valores de densidade de corrente para a água destilada e solução de NaCl 3,5% p/v, pois este último deveria demandar maior densidade de corrente de proteção. Credita-se este fato a variação dos valores diários para a curva da solução de NaCl 3,5% p/v que situou o valor médio da densidade de corrente para valores mais baixos.

Para a água destilada observaram-se valores de densidade de corrente menores nas primeiras duas semanas e, após este período, um salto para valores maiores. Este comportamento é justificado pelo aumento do potencial de corrosão após o período de duas semanas (vide Tabela 4.3).

Se comparadas somente as areias (Figura 4.10), obtém-se uma relação entre a umidade e a densidade de corrente. Neste caso, observa-se que a densidade de corrente decresce com o aumento da umidade, o que está de acordo com a teoria, onde é estimada uma densidade de corrente entre 3 a 60 mA/m^2, dependendo da resistividade do solo (DUTRA; NUNES, 1999).

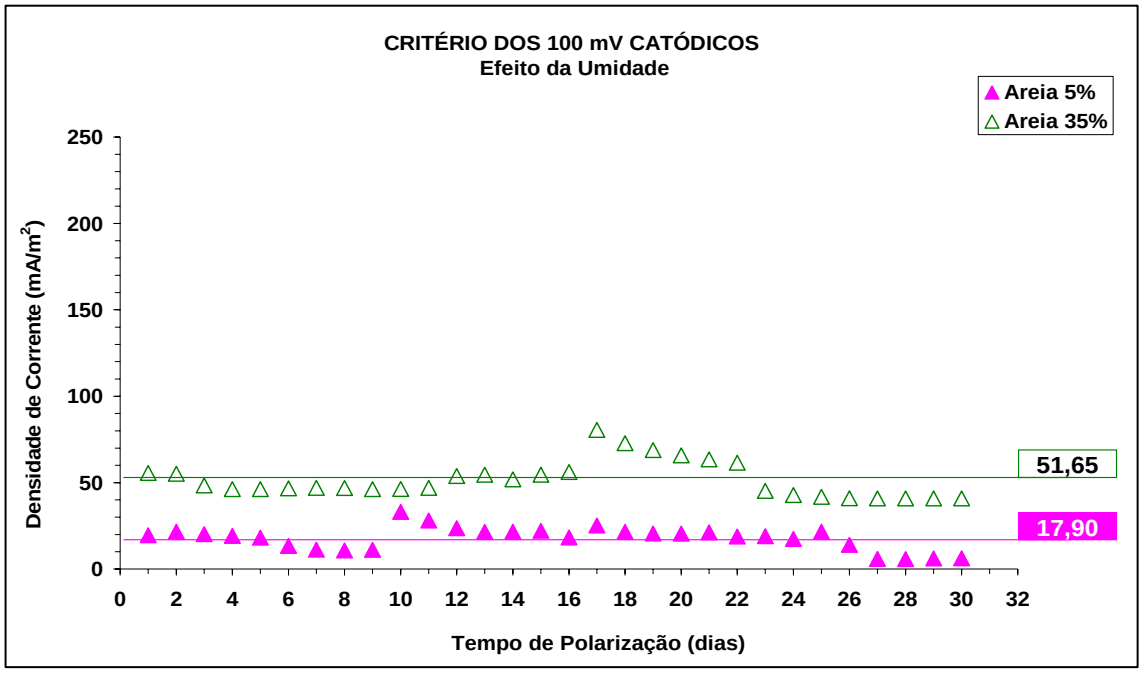


Figura 4.10 – Comparação da densidade de corrente obtida na polarização catódica do aço-carbono em areias de diferentes umidades, aplicando-se o critério dos 100 mV catódicos.

4.2.2.3 Comparação entre os Critérios de Proteção

Nas Figuras 4.11 a 4.14 estão registrados os valores de densidade de corrente, referentes a cada um dos critérios estudados, para cada um dos meios investigados, durante o período de polarização.

Com base nos resultados obtidos, verifica-se que para a água destilada (Figura 4.11) não há uma diferença significativa entre os valores de densidade de corrente aplicados para os critérios do potencial mínimo e dos 100 mV catódicos, pois esta diferença é razão dos valores mais baixos de densidade de corrente, nos primeiros dias de aplicação do critério dos 100 mV catódicos, devido ao potencial de corrosão inicial (Tabela 4.3). Considerando somente este resultado, pode-se afirmar que os critérios apresentam as mesmas características econômicas e técnicas.

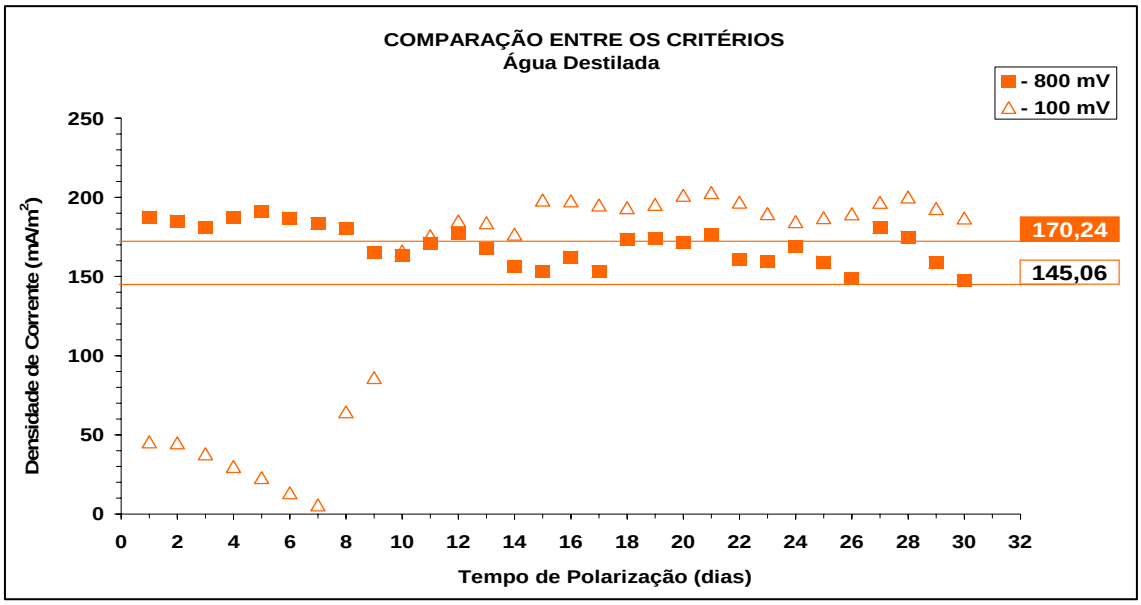


Figura 4.11 – Comparação entre os critérios de proteção para o aço-carbono SAE 1020, eletrólito: água destilada.

Para a solução de NaCl 3,5% p/v verificou-se grandes variações nas médias diárias dos valores de densidade de corrente, principalmente, para o critério do potencial mínimo (Figura 4.12). Levando em consideração esta variação, pode-se afirmar que não há diferença significativa para escolha dos critérios.

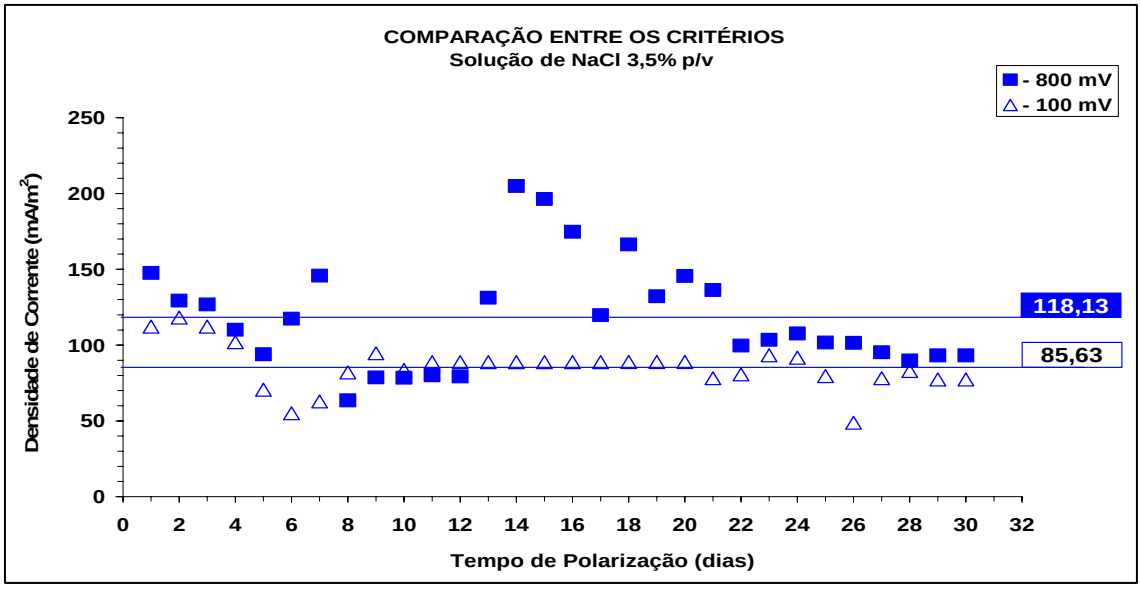


Figura 4.12 – Comparação entre os critérios de proteção para o aço-carbono SAE 1020, eletrólito: solução de NaCl 3,5% p/v.

Para a areia com 5% de umidade, o valor da densidade de corrente observada para aplicação do potencial mínimo é, aproximadamente, 32 vezes maior que o encontrado para o critério dos 100 mV catódicos, como pode ser constatado na Figura 4.13.

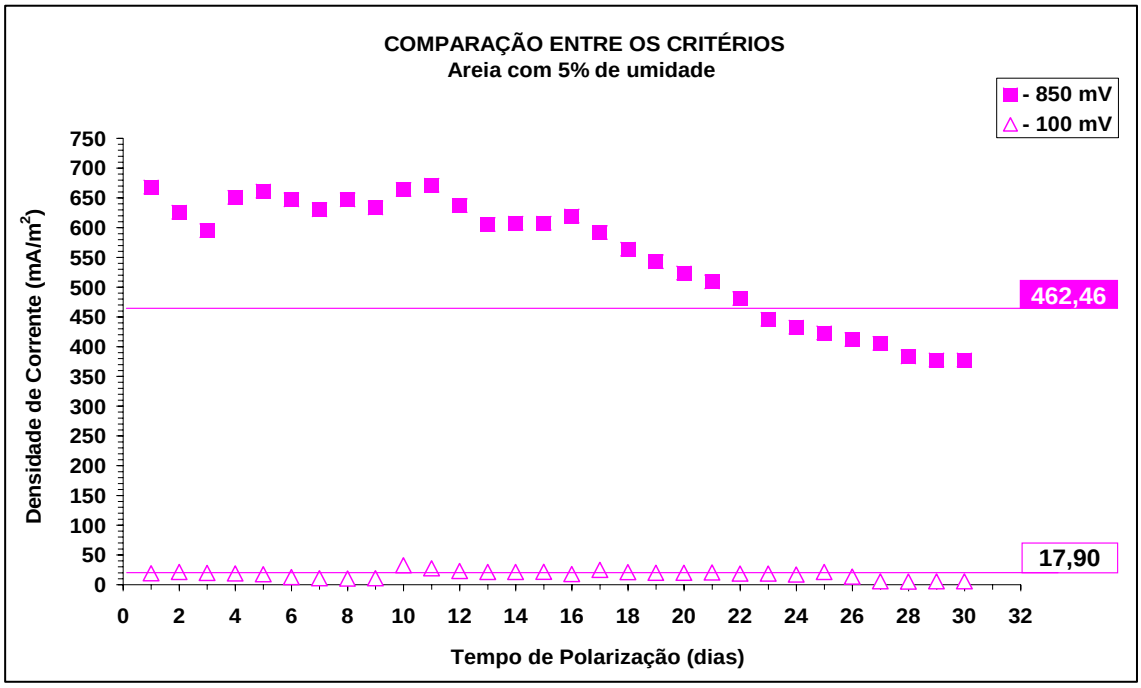


Figura 4.13 – Comparação entre os critérios de proteção para o aço-carbono SAE 1020, eletrólito: areia com 5% de umidade.

Comportamento similar pode ser observado para a areia com 35% de umidade (Figura 4.14), onde o valor da densidade de corrente para o critério mínimo é quase o dobro da utilizada para manter o decaimento de 100 mV catódicos.

Desta maneira, em termos econômicos, o critério dos 100 mV catódicos é o menos oneroso para os solos arenosos com 5% e 35% de umidade.

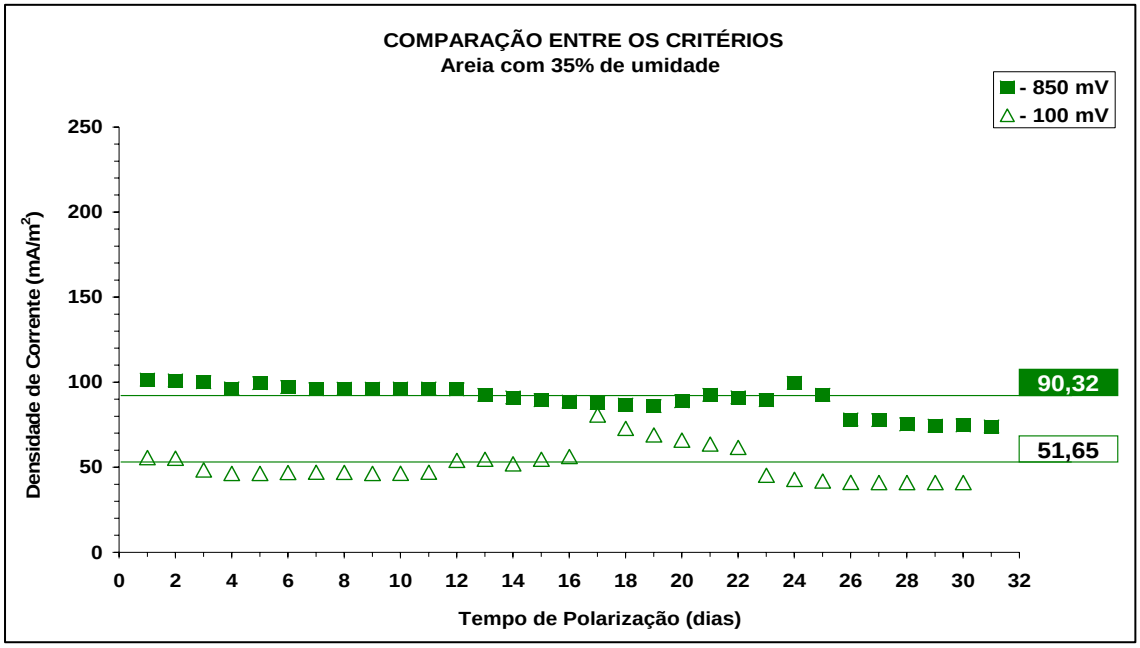


Figura 4.14 – Comparação entre os critérios de proteção para o aço-carbono SAE 1020, eletrólito: areia com 35% de umidade.

4.3 ENSAIOS DE PERDA DE MASSA

Os resultados do ensaio de perda de massa para as amostras e os brancos, nos dois critérios estão resumidos nas Tabelas 4.4 e 4.5, onde as taxas de corrosão estão expressas em mm/ano (milímetros por ano), mdd (miligramas por decímetro quadrado de área exposta por dia) e mpy (milésimo de polegada por ano).

Os resultados expressos para os brancos são referentes às médias aritméticas entre os valores encontrados para cada um dos dois critérios, em cada um dos meios estudados. Exceto para a areia com 5% de umidade, em que os resultados de perda de massa referem-se a um branco, pois o outro apresentou corrosão localizada severa, sendo desconsiderado para fins de cálculos.

Os dados obtidos, utilizados para cálculo da perda de massa e taxas de corrosão encontram-se à disposição no ANEXO E.

Tabela 4.4 – Taxas de corrosão das "**amostras**" de aço-carbono SAE 1020, expressas em **mm/ano**, **mdd** e **mpy**, para os quatro meios analisados: água destilada, solução de NaCl 3,5% p/v, areias com 5% e 35% de umidade, após 30 dias de polarização.

	TAXAS DE CORROSÃO					
	POTENCIAL MÍNIMO			100 mV CATÓDICOS		
ELETRÓLITO	**mm/ano**	**mpy**	**mdd**	**mm/ano**	**mpy**	**mdd**
AREIA 35%	0,0169	0,664	3,630	0,0269	1,060	5,770
AREIA 5%	0,0106	0,418	2,280	0,0143	0,564	3,080
NaCl 3,5% p/v	0,0230	0,904	4,940	0,0168	0,662	3,610
Água dest.	0,0384	1,510	8,240	0,0145	0,570	3,110

Tabela 4.5 – Taxas médias de corrosão dos "**brancos**" de aço-carbono SAE 1020, expressas em **mm/ano**, **mdd** e **mpy**, para os quatro meios analisados: água destilada, solução de NaCl 3,5% p/v, areias com 5% e 35% de umidade, após 30 dias de polarização.

	TAXAS DE CORROSÃO		
ELETRÓLITO	**mm/ano**	**mpy**	**mdd**
AREIA 35%	0,182	7,140	38,900
AREIA 5%	0,030	1,300	7,090
NaCl 3,5% p/v	0,503	19,800	108,000
Água dest.	0,263	10,400	56,500

As Figuras 4.15 a 4.17 apresentam os gráficos das taxas de corrosão para os brancos, sem polarização, e as amostras polarizadas durante 30 dias, para os quatro meios analisados, utilizando os dois critérios.

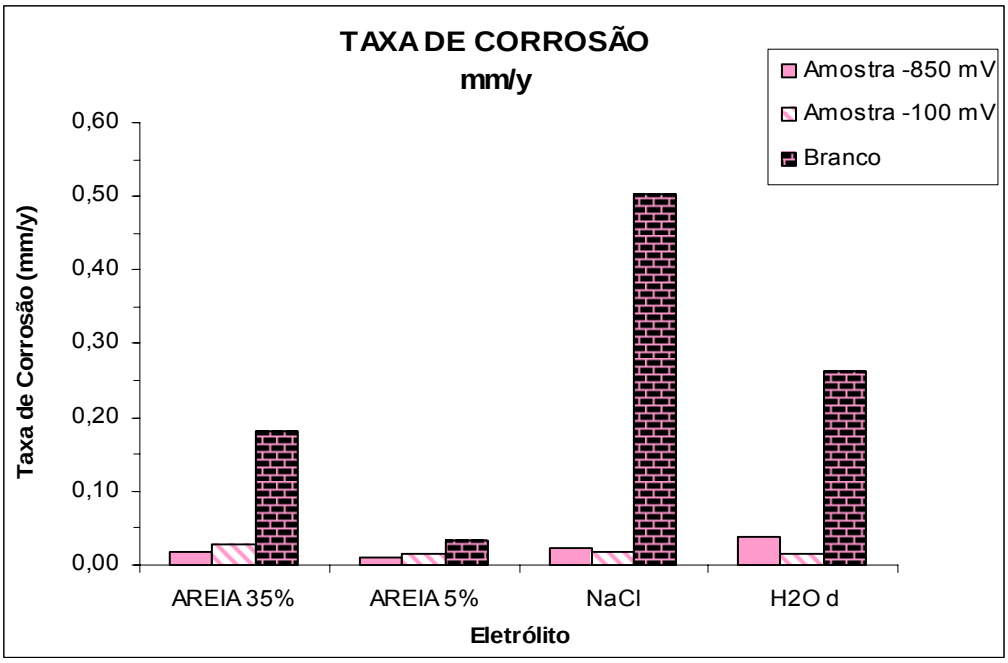


Figura 4.15 – Comparação entre as taxas de corrosão, em **mm/ano**, do aço-carbono SAE 1020, nos quatro meios estudados, em cada critério empregado.

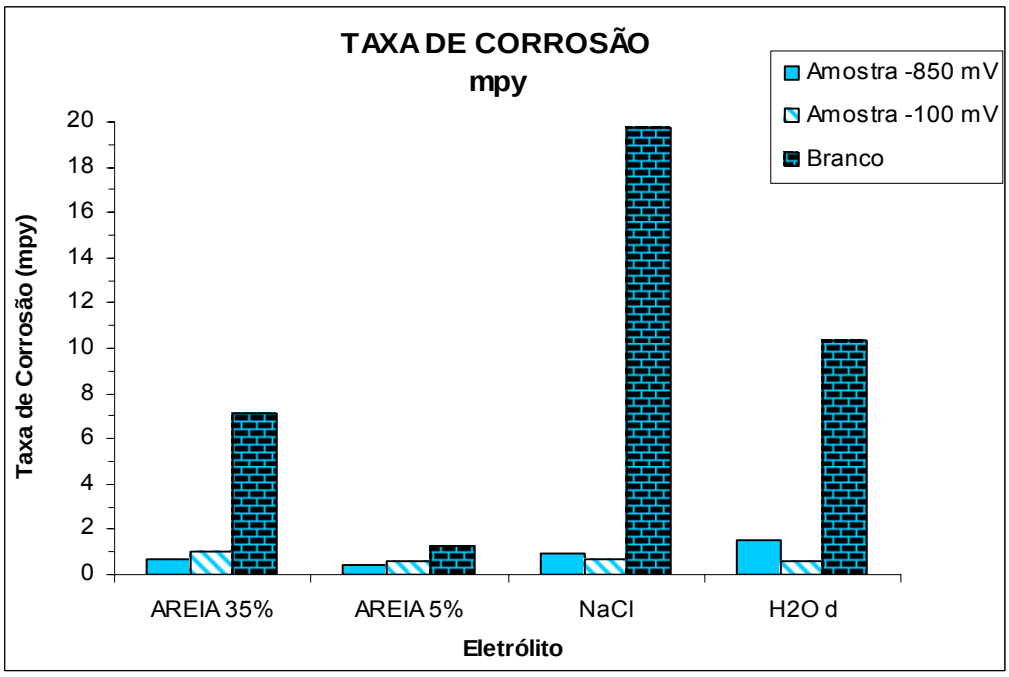


Figura 4.16 – Comparação entre as taxas de corrosão, em **mpy**, do aço-carbono SAE 1020, nos quatro meios estudados, em cada critério empregado.

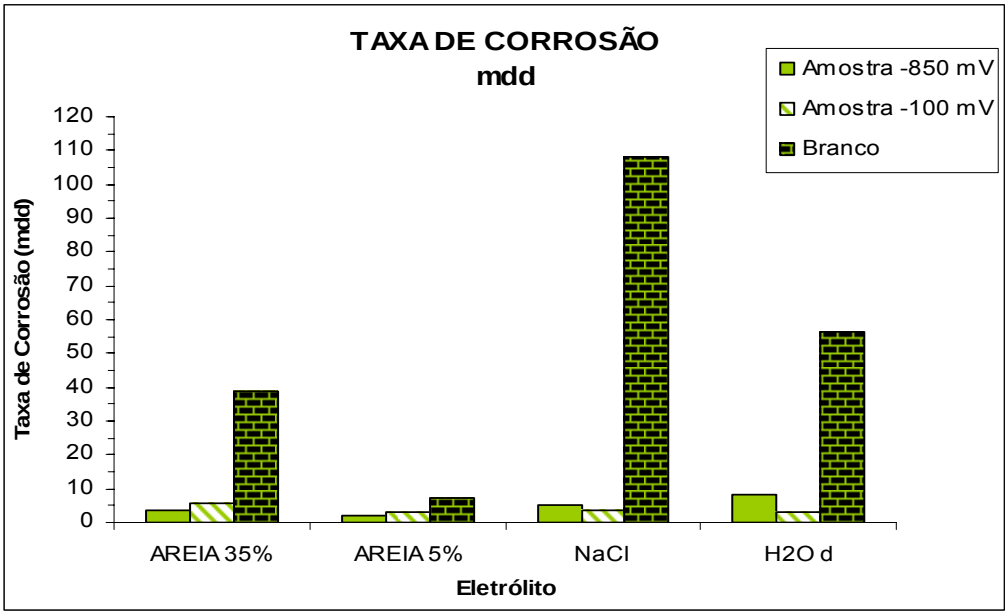


Figura 4.17 – Comparação entre as taxas de corrosão, em **mdd**, do aço-carbono SAE 1020, nos quatro meios estudados, em cada critério empregado.

Comparando os resultados das amostras nos dois critérios, observa-se que para os meios com areia houve maior taxa de corrosão, embora pouco significativa, para o critério dos 100 mV catódicos, em relação ao critério do potencial mínimo. Para os meios líquidos, água destilada e solução de NaCl 3,5% p/v, as maiores taxas de corrosão foram observadas para o critério do potencial mínimo.

Levando em consideração somente este parâmetro, pode-se dizer que o critério dos 100 mV catódicos é melhor aplicável aos meios aquosos, enquanto que para os solos arenosos é mais interessante o uso do critério do potencial mínimo de proteção, onde se observa um menor desgaste do metal.

Entretanto, se observado cada critério separadamente, verifica-se que para o critério dos 100 mV catódicos, as amostras em areia 5% de umidade e água destilada foram as que apresentaram menores taxas de corrosão, seguidas daquelas em solução de NaCl 3,5% e areia com 35% de umidade, ou seja, a taxa de corrosão foi maior quanto menor a resistividade do meio.

Para o critério do potencial mínimo, foi constatada taxa de corrosão crescente na seguinte ordem: amostras em areia com 5%, seguida por aquelas em areia com 35% de umidade e solução de NaCl 3,5% e a amostra em água destilada, que apresentou a maior taxa de corrosão. Os meios aquosos apresentaram mais corrosivos, devido a maior difusão do oxigênio nestes eletrólitos.

Analisando os brancos, nota-se que a maior perda de massa foi obtida para aquele em solução de NaCl 3,5% p/v, seguido daqueles em meio de água destilada e areia com 35% de umidade. O branco em areia com 5% de umidade apresentou as menores taxas de corrosão.

Estes resultados se mostraram bastante satisfatórios, à medida que estão de acordo com os resultados de polarização e com a teoria, onde dois fatores devem ser considerados para explicar o grau de corrosividade dos meios: a resistividade e a difusão do oxigênio.

Como visto no Capítulo 2, quanto maior a resistividade, menos agressivo é o meio (DUTRA; NUNES, 1999; GENTIL, 2003), porém deve-se considerar que em meios aerados a corrosão é dada pela difusão do oxigênio. Este fenômeno é, de um modo geral, facilitado em meios líquidos, onde haverá maiores taxas de corrosão.

Comparando-se, os brancos com suas respectivas amostras, é possível dizer que todas as amostras foram protegidas contra a corrosão, ou seja, os dois critérios são válidos na efetividade da proteção catódica.

As Figuras 4.18 a 4.22 apresentam o aspecto dos corpos-de-prova, fotografados em estereoscópio, com aumento de 6x, antes e após os ensaios de polarização e perda de massa, nos meios e critérios de proteção analisados.

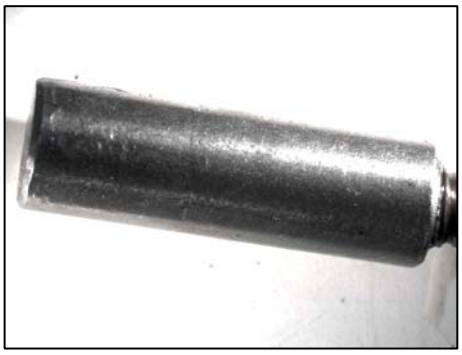


Figura 4.18 – Micrografia do corpo-de-prova de aço-carbono SAE 1020, antes dos ensaios de polarização e perda de massa (aumento: 6x).

Analisando as Figuras 4.19 (a) e (b), verifica-se que os corpos-de-prova se mantiveram praticamente intactos quando polarizados em areia com 5% de umidade, não apresentando corrosão visível em nenhum dos dois critérios estudados, comprovando os resultados de taxa de corrosão (Figura 4.15). O mesmo observou-se para o corpo-de-prova não polarizado (Figura 4.19 (c)).

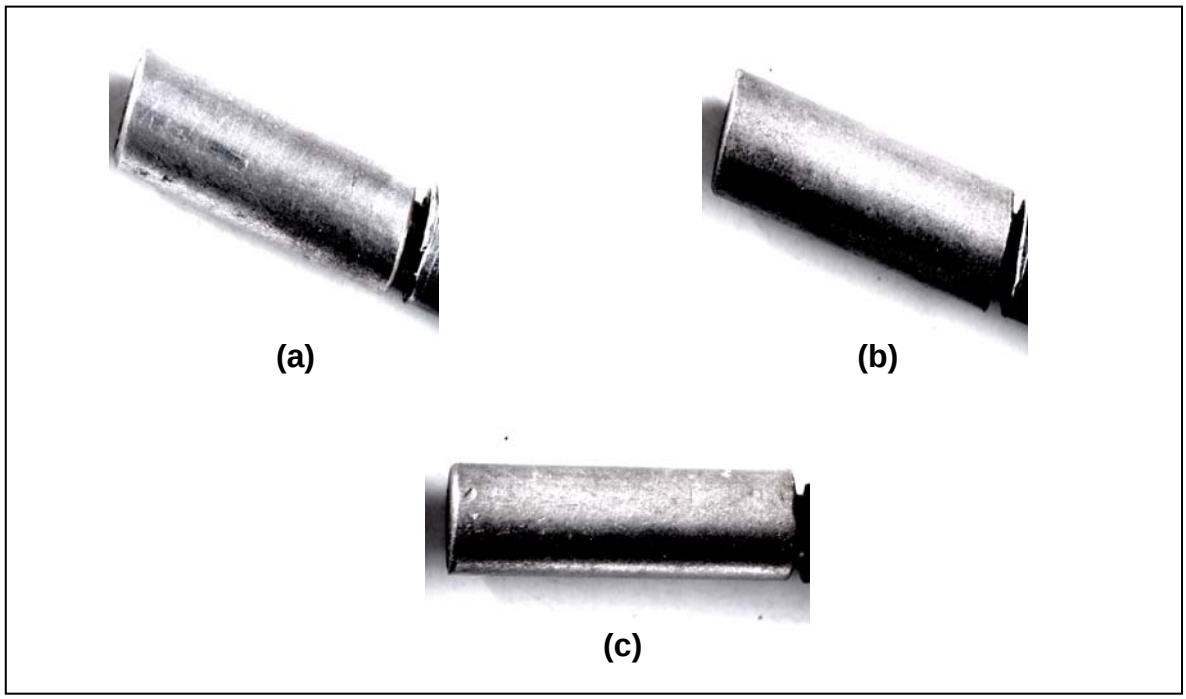


Figura 4.19 – Micrografias dos corpos-de-prova de aço-carbono SAE 1020, após ensaio em areia com 5% de umidade em: **(a)** -850 mV; **(b)** -100 mV; **(c)** sem polarização (aumento: 6x).

Na Figura 4.20 (b), observa-se perda do brilho metálico na superfície do corpo-de-prova, em relação à Figura 4.20 (a), o que evidencia a maior taxa de corrosão, para o critério dos 100 mV catódicos, em relação à aplicação dos -850 mV, para as amostras polarizada em meio de areia com 35% de umidade, o que foi verificado na Figura 4.15.

O corpo-de-prova não polarizado (Figura 4.20 (c)) não apresentou corrosão severa visível porém, alguns pontos mais escuros na superfície atestam a sua pequena perda de massa.

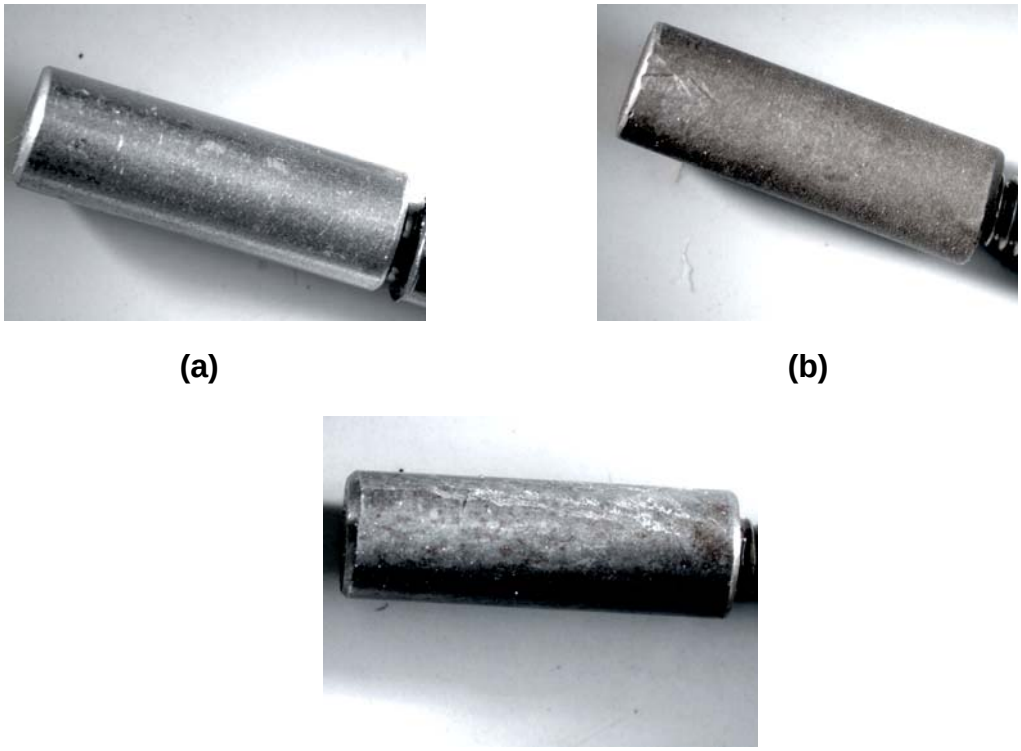
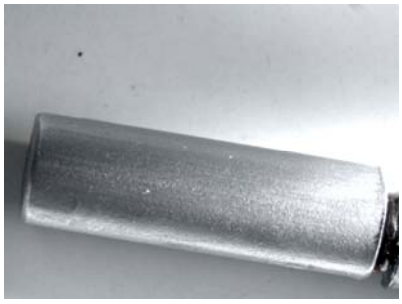


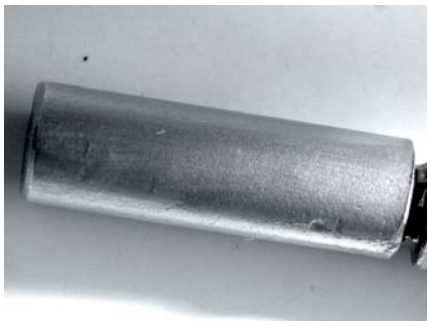
Figura 4.20 – Micrografias dos corpos-de-prova de aço-carbono SAE 1020, após ensaio em areia 35% de umidade em: **(a)** -850 mV; **(b)** -100 mV; **(c)** sem polarização (aumento: 6x).

Comparando as Figuras 4.21 (a) e (b) das amostras polarizadas em solução de NaCl 3,5% p/v observa-se que em ambos os casos o corpo-de-prova perdeu um pouco do brilho metálico, constatando a pequena diferença de perda de massa entre os critérios dos 100 mV catódicos e do potencial mínimo de proteção.

O corpo-de-prova não polarizado (Figura 4.21 (c)) teve sua espessura bastante reduzida, o que pode ser verificado próximo à haste, onde fica evidente a diferença de espessura entre a saliência mais brilhosa do metal intacto (destaque) e a superfície mais rugosa de todo o resto do corpo-de-prova.



(a)



(b)

(c)

Figura 4.21 – Micrografias dos corpos-de-prova de aço-carbono SAE 1020, após ensaio em solução de NaCl 3,5% p/v em: **(a)** -800 mV; **(b)** -100 mV; **(c)** sem polarização (aumento: 6x).

Observando-se a diferença de brilho entre os corpos-de-prova das Figuras 4.22 (a) e (b) e os resultados de taxa de corrosão na Figura 4.15, verifica-se que, em meio de água destilada, o corpo-de-prova perdeu a maior massa quando polarizado segundo o critério dos 100 mV catódicos.

Na Figura 4.22 (c), observa-se o mesmo desgaste generalizado verificado no NaCl (Figura 4.21 (c)), entretanto a perda de massa é bem menor em água destilada, devido a menor corrosividade do meio.

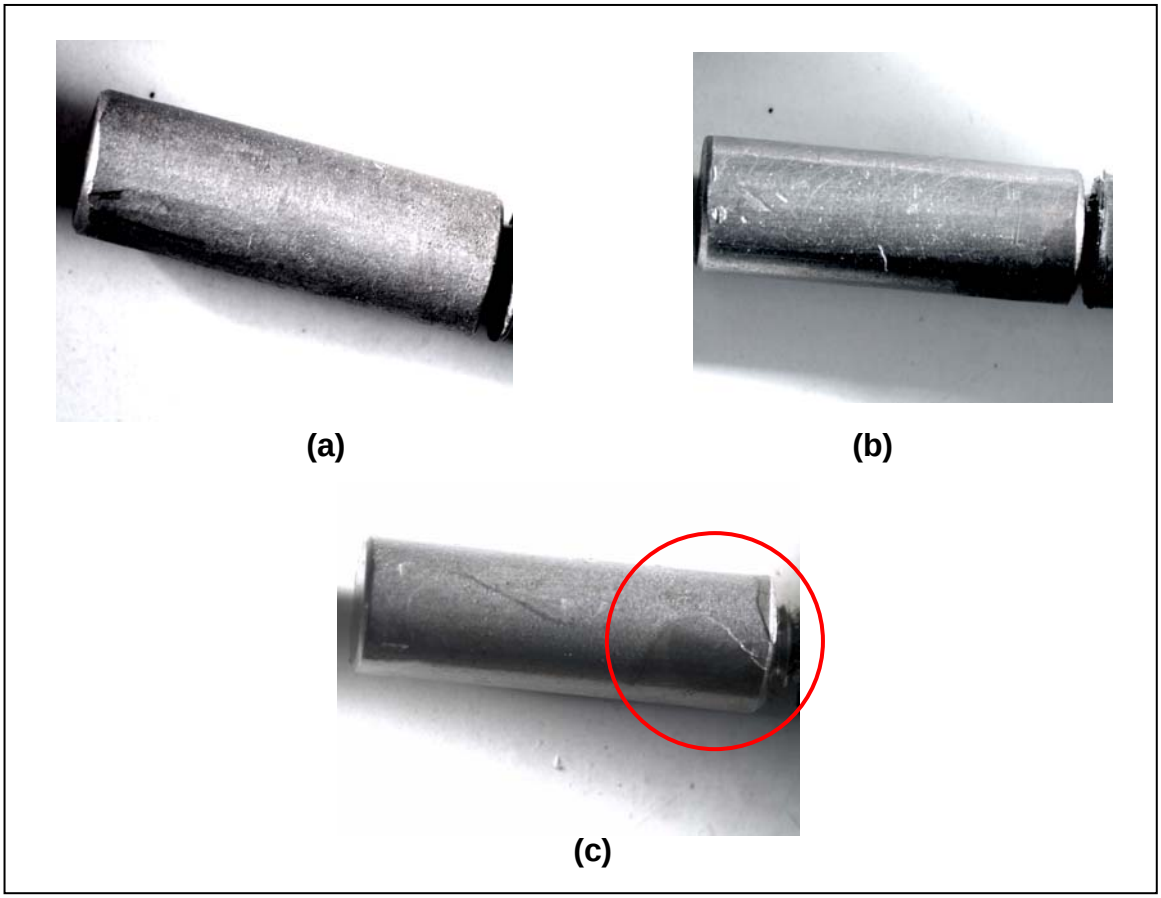


Figura 4.22 – Micrografias dos corpos-de-prova de aço-carbono SAE 1020, após ensaio em água destilada em: **(a)** -800 mV; **(b)** -100 mV; **(c)** sem polarização (aumento: 6x).

4.4 ANÁLISE DE PITE

Não foram encontrados pites em nenhuma das amostras polarizadas, comprovando-se a proteção efetiva da proteção catódica por ambos critérios. As micrografias representativas da superfície mais atacada do corpo-de-prova são apresentadas na Figura 4.23.

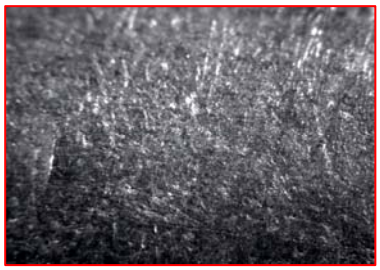
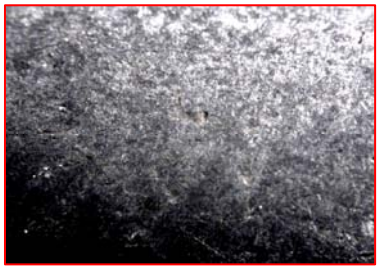
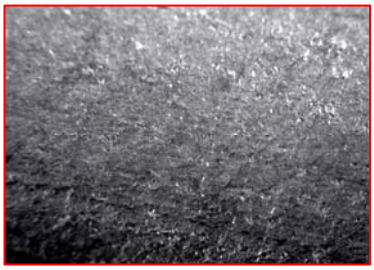
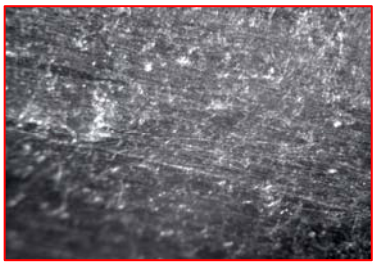
	100 mV catódicos	Potencial Mínimo
Areia 5%		
Areia 35%		
NaCl 3,5%		
Água destilada		

Figura 4.23 – Micrografias dos corpos-de-prova de aço SAE 1020, após os ensaios de polarização e perda de massa, nos 4 meios e nos dois critérios investigados (aumento: 50x).

As micrografias em destaque referem-se ao critério em que os corpos-de-prova perderam maior massa em cada um dos meios. Na areia com 5% de umidade e na solução de NaCl 3,5% p/v, a perda de massa observada para as amostras em cada um dos critérios foi praticamente a mesma.

Comparando as micrografias da Figura 4.23 com as do corpo-de-prova antes da polarização (Figura 4.24) observou-se que as superfícies das amostras polarizadas permaneceram relativamente intactas em ambos critérios, com ausência de corrosão localizada.

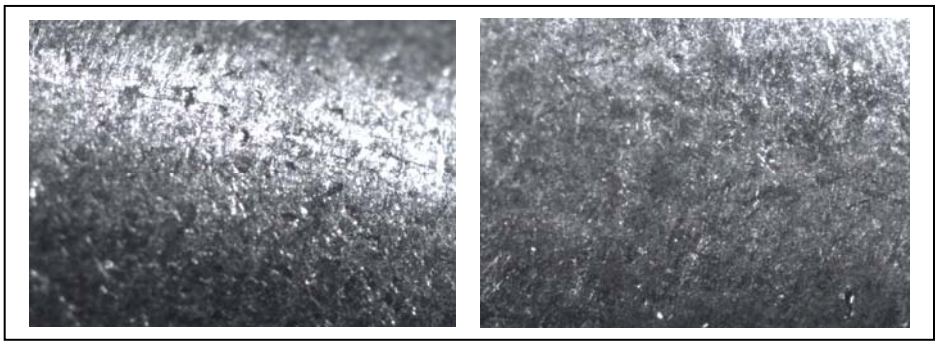


Figura 4.24 – Micrografias dos corpos-de-prova de aço SAE 1020, antes dos ensaios de polarização e perda de massa (aumento: 50x).

Todos brancos, com exceção do exposto ao meio de areia com 5% de umidade, sofreram corrosão localizada. Os pites mais profundos e extensos, foram fotografados e identificados graficamente em 3D, conforme pode ser visto nas Figuras de 4.25 a 4.27.

Entretanto, devido à dificuldade em focalizar os pites em corpo-de-prova cilíndrico, não possível quantificar a profundidade e o diâmetro destes pites.

Os principais pites observados nos corpos-de-prova expostos a areia com 35% de umidade, durante 30 dias, são mostrados na Figura 4.25, onde se observa pequenos pites, pouco profundos, localizados em alguns pontos da superfície.

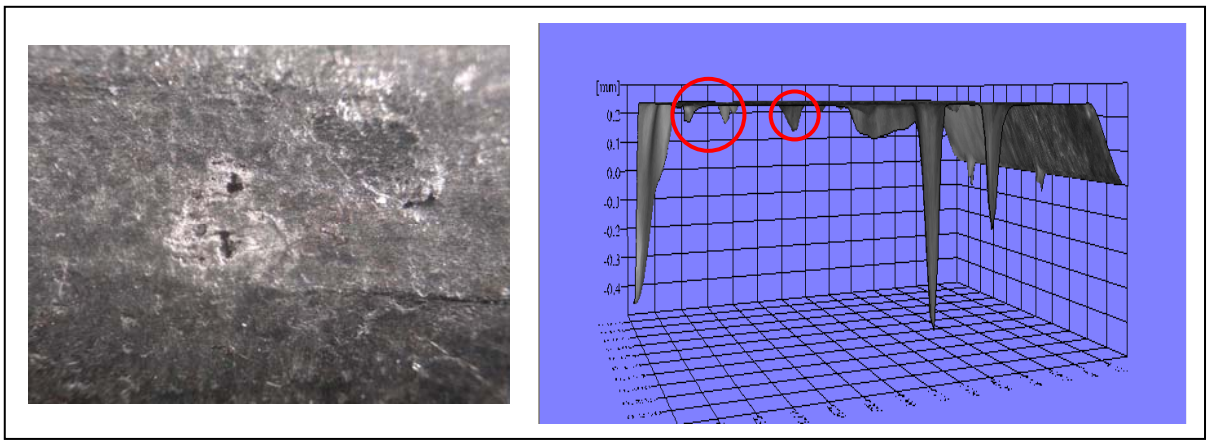


Figura 4.25 – Micrografias e gráficos 3D dos principais pites observados nos corpos-de-prova de aço SAE 1020, após 30 dias de contato com a areia com 35% de umidade (aumento: 50x).

Para o corpo-de-prova ensaiado na solução de NaCl 3,5% p/v, foram observados alguns poucos pites profundos concentrados em uma determinada região da superfície (Figura 4.26).

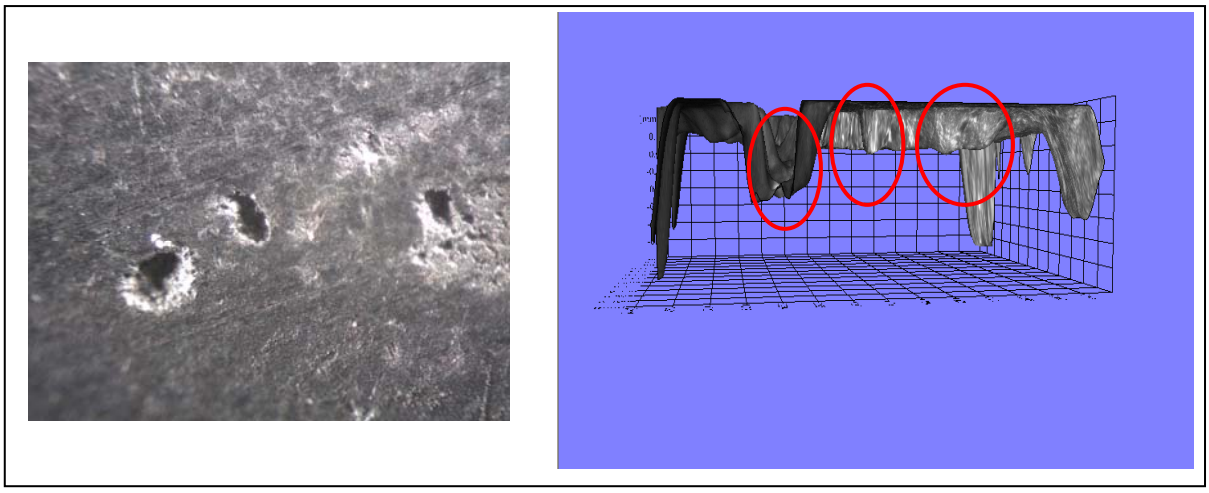


Figura 4.26 – Micrografias e gráficos 3D dos principais pites observados nos corpos-de-prova de aço SAE 1020, após 30 dias de contato com a solução de NaCl 3,5% p/v (aumento: 50x).

Os corpos-de-prova expostos à água destilada (Figura 4.27) apresentaram alguns pites profundos e outros menos severos, distribuídos em algumas regiões da superfície, que adquiriu aspecto rugoso.

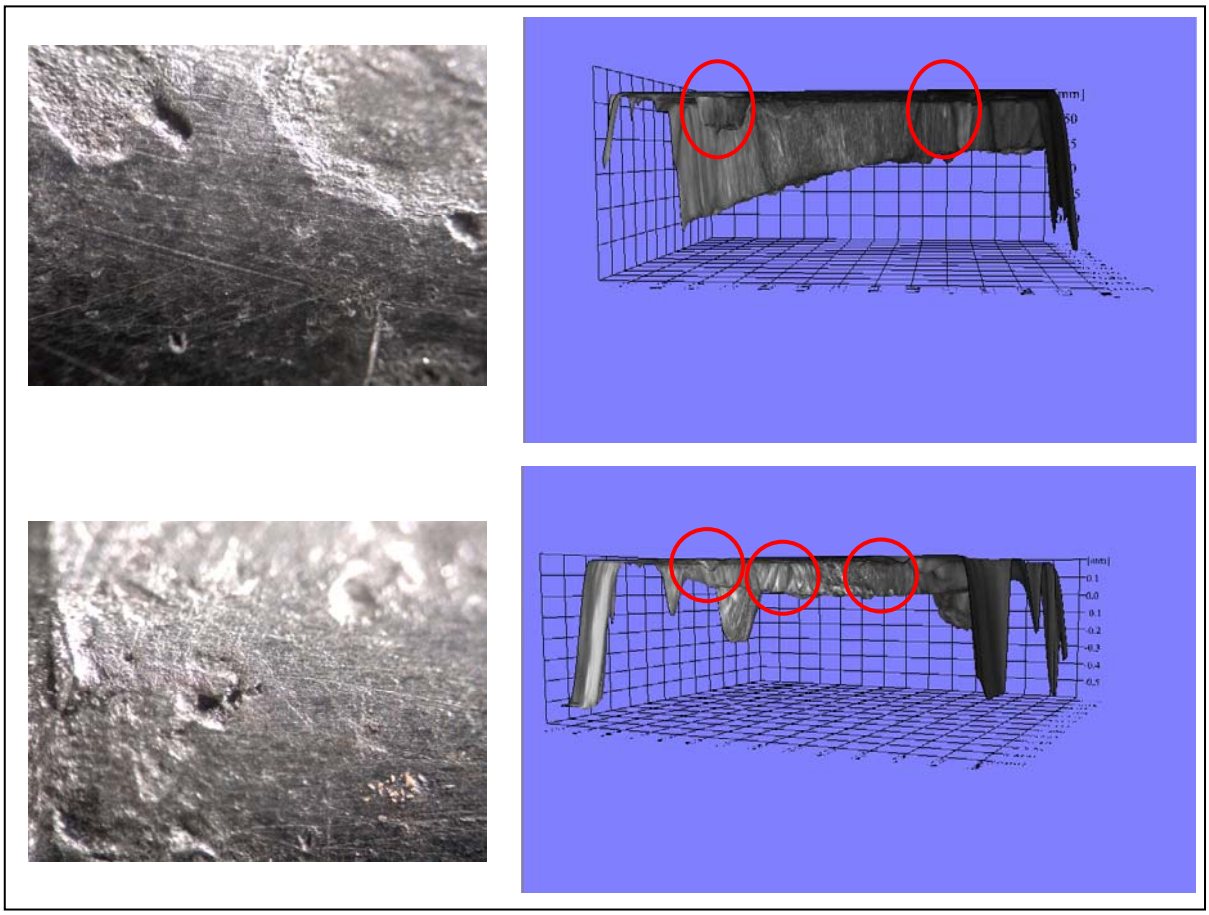


Figura 4.27 – Micrografias e gráficos 3D dos principais pites observados nos corpos-de-prova de aço SAE 1020, após 30 dias de contato com água destilada (aumento: 50x).

4.5 LEVANTAMENTO DE CUSTOS DOS PROJETOS DE PC

A partir dos resultados obtidos até aqui, tanto o critério dos 100 mV catódicos quanto do potencial mínimo de proteção, se mostraram tecnicamente bem aplicáveis a todos os meios, pela comprovação da efetividade da proteção catódica. Portanto, cabe à análise dos custos de instalação dos sistemas de proteção catódica, especificar o melhor critério a ser utilizado em cada um dos meios estudados.

Para estabelecer a padronização dos meios e relacionar os custos apenas às diferenças de densidade de corrente entre os dois critérios, foram escolhidos revestimento e anodos aplicáveis a ambas situações (solo e água do mar). Desta forma, estabeleceu-se a utilização de anodos de ferro-silício-cromo, e revestimento de polietileno extrudado, com eficiência inicial de 99% e final de 97%.

As densidades de corrente aplicadas a cada caso foram obtidas a partir dos ensaios de polarização (vide item 4.2.2). Foi considerado, ainda, que o eletrólito tem movimentação desprezível, e assim o fator de velocidade é igual a 1.

Os cálculos aqui reproduzidos para o dimensionamento da proteção catódica por corrente impressa seguem a ordem e as fórmulas descritas no item 2.5.

Para facilitar a orientação, os resultados encontram-se resumidos nas Tabelas 4.6 e 4.7.

4.5.1 CRITÉRIO DO POTENCIAL MÍNIMO DE PROTEÇÃO

A Tabela 4.6 apresenta as principais especificações para aplicação da proteção catódica por corrente impressa, durante o período de 10 anos (vida útil do leito de anodos), a partir dos dados de densidade de corrente verificados na utilização do critério do potencial mínimo de proteção.

Tabela 4.6 – Características aplicadas à instalação de um sistema de proteção catódica por corrente impressa para estruturas enterradas ou submersas, utilizando-se o critério do potencial mínimo de proteção.

	AREIA COM 5% DE UMIDADE	**AREIA COM 35% DE UMIDADE**	**ÁGUA DESTILADA**	**SOLUÇÃO DE NaCl 3,5%**
Simulação de campo	Solo seco (altíssima resistividade)	Solo encharcado (média resistividade)	Meios de alta resistividade	Água do mar
Retificadores utilizados	50V – 30A	50V – 30A	50V – 60A	20V – 150A
Superfície a proteger	Aço-carbono SAE 1020	Aço-carbono SAE 1020	Aço-carbono SAE 1020	Aço-carbono SAE 1020
Área a proteger (m^2)	1200	1200	1200	1200
Densidade de Corrente (mA/m^2)	560,9	90,5	170,7	118,9
Fator velocidade	1	1	1	1
Revestimento (99,0%)	Polietileno extrudado	Polietileno extrudado	Polietileno extrudado	Polietileno extrudado
Corrente de proteção (A)	6,731	1,086	2,048	1,427
Anodo	Fe-Si-Cr	Fe-Si-Cr	Fe-Si-Cr	Fe-Si-Cr
Tempo de vida do leito (anos)	10	10	10	10
Massa de anodos (Kg)*	31,680	5,111	9,638	6,715
Número de anodos**	6,336 (7)	1,022 (2)	1,928 (2)	1,343 (2)

* Foi considerado um fator de utilização de 0,85
** Para efeito de cálculo, estipulou-se um anodo de 5 Kg.

4.5.2 CRITÉRIO DOS 100 mV CATÓDICOS

Na Tabela 4.7 encontram-se as principais especificações para aplicação da proteção catódica por corrente impressa, durante o período de 10 anos (vida útil do leito de anodos), a partir dos dados de densidade de corrente verificados na utilização do critério dos 100 mV catódicos.

Tabela 4.7 – Características aplicadas à instalação de um sistema de proteção catódica por corrente impressa para estruturas enterradas ou submersas, utilizando-se o critério dos 100 mV catódicos.

	AREIA COM 5% DE UMIDADE	**AREIA COM 35% DE UMIDADE**	**ÁGUA DESTILADA**	**SOLUÇÃO DE NaCl 3,5%**
Simulação de campo	Solo seco (altíssima resistividade)	Solo encharcado (média resistividade)	Meios de alta resistividade	Água do mar
Retificadores utilizados	50V – 30A	50V – 30A	50V – 60A	20V – 150A
Superfície a proteger	Aço-carbono SAE 1020	Aço-carbono SAE 1020	Aço-carbono SAE 1020	Aço-carbono SAE 1020
Área a proteger (m^2)	1200	1200	1200	1200
Densidade de Corrente (mA/m^2)	18,8	51,8	152,2	85,9
Fator velocidade	1	1	1	1
Revestimento (99,0%)	Polietileno extrudado	Polietileno extrudado	Polietileno extrudado	Polietileno extrudado
Corrente de proteção (A)	0,226	0,622	1,826	1,031
Anodo	Fe-Si-Cr	Fe-Si-Cr	Fe-Si-Cr	Fe-Si-Cr
Tempo de vida do leito (anos)	10	10	10	10
Massa de anodos (Kg)*	1,063	2,927	8,593	4,852
Número de anodos**	0,213 (1)	0,585 (1)	1,719 (2)	0,970 (1)

* Foi considerado um fator de utilização de 0,85
** Para efeito de cálculo, estipulou-se um anodo de 5 Kg.

Como não pode ser feita uma análise em termos de cifras para a instalação dos sistemas propostos, assim, o levantamento dos custos será feito através do número de anodos gastos para a proteção das estruturas definidas, tendo em vista que o preço da proteção será proporcional a estes.

Comparando-se o número de anodos empregados na proteção das estruturas para ambos os critérios, verifica-se que a aplicação do critério dos 100 mV catódicos é o mais econômico para todos os meios analisados, à medida que retrata o menor número de anodos consumidos por 1200 m^2 de área a proteger, devido a menor densidade de corrente observada para estes casos.

Entretanto, verifica-se que para os meios líquidos, a diferença entre os dois critérios é muito pequena, podendo ser considerada indiferente a aplicação de um critério ou outro, em termos econômicos.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Com base nos resultados obtidos, as principais conclusões, referentes à aplicabilidade dos critérios de proteção catódica nos meios investigados, são as seguintes:

- Foi constatada a proteção catódica por corrente impressa, a partir da aplicação dos critérios e sistemas estudados, para a proteção do aço-carbono, que apresentou excelente resistência à corrosão, avaliada por taxa de corrosão, na maioria dos casos (mpy < 1), exceto para água destilada em -800 mV $_{Ag/AgCl}$, onde foi considerada muito boa (mpy entre 1 e 5).

- Verificou-se a seguinte ordem crescente de corrosividade dos eletrólitos estudados, segundo os resultados dos ensaios de perda de massa: areia com 5% de umidade < areia com 35% de umidade < água destilada < solução de NaCl 3,5% p/v.

- A perda de massa está relacionada à resistividade do meio, no entanto, a difusão do oxigênio mostrou-se um fator preponderante para quantificação da corrente de proteção e perda de massa do metal nos eletrólitos líquidos.

- Para o critério do potencial eletroquímico mínimo de proteção, foram observados os maiores valores de densidades de corrente para o meio de areia com 5% de umidade, seguida pela água destilada, a solução de NaCl 3,5% p/v e o solo arenoso com 35% de umidade.

- A elevada queda ôhmica comprometeu a distribuição da corrente através da areia com 5% de umidade, que apresentou valor de densidade de corrente maior do que aquela efetivamente necessária para a polarização do metal, quando aplicado o critério do potencial eletroquímico mínimo de proteção.

- O critério do potencial mínimo de proteção mostrou-se eficaz para os meios analisados. Entretanto, foram observados maiores valores de corrente para o

alcance deste critério em todos os meios analisados, em relação ao critério dos 100 mV catódicos, tornando-o menos econômico,.

- Para o critério dos 100 mV catódicos, os maiores valores de densidade de corrente foram observados para a água destilada, seguida da solução de NaCl 3,5% p/v, areia com 35% de umidade e areia com 5% de umidade.

- Para os meios líquidos, observou-se que não houve uma diferença significativa entre os valores de densidade de corrente necessária à proteção, nos dois critérios (cerca de 30 mA/m^2). Para a areia, no entanto, esta diferença é notável, sendo o critério dos 100 mV catódicos o menos dispendioso.

- Os projetos de proteção catódica revelaram um custo menor quando aplicado o critério dos 100 mV catódicos, para todos os meios investigados, em especial nas areias.

Para tratamento em trabalhos futuros, sugere-se:

- A investigação da corrosão microbiológica;

- A avaliação da influência dos tipos de revestimentos na proteção catódica;

- Uma análise mais aprofundada de pite, onde seja possível obter as medidas de profundidade e diâmetro dos pites;

- Um estudo detalhado dos fatores cinéticos e termodinâmicos envolvidos na teoria da proteção catódica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM INTERNATIONAL. **G31-72 (2004)**: standard practice for laboratory immersion corrosion testing of metals. West Conshohocken, 2004. 8p.

ASTM INTERNACIONAL. **G1-03**: standard practice for preparing, cleaning, and evaluating corrosion test specimens. West Conshohocken, 2003. 9p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM87**: aços carbono e ligados para construção mecânica - designação e composição química. Rio de Janeiro, 2000. 19p.

BAECKMANN, W.von; SCHWENK, W.; PRINZ, W. **Handbook of cathodic corrosion protection: theory and practice of electrochemical protection processes**. 3rd ed. Houston: Gulf Publishing Company, 1997. 520p.

BARLO, T.J; BERRY, W.E. An assessment of the current criteria for cathodic protection of buried steel pipelines. **Materials Performance**, Houston, v. 23, n. 9, p. 9–16, sep. 1984.

BRASIL, S.L.D.C; TELLES, J.C.F; MIRANDA, L.R.M. Simulation of coating failures on cathodically protected pipelines: experimental and numerical results. **Corrosion**, Houston, v. 56, n. 11, p. 1180–1188, nov. 2000.

COELHO, J.F.P. A nova ABRACO. **ABRACO: Palestras**. Rio de Janeiro. Disponível em: <http://www.abraco.org.br/NAbracoP/slide0.htm>. Acesso em: 20 dez. 2005.

DEARING, B.M. The 100 mV polarization criterion: practical application for buried pipelines. **Materials Performance**, Houston, p. 23–27, sep. 1994.

DUTRA, A.C.; NUNES, L. de P. **Proteção catódica: técnica de combate à corrosão**. 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 1999. 246p.

ESTEIO Engenharia e Aerolevantamentos. Proteção Catódica. **ESTEIO: Vários – FAQ**. Curitiba. Disponível em: <http://www.esteio.com.br/faq/FAQ-Varios.htm>. Acesso em: 02 fev. 2006.

FONTANA, M.G. **Corrosion Engineering**. 3rd ed. New York: McGraw-Hill Book Company, 1986. 544p.

GENTIL, V. **Corrosão**. 3. ed. rev. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2006.

GLASS, G.K.; CHADWICK, J.R. An investigation into the mecanisms of protection afforded by a cathodic current and aplications for advances in the field of cathodic protection. **Corrosion Science**, Elsevier Science Ltd., Great Britain, v. 36, n. 12, p. 2193–2209, 1994.

GLASS, G.K. Technical note: the 100 mV potential decay cathodic criterion. **Corrosion**, Houston, v. 55, n. 3, p. 286–290, mar.1999.

GUMMOW, R.A. Cathodic protection potencial criterion for underground steel structures. **Materials Performance**, Houston, p. 21–30, nov. 1993.

GUMMOW, R. A. Using Coupons and probes to determine cathodic protection levels. **Materials Performance**, v. 37, n. 8, p. 24–29, aug. 1998.

HOLTSBAUM, W.B. Application and misapplication of the 100 mV criterion for cathodic protection. **Materials Performance**, p. 30–32, jan. 2003.

HUHN, R. Corrosão em tubulações. **ABRACO: Artigos**. Rio de Janeiro. Disponível em: <http://www.abraco.org.br/corrosi.htm>. Acesso em: 22 fev. 2006.

IEC INSTALAÇÕES E ENGENHARIA DE CORROSÃO LTDA. **Sistemas de proteção catódica**. Rio de Janeiro: Diagraphic - Projetos Gráficos e Editoriais, 1990. 261p.

JONES, D.A. The application of eletrode kinetics to the theory and pratice of cathodic protection. **Corrosion Science**, Pergamon Press, Great Britain, v. 11, p. 439–451, 1971.

JONES, D.A. Analysis of cathodic protection criteria. **Corrosion**, Houston, v. 28, n. 11, p. 421–423, nov. 1972.

KOCH, G.H. et al. Cost of Corrosion Study Unveiled. **A Supplement to Materials Performance**, Houston, p.2–11, jul. 2002.

LOUREIRO, A.M.V. **Estudo da corrosão de dutos enterrados em solos contaminados por substâncias químicas**. 2005. xvi, 135f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

MATEER, M. Using failure probality plots to evaluate the effectiveness of “off” vs “on” potencial CP criteria. **Materials Performance**, p. 22–24, sep. 2004.

MAINIER, F.B.; MATA, S.F. Uma Visão dos Processos Corrosivos no Cotidiano. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CORROSÃO, 18., 1995, Rio de Janeiro. **Anais LMCORR 95**. Rio de Janeiro: ABRACO, 1995, 10p.

MAINIER, F.B.; LETA, F.R. O ensino de corrosão e de técnicas anticorrosivas compatíveis com o meio ambiente. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENSINO DE ENGENHARIA, 24., 2001, Porto Alegre. **Anais COBENGE 2001**. Porto Alegre: ABENGE, 2001, p.5–11.

MATTEDI, V.A. **Proteção catódica em estrutura de concreto armado e protendido**. 1999. xi, 109p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1999.

NACE INTERNACIONAL. **RP0169-2002, Item nº21001**: control of external corrosion on underground or submergeal metallic piping systems. Houston, 2002. 29p.

NACE INTERNACIONAL. **RP0104-2004, Item nº21105**: the use of coupons for cathodic protection monitoring applications. Houston, 2004. 26p.

NACE INTERNACIONAL. **Proposed draft**: report on the 100 mV cathodic polarization criterion. Houston, 2006. 35p.

PIMENTA, G.S. Uma abordagem geral. **ABRACO: Artigos**. Rio de Janeiro. Disponível em: <http://www.abraco.org.br/corros10.htm>. Acesso em: 22 fev. 2006.

RIZZO, M.E.; WILDMAN, T.A. Computerized cathodic protection technology reduces pipeline reconditioning costs. **Materials Performance**, Houston, p. 14–19, oct. 1997.

ANEXOS

ANEXO A – ANÁLISE DA UMIDADE GRAVIMÉTRICA DA AREIA 35%

AREIA 35% => -850 mV

		MASSA INICIAL	MASSA FINAL
AMOSTRA	AREIA	520,00	328,08
	ÁGUA	280,10	146,51
	TOTAL	800,10	474,59
BRANCO	AREIA	520,00	206,93
	ÁGUA	280,10	110,98
	TOTAL	800,10	317,91

	UMIDADE INICIAL (%)	UMIDADE FINAL (%)
AMOSTRA	35,01	30,87
BRANCO		34,91

AREIA 35% => -100 mV

		MASSA INICIAL	MASSA FINAL
AMOSTRA	AREIA	780,38	399,36
	ÁGUA	420,23	192,99
	TOTAL	1200,61	592,35
BRANCO	AREIA	780,38	392,73
	ÁGUA	420,23	206,31
	TOTAL	1200,61	599,04

	UMIDADE INICIAL (%)	UMIDADE FINAL (%)
AMOSTRA	35,00	32,58
BRANCO		34,44

ANEXO B – ANÁLISE DA UMIDADE GRAVIMÉTRICA DA AREIA 5%

AREIA 5% => -850 mV

		MASSA INICIAL	MASSA FINAL
AMOSTRA	AREIA	855,48	476,81
	ÁGUA	45,03	24,52
	TOTAL	900,51	501,33
BRANCO	AREIA	855,48	341,40
	ÁGUA	45,03	17,78
	TOTAL	900,51	359,18

	UMIDADE INICIAL (%)	UMIDADE FINAL (%)
AMOSTRA	5,00	4,89
BRANCO		4,95

AREIA 5% => -100 mV

		MASSA INICIAL	MASSA FINAL
AMOSTRA	AREIA	1136,36	522,59
	ÁGUA	59,81	27,39
	TOTAL	1196,17	549,98
BRANCO	AREIA	1136,36	524,38
	ÁGUA	59,81	26,85
	TOTAL	1196,17	551,23

	UMIDADE INICIAL (%)	UMIDADE FINAL (%)
AMOSTRA	5,01	4,98
BRANCO		4,87

ANEXO C – VALORES MÉDIOS DIÁRIOS DA DENSIDADE DE CORRENTE

CRITÉRIO DO POTENCIAL ELETROQUÍMICO MÍNIMO

Dias	Areia com 35%	Areia com 5%	NaCl 3,5% p/v	Água Dest.
1	1,015E+02	6,682E+02	1,476E+02	1,876E+02
2	1,010E+02	6,261E+02	1,293E+02	1,850E+02
3	1,000E+02	5,951E+02	1,268E+02	1,808E+02
4	9,628E+01	6,511E+02	1,102E+02	1,873E+02
5	9,937E+01	6,616E+02	9,393E+01	1,910E+02
6	9,710E+01	6,470E+02	1,174E+02	1,869E+02
7	9,581E+01	6,302E+02	1,458E+02	1,834E+02
8	9,613E+01	6,471E+02	6,349E+01	1,804E+02
9	9,611E+01	6,336E+02	7,863E+01	1,650E+02
10	9,619E+01	6,644E+02	7,848E+01	1,632E+02
11	9,625E+01	6,713E+02	8,011E+01	1,712E+02
12	9,578E+01	6,372E+02	7,928E+01	1,772E+02
13	9,244E+01	6,057E+02	1,313E+02	1,681E+02
14	9,097E+01	6,076E+02	2,049E+02	1,564E+02
15	8,934E+01	6,075E+02	1,964E+02	1,530E+02
16	8,853E+01	6,195E+02	1,748E+02	1,624E+02
17	8,775E+01	5,921E+02	1,197E+02	1,530E+02
18	8,668E+01	5,641E+02	1,664E+02	1,736E+02
19	8,595E+01	5,433E+02	1,322E+02	1,740E+02
20	8,873E+01	5,241E+02	1,456E+02	1,716E+02
21	9,244E+01	5,092E+02	1,363E+02	1,765E+02
22	9,097E+01	4,813E+02	9,964E+01	1,607E+02
23	8,934E+01	4,463E+02	1,035E+02	1,593E+02
24	9,952E+01	4,330E+02	1,076E+02	1,690E+02
25	9,251E+01	4,233E+02	1,017E+02	1,593E+02
26	7,797E+01	4,123E+02	1,015E+02	1,488E+02
27	7,761E+01	4,061E+02	9,524E+01	1,809E+02
28	7,514E+01	3,833E+02	8,982E+01	1,750E+02
29	7,426E+01	3,780E+02	9,324E+01	1,589E+02
30	7,451E+01	3,781E+02	9,322E+01	1,476E+02
MÉDIA MENSAL	**9,087E+01**	**4,624E+02 ***	**1,181E+02**	**1,702E+02**

*** Para a areia com 5% de umidade, a média foi feita apenas com os últimos 15 dias de polarização, onde foi observada uma tendência à estabilização.**

ANEXO D – VALORES MÉDIOS DIÁRIOS DA DENSIDADE DE CORRENTE CRITÉRIO DOS 100 mV CATÓDICOS

Dias	Areia com 35%	Areia com 5%	NaCl 3,5% p/v	Água Dest.
1	5,559E+01	1,952E+01	1,121E+02	4,568E+01
2	5,512E+01	2,159E+01	1,182E+02	4,498E+01
3	4,835E+01	2,013E+01	1,122E+02	3,812E+01
4	4,623E+01	1,915E+01	1,019E+02	3,012E+01
5	4,628E+01	1,810E+01	7,062E+01	2,306E+01
6	4,669E+01	1,339E+01	5,501E+01	1,348E+01
7	4,691E+01	1,123E+01	6,285E+01	5,855E+00
8	4,685E+01	1,077E+01	8,199E+01	6,469E+01
9	4,621E+01	1,115E+01	9,465E+01	8,625E+01
10	4,636E+01	3,306E+01	8,361E+01	1,662E+02
11	4,697E+01	2,806E+01	8,872E+01	1,759E+02
12	5,384E+01	2,359E+01	8,876E+01	1,852E+02
13	5,453E+01	2,153E+01	8,874E+01	1,840E+02
14	5,188E+01	2,161E+01	8,878E+01	1,768E+02
15	5,454E+01	2,211E+01	8,879E+01	1,985E+02
16	5,618E+01	1,822E+01	8,879E+01	1,979E+02
17	8,055E+01	2,522E+01	8,879E+01	1,953E+02
18	7,275E+01	2,151E+01	8,882E+01	1,936E+02
19	6,885E+01	2,060E+01	8,881E+01	1,956E+02
20	6,582E+01	2,048E+01	8,884E+01	2,014E+02
21	6,351E+01	2,118E+01	7,815E+01	2,032E+02
22	6,150E+01	1,882E+01	8,062E+01	1,970E+02
23	4,518E+01	1,900E+01	9,332E+01	1,898E+02
24	4,278E+01	1,744E+01	9,166E+01	1,847E+02
25	4,172E+01	2,159E+01	7,958E+01	1,872E+02
26	4,099E+01	1,397E+01	4,877E+01	1,897E+02
27	4,084E+01	5,881E+00	7,814E+01	1,969E+02
28	4,087E+01	5,787E+00	8,291E+01	2,003E+02
29	4,085E+01	6,046E+00	7,739E+01	1,931E+02
30	4,085E+01	6,154E+00	7,735E+01	1,870E+02
MÉDIA MENSAL	**5,165E+01**	**1,790E+01**	**8,563E+01**	**1,451E+02**

ANEXO E – DADOS EXPERIMENTAIS PARA CÁLCULO DA PERDA DE MASSA E TAXAS DE CORROSÃO

Densidade	g/cm^3
	7,860

Área	cm^2	in^2	mm^2
	2,553	0,396	255,30

PERDA DE MASSA - AMOSTRA

	CRITÉRIO 850					CRITÉRIO 100				
	PM (mg)	t (h)	mm/y	mpy	mdd	PM (mg)	t (h)	mm/y	mpy	mdd
AREIA 35%	2,90	749	0,02	0,66	3,63	4,30	698	0,03	1,06	5,77
AREIA 5%	1,70	698	0,01	0,42	2,28	2,30	700	0,01	0,56	3,08
NaCl 3,5% p/v	3,80	721	0,02	0,90	4,94	2,70	700	0,02	0,66	3,61
Água dest.	7,20	818	0,04	1,51	8,24	2,40	722	0,01	0,57	3,11

PERDA DE MASSA - BRANCO

	CRITÉRIO DO POTENCIAL MÍNIMO					CRITÉRIO DOS 100 CATÓDICOS				
	Pm (mg)	t (h)	mm/y	mpy	mdd	Pm (mg)	t (h)	mm/y	mpy	mdd
AREIA 35%	27,00	749	0,16	6,18	33,76	32,90	698	0,21	8,09	44,14
AREIA 5%	-*	-	-	-	-	5,30	700	0,03	1,30	7,09
NaCl 3,5% p/v	83,00	721	0,50	19,75	107,80	80,80	700	0,50	19,80	108,09
Água dest.	45,60	818	0,24	9,56	52,20	46,90	722	0,28	11,14	60,83

*** O branco exposto à areia com 5% de umidade, no critério do potencial mínimo, não pôde ser considerado para o cálculo da perda de massa, por apresentar corrosão severa, incompatível com os demais resultados.**