

JOSÉ ÁLVARO DE CARVALHO ALBERTINI

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA CORRENTE ALTERNADA
NA CORROSÃO EM DUTOS METÁLICOS ENTERRADOS**

SÃO CAETANO DO SUL
2008

JOSÉ ÁLVARO DE CARVALHO ALBERTINI

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA CORRENTE ALTERNADA
NA CORROSÃO EM DUTOS METÁLICOS ENTERRADOS**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia Mauá do Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos.

Linha de pesquisa: Análise e Controle de Processos Químicos.

Orientadora: Prof ^ª. Dra. Susana M. Giampietri Lebrão
Co-orientador: Prof. Dr. Mário Leite Pereira Filho

SÃO CAETANO DO SUL
2008

FICHA CATALOGRÁFICA

Albertini, José Álvaro de Carvalho

Estudo da influência da corrente alternada na corrosão em dutos metálicos enterrados / José Álvaro de Carvalho Albertini – São Caetano do Sul, SP: IMT – CEUN, 2008.

95 p.

Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia do Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, SP, 2008

Orientadora: Dra. Susana M. Giampietri Lebrão

Co-orientador: Dr. Mário Leite Pereira Filho

1. Corrente AC – Corrosão 2. Proteção catódica - Dutos I. José Álvaro de Carvalho Albertini. II. Instituto Mauá de Tecnologia. Centro Universitário. Escola de Engenharia Mauá. II. Título

JOSÉ ÁLVARO DE CARVALHO ALBERTINI

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA CORRENTE ALTERNADA NA CORROSÃO EM DUTOS METÁLICOS ENTERRADOS

Dissertação aprovada como requisito parcial para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos pela Escola de Engenharia Mauá do Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia.

Orientadora: Prof ^a. Dra. Susana M. Giampietri Lebrão
Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia

Co-orientador: Prof. Dr. Mário Leite Pereira Filho
Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT - SP

Banca examinadora:

Prof ^a. Dra. Ana Magda Piva
Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia

Prof. Dr. Álvaro Augusto Oliveira Magalhães
PETROBRAS – CENPES - Centro de Pesquisa - RJ

São Caetano do Sul - 2008

AGRADECIMENTOS

À Dra. Susana M. Giampietri Lebrão e ao Dr. Mário Leite Pereira Filho pela atenção e apoio durante a orientação deste estudo.

À Cibeli, Álvaro e Arthur, minha esposa e filhos queridos.

Aos meus pais, que sempre me incentivaram aos estudos.

Ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT, especialmente à Dra. Zehbour Panossian, ao Mestre Neosvaldo L. de Almeida e ao Químico Sérgio E. A. Filho, pelas discussões e todo apoio proporcionado.

Aos amigos, engenheiros da PETROBRAS, Gutemberg de S. Pimenta, João Hipólito de L. Oliver e Eduardo W. Laurino, pelo incentivo e apoio durante o desenvolvimento deste estudo.

A todo o Corpo Docente desta Universidade, especialmente ao Prof. Dr. Cláudio Garcia, que pelo fascínio em ensinar e transmitir conhecimentos me motivou a este mestrado.

A PETROBRAS, que sempre incentivou a cultura e o desenvolvimento tecnológico de seus funcionários.

RESUMO

Os dutos metálicos enterrados utilizados no transporte de fluídos, instalados em áreas comuns as linhas de transmissão de energia elétrica em alta tensão, tem apresentado histórico de corrosão externa mesmo estando protegidos catodicamente. Estudos atribuem este problema à presença de corrente alternada induzida na tubulação pelas linhas de transmissão de energia. As empresas de transporte de fluídos, principalmente as de derivados de petróleo e gás, preocupadas com a segurança pessoal e com o impacto ambiental causado no caso de vazamentos, investem cada dia mais em busca de soluções para evitar este tipo de corrosão. O presente trabalho estuda e avalia, através de abordagem teórica e ensaios laboratoriais, a influência de algumas variáveis no processo de corrosão em dutos metálicos enterrados, proveniente de corrente alternada induzida pelas linhas de alta tensão. Constataram-se as relações existentes entre o processo de corrosão dos cupons de corrosão com a densidade de corrente alternada a que os dutos estão expostos, com a resistividade do meio em que estão enterrados, com a densidade de corrente de proteção catódica, com o pH do meio, com a temperatura e com a freqüência da corrente alternada. Nos sistemas sem a proteção catódica ensaiados experimentalmente o processo de corrosão foi inevitável, independentemente do nível de interferência de corrente alternada. Nos ensaios com proteção catódica por corrente impressa, constatou-se corrosão por influência da corrente alternada, o que nos leva a crer que os critérios de proteção, adotados na literatura para verificar possíveis interferências de corrente AC, ainda não são totalmente confiáveis.

Palavras-chave: Corrosão AC. Proteção Catódica. Corrente alternada. Transporte por dutos.

ABSTRACT

The buried metallic pipelines used for the transportation of fluids, installed together in the same common area as the high tension electric power transmission lines, have presented a historic background of external corrosion even having cathodic protection. Studies attribute this problem to the presence of alternating current induced in the pipeline through the power transmission lines. The fluid transporting companies, mainly the petroleum and gas derivate production enterprises, concerned with the personal safety and ambient impact protection caused by major spilling and leakages, invest larger sums on a daily basis in seeking new solutions to avoid this type of corrosion. This paper studies and evaluates, through theoretic methods and laboratorial studies, the influence that some variables cause in the corrosion process on buried metallic pipelines, generated by alternating current inducted by the high tension power lines. It was noticed that the existing relationship between the corrosion process of the coupons of corrosion with the density of alternate current that the pipelines are exposed to, with a resistivity to the ambient that they are buried, with the density of cathodic protection, with the PH, with the temperature and with the frequency of the alternate current. On the systems experimentally tested without cathodic protection the corrosion process was unavoidable, independent of the level of interference of alternate current. On the experiments with cathodic protection by imposed current, it was noticed corrosion by influence of alternate current, that takes us to believe that the protection criteria, used in literature to verify possible influences of AC current, is still not totally reliable.

Key-words: AC Corrosion. Cathodic protection. Alternating current. Transport by pipelines.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 -	Terminal Terrestre de São Caetano do Sul.....	18
FIGURA 2.2 -	Terminal Terrestre de Campos Elíseos.....	19
FIGURA 2.3 -	Terminal Aquaviário de São Sebastião.....	19
FIGURA 2.4 -	Cruzamento de Linha de Transmissão de Alta Tensão com o Oleoduto	28
FIGURA 2.5 -	Cruzamento de Linha de Transmissão de Alta Tensão com o Oleoduto em Área Rural.....	29
FIGURA 2.6 -	Cruzamento de Linha de Transmissão de Alta Tensão com Oleoduto em Área Urbana.....	29
FIGURA 2.7 -	Diagrama de Pourbaix – Sistema Fe – H ₂ O a 25 °C	33
FIGURA 2.8 -	Sistema de Proteção Catódica por Corrente Galvânica.....	37
FIGURA 2.9 -	Anodo instalado em fundo de tanque.....	37
FIGURA 2.10 -	Exemplo de anodos.....	37
FIGURA 2.11 -	Sistema de Proteção Catódica por Corrente Impressa.....	36
FIGURA 2.12 -	Retificador para corrente impressa.....	39
FIGURA 2.13 -	Retificador com ajuste de potência.....	39
FIGURA 2.14 -	Instalação típica de um leito de anodos.....	40
FIGURA 2.15 -	Retificador usando energia solar.....	40
FIGURA 2.16 -	Eletrodo de referência de Cu-CuSO ₄	41
FIGURA 2.17 -	Corrente de proteção nas falhas do revestimento.....	41
FIGURA 2.18 -	Medição de potencial Tubo – Solo	42
FIGURA 2.19 -	Diagrama da relação Densidade AC e DC para a proteção.....	50
FIGURA 2.20 -	Diagrama de Pourbaix – Potenciais no domínio da imunidade	52
FIGURA 2.21 -	RS, resistência de dispersão da falha (spread).....	54
FIGURA 2.22 -	Gráfico V _{AC} em função da área da falha, com J _{AC} = 100 A/m ²	55
FIGURA 2.23 -	Círculo equivalente de um duto metálico enterrado.....	57
FIGURA 2.24 -	Círculo equivalente com alta freqüência.....	58

FIGURA 2.25 -	Círculo equivalente com média freqüência.....	57
FIGURA 2.26 -	Círculo equivalente com baixa freqüência.....	59
FIGURA 2.27 -	Círculo equivalente e a influência da resistividade do solo.....	59
FIGURA 3.1 -	Aspecto típico do gráfico para determinar perda de massa	67
FIGURA 3.2 -	Cupons de corrosão utilizados nos ensaios	68
FIGURA 3.3 -	Cuba de vidro utilizada nos ensaios	69
FIGURA 3.4 -	Fonte de tensão alternada	69
FIGURA 3.5 -	Arranjo dos ensaios com proteção catódica	70
FIGURA 3.6 -	Montagem dos ensaios com proteção catódica	71
FIGURA 4.1 -	Arranjos experimentais para avaliação da corrente galvânica	73
FIGURA 4.2 -	Círculo equivalente da dupla camada elétrica	79
FIGURA 4.3 -	Curvas de potencial E_{DC} x J_{DC} sem influência de corrente AC	82
FIGURA 4.4 -	Curvas de potencial E_{DC} x J_{DC} com resistividade de 5.000 $\Omega.cm$ e com influência de corrente AC.....	83
FIGURA 4.5 -	Curvas de potencial E_{DC} versus J_{DC} com resistividade de 10.000 $\Omega.cm$ e com influência de corrente AC.....	84
FIGURA 4.6 -	Curvas de potencial E_{DC} versus J_{DC} com resistividade de 65.000 $\Omega.cm$ e com influência de corrente AC.....	85
FIGURA 4.7 -	Ensaios na presença de proteção catódica, simulando as condições de imunidade, equilíbrio e atividade de corrosão	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Principais acidentes em dutos de petróleo e derivados no Brasil	27
Tabela 3.1 - Resistividade de soluções aquosas de sulfato de sódio preparadas em laboratório	65
Tabela 4.1 - Resultados dos ensaios com corrente galvânica	74
Tabela 4.2 - Efeito da resistividade e da densidade de corrente AC na taxa de corrosão....	76
Tabela 4.3 - Efeito da freqüência da corrente AC na taxa de corrosão	77
Tabela 4.4 - Efeito da temperatura na taxa de corrosão	79
Tabela 4.5 - Efeito do pH do meio na taxa de corrosão	80
Tabela 4.6 - Ensaios em cupons de corrosão com proteção catódica e com interferência de corrente AC	87

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CNP	Conselho Nacional do Petróleo
OTC	Offshore Technology Conference
FPSO	Floating Production Storage Offloading -Unidade com características de produzir, processar, armazenar e escoar óleo e gás
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
LGN	Líquido de Gás Natural
GNL	Gás Natural Liquefeito
PEGASO	Programa de Excelência em Gestão Ambiental e Segurança Operacional
SPC	Sistema de proteção catódica
PIG	Pipeline inspection gadget – Equipamento para limpeza e inspeção de interna de dutos
IPT	Instituto de Pesquisa Tecnológicas
LT	Linha de transmissão
COPESUL	Companhia Petroquímica do Sul
AGA	American Gás Association
COPANT	Comissão Panamericana de Normas Técnicas
SAE	Society of Automotive Engineers
UNS	Unified Numbering System
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
f.e.m.	Força Eletromotriz
RS	Spread Resistance – Resistência de Dispersão
ECS	Eletrodo de Calomelano Saturado
ECSC	Eletrodo de Cobre/Sulfato de Cobre
RMS	Potencial Médio Quadrático

LISTA DE SÍMBOLOS

Bpd	Barris por dia
V	Volts
A	Ampere
Cu-CuSO ₄	Cobre Sulfato de Cobre
DC	Direct Current – Corrente Contínua
AC	Alternating Current – Corrente Alternada
J _{AC}	Densidade de Corrente Alternada
J _{DC}	Densidade de Corrente Contínua
Hz	Hertz
A/m ²	Ampere por metro quadrado
mm/a	Milímetro por ano
ρ	Resistividade
Ω.cm	Ohms x centímetro
pH	Potencial Hidrogeniônico
RS	Spread Resistance – Resistência de Dispersão
V _{IR FREE}	Potencial livre da queda ôhmica (I x R do solo)
E _{AC}	Potencial elétrico eficaz AC
E _{DC}	Potencial elétrico eficaz DC
E _{AC+DC}	Potencial elétrico eficaz AC+DC
I _{AC}	Corrente elétrica eficaz AC
E _{ECSC}	potencial elétrico medido em relação ao eletrodo de referência de cobre/sulfato de cobre
E _{ECS}	potencial elétrico medido em relação ao eletrodo de calomelano saturado
E _{EH}	potencial elétrico medido em relação ao eletrodo de referência de hidrogênio

SUMÁRIO

1	<i>INTRODUÇÃO</i>	15
2	<i>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</i>	17
2.1	<i>História da PETROBRAS</i>	17
2.1.1	<i>História da TRANSPETRO</i>	18
2.1.1.1	<i>Terminais e Oleodutos</i>	20
2.1.1.2	<i>Oleodutos</i>	21
2.1.1.3	<i>Gasodutos</i>	21
2.1.1.4	<i>Carga Transportada e Extensão dos Dutos</i>	23
2.1.2	<i>Preocupação com o Meio Ambiente e Segurança Operacional</i>	24
2.1.2.1	<i>Programa PEGASO</i>	24
2.1.2.2	<i>Padrão de Integridade Estrutural de Duto – PID</i>	25
2.1.2.3	<i>Acidentes em Oleodutos</i>	27
2.2	<i>Cruzamentos entre Linhas de Transmissão de Energia Elétrica e Dutos Metálicos</i>	27
2.3	<i>Corrosão</i>	30
2.3.1	<i>Conceitos</i>	30
2.3.2	<i>Tipos de Corrosão</i>	30
2.3.3	<i>Principais reações envolvidas na corrosão do ferro</i>	31
2.3.4	<i>Diagrama de Pourbaix</i>	32
2.3.5	<i>Potencial de equilíbrio</i>	34
2.4	<i>Proteção Catódica</i>	35
2.4.1	<i>Tipos de Proteção Catódica</i>	36
2.4.2	<i>Critério de proteção</i>	41
2.5	<i>Corrosão por Corrente Alternada</i>	42
2.5.1	<i>Corrosão AC na ausência de proteção catódica</i>	43

2.5.2	Corrosão AC na presença de proteção catódica	43
2.5.3	Intensidade da corrosão AC (taxa de corrosão)	45
2.5.4	Características Morfológicas da corrosão AC	46
2.5.5	Fatores que influenciam na corrosão por AC	46
2.5.6	Probabilidade da corrosão AC	48
2.6	Fundamentação Teórica da Corrente Alternada	60
3	MATERIAIS E MÉTODOS	64
3.1	Seleção do meio de ensaio	64
3.2	Preparação dos cupons de corrosão para os ensaios e procedimento para determinação da perda de massa (taxa de corrosão)	65
3.3	Ensaios sem proteção catódica	67
3.4	Curvas do Potencial DC em função da Densidade de corrente para diferentes valores de corrente AC	69
3.5	Ensaios com proteção catódica e com interferência de corrente AC	70
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	72
4.1	Ensaios em cupons de corrosão sem proteção catódica	72
4.1.1	Efeito da resistividade e da densidade de corrente AC na taxa de corrosão	75
4.1.2	Efeito da freqüência da corrente AC na taxa de corrosão	76
4.1.3	Efeito da temperatura na taxa de corrosão	79
4.1.4	Efeito do pH na taxa de corrosão	80
4.2	Curvas de Potencial DC em função da Densidade de Corrente DC para verificação da influência da corrente AC	81
4.3	Ensaios em cupons com proteção catódica e com interferência de corrente AC	86
5	CONCLUSÃO	89
6	TRABALHOS FUTUROS	90
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91

1 INTRODUÇÃO

O transporte de fluídos por dutos é o principal meio utilizado pelas companhias de petróleo, gás e saneamento. Os dutos metálicos enterrados estão sujeitos a corrosão externa, influenciada por diversos fatores: tipo do material utilizado na fabricação do duto, características do solo e do revestimento, ação de correntes de interferência, entre outros. O principal método utilizado para proteção desse tipo de corrosão é a proteção catódica. Porém, na literatura há relatos de casos de corrosão em dutos enterrados, protegidos ou não catódicamente, atribuídas a corrente alternada induzida por linhas de transmissão de alta tensão e estradas de ferro alimentadas por corrente alternada, instaladas próximas a essas tubulações.

Com o crescente desenvolvimento do Brasil, as empresas que utilizam o transporte de fluídos por dutos estão aumentando suas malhas dutoviárias, assim como, as companhias de energia elétrica suas linhas de transmissão de alta tensão, ambas com extensões de milhares de quilômetros, atravessando regiões povoadas e de difícil acesso, tornando comum o compartilhamento dessas áreas entre essas empresas. Este fato aumentou a preocupação das empresas em relação às interferências elétricas causadas nos dutos. Esta preocupação abrange principalmente quanto à segurança pessoal dos funcionários, que geralmente, estão em contato com esses dutos e aos riscos de vazamentos de produtos ocorridos por furos nos dutos causados pela corrosão por corrente alternada. A PETROBRAS, Empresa com a maior malha dutoviária para transporte de petróleo, derivados e gás natural no País, desenvolve um projeto de pesquisa em parceria com o Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT, com intuito de entender o mecanismo de corrosão por corrente alternada e desenvolver ações para evitá-la.

Assim, neste estudo, os objetivos foram: verificar a influência de algumas variáveis no processo de corrosão em dutos metálicos enterrados, proveniente de corrente alternada induzida por linhas de transmissão de alta tensão, através de ensaios laboratoriais e comparar os resultados encontrados com a literatura existente. As variáveis avaliadas

foram: a densidade de corrente alternada a que os dutos estão expostos, a resistividade do meio em que eles estão enterrados, a densidade de corrente de proteção catódica, o pH do meio, a freqüência da corrente alternada e a temperatura. Foram avaliados sistemas sem proteção catódica e com proteção catódica por corrente impressa.

O trabalho está dividido em seis capítulos, incluindo este primeiro. No Capítulo 2, é feita uma revisão bibliográfica sobre a história da PETROBRAS e sua estrutura dutoviária, exemplos de pontos de interferência entre dutos enterrados e linhas de transmissão de alta tensão compartilhando a mesma faixa e também, uma revisão bibliográfica sobre corrosão por corrente alternada e seus fatores de influência, mostrando trabalhos e conclusões relacionadas ao assunto, além de uma fundamentação teórica sobre corrente alternada. No Capítulo 3, encontram-se descritos os materiais, equipamentos e métodos experimentais adotados para a execução da parte experimental do trabalho. O Capítulo 4 apresenta os resultados experimentais e uma discussão geral dos resultados obtidos. No Capítulo 5, é apresentada a conclusão do trabalho e no Capítulo 6, algumas sugestões para futuros trabalhos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 História da PETROBRAS

Em outubro de 1953, com a edição da Lei 2.004, a constituição da PETROBRAS foi autorizada com o objetivo de executar as atividades do setor petrolífero no Brasil em nome da União. A Petróleo Brasileiro S.A. - PETROBRAS iniciou suas atividades com o acervo recebido do antigo Conselho Nacional do Petróleo (CNP), que manteve sua função fiscalizadora sobre o setor (PETROBRAS, 2007).

As operações de exploração e produção de petróleo, bem como as demais atividades ligadas ao setor de petróleo, gás natural e derivados, à exceção da distribuição atacadista e da revenda no varejo pelos postos de abastecimento, foram monopólio conduzido pela PETROBRAS de 1954 a 1997. Durante esse período a PETROBRAS tornou-se líder em comercialização de derivados no País, e graças ao seu desempenho a Companhia foi premiada em 1992 pela Offshore Technology Conference (OTC), o mais importante prêmio do setor, e posteriormente recebeu o prêmio em 2001. Em 1997, o Brasil, através da PETROBRAS, ingressou no seletivo grupo de 16 países que produz mais de 1 milhão de barris de óleo por dia. Em 2003, coincidindo com a comemoração dos seus 50 anos, a PETROBRAS dobrou a sua produção diária de óleo e gás natural ultrapassando a marca de 2 milhões de barris, no Brasil e no exterior. A Companhia identificou novas regiões petrolíferas de óleo leve, no Espírito Santo e em Sergipe, o que pode ser considerada a sua maior conquista, na área de exploração e produção, depois da descoberta de óleo na Bacia de Campos em 1974 (PETROBRAS, 2007).

A PETROBRAS ultrapassou pela primeira vez, em 12 de maio de 2005, a marca nacional de 1,8 milhões de barris de produção de petróleo por dia, chegando perto da auto-suficiência brasileira. Nesse ano, a Companhia bateu o recorde brasileiro de profundidade de perfuração, em 12 de agosto, com um poço inclinado que chegou a 6.915 metros além do fundo do mar. O poço foi perfurado na Bacia de Santos, localizado a 200 km da costa sul da cidade do Rio de Janeiro. As reservas combinadas de petróleo e gás que eram de 8,5

bilhões de barris em 1997 aumentaram 76,4%, chegando a 15 bilhões de barris de óleo equivalente em 2005, registrando um desempenho superior à média mundial (PETROBRAS, 2007).

No dia 21 de abril de 2006, o Presidente Luiz Inácio Lula da Silva deu início à produção da plataforma P-50, no Campo de Albacora Leste, na Bacia de Campos, que permitiu ao Brasil atingir a auto-suficiência em petróleo. A P-50 é um FPSO, sigla de Floating Production Storage Offloading, unidade que possui a característica de produzir, processar, armazenar e escoar óleo e gás. É a unidade flutuante de maior capacidade do Brasil, podendo produzir até 180 mil barris de petróleo por dia - bpd (PETROBRAS, 2007).

2.1.1 História da TRANSPETRO

A PETROBRAS TRANSPORTE S. A. – TRANSPETRO, atende às atividades de transporte e armazenagem de petróleo e derivados, álcool e gás natural, operando uma frota de 51 navios, 10 mil quilômetros de malha dutoviária e 44 terminais terrestres, Figuras 2.1 e 2.2 e aquaviários, Figura 2.3 (TRANSPETRO, 2007).



FIGURA 2.1 – Terminal Terrestre de São Caetano do Sul.

FONTE – TRANSPETRO TERMINAIS, 2007



FIGURA 2.2 – Terminal Terrestre de Campos Elíseos.

FONTE – TRANSPETRO TERMINAIS, 2007



FIGURA 2.3 – Terminal Terrestre de São Sebastião.

FONTE – TRANSPETRO TERMINAIS, 2007

A empresa, subsidiária integral da PETROBRAS, foi criada em 12 de junho de 1998, de acordo com a legislação que reestruturou o setor petróleo no Brasil. O principal objetivo da TRANSPETRO é crescer e ajudar a impulsionar o desenvolvimento do país, em sintonia com a estratégia de negócios do Sistema PETROBRAS (TRANSPETRO, 2007).

A TRANSPETRO é responsável por uma rede de estradas invisíveis formada por mais de dez mil quilômetros de dutos que interligam todas as regiões do Brasil. Por esses

dutos trafegam produtos, como petróleo e derivados, álcool e gás natural, que abastecem os mais remotos pontos do país (TRANSPETRO, 2007).

À malha de dutos se aliam terminais, bases de armazenamento e uma frota de navios-petroleiros, unindo as áreas de produção, refino e distribuição da PETROBRAS e atuando na importação e exportação de petróleo e derivados e de gás natural. Além da PETROBRAS, seu principal cliente, a TRANSPETRO presta serviços a diversas distribuidoras e à indústria petroquímica. Coerente com a sua estratégia de crescimento, a empresa vem priorizando os investimentos em projetos de expansão e modernização da sua frota marítima e das instalações de dutos e terminais (TRANSPETRO, 2007).

A TRANSPETRO opera por meio das unidades de Dutos e Terminais e de Transporte Marítimo com a missão de atuar de forma segura e rentável, com responsabilidade social e ambiental, no transporte e armazenamento de petróleo, derivados e gás natural.

2.1.1.1 Terminais e Oleodutos

Dos 10 mil quilômetros de dutos operados pela TRANSPETRO, 7 mil são utilizados para o transporte de petróleo, derivados, biocombustível, GLP (gás liquefeito de petróleo), petroquímicos e outros renováveis líquidos. Em 2005, seus oleodutos transportaram 640 milhões m³/ano de petróleo, derivados e etanol, o que representou um crescimento de 1,5% em relação ao ano anterior (TRANSPETRO OLEODUTOS, 2007).

Os 44 terminais – 20 terrestres e 24 marítimos – distribuídos pelo Brasil possuem uma capacidade de armazenamento de 62 milhões de barris de petróleo e 10 milhões m³ de óleo leve e pesado em seus 500 tanques. Dessa forma, a TRANSPETRO ajuda o Sistema PETROBRAS a garantir os combustíveis necessários para abastecer veículos, fábricas, usinas, residências e pontos comerciais. Em média, 382 navios são operados por mês nos nossos terminais aquaviários (TRANSPETRO TERMINAIS, 2007).

Dos campos de produção, o petróleo é transportado, por oleodutos e/ou navios, para os terminais da TRANSPETRO. De lá, seguem por oleodutos até as refinarias. Após o refino, uma parcela dos derivados é novamente transportada pelos dutos até os terminais, para, em seguida, serem entregues às companhias distribuidoras que vão abastecer o mercado.

2.1.1.2 Oleodutos

O segmento de negócio Oleodutos presta serviços de transporte dutoviário, armazenamento, recebimento, entrega de petróleo e seus derivados, produtos petroquímicos e renováveis, por meio de ampla rede de dutos e terminais terrestres.

Essa rede de dutos interliga as diversas regiões produtoras de petróleo, refinarias, terminais e bases de distribuição sendo supervisionada e controlada pelo Centro Nacional de Controle localizado no centro do Rio de Janeiro, responsável pela operação de 7.000 km de oleodutos, nove estações de bombeio e 20 terminais terrestres no território nacional (TRANSPETRO OLEODUTOS, 2007).

2.1.1.3 Gasodutos

A TRANSPETRO é líder no Brasil no transporte de gás natural, combustível que, por suas vantagens técnicas, comerciais e ambientais, vem apresentando demanda crescente para diversos mercados, como indústrias, comércio, veículos, residências, cogeração e geração termoelétrica. Atualmente, mais de 75% de todo o gás natural distribuído diariamente de Norte a Sul do País passa pela malha de gasodutos operada pela TRANSPETRO. São mais de 35 milhões de m³ que chegam todos os dias às Companhias Distribuidoras de Gás dos estados e de lá para os consumidores finais. Cerca de 35% deste volume são processados no Terminal de Cabiúnas - o maior pólo de processamento de gás natural do país. Até 2011, o Planejamento Estratégico da PETROBRAS prevê um aumento de movimentação dos atuais 35 para cerca de 100 milhões de m³ diários, com investimentos

significativos na rede de gasodutos e na capacidade de processamento existente, resultando na ampliação significativa das atividades da TRANSPETRO na área de gás natural (TRANSPETRO GÁS NATURAL, 2007).

Atualmente, a TRANSPETRO opera uma rede de gasodutos com 3.000 km de extensão, distribuída pelas diversas regiões do país, de modo a prestar o serviço de transporte de gás natural desde as áreas de produção até os mais de 70 pontos de entrega, distribuídos estrategicamente ao longo dos dutos, onde se dá a transferência do combustível para as distribuidoras de cada estado (TRANSPETRO GÁS NATURAL, 2007).

A Estação de Processamento de Gás Natural da TRANSPETRO fica localizada no Terminal de Cabiúnas, no município de Macaé, Rio de Janeiro. Atualmente, face à sua configuração, o Terminal de Cabiúnas é considerado o maior pólo processador de gás natural do Brasil com capacidade de processamento de até 14.900.000 m³/dia.

A maior parte do gás natural recebido da Bacia de Campos é processada no Terminal de Cabiúnas, tendo como produtos: o gás natural especificado para uso, o gás liquefeito de petróleo (GLP) e o líquido de gás natural (LGN) (TRANSPETRO GÁS NATURAL, 2007).

O gás natural especificado é disponibilizado para a malha sudeste através de um gasoduto que liga o terminal à REDUC (Refinaria de Duque de Caxias), atendendo, em seu percurso, às termoelétricas situadas em Macaé e Duque de Caxias. Outro destino do gás especificado no terminal é a Cia CEG-RIO que o distribui para as regiões Norte Fluminense e dos Lagos (TRANSPETRO GÁS NATURAL, 2007).

O LGN, produzido no Terminal de Cabiúnas, é bombeado para a REDUC, onde é processado e serve como matéria-prima para atendimento do Pólo Gás-Químico do Rio de Janeiro, onde ocorre sua transformação em polietileno (TRANSPETRO GÁS NATURAL, 2007).

A perspectiva de crescimento das atividades da TRANSPETRO na área de gás natural está alinhada com as metas do Planejamento Estratégico da PETROBRAS, que prevê grandes investimentos para este segmento até 2011. Esses investimentos permitirão

que o País reduza a sua dependência externa em relação ao gás natural, aumentando a oferta proveniente da produção brasileira. Descobertas recentes nas Bacias de Santos, Campos e Espírito Santo, ampliarão em 24 milhões de m³ a produção de gás natural até 2008 (TRANSPETRO GÁS NATURAL, 2007).

Além disso, cerca de 20 milhões de m³ adicionais serão disponibilizados por meio da importação de GNL (gás natural liquefeito). Deverão ser instaladas unidades de armazenamento e regaseificação de GNL nos Terminais Aquaviários de Pecém, no Ceará, e da Ilha D'Água, no Rio de Janeiro. A TRANSPETRO será responsável pelas operações de desembarque, regaseificação e inserção do gás na rede existente.

Nos próximos quatro anos a rede de gasodutos deverá mais do que dobrar, passando dos atuais 3.000 km para 7.000 km (TRANSPETRO GÁS NATURAL, 2007).

2.1.1.4 Carga transportada e extensão dos dutos

- Carga Transportada em 2006 (TRANSPETRO NÚMEROS, 2007)

Transporte Marítimo - 60 milhões de toneladas;

Transporte por Oleodutos - 654 milhões m³;

Transporte por Gasodutos - 11 bilhões m³.

- Malha de Dutos e Terminais (TRANSPETRO NÚMEROS, 2007).

7.011 quilômetros de oleodutos;

2.952 quilômetros de gasodutos;

Total de dutos operados 9.963 km.

Última atualização: Julho de 2007

2.1.2 Preocupação com o Meio Ambiente e Segurança Operacional

2.1.2.1 Programa PEGASO

Em janeiro de 2000, a PETROBRAS, por determinação de sua Diretoria Executiva, constituiu um grupo de trabalho composto de dez gerentes para conduzir uma ampla avaliação da gestão ambiental e de segurança operacional da Companhia.

O trabalho foi concluído em março de 2000 e determinou como primeira demanda, o levantamento de programas de Investimentos e de Gestão que, na visão de cada órgão, precisavam ser implantados para que, até dezembro de 2003, a PETROBRAS alcançasse o nível de excelência na gestão ambiental e de segurança operacional.

O Programa de Excelência em Gestão Ambiental e Segurança Operacional (PEGASO) foi aprovado pela Diretoria Executiva em abril de 2000.

Devido à ocorrência de acidentes em dutos nos meses de maio e junho de 2001, foi criado um grupo específico, por solicitação do presidente, para atuar na recuperação e garantia da integridade dos dutos da Companhia. Com a denominação “Programa Emergencial de Integridade dos Dutos”, ele abrange as etapas de inspeção e recuperação de 80 dutos na TRANSPETRO classificados como prioritários, seguindo critérios estabelecidos por este grupo de trabalho. Estes serviços de recuperação estão sendo concluídos. O passo seguinte é consolidar e perenizar o status atingido e preservar a integridade dos dutos, contribuindo desta forma para o êxito nas seguintes metas:

- Reduzir os riscos de acidentes ambientais.
- Evitar danos ambientais causados por resíduos e por possíveis acidentes.
- Tornar a PETROBRAS reconhecida como empresa de excelência na gestão ambiental e segurança operacional.

Para atingir estas metas, foi fundamental a implantação de um padrão para gerenciamento da integridade estrutural dos dutos da PETROBRAS.

2.1.2.2 Padrão de Integridade Estrutural de Dutos – PID

Desenvolvido por um grupo de mais de 80 especialistas o Padrão de Integridade de Dutos, tem como objetivo condensar em um único documento, a experiência da Companhia em todos os aspectos relevantes para a gestão da integridade estrutural de seus dutos de transporte e de transferência.

O Padrão contempla:

- **Análise de risco:** estabelece procedimento para classificação dos dutos/trechos de dutos quanto a sua importância, tomando por base o potencial de consequência de sua falha.
- **Corrosão interna:** define diretrizes para gerenciamento da corrosão interna de forma a permitir a avaliação, monitoração e controle da corrosão interna de dutos de transporte e transferência pelas Unidades de Negócios.
- **Corrosão externa:** estabelece a avaliação e controle da corrosão externa dos dutos terrestres e marítimos de forma emergencial e de forma sistemática. Para classificação do potencial de ocorrência de corrosão externa são estabelecidos critérios, assim como diretrizes para a elaboração de um Plano de Inspeção e um Plano de Recuperação do sistema de proteção anticorrosiva, ou seja, sistema de proteção catódica (SPC) e revestimento. Este padrão visa à adoção de medidas para preservar a integridade estrutural do duto, a segurança operacional e o meio ambiente.
- **Análise geológica-geotécnica:** estabelece critérios e rotinas para o mapeamento, classificação, inspeção, monitoramento, intervenção, manutenção e gerenciamento geológico-geotécnico ao longo das faixas de dutos terrestres e marítimos da

PETROBRAS. A principal preocupação está relacionada à identificação e classificação das ocorrências geológico-geotécnicas que possam ameaçar a integridade dos dutos ou levar à interrupção do seu funcionamento, trazendo prejuízos sociais, ambientais e econômicos.

- **Ação de terceiros:** emite recomendações e estabelece critérios para orientar as providências a serem adotadas quanto às ações de terceiros que interfiram com as instalações e dutos da PETROBRAS.
- **PIG (Pipeline Inspection Gadget):** estabelece as características básicas e diretrizes para seleção e uso de pigs instrumentados na inspeção de dutos.
- **Análise de descontinuidade e danos:** define procedimentos de avaliação e critérios de aceitação de descontinuidades e danos encontrados em dutos da PETROBRAS.
- **Reparo de contingência:** define técnicas de reparo dominadas pela PETROBRAS, suas aplicações e limitações, assim como a logística requerida para realizar reparos de contingência para o restabelecimento das condições operacionais de dutos comprometidos, em caráter definitivo ou provisório, visando, sempre que possível, o atendimento aos requisitos da norma de construção dutos.
- **Teste hidrostático:** fixa as condições mínimas exigíveis para o planejamento e preparação visando à execução de teste hidrostático de dutos ou trechos de dutos terrestres ou submarinos, novos ou existentes.

Aplica-se a: teste de dutos novos, requalificação de dutos existentes para diferentes condições operacionais, averiguação de resistência mecânica e estanqueidade após a execução dos reparos.

2.1.2.3 Acidentes em Oleodutos

O transporte de petróleo e seus derivados, através de dutos deve receber uma atenção especial, uma vez que atravessam mares, mangues reservas ecológicas, regiões habitadas e qualquer acidente durante o transporte poderia ocasionar danos ao meio ambiente e à sociedade. A Tabela 2.1 mostra os principais acidentes em dutos de petróleo e derivados ocorridos no Brasil.

TABELA 2.1
Principais acidentes em dutos de petróleo e derivados no Brasil

Data	Local	Volume (m³)	Produto Derramado
Outubro/83	São Sebastião - Cubatão – SP	2.500	Petróleo
Fevereiro/84	Vila Socó, Cubatão – SP	700	Gasolina
Junho/92	Rio Cubatão, Cubatão – SP	10	Petróleo
Maio/94	São Sebastião - Cubatão – SP	2.700	Petróleo
Fevereiro/97	Baía de Guanabara – RJ	900 ~ 3.000	Óleo Combustível
Outubro/98	São José dos Campos – SP	1.000	Petróleo
Janeiro/00	Baía de Guanabara – RJ	1300	Óleo Combustível
Julho/00	Rio Barigui e Iguaçu – PR	4.000	Petróleo
Fevereiro/04	São Sebastião - Cubatão – SP	260	Petróleo

FONTES – O Estado de São Paulo, 2001 – apud NAGAYASSU, 2006; Vale Paraibano, 2004.

2.2 Cruzamentos entre Linhas de Transmissão de Energia Elétrica e Dutos Metálicos

O grande incremento verificado recentemente no Brasil na construção de oleodutos, adutoras e, principalmente, gasodutos para fornecimento de gás natural às indústrias, bem como a crescente expansão de linhas de transmissão de energia elétrica em alta tensão, fizeram com que fosse levantado o problema da interferência de tais redes elétricas nas tubulações próximas, em regiões de caminhamentos paralelos ou cruzamentos. Suspeitas do efeito de correntes alternadas induzidas no processo de corrosão em dutos tem levado

pesquisadores a estudar estes efeitos. Esta indução ocorre em casos de falha na rede elétrica e através de campos elétricos e eletromagnéticos gerados por estas redes (CASTINHEIRAS e NIELSEN, 1987).

Os dutos instalados em corredores compartilhados com linhas de transmissão (LT) em corrente alternada (CA) de alta tensão (69 kV, 138 kV, 230 kV, 500 kV etc.) e média tensão (tipicamente 13 kV) estão sujeitos às interferências desses sistemas elétricos que podem causar riscos à segurança pessoal no caso de choques elétricos, a operação ocasionando paradas operacionais e ao meio-ambiente no caso de vazamentos causados por furos devido à corrosão (HIPÓLITO, 2003).

Cruzamentos e paralelismos entre os dutos enterrados da PETROBRAS com as linhas de transmissão das Concessionárias de energia elétrica são encontrados por todo o território Nacional.

Alguns exemplos de compartilhamento nas faixas de utilização das Empresas resultando em cruzamentos e paralelismos entre dutos e linhas de transmissão de alta tensão, são mostrados nas Figuras 2.4, 2.5 e 2.6.



FIGURA 2.4 – Cruzamento de Linha de Transmissão com oleoduto.
FONTE – Levantamento próprio.

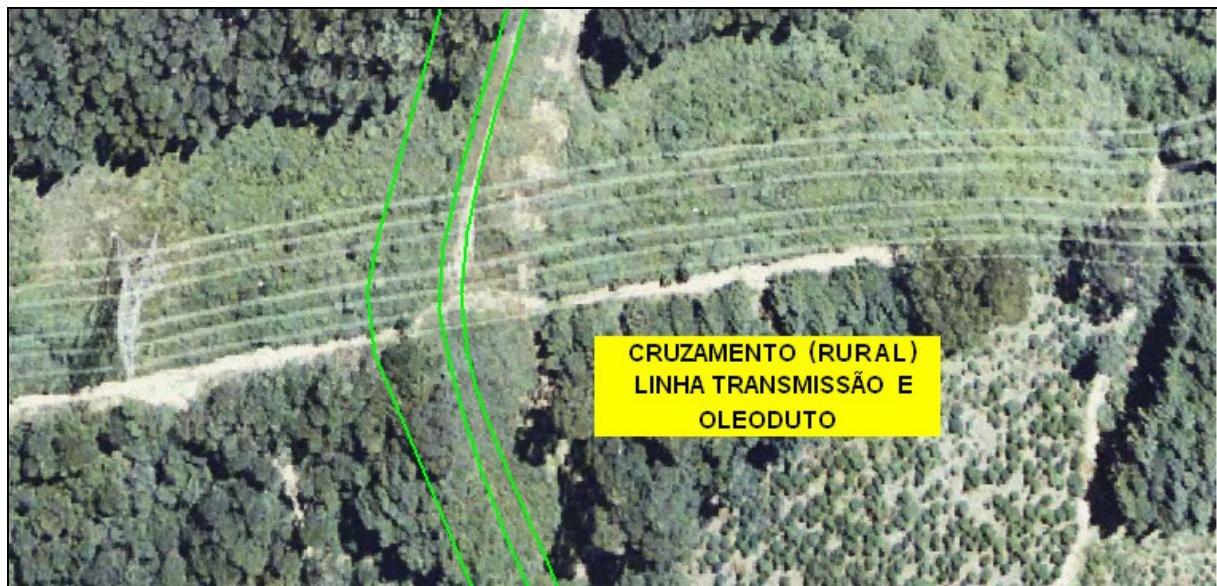


FIGURA 2.5 – Cruzamento de Linha de Transmissão com oleoduto em área rural.
FONTE – Levantamento próprio.



FIGURA 2.6 – Cruzamento de Linha de Transmissão com oleoduto em área urbana.
FONTE – Levantamento próprio.

2.3 Corrosão

2.3.1 Conceitos

O termo corrosão é usado para descrever a deterioração de um material, geralmente metálico, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente associada ou não a uma ação física. Em geral é um processo espontâneo e, não fosse o emprego de mecanismos protetores, ter-se-ia a destruição completa dos materiais metálicos. Todos os metais estão sujeitos ao ataque corrosivo, se o meio for suficientemente agressivo. A importância dos problemas de corrosão é encarada segundo dois aspectos principais. O primeiro deles é o econômico, causando prejuízos para diversas empresas e o segundo relaciona-se com a conservação das reservas de minérios. Tendo em vista a permanente destruição dos materiais pela corrosão, há necessidade de uma reposição do que foi deteriorado (DUTRA e NUNES, 1999; PEABODY, 2001; GENTIL, 2007).

2.3.2 Tipos de corrosão

Os fenômenos de corrosão de metais envolvem uma variedade de mecanismos que, no entanto, podem ser resumidos em quatro grupos, a saber, (WOLYNEC, 2003):

- Corrosão em meios aquosos (90%);
- Oxidação e corrosão quente (8%);
- Corrosão em meios orgânicos (1,8%);
- Corrosão por metais líquidos (0,2%).

A incidência estimada de cada tipo de corrosão, indicada entre parênteses, mostra que a corrosão em meios aquosos é a mais comum. A natureza dos processos que ocorrem nos dois últimos grupos não pode ser precisada, uma vez que seus mecanismos ainda não foram devidamente estabelecidos (WOLYNEC, 2003).

A corrosão de um metal é consequência de uma reação de oxidação, visto que o átomo metálico perde elétrons, transformando-se, consequentemente, em íon positivo. Para que isto ocorra é necessário que no meio exista uma espécie ou espécies receptoras de elétrons. Portanto, a corrosão metálica ocorre via reações de oxi-redução (PANOSSIAN, 1993; GUTEMBERG e MAGALHÃES, 2003).

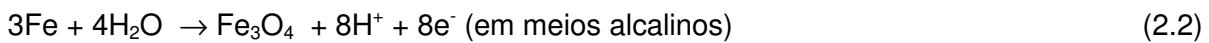
Uma reação de oxi-redução pode ser de natureza química ou eletroquímica. Será química se o doador de elétrons (no caso, o átomo metálico) e o receptor de elétrons (no caso, a espécie presente no meio) estiverem no mesmo local, ou seja, num mesmo ponto da superfície do metal, de modo que a transferência de elétrons aconteça diretamente do doador ao receptor, neste caso, não há condução elétrica. Na eletroquímica, a reação de perda de elétrons do átomo metálico ocorre em local diferente daquele em que a espécie do meio recebe elétrons, não importando a distância entre estes locais, podendo ser muito próxima (angstroms) ou muito afastada (metros). Neste caso, o local da superfície metálica onde se dá a oxidação do átomo metálico recebe o nome de anodo e onde ocorre a redução de uma espécie presente no meio recebe o nome de catodo. Há, portanto, condução elétrica (eletrônica no metal e iônica no meio) (PANOSSIAN, 1993).

A grande maioria dos casos de corrosão ocorre via reação de oxi-redução do tipo eletroquímico, por exemplo: a corrosão dos metais em solução aquosa. Os estudos de corrosão abordados no presente trabalho podem ser classificados como de natureza eletroquímica, razão pela qual somente esta será considerada.

2.3.3 Principais reações envolvidas na corrosão do ferro

As principais reações envolvidas no processo de corrosão do ferro são classificadas como reações anódicas ou de oxidação (Equações 2.1 e 2.2) e reações catódicas, ou de redução (Equações 2.3, 2.4 e 2.5) (PANOSSIAN, 1993; WOLYNEC, 2003; GENTIL, 2007).

Principais reações anódicas do processo de corrosão do ferro:



Principais reações catódicas do processo de corrosão do ferro:



Nos meios alcalinos, a continuidade do processo de corrosão dependerá das características da camada de óxidos. Se esta for uniforme e compacta, as taxas de corrosão poderão atingir valores desprezíveis. Porém, se esta camada for porosa ou não-adherente, a corrosão poderá estabelecer-se com taxas significativas (PANOSSIAN, 1993; GUTEMBERG e MAGALHÃES, 2003).

2.3.4 Diagramas de Pourbaix

Pourbaix desenvolveu um método gráfico, relacionando potencial e pH, que apresenta uma possibilidade para se prever as condições sob as quais podem-se ter corrosão, imunidade ou possibilidade de passivação.

As representações gráficas das reações possíveis, a 25°C e sob pressão de 1 atm entre os metais e a água, para valores usuais de pH e diferentes valores do potencial de eletrodo, são conhecidas como Diagramas de Pourbaix, nos quais os parâmetros de potencial, em relação ao potencial de eletrodo padrão de hidrogênio (E_H) e pH são representados para os vários equilíbrios (GENTIL, 2007).

As reações que dependem do pH e do potencial são representadas por um conjunto de retas inclinadas. As equações dessas retas decorrem da aplicação da equação de Nernst às reações em questão.

O diagrama representado na Figura 2.7, define regiões onde o ferro está dissolvido principalmente sob a forma de íons Fe^{2+} , Fe^{3+} e $HFeO_2^-$ e regiões onde o metal é 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 indicada pelo diagrama. Tal dissolução nada mais é do que a corrosão do metal. Se as condições correspondem a uma região onde o metal é estável (dentro da região inferior do diagrama), o metal não corroerá e será imune contra a corrosão. Finalmente, se as condições de interface correspondem a uma região de estabilidade de um óxido, por exemplo, Fe_2O_3 , 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, 2007).

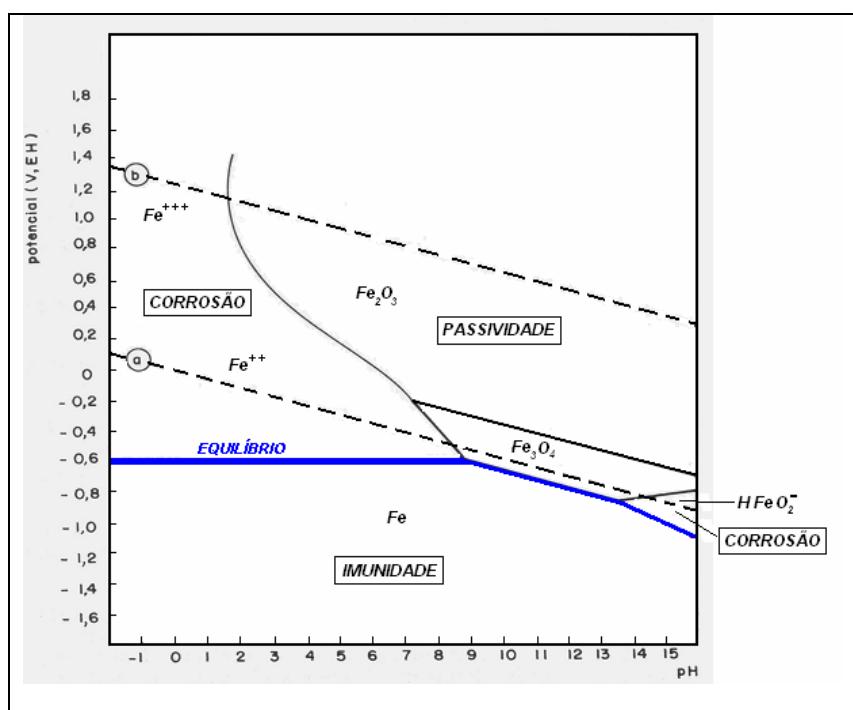


FIGURA 2.7 – Diagrama de Pourbaix - Sistema Fe - H_2O a 25°C.
FONTE – GENTIL, 2007.

2.3.5 Potencial de equilíbrio

A previsão termodinâmica da ocorrência ou não de corrosão de um sistema metal/meio é feita comparando-se o potencial de eletrodo deste sistema com o potencial de equilíbrio da reação $\text{Me}^{2+} + 2\text{e}^- \leftrightarrow \text{Me}$ no referido sistema. Se o potencial de eletrodo for maior do que o referido potencial de equilíbrio, o metal estará sujeito à corrosão, caso contrário, o metal estará imune à corrosão (PANOSSIAN, 1993; DUTRA e NUNES, 1999; PEABODY, 2001).

O cálculo do potencial de equilíbrio nas condições reais do sistema metal/meio é feito por meio da Equação de Nernst, que na temperatura ambiente é dado pela equação 2.6:

$$E_{\text{Me}^{n+}/\text{Me}} = E^{\circ}_{\text{Me}^{n+}/\text{Me}} + \frac{0,059}{n} \log a_{\text{Me}^{n+}} \quad (2.6)$$

Onde:

$E_{\text{Me}^{n+}/\text{Me}}$ → potencial de equilíbrio que deseja calcular

$E^{\circ}_{\text{Me}^{n+}/\text{Me}}$ → potencial de equilíbrio padrão (-0,44 V, E_H)

No caso do sistema do presente trabalho, aço-carbono em contato com solução que simula a fase aquosa de um solo, a concentração de íons de Fe^{2+} no início do ensaio é praticamente nula. Nestas condições, por convenção, assume-se o teor de Fe^{2+} como sendo 10^{-6} mol/L. Assim, pode-se obter o potencial de equilíbrio do ferro medido contra o eletrodo de referência de hidrogênio, conforme mostrado na equação 2.7 (PANOSSIAN, 1993).

$$E_{Fe^{2+}/Fe} = -0,44 + \frac{0,059}{2} \log 10^{-6} \quad (2.7)$$

$$E_{Fe^{2+}/Fe} = -0,44 - 0,177$$

$$E_{Fe^{2+}/Fe} = -0,617 \text{ V}_{EH}$$

Pode-se verificar então que, o potencial de equilíbrio da reação $Fe^{2+} + 2e^- \leftrightarrow Fe$ em relação ao eletrodo de hidrogênio é $-0,617 \text{ V}_{EH}$. A partir deste valor, pode-se calcular o potencial de equilíbrio em relação aos eletrodos de referência de calomelano saturado (ECS) ou de cobre/sulfato de cobre (ECSC), de acordo com as seguintes equações 2.8 e 2.9:

$$E_{Fe^{2+}/Fe} = -0,617 - 0,241 = -0,858 \text{ V}_{ECS} \quad (2.8)$$

$$E_{Fe^{2+}/Fe} = -0,617 - 0,300 = -0,917 \text{ V}_{ECSC} \quad (2.9)$$

2.4 Proteção Catódica

A história da proteção catódica data dos primórdios do século XIX, quando a eletroquímica também dava seus primeiros passos. Com o desenvolvimento da indústria do petróleo na década de 20, surgem os longos oleodutos e gasodutos de aço utilizados para o transporte desses produtos. No final daquela década, os problemas de corrosão externa já eram grandes e o número de furos nesses dutos aumentava. O problema foi minimizado com a aplicação de revestimentos e logo em seguida com a proteção catódica, inicialmente

com anodos galvânicos e depois desenvolvendo os sistemas de corrente impressa (DUTRA e NUNES, 1999).

No Brasil, o emprego da proteção catódica em escala industrial data da década de 60, quando a PETROBRAS, para proteger seus dutos submarinos e suas instalações portuárias e terrestres, investiu no desenvolvimento desta técnica de proteção (DUTRA e NUNES, 1999).

O campo de aplicação de proteção catódica é vasto, porém, possui uma característica fundamental: a estrutura deve encontrar-se em contato com um eletrólito, no qual se instala o anodo ou um conjunto de anodos, por meio dos quais é provida a corrente necessária à proteção. Desse modo, dentre as instalações mais comuns em que se aplica a proteção catódica, destacam-se as tubulações enterradas e as submersas, tais como oleodutos, gasodutos e adutoras (DUTRA e NUNES, 1999; PEABODY, 2001; GENTIL, 2007).

2.4.1 Tipos de Proteção Catódica

Existem dois processos pelos quais se pode aplicar a proteção catódica, galvânica e por corrente impressa, ambos fundamentados no princípio de imposição de corrente elétrica na estrutura.

Proteção Catódica Galvânica

Nesse tipo de proteção, a corrente elétrica é provida pela força eletromotriz existente entre o metal a proteger e outro metal escolhido para anodo, como resultado de seus diferentes potenciais eletroquímicos. Na prática, os materiais metálicos utilizados como anodos são ligas de Zinco (Zn), Magnésio (Mg) e de Alumínio (Al) por estarem entre os que apresentam maior diferença de potencial em relação aos materiais metálicos mais comumente usados nas estruturas a serem protegidas, principalmente o aço. Como a

diferença de potencial neste sistema depende do par metálico adotado e em geral não ultrapassam 1,2 V, é recomendado que seja aplicado em meios com resistividade elétrica máxima de 6000 $\Omega \cdot \text{cm}$. O emprego da proteção galvânica é amplamente utilizado nas instalações marítimas, onde a baixa resistividade da água do mar possibilita uma baixa resistência no circuito de proteção catódica, permitindo uma injeção de corrente de maior intensidade no sistema (DUTRA e NUNES, 1999; PEABODY, 2001; GENTIL, 2007).

Um esquema de circulação de corrente (sentido convencional da corrente elétrica) entre um duto metálico enterrado e um leito de anodos de Zinco, é mostrado na Figura 2.8. Exemplos de anodos são mostrados nas Figuras 2.9 e 2.10.

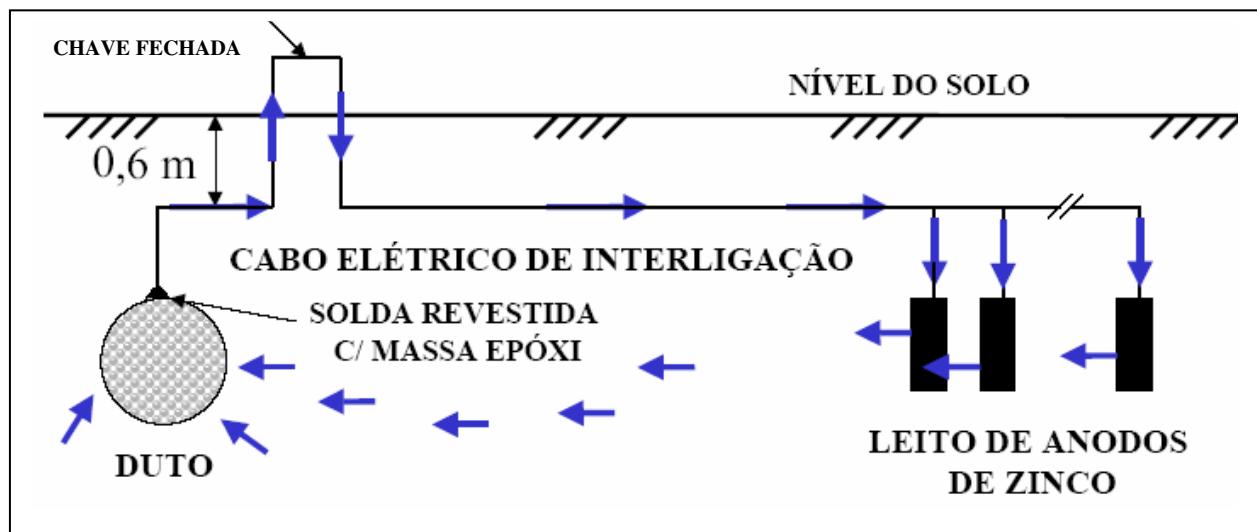


FIGURA 2.8 – Sistema de Proteção Catódica por Corrente Galvânica.
FONTE - DUTRA e NUNES, 1999



FIGURA 2.9 – Anodo instalado em fundo de tanque.
FONTE – IBP, 2005



FIGURA 2.10 – Exemplo de anodos.
FONTE – IBP, 2005

Proteção Catódica por Corrente Impressa

Nesse sistema, a corrente elétrica é provida por uma força eletromotriz (f.e.m.) de uma fonte geradora de corrente contínua, por exemplo: retificador, bateria ou gerador, utilizando um conjunto dispersor de corrente no eletrólito, constituído de anodos inertes, chamado leito de anodos (DUTRA e NUNES, 1999; PEABODY, 2001; GENTIL, 2007).

Um esquema de proteção catódica por corrente impressa, utilizado para proteger um duto metálico enterrado, pode ser observado na Figura 2.11 (sentido convencional da corrente elétrica). As Figuras 2.12 e 2.13 apresentam exemplos de retificadores utilizados para este tipo de proteção. Uma das maiores vantagens do sistema está no fato de que a fonte geradora poderá ter a potência que se deseja, bem como a f.e.m. necessária, ou seja, a corrente injetada pode ser controlada (DUTRA e NUNES, 1999; PETROBRAS N-2801). Os terminais de ajuste de potência do transformador podem ser notados na Figura 2.13.

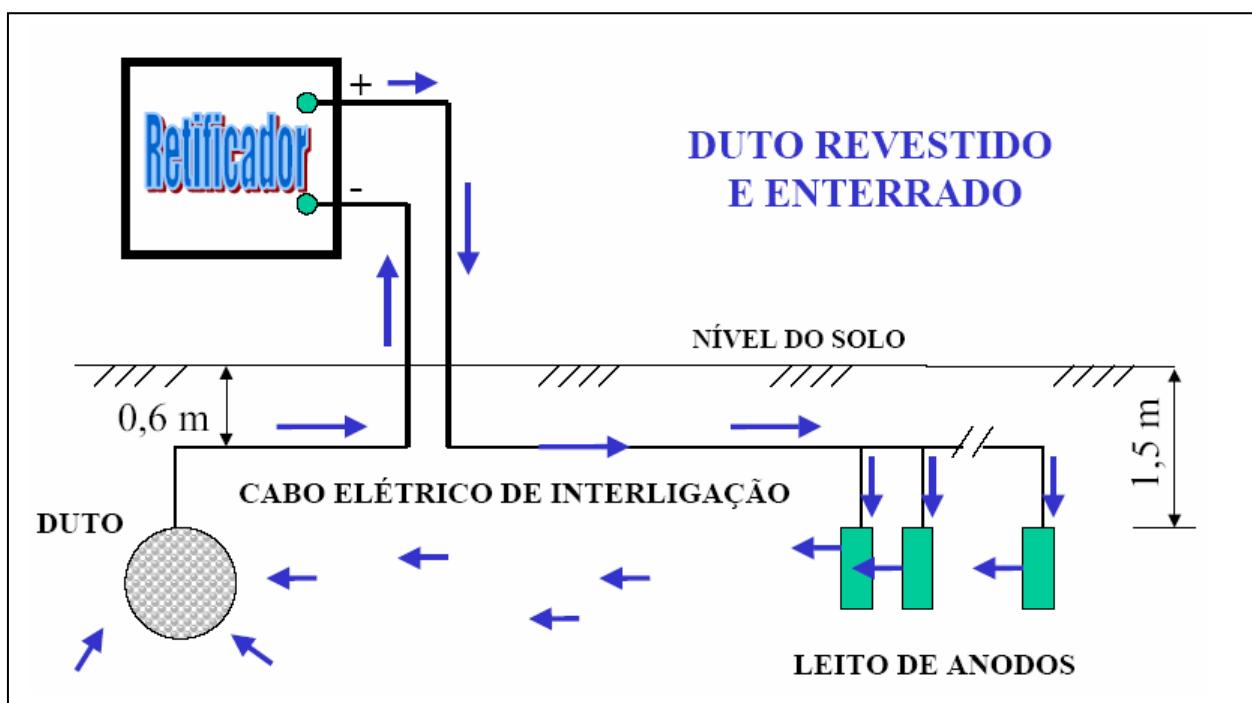


FIGURA 2.11 - Sistema de Proteção Catódica por Corrente Impressa.
FONTE – IBP, 2005

A proteção catódica por corrente impressa se aplica a estruturas situadas em eletrólitos de baixa, média, alta e altíssima resistividade. É mais indicada para estruturas de médio e grande porte, por ser um sistema mais compacto e mais econômico, quando é necessário injetar altas correntes de proteção (DUTRA e NUNES, 1999).

Inspeções e manutenções periódicas são necessárias nos retificadores, enquanto as demais partes são projetadas para um período longo de duração. Estes sistemas são apropriados para estruturas sujeitas a correntes de interferência e permitem, através dos retificadores, ampla regulagem.

Pela própria natureza do equipamento elétrico, são mais sujeitos a interrupções no funcionamento (DUTRA e NUNES, 1999).



FIGURA 2.12 - Retificador para corrente impressa.
FONTE – IBP, 2005



FIGURA 2.13 - Retificador com ajuste de potência.
FONTE – IBP, 2005

O leito de anodos para a dispersão da corrente no eletrólito constitui-se, de modo geral, de anodos inertes enterrados no solo (DUTRA e NUNES, 1999). Uma instalação típica de leito de anodos é mostrada na Figura 2.14.

Os retificadores geralmente são alimentados em corrente alternada que depois de retificada, é usada no sistema. Outras fontes de energia podem ser utilizadas, como geradores térmicos, sistema de energia solar (Figura 2.15), baterias convencionais e sistemas eólicos (PEABODY, 2001).



FIGURA 2.14 - Instalação típica de um leito de anodos.
FONTE – IBP, 2005



FIGURA 2.15 -Retificador usando energia solar.
FONTE – IBP, 2005

2.4.2 Critério de proteção

Quando se aplica proteção catódica a uma estrutura, é importante verificar se ela está realmente protegida contra a corrosão. Vários critérios são adotados, conforme citações de diversos autores que serão mostradas ao longo deste trabalho. No entanto, o critério mais utilizado é o que avalia o potencial negativo mínimo entre a estrutura e o eletrólito, medido com eletrodo de referência. No caso específico de tubulações de aço enterradas no solo o potencial negativo mínimo de proteção é de -0,85 V, em relação ao eletrodo de cobre-sulfato de cobre (DUTRA e NUNES, 1999; PEABODY, 2001; GENTIL, 2007; PETROBRAS N-2801, 2008). A Figura 2.16 mostra um eletrodo de cobre-sulfato utilizado para tal medição e a Figura 2.17, a corrente de proteção catódica atingindo a estrutura metálica através das falhas no revestimento (PEABODY, 2001).



FIGURA 2.16 - Eletrodo de referência Cu-CuSO₄.
FONTE – IBP, 2005

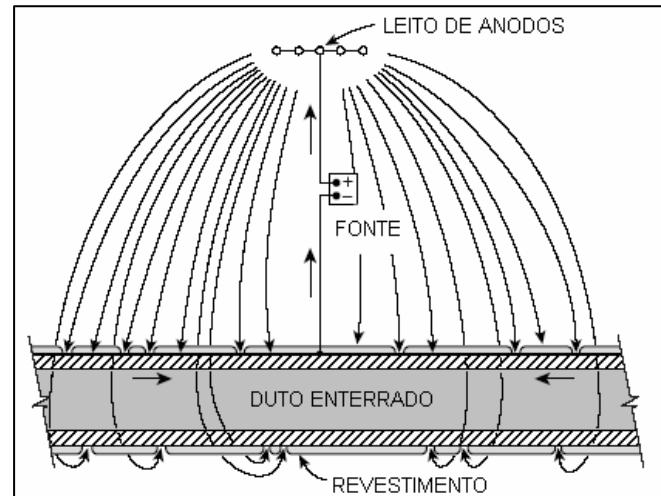


FIGURA 2.17 - Corrente de proteção nas falhas do revestimento.
FONTE - PEABODY, 2001

A medição do potencial de proteção entre o duto e o solo é realizada com um voltímetro e um eletrodo de cobre-sulfato. A medição é realizada em pontos de testes instalados ao longo do duto, como mostra a Figura 2.18.

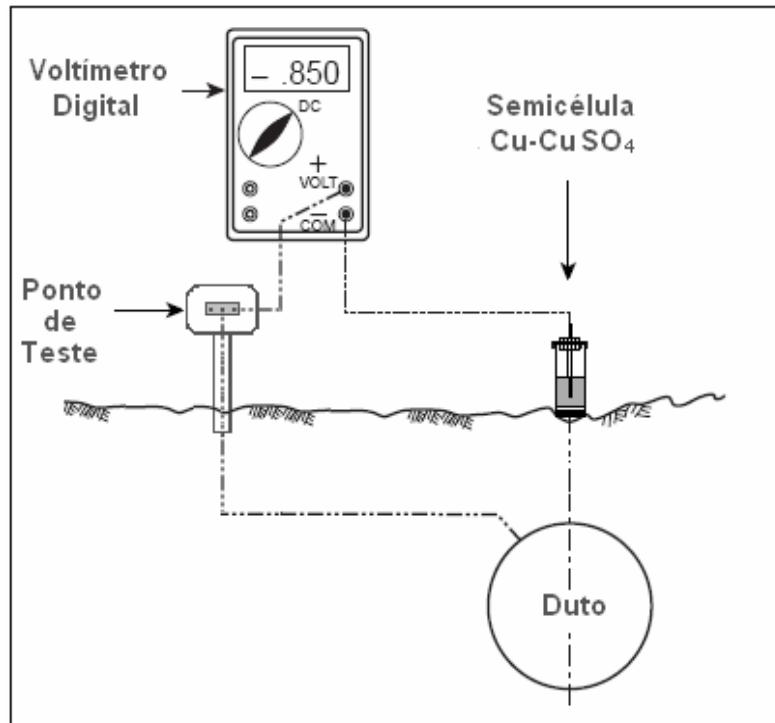


FIGURA 2.18 – Medição de potencial tubo/solo
FONTE – PEABODY, 2001

2.5 Corrosão por Corrente Alternada

A corrosão por corrente alternada (AC) vem sendo estudada por vários autores desde antes de 1900 e os seus mecanismos ainda não são completamente entendidos, principalmente nos casos de dutos enterrados, com proteção catódica.

Em 1891, MENGARINI (apud GUMMOW et al, 1998) apresentou as seguintes conclusões, em relação à corrosão por corrente alternada: é menor do que a corrosão causada por uma corrente contínua (DC) equivalente (cerca de 1%); é proporcional à intensidade da corrente AC; existe uma corrente AC limiar, abaixo do qual não se verifica o seu efeito; a intensidade da corrosão diminui com o aumento da freqüência da corrente AC.

No início do século XX, já se afirmava que a corrosão por corrente alternada era devido à irreversibilidade da reação de corrosão do ferro (MAC COLLUM e AHLBORN, 1916 apud GUMMOW et al, 1998).

2.5.1 Corrosão AC na ausência de proteção catódica

Em 1955, a comissão AGA (*American Gas Association*) publicou um trabalho relatando a suspeita de ocorrência de corrosão por corrente alternada de 7 em 27 dutos enterrados sem proteção catódica;

Em 1958, (FUCHS et al apud GUMMOW et al, 1998) estudos foram realizados com densidades de corrente AC de 1, 10 e 100 A/m² e freqüências de 0,05 a 50 Hz em soluções aquosas de cloreto de sódio e sulfato de sódio. Para densidades de 100 A/m² foram verificadas taxas de corrosão da ordem de 0,25 mm/a, considerada alta para os padrões normais de 0,075 mm/a. Os autores deste estudo afirmaram que este nível de corrosão por corrente alternada poderia ocorrer na prática em dutos com as seguintes características: tensão AC de 10 V, resistividade do meio de 1000 Ω.cm e falha no revestimento de 25,4 mm de diâmetro;

Em 1964, um abrangente estudo realizado por BRUCKNER, patrocinado pela AGA (*American Gas Association*), investigou por 2,5 anos a taxa de corrosão, usando como meio solos naturais. Neste estudo, foi verificado que a velocidade de corrosão aumenta com a densidade de corrente alternada, sendo o máximo valor encontrado de 0,53 mm/a para densidades de 775 A/m² para um solo de pH 7. Os autores atribuíram parte da aceleração da corrosão ao aumento da temperatura causada pela passagem de altos valores de corrente alternada.

2.5.2 Corrosão AC na presença de proteção catódica

Nas décadas 60 e 70, estudos detalhados mostraram que a corrosão por corrente alternada é reduzida a níveis desprezíveis na presença de proteção catódica, sendo afirmado por BRUCKNER e colaboradores (1964) que a corrosão induzida por corrente alternada, sendo já uma fração da corrosão provocada pela corrente contínua, chega a níveis desprezíveis quando se adota práticas usuais de proteção catódica. Idéia esta que foi mantida por muitos autores como POOKOTE e CHIN (1978).

No entanto, um trabalho publicado por DÉVAY e colaboradores (1967), utilizando como meio solução aquosa de cloreto de potássio a 5% e corpos de prova de aço carbono de 1 cm² de área, afirma que, apesar de se verificar uma redução da corrosão por corrente AC com o aumento da densidade de corrente de proteção catódica, ainda se tem taxas de corrosão elevadas ($>0,28$ mm/a) com valores de densidades de corrente AC de 100 e 250 A/m² e freqüência de 50 Hz, mesmo com valores de densidade de corrente DC de 10 A/m². Apesar de ter sido constatado que mesmo na presença de proteção catódica ocorre corrosão por corrente AC, na prática não se a devida importância a este tipo de corrosão.

Na década de 80 este tipo de corrosão passou a ser considerada como um problema real, quando em 1986 na Alemanha, constatou-se a ocorrência em campo de duas falhas perfurantes em dutos protegidos com polietileno. Os dutos foram instalados em 1980 ao longo de uma linha de trem com corrente alternada de freqüência 50 Hz. Estes dutos estavam catodicamente protegidos com potencial de polarização de -1,0 V (PRINZ, 1992).

Em 1993, estudos conduzidos na França (RAGAULT, 1998) identificaram 31 casos de corrosão por corrente alternada em um gasoduto revestido de polietileno instalado em corredor de linha de transmissão de 400 kV (paralelismo de 3 km), com potenciais de proteção catódica menores que -2,0 V.

A partir da década de 90, iniciou-se uma preocupação mundial com a corrosão de dutos instalados ao longo de linhas de transmissão (LT), ou ao longo de ferrovias, mesmo submetidos à proteção catódica, pois o número de casos de corrosão por corrente alternada detectados aumentou devido aos seguintes fatores (SMART et al, 1999; TRENCH e WEESNER, 2006): aumento do número de corredores de linhas de transmissão de alta tensão, compartilhadas com dutos enterrados; aumento do número de ferrovias que usam corrente alternada como alimentação e a utilização de revestimentos mais eficazes em dutos enterrados proporcionando poucas falhas, expondo áreas metálicas de menor tamanho.

2.5.3 Intensidade da corrosão AC (taxa de corrosão)

Apesar do consenso na literatura sobre a baixa intensidade de corrosão causada por corrente alternada, há trabalhos nos quais se afirma que a intensidade da corrosão por corrente alternada atinge valores entre 6% a 14% do valor correspondente a corrosão ocasionada por uma corrente contínua de mesmo valor (RADEKA et al, apud NACE International, 2007).

Alguns autores (WILLIAMS, apud NACE International, 2007; PRINZ, 1992) afirmam que para um determinado valor de densidade de corrente alternada existe um período de incubação (30 a 120 dias), durante o qual este tipo de corrosão não se verifica e, ainda, que a taxa de corrosão tende a diminuir com o tempo de exposição.

Muitos autores (STALDER, 2001, SONG et al, 2002 e GUMMOW et al, 1998) afirmam que a resistência elétrica ao redor da falha (resistência de dispersão - R_s) aumenta com o tempo e isto pode causar a diminuição da intensidade da corrosão.

Porém há citações (NIELSEN e COHN, 2000) de casos onde foram verificados que os produtos nas vizinhanças da falha apresentavam resistividade menor que a do solo, o que determina o aumento da corrente que passa pela falha, portanto um aumento da taxa de corrosão com o tempo.

A evolução da corrosão depende de muitos fatores, citando-se: a natureza do meio; a passivação ou não do metal; a formação de produtos de corrosão não completamente protetores, pois não passivam, mas que causam uma diminuição das velocidades de corrosão; o transporte das espécies presentes no meio até a interface e da interface até o meio; as mudanças da composição do meio junto à interface, especialmente do pH, podendo tornar o meio mais ou menos agressivo (GENTIL, 2007).

2.5.4 Características Morfológicas da Corrosão AC

A literatura apresenta diferentes morfologias de corrosão por corrente AC, sendo elas:

- aglomerado de pites, pequenos ou grandes, distribuídos na região afetada, dando impressão de corrosão generalizada (GORAN, 2000; COLLET et al, 2001);
- pites largos e profundos circundados por região sem sinal de corrosão (WAKELIN, et al, 1998; GORAN, 2000);
- tubérculos constituídos de produtos duros principalmente carbonatos (NIELSEN e COHN, 2000; THOMPSON, 2004);
- produto da corrosão composto por magnetita (WILLIAMS, apud NACE International, 2007; RAGAULT, 1998).

2.5.5 Fatores que influenciam na corrosão AC

A corrosão por corrente alternada sofre influência de vários fatores. Nos itens seguintes estão resumidos os estudos encontrados na literatura existente.

Densidade de Corrente Alternada

Quanto maior a densidade de corrente alternada, maior é a probabilidade de corrosão por corrente AC (Padrão Europeu CEN/TS 15280, 2006; POOKOTE e CHIN, 1978; SONG, 2002; FUNK et al, 1992; HELM et al, 1993; GUMMOW et al, 1998);

Potencial de proteção catódica

Quanto maior a densidade de corrente de proteção catódica, menor é a probabilidade de corrosão por AC (FUNK et al, 1992; HELM et al, 1993; DÉVAY et al, 1967; GUMMOW et al, 1998; GREGOOR e POURBAIX, 2003);

Relação das densidades de correntes J_{AC} / J_{DC}

Quanto menor a razão das densidades de corrente J_{AC} / J_{DC} , menor a probabilidade de corrosão (RAGAULT et al, 1998; BUCHLER et al, 2004);

Potencial de corrente alternada

Quanto maior o potencial de corrente alternada, maior é a probabilidade de corrosão por corrente AC (GUMMOW et al, 1998).

Nível de freqüência

Quanto menor a freqüência, maior a corrosão por corrente alternada (GUMMOW et al, 1998; THOMSOM, 2004);

Resistividade do solo

Quanto maior a resistividade, menor a probabilidade de ocorrência de corrosão por corrente alternada (GUMMOW et al, 1998; PRINZ, 1992, HELM et al, 1993).

Temperatura

Há um aumento da temperatura do meio com o aumento da densidade de corrente alternada (BRUCKNER, 1964; POOKOTE e CHIN, 1978; DÉVAY et al, 1964) e com o aumento da resistividade da solução (DÉVAY et al, 1964).

Alguns pesquisadores acreditam que a aceleração ocorre pela ativação térmica, mas os estudos não foram conclusivos (POOKOTE e CHIN, 1978).

Falha do revestimento

A intensidade da corrosão depende do tamanho da falha do revestimento, quanto menor área da falha, maior a densidade de corrente circulando por ela, aumentando a corrosão por corrente alternada (GUMMOW et al, 1998; THOMPSON, 2004).

2.5.6 Probabilidade de corrosão AC

Em função da influência dos fatores descritos anteriormente existem citações sobre a probabilidade da ocorrência de corrosão por corrente alternada e os critérios adotados para evitá-la.

Probabilidade de corrosão AC em função da densidade de corrente AC (J_{AC})

Na literatura consultada, é citado que a probabilidade de ocorrência de corrosão por corrente AC aumenta com o aumento de J_{AC} conforme dois critérios:

- **Critério 1** (DIN 50925, 1992; CEN/TS 15280, 2006)

J_{AC} (A/m²) < 30 → probabilidade baixa de corrosão

30 < J_{AC} (A/m²) < 100 → média probabilidade

J_{AC} (A/m²) > 100 → probabilidade muito alta de corrosão

- **Critério 2**

(HELM et al, 1993; NACE STANDART RP0177, 1995; FLOYD, 2004)

J_{AC} (A/m²) < 20 → Corrosão por AC não ocorre

20 < J_{AC} (A/m²) < 100 → Corrosão AC não pode ser prevista

J_{AC} (A/m²) > 100 → Corrosão AC ocorre

Os critérios mostrados acima fornecem uma ferramenta de prevenção ao operador do duto, uma estimativa da probabilidade de ocorrência de corrosão por corrente AC e não um critério infalível (GUMMOW et al, 1998).

Conforme os critérios citados, não há consenso a respeito do limiar para a ocorrência ou não de corrosão por corrente AC. Há autores ainda que já constataram aceleração da corrosão com valores de 10 A/m² de corrente AC (KASAHARA et al, 1979).

Probabilidade de corrosão AC em função da Proteção Catódica

Nas práticas tradicionais de proteção catódica, postula-se que se deve evitar a aplicação de níveis de proteção catódica excessivos em estruturas de aço revestidas e aços de alta resistência, isto é, evitar altos valores de densidades de corrente J_{DC} (BS EN 12954, 2001; DUTRA e NUNES, 1999; PETROBRAS N-2801, 2008).

Esta diretriz é adotada devido aos seguintes fatores:

- valores muito elevados de densidade de corrente J_{DC} determinam a excessiva alcalinização do solo nas vizinhanças do defeito, levando o sistema duto/solo ao domínio da corrosão com formação de íons ferrato; (BS EN 12954, 2001; DUTRA e NUNES, 1999);
- valores muito elevados de densidade de corrente J_{DC} são problemáticos, pois, a quantidade de hidrogênio gerado aumenta e começa a haver probabilidade de danificação por hidrogênio, como por exemplo, a ocorrência de descolamento catódico e aparecimento de trincas em soldas de dutos confeccionados com aços de alta resistência (BS EN 12954 2001; DUTRA e NUNES, 1999; PETROBRAS N-2801, 2008);
- a norma Européia de Proteção Catódica (BS EN 12954, 2001), assim como, a norma PETROBRAS N-2801 (2008) recomendam manter o potencial de proteção o mais próximo possível do -0,85 V em relação ao eletrodo de referência de cobre-sulfato de cobre em solos aerados e mais próximo possível de -0,95 V em solos desareados contendo bactérias sulfato redutoras. Esta recomendação tem por base evitar os problemas citados anteriormente;

Com a incidência crescente de casos de corrosão por corrente alternada, as práticas tradicionais em relação aos valores dos potenciais de proteção catódica, começaram a ser questionadas. Há uma tendência em se afirmar que o aumento do potencial de proteção catódica controla a corrosão por corrente AC. FUNK e colaboradores (1992), perceberam que aumentando a densidade de corrente J_{DC} de 2,0 A/m² para 5 A/m², a corrosão provocada por uma densidade de corrente J_{AC} de 50 A/m² cai pela metade;

Há citações (GUMMOW et al, 1998) dizendo que uma densidade de corrente J_{DC} de 4 A/m² é capaz de bloquear a corrosão AC enquanto DÉVAY e colaboradores (1967), observaram que corrosão por corrente AC foi reduzida com o aumento de J_{DC} , mas, que ainda era significante para uma densidade de corrente J_{DC} de 10 A/m², com densidade de corrente AC de 100 e 250 A/m²;

O diagrama apresentado na Figura 2.19 (HOSOKAWA, 2002) mostra o nível de proteção catódica necessária para não ocorrer a corrosão por corrente AC.

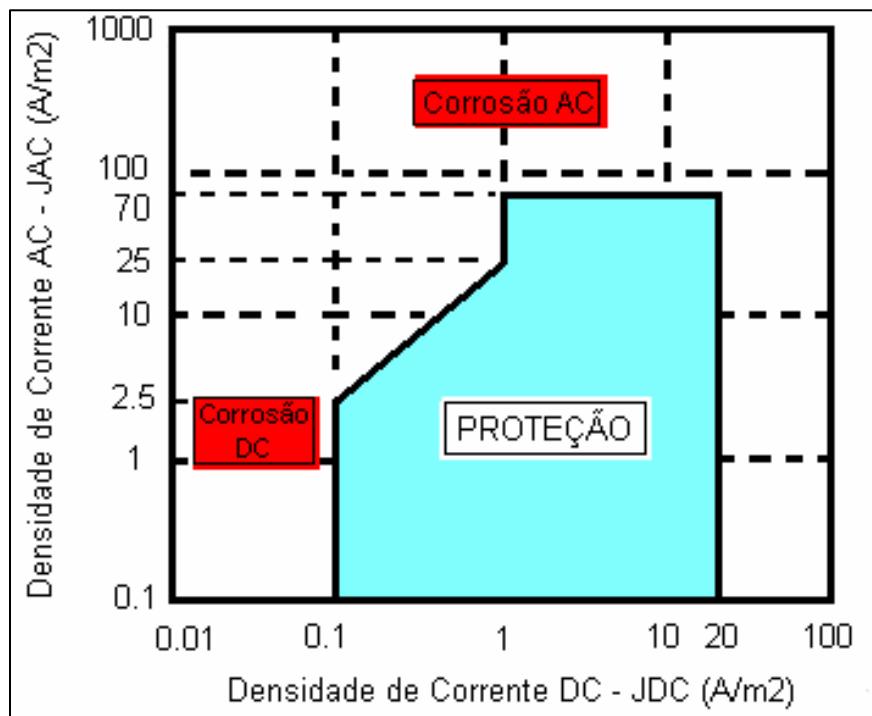


FIGURA 2.19 - Diagrama da relação Densidade AC e DC para a proteção.
FONTE - HOSOKAWA, 2002

A partir deste diagrama foi possível o estabelecimento dos seguintes critérios:

- os dutos estarão protegidos quando:

- $0,1 \text{ A/m}^2 < J_{DC} < 1,0 \text{ A/m}^2$ para $J_{AC} < 25 \text{ A/m}^2$
- $1 \text{ A/m}^2 < J_{DC} < 20 \text{ A/m}^2$ para $J_{AC} < 70 \text{ A/m}^2$

Outro estudo (GOIDANICH et al, 2005), afirma que na presença de corrente AC, os critérios estabelecidos para a proteção catódica tradicional (BS EN 12954, 2001) não se aplicam, necessitando um mínimo de $-1,150 \text{ V}$ em relação ao eletrodo de cobre-sulfato de cobre. Este estudo inclusive propõe o cálculo da corrente de proteção por meio de uma equação (2.10) empírica:

$$J_{DC} = J_L + K_{AC} \cdot J_{AC} \quad (2.10)$$

Onde

J_{DC} é dado em mA/m^2

J_L é a densidade de corrente limite do oxigênio em mA/m^2

K_{AC} é uma constante empírica entre 2 e 5

GREGOR e POURBAIX (2003), afirmam que a corrosão por corrente AC não ocorre se o potencial na interface do aço estiver dentro do domínio de imunidade do diagrama de Pourbaix (Figura 2.20). Isto significa que ele deve ser menor do que $-0,85 \text{ V}_{ECSC}$ em solos com pH menores que 8,5 e menor do que $-1,15 \text{ V}_{ECSC}$ para pH maiores que 8,5 e menores que 14. Se o pH for maior que 14 o potencial necessário para proteção contra a corrosão AC deve ser de $-1,4 \text{ V}_{ECSC}$. Os autores consideram isto impraticável e recomendam, nesse caso, a utilização de um aterramento elétrico para a estrutura evitando com que a corrente alternada se descarregue no solo através das falhas do revestimento.

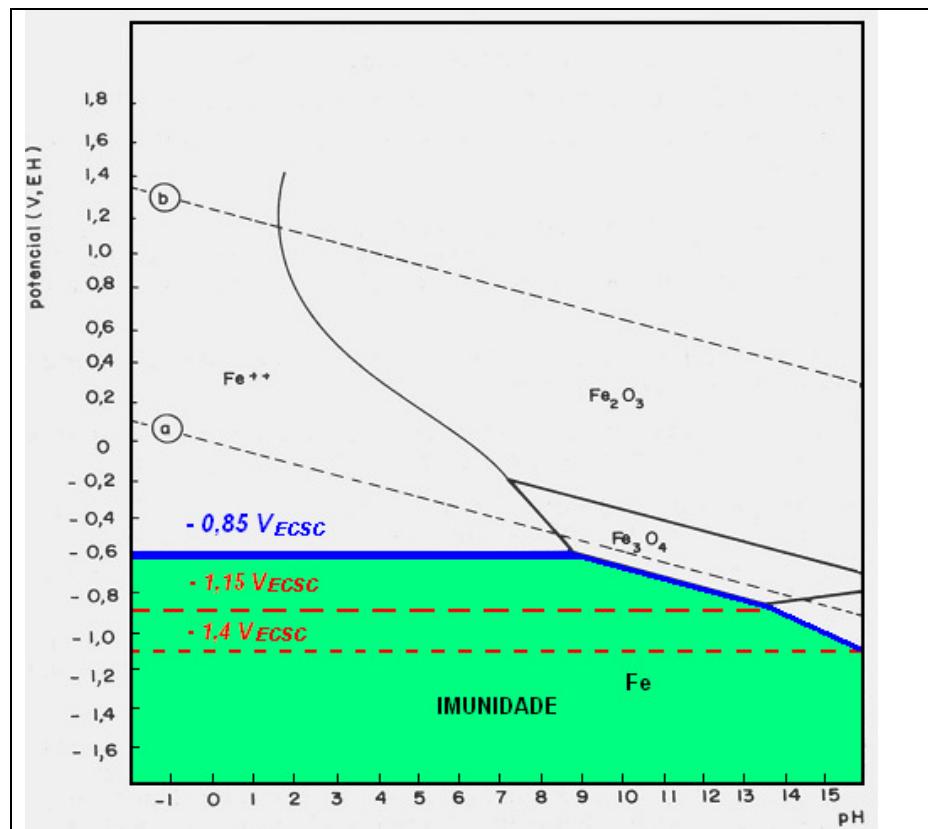


FIGURA 2.20 – Diagrama de Pourbaix relacionando os potenciais de proteção com o pH, dentro do domínio da imunidade.

FONTE – GREGOOR e POURBAIX, 2003

Probabilidade de corrosão AC em função da Relação JAC/JDC

Em todos os casos abaixo, assume-se que o potencial de proteção catódica do duto esteja satisfeito.

$J_{\text{AC}}/J_{\text{DC}} < X \rightarrow$ probabilidade baixa de corrosão

$X < J_{\text{AC}}/J_{\text{DC}} < 10 \rightarrow$ probabilidade de corrosão existe, devendo ser investigado

$J_{\text{AC}}/J_{\text{DC}} > 10 \rightarrow$ probabilidade alta de corrosão, aconselha-se adotar medidas corretivas

Na literatura aparecem três valores para X : 2 A/m², 3 A/m² e 5 A/m² (GUMMOW et al, 1998; BUCHLER et al, 2004).

As medições de corrente para J_{AC} e J_{DC} são realizadas em cupons de corrosão instalados em campo. A partir destes valores, calcula-se a razão J_{AC}/J_{DC} . (BUCHLER, et al, 2004).

As medidas de J_{AC} e J_{DC} realizadas em cupons de corrosão instalados na superfície ou na vizinhança de dutos estão associadas a erros significativos. Com o cálculo da razão entre estas grandezas, os erros associados às medidas individuais são minimizados (BUCHLER et al, 2004).

Além disto, se as dimensões do cupom de corrosão variam a razão entre as duas correntes continua inalterada e não é necessário conhecer a geometria de uma falha real para aplicar este critério: qualquer que seja a geometria, a razão será a mesma (BUCHLER et al, 2004).

A adoção da razão parece mais adequada, pois permite que se faça um ajuste do nível da proteção catódica em função da interferência AC (BUCHLER, et al, 2004).

Uma segunda metodologia (BUCHLER et al, 2004) pode ser usada para o cálculo da razão conforme equação (2.11): considera-se que ambas as densidades de corrente seguem a lei de Ohm (2.12) e (2.13) (relativo à resistência da falha e a resistividade do solo) sendo as polarizações não-lineares desprezadas. Com esta premissa, pode-se supor que:

$$\frac{J_{AC}}{J_{DC}} = \frac{V_{AC}}{V_{IR\ free} - V_{on}} \quad (2.11) \quad I_{AC} = V_{AC} / R_s \quad (2.12)$$

$$I_{DC} = V_{DC} / R_s \quad (2.13)$$

onde:

$V_{IR\ free}$ - potencial sem a queda ôhmica da interface cupom/falha do revestimento;

R_s - resistência de dispersão da falha (Figura 2.21);

V_{AC} - potencial de corrente alternada;

V_{DC} - potencial de corrente contínua (com a queda IR);

V_{on} – potencial de proteção DC

No caso de revestimentos de polietileno com defeitos muito pequenos, pode-se considerar que $V_{IR\ free}$ é aproximadamente o potencial V_{off} do duto (medida de potencial estrutura-eletrólito realizada imediatamente após a interrupção da corrente de proteção catódica e antes da despolarização do duto, ou seja, é o potencial do duto sem a influência da queda ôhmica) desprezando as possíveis diferenças (50 mV a 100 mV). Com isto a razão J_{AC} / J_{DC} pode ser estimada com valores facilmente determinados em campo (BUCHLER et al, 2004).

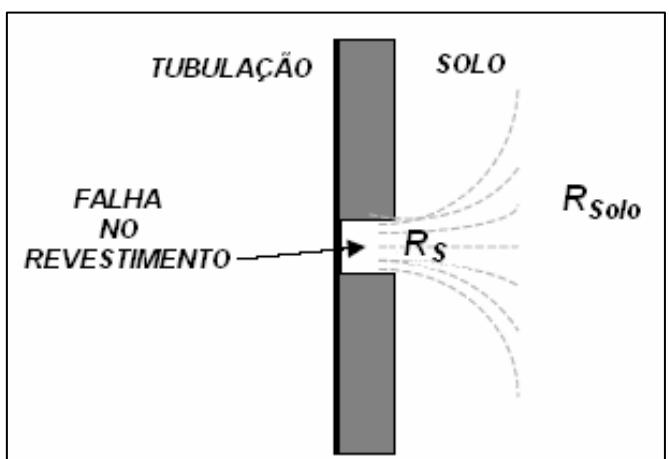


FIGURA 2.21 – R_s , resistência de dispersão da falha (spread).
FONTE – PEABODY , 2001

Probabilidade de corrosão AC em função do Potencial AC (V_{AC})

Quanto maior o potencial AC maior é a probabilidade de corrosão por corrente AC (GUMMOW et al, 1998).

Há citações na literatura que tentam estabelecer critérios para os valores de V_{AC} . Nos Estados Unidos e no Canadá o valor limite sugerido foi de 15 V_{AC} (NACE STANDART RP0177, 2000; ANSI/IEEE STANDART 80). Na Alemanha este limite foi de 65 V_{AC}

(TECHNICAL RECOMMENDATION No. 7, 1985). Na França em uma companhia de gás, 24 V_{AC} (THOMPSON, 2004).

Outro critério europeu mostra que o valor do potencial AC não deve exceder a 10 V em todo o duto e a 4 V em locais onde os solos tem uma resistividade aproximada de 25 Ω.cm (CEN/TS 15280, 2006);

Há críticas sobre estes limites, pois depende do tamanho da falha no revestimento, sendo mais aceito o critério da densidade de corrente J_{AC} . Para contornar isto, é recomendado o uso de um gráfico (Figura 2.22), que relaciona o potencial AC com a área da falha. O valor do potencial determinado, conhecendo-se a área da falha e a resistividade do meio, corresponde à densidade de corrente AC de 100 A/m². Portanto, potenciais acima deste valor apresentam condições de alta probabilidade de corrosão. O gráfico mostra, como exemplo, um meio com resistividade de 1.000 Ω.cm e uma falha com área de 1,5 cm². Neste caso, para potenciais acima de 6 volts a probabilidade de ocorrência de corrosão AC seria muito elevada. Em se querendo reduzir esta probabilidade, deve-se manter o valor de densidade de corrente J_{AC} no máximo igual a 20 A/m², calculando o valor máximo do potencial AC através equação (2.14) (GUMMOW et al, 1998).

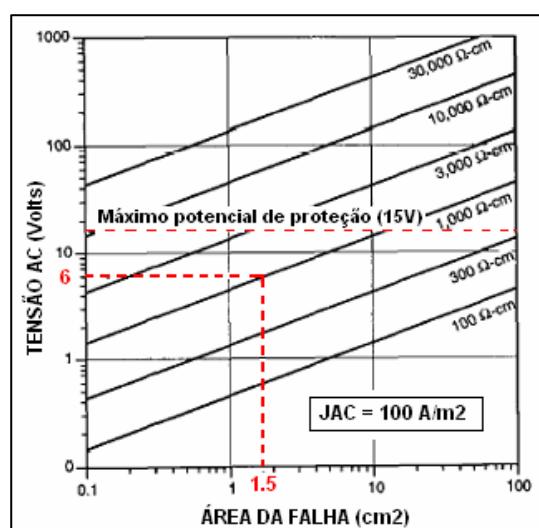


FIGURA 2.22 – Gráfico potencial AC em função da área da falha
FONTE - GUMMOW, 1998.

$$V_{AC} = 6 \cdot \frac{20 (J_{AC} \text{ seguro})}{100 (J_{AC} \text{ Risco})} = 1,2 \text{ V} \quad (2.14)$$

Outro exemplo utilizando fórmula (2.15) foi mostrado por WAKELIN e colaboradores (1998): conhecendo o potencial V_{AC} , é possível estimar a probabilidade de ocorrência de corrosão por corrente AC adotando os critérios já discutidos para J_{AC} . Para uma falha do revestimento com área de 100 mm², em meio com resistividade de 1000 Ω.cm e potencial induzido V_{AC} de 10 V, temos uma densidade de corrente J_{AC} na falha de 225 A/m².

$$J_{AC} = \frac{8V_{AC}}{\rho \pi d} = \frac{8V_{AC}}{\rho \pi \sqrt{\frac{4A}{\pi}}} = \frac{8 \cdot 10}{10.314 \cdot \sqrt{\frac{4.00001}{3,14}}} = 225 \text{ A/m}^2 \quad (2.15)$$

Onde:

Potencial V_{AC} é dado em volts;

Resistividade é dada em Ω.m;

Área da falha é dada em m²

Segundo o critério do J_{AC} , descrito anteriormente, a probabilidade de corrosão por AC é elevada, pois está acima de 100 A/m². Este exemplo é baseado em caso real de oleoduto enterrado, citado por FLOYD (2004).

Probabilidade de corrosão AC em função da Freqüência

Há uma correlação inversa entre a corrosão por AC e a freqüência, ou seja, quanto maior a freqüência menor a probabilidade de corrosão por AC (POOKOTE e CHIN, 1978; STALDER, 2001).

Alguns autores (HELM et al, 1993) não detectaram diferenças significativas quando variavam a freqüência de 20 Hz para 60 Hz.

A teoria da eletroquímica assegura que a taxa de corrosão é dependente da freqüência: freqüências menores, maior corrosão (WOLYNCE, 2003; GENTIL, 2007).

As Figuras 2.23, 2.24, 2.25 e 2.26 representam o circuito equivalente de um duto metálico enterrado no solo e a influência da freqüência na taxa de corrosão.

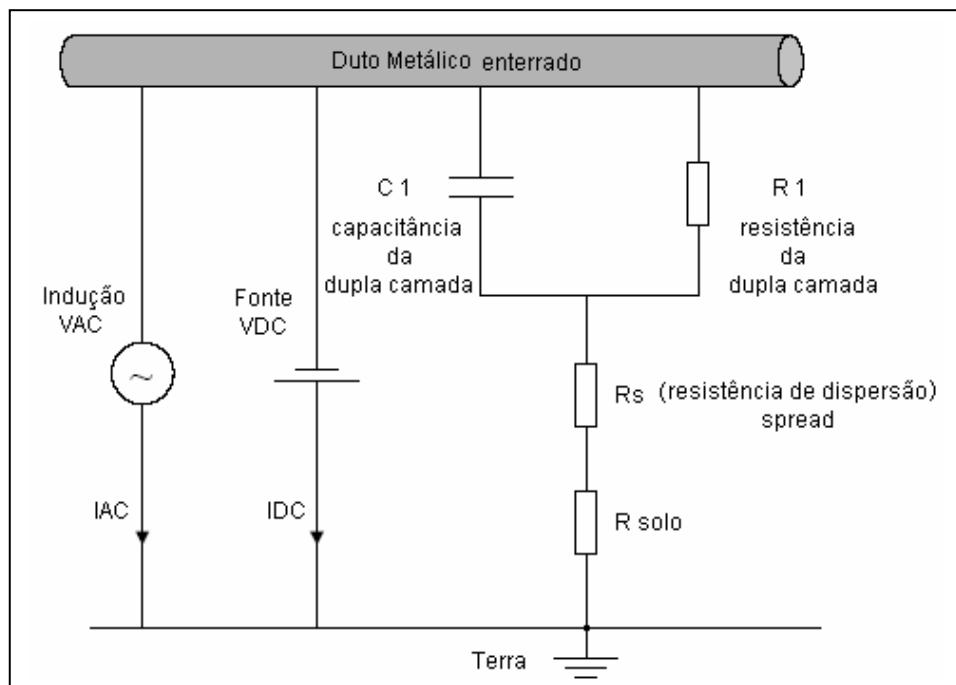


FIGURA 2.23 – Circuito equivalente de um duto metálico enterrado.
FONTE – PEABODY, 2001

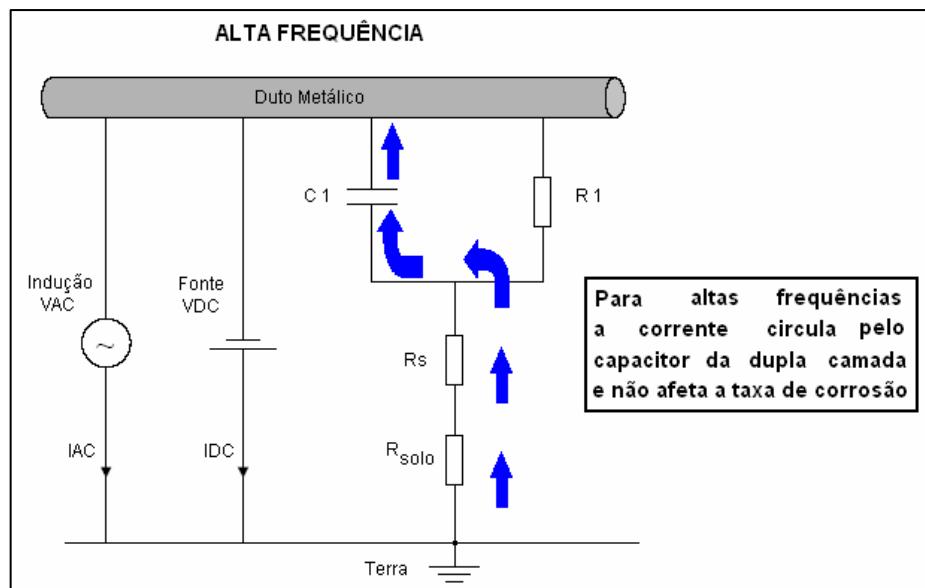


FIGURA 2.24 – Circuito equivalente com alta freqüência.
FONTE – PEABODY, 2001

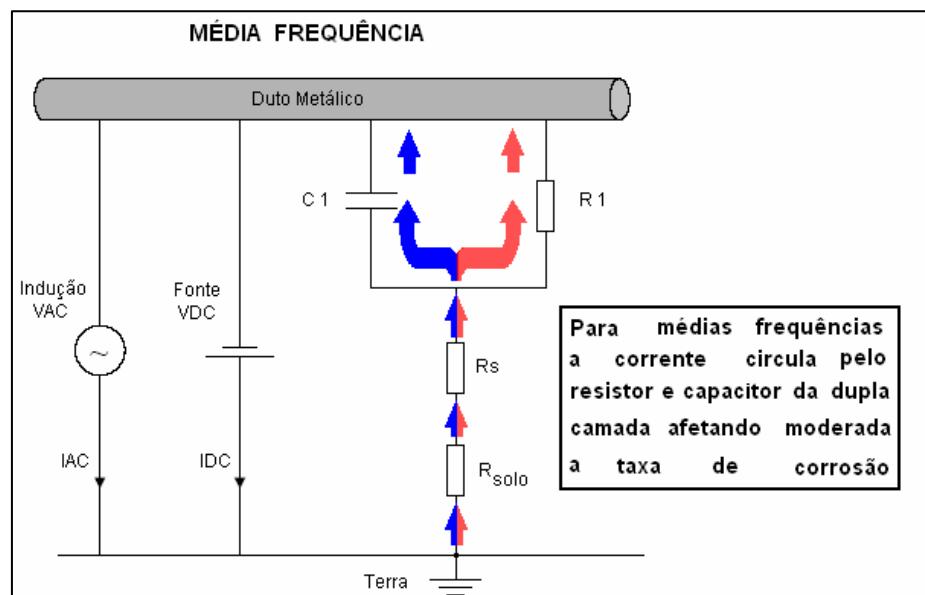


FIGURA 2.25 – Circuito equivalente com média freqüência.
FONTE – PEABODY, 2001

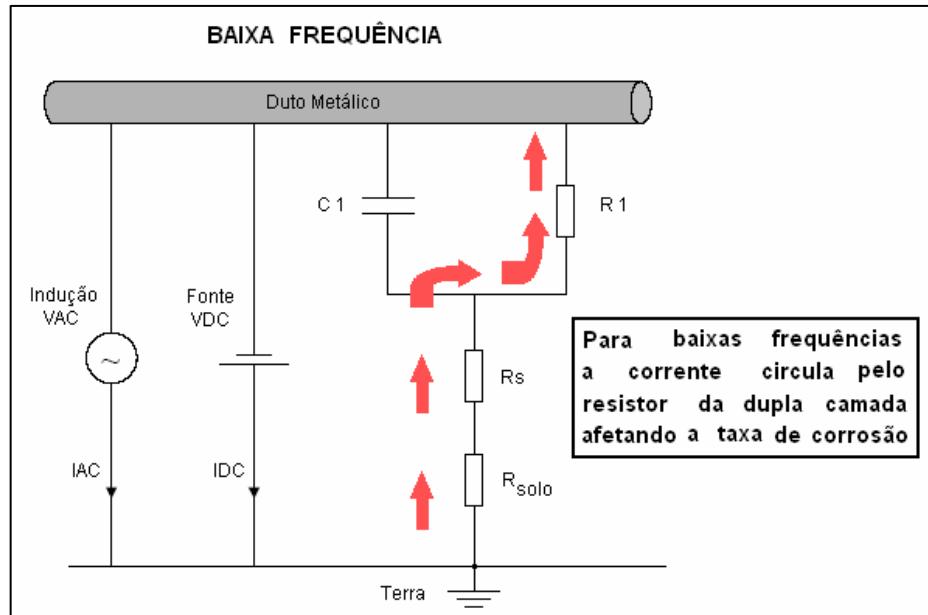


FIGURA 2.26 – Circuito equivalente com baixa freqüência.
FONTE – PEABODY, 2001

Probabilidade de corrosão AC em função da resistividade do solo

É praticamente consenso de que quanto menor a resistividade do solo é maior a probabilidade de corrosão por AC. Há muitas citações na literatura mostrando que a incidência de corrosão em dutos é maior em regiões de menor resistividade do solo.

Observando o circuito equivalente de uma interface, Figura 2.27, nota-se que:

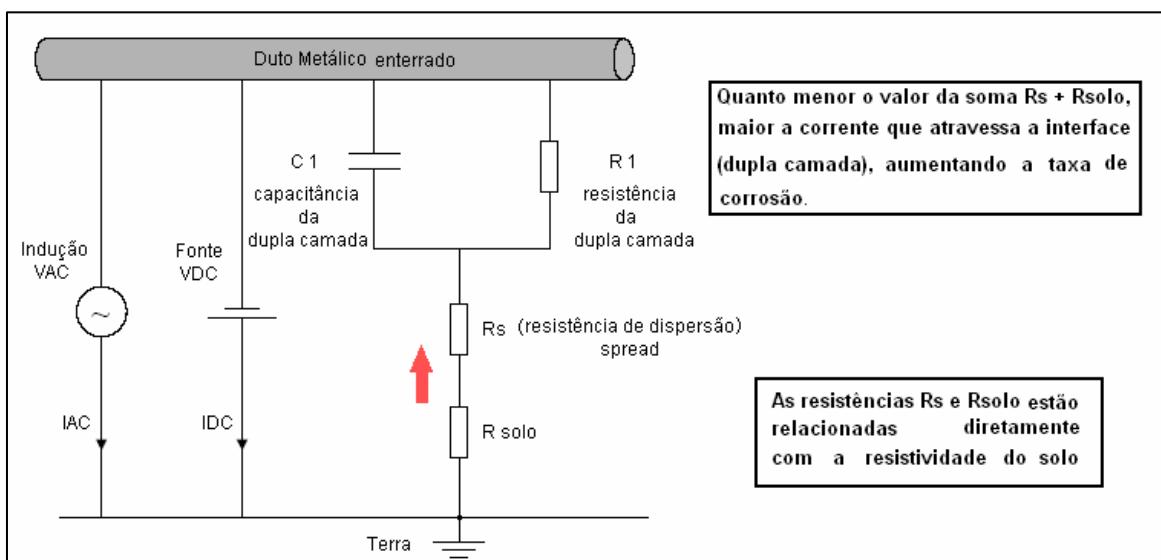


FIGURA 2.27 – Circuito equivalente e a influência da resistividade do solo.
FONTE – PEABODY, 2001

Para uma determinada tensão entre o solo e o metal, quanto menor o valor da soma $Rs + Rsolo$, maior o valor da corrente que atravessa a interface. Rs e $Rsolo$ são diretamente proporcionais à resistividade do solo.

Probabilidade de corrosão AC em função da dimensão da falha

Quanto menor a área da falha no revestimento e menor a área de metal do duto exposta ao solo, maior a probabilidade de ocorrência de corrosão por AC (GUMMOW et al, 1998; COLLET et al, 2001). As máximas velocidades de corrosão ocorrem em falhas de área entre 100 e 300 mm² (HELM et al, 1993). Alguns autores (HEIM e PEEZ, 1992 apud THOMPSON, 2004) observaram que em defeitos extremamente pequenos (0,01 cm²) não se verifica corrosão e atribuíram este fato à obstrução da falha pelos produtos das reações que ocorrem no defeito. Porém, autores franceses (RAGAULT et al, 1998) afirmam que há casos de corrosão com defeitos desta ordem de grandeza. Isto ocorre devido à falta de proteção catódica, afirma COLLET e colabores (2001), pois a corrente de proteção tem maior dificuldade de atingir pequenas áreas do que grandes áreas.

2.6 Fundamentação Teórica da Corrente Alternada

Em um circuito de corrente alternada, o potencial elétrico $E_{AC}(t)$ varia com o tempo t de acordo com as Equações (2.16 e 2.17):

$$E_{AC}(t) = E_0 \cdot \cos(\omega \cdot t) \quad (2.16)$$

Nesta expressão, E_0 é a amplitude do potencial elétrico e $\omega = 2\pi f$ onde f é a freqüência da corrente alternada. A resposta elétrica $I_{AC}(t)$ a esta oscilação de potencial dá-se por meio da seguinte expressão:

$$I_{AC}(t) = I_0 \cdot \sin(\omega t + \varphi) \quad (2.17)$$

Nesta expressão, I_0 é a amplitude corrente elétrica e φ é a defasagem da corrente em relação ao potencial.

O potencial elétrico RMS (*root mean square*) ou potencial eficaz, geralmente medido com um multímetro. Para ondas puramente senoidais, o potencial eficaz segue uma relação com a amplitude do potencial AC (E_0) conforme a Equação (2.18).

$$E_{AC} = \frac{E_0}{\sqrt{2}} \quad (2.18)$$

A corrente elétrica eficaz é a corrente geralmente medida com um multímetro e para ondas puramente senoidais, a corrente eficaz segue uma relação com a amplitude da corrente AC (I_0), conforme a Equação (2.19).

$$I_{AC} = \frac{I_0}{\sqrt{2}} \quad (2.19)$$

Alguns dos parâmetros elétricos utilizados em resultados práticos de laboratório e de campo são os potenciais medidos com um multímetro: potencial e corrente DC (E_{DC} e I_{DC}), potencial e corrente eficaz AC (E_{AC} e I_{AC}) e potencial eficaz AC+DC (E_{AC+DC}). O E_{DC} é um valor médio obtido devido à componente DC e calculado segundo a Equação (2.20); o E_{AC} é o potencial eficaz, sendo obtido considerando apenas a componente AC e, para ondas puramente senoidais, pode ser calculado segundo a Equação (2.21); o E_{AC+DC} , também eficaz, é obtido considerando o acoplamento das componentes AC e DC calculado segundo a Equação (2.22).

$$E_{DC} = \frac{1}{T} \int_0^T E(t) dt \quad (2.20)$$

Onde T representa o período em segundos.

$$E_{AC} = \frac{1}{T} \sqrt{\int_0^T (E(t) - E_{DC})^2 dt} \quad (2.21)$$

$$E_{AC+DC} = \frac{1}{T} \sqrt{\int_0^T (E(t))^2 dt} \quad (2.22)$$

Outro conceito importante é o de resistência elétrica. O valor da resistência elétrica de um defeito de revestimento depende da forma deste defeito e do meio onde a corrente se dispersa. Para um duto metálico sem revestimento de comprimento L, de diâmetro externo D, enterrado a uma profundidade P e num solo de resistividade ρ , o valor da resistência elétrica R da região onde a corrente se dispersa é dado pela Equação (2.23) (DUTRA e NUNES, 1999; PEABODY, 2001; PETROBRAS N-2801, 2008):

$$R = \frac{\rho}{\pi \cdot L} \left(\ln \left(\frac{2 \cdot L}{\sqrt{2 \cdot D \cdot P}} \right) - 1 \right) \quad (2.23)$$

Já para um duto enterrado revestido, com diâmetro do duto muito maior que o diâmetro do defeito, em solo de resistividade ρ , a resistência elétrica deste defeito pode ser ilustrada na Figura 2.21 e calculada segundo a Equação (2.24). Esta é a chamada R_s , ou resistência de dispersão (*spread resistance*) (DUTRA e NUNES, 1999; PEABODY, 2001; PETROBRAS N-2801, 2008):

$$R_s = \frac{\rho}{2 \cdot d} \quad (2.24)$$

No caso de um defeito de diâmetro d, pode-se calcular a densidade de corrente eficaz AC (J_{AC}) que passará por este defeito aplicando-se a 1^a Lei de Ohm, de acordo com as Equações (2.25 e 2.26):

$$I_{AC} = \frac{E_{AC}}{R_s} = \frac{E_{AC}}{\frac{\rho}{2.d}} = \frac{2.d.E_{AC}}{\rho} \quad (2.25)$$

$$J_{AC} = \frac{I_{AC}}{A_{defeito}} = \frac{\frac{2.d.E_{AC}}{\rho}}{\frac{\pi.d^2}{4}} = \frac{2.d.E_{AC}}{\rho} \cdot \frac{4}{\pi.d^2} \quad (2.26)$$

$$J_{AC} = \frac{8.E_{AC}}{\rho.\pi.d} \quad (2.27)$$

Assim, pode-se calcular a densidade de corrente eficaz AC (J_{AC}) que passará por um defeito de diâmetro d aplicando-se a Equação (2.27). Esta equação é amplamente utilizada pelos profissionais que estudam corrosão por corrente AC (WAKELIN et al, 1998; DUTRA e NUNES, 1999; PEABODY, 2001; PETROBRAS N-2801, 2008).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Devido à ausência de normas ou procedimentos específicos apropriados para a avaliação das variáveis que influenciam no processo de corrosão por corrente alternada, foi proposta uma metodologia com o objetivo de reproduzir em laboratório as condições de operação em campo.

Os ensaios foram realizados nos Laboratórios de Corrosão Externa e de Equipamentos Elétricos do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, IPT, através do projeto de pesquisa da PETROBRAS.

Primeiramente, foram conduzidos ensaios sem proteção catódica e sob a influência de corrente alternada, variando parâmetros tais como, resistividade, nível de corrente AC, temperatura e freqüência da corrente AC.

Em seguida, foram levantadas curvas do potencial DC em função da corrente DC, em meios de diferentes resistividades e diferentes níveis de corrente AC e finalmente foram conduzidos os ensaios simulando as condições de campo, quais sejam: ensaios com proteção catódica e interferência de corrente AC.

Nos ensaios utilizaram-se cupons de corrosão de aço-carbono, em alguns casos, os cupons de corrosão foram submetidos apenas à inspeção visual, em outros foram avaliados quanto à perda de massa e documentação fotográfica.

A seguir, serão descritas as metodologias adotadas para a escolha do eletrólito e a metodologia para determinação da perda de massa e, em seguida, as metodologias adotadas para cada uma das concepções citadas.

3.1 Seleção do meio de ensaio

Em busca de uma solução que apresentasse uma resistividade típica dos solos naturais, foram preparadas soluções aquosas com diferentes concentrações de diferentes sais, como por exemplo, cloreto de sódio e sulfato de sódio. Em seguida, a resistividade destas soluções foi determinada usando um condutivímetro Marca Digimed, Modelo DM-3. Entre os sais utilizados, o sulfato de sódio apresentou maior reproduzibilidade em relação

aos demais e, por isto, escolheu-se este como eletrólito para os ensaios. A Tabela 3.1 mostra a concentração de eletrólito e a respectiva resistividade das soluções aquosas preparada.

TABELA 3.1

Resistividade de soluções aquosas de sulfato de sódio preparada em laboratório.

Eletrólito	Concentração do eletrólito (%)	Resistividade ($\Omega \cdot \text{cm}$)
Na_2SO_4	0,005	10.000
	0,0075	7.000
	0,010	5.000
	0,015	4.000
	0,030	2.000
	0,06	1.000
	0,15	500

3.2 Preparação dos cupons de corrosão para os ensaios e procedimento para a determinação da perda de massa (taxa de corrosão)

Antes do início dos ensaios, todos os cupons de corrosão foram submetidos ao seguinte procedimento de limpeza:

- desengraxe em solvente orgânico apropriado (acetona) e em seguida lavagem com água. Imersão em solvente orgânico (álcool etílico) e secagem com ar limpo e seco;
- lixamento utilizando lixas de carbeto de silício (lixas 100 à 1200). Lavagem com solvente orgânico (acetona) e secagem com ar limpo e seco.

As massas dos cupons foram obtidas utilizando uma balança analítica Marca Mettler Toledo, Modelo AB204-S com sensibilidade de 0,1 mg. Para cada cupom foram realizadas três medidas de massa e foi calculada a média das três medidas, assim como, três medidas de altura e três medidas do diâmetro, calculando-se a média das alturas (h_c) e a média dos diâmetros (d_c). A área dos cupons foi calculada segundo a equação 3.1.

$$A = \pi \left(\frac{d_c}{2} \right)^2 + \pi \cdot d_c \cdot h_c \quad (3.1)$$

Onde:

A = área do cupom em cm^2

d_c = diâmetro do cupom em cm

h_c = altura do cupom em cm

A perda de massa é obtida por meio da diferença da massa inicial de um cupom e a massa após o ensaio. A determinação da massa final do cupom deve levar em consideração a solubilidade dos produtos de corrosão que se formam sobre a superfície do mesmo. Se tais produtos forem solúveis no meio em questão, uma simples lavagem do corpo-de-prova será suficiente antes da pesagem. Por outro lado, se os produtos de corrosão forem aderentes à superfície do corpo-de-prova, estes deverão ser retirados antes da pesagem. O procedimento adotado para a remoção dos produtos de corrosão tomou por base a norma ASTM G-1 (ASTM, 2001), sendo realizadas sucessivas decapagens dos cupons com solução de Clarke, composta de 20 g/L de trióxido de antimônio, 50 g/L de cloreto estanoso em ácido clorídrico, lavagem do cupom com água corrente, imersão em álcool etílico, secagem com ar quente e pesagem em balança analítica.

Foi elaborado um gráfico, Figura 3.1, relacionando o tempo de decapagem com a massa do cupom, após cada intervalo. Foram traçadas as retas mais representativas, correspondentes à remoção dos produtos de corrosão e ao ataque do metal-base. O ponto de interseção destas duas retas fornece o valor da massa final do corpo-de-prova. Com os valores de massa inicial e massa final, calculou-se a perda de massa por unidade de área e a taxa de corrosão por meio das equações 3.2 e 3.3.

$$\text{Perda de massa por unidade de área (g/m}^2\text{)} = \frac{m_i - m_f}{A} \quad (3.2)$$

$$\text{Taxa de corrosão (mm/a)} = \frac{m_i - m_f}{A \cdot t \cdot d} \cdot 10^{-3} \quad (3.3)$$

Onde:

m_i = massa inicial em g

m_f = massa final em g

A = área do corpo-de-prova em m^2

t = tempo de ensaio em anos

d = densidade do aço-cabono = 7,86 g/cm^3

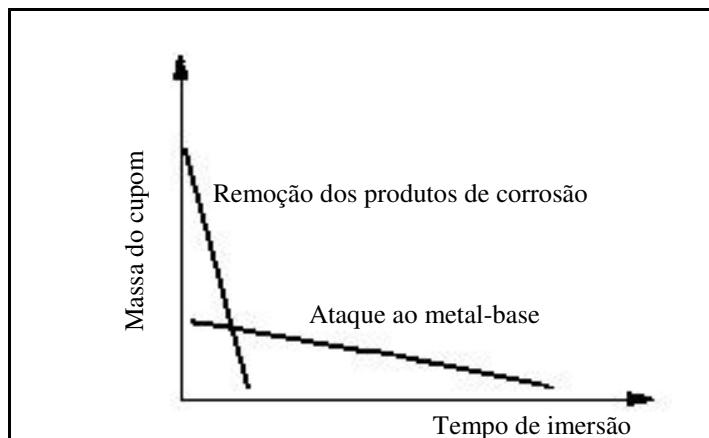


FIGURA 3.1 - Aspecto típico do gráfico usado para a determinação da massa final de um cupom submetido a ensaios de corrosão.

FONTE: ASTM G-1, 2001

3.3 Ensaios sem proteção catódica

Os ensaios foram realizados com cupons de corrosão cilíndricos de aço-carbono COPANT 1020, com cerca de 10 mm de altura e 12 mm de diâmetro, totalizando uma área de $4,8 \text{ cm}^2$. O cupom utilizado nos ensaios está mostrado na Figura 3.2a. Como contra-

eletrodo utilizou-se uma barra cilíndrica de aço inoxidável ABNT 316, com cerca de 60 mm de altura e 17 mm de diâmetro, totalizando uma área de 35 cm^2 , como mostrado na Figura 3.2b. As medidas de potencial foram realizadas com o auxílio de um eletrodo de referência de calomelano saturado (ECS).

Os ensaios foram conduzidos em uma cuba de vidro com capacidade de dois litros, provido de uma tampa, também de vidro, com aberturas para a inserção dos eletrodos, conforme Figura 3.3. Para imposição da corrente AC, utilizou-se uma fonte de tensão alternada de 3 kVA da Califórnia Instruments modelo 3001Lx, Figura 3.4.

A avaliação dos cupons de corrosão foi feita por meio de inspeção visual com registro fotográfico e perda de massa.

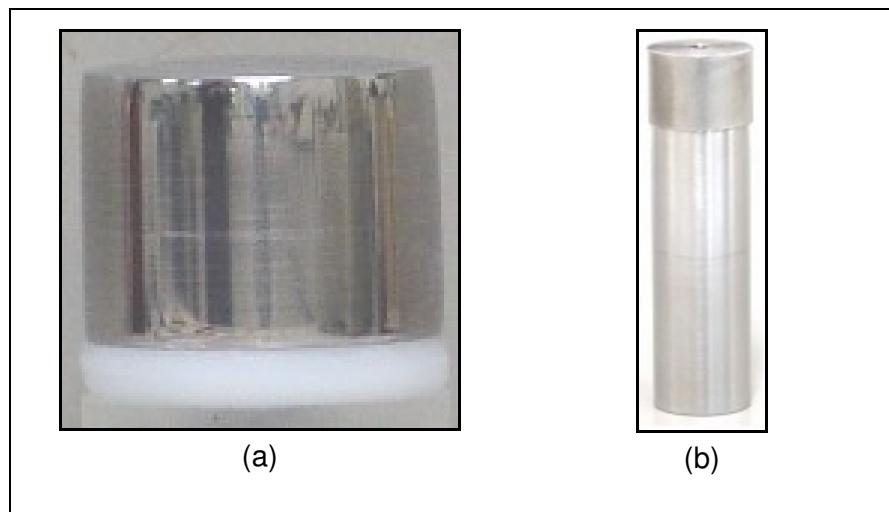


FIGURA 3.2 - Cupom cilíndrico de aço-carbono COPANT 1020 de $4,8 \text{ cm}^2$ de área (a) e contra eletrodo de aço inoxidável ABNT 316 (b) utilizados nos ensaios sem proteção catódica e com interferência de corrente AC.

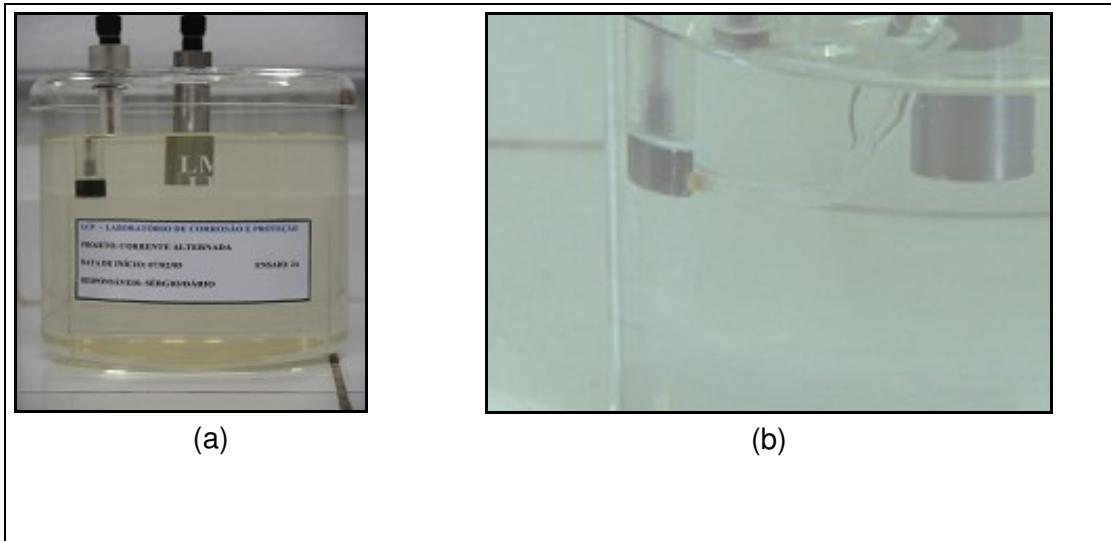


FIGURA 3.3 - Cuba de vidro utilizada nos ensaios sem proteção catódica e com interferência de corrente alternada (a) e detalhe do eletrodo de trabalho, do contra-eletrodo e eletrodo de referência (b): medida de potencial da interfase metal/eletrolíto.

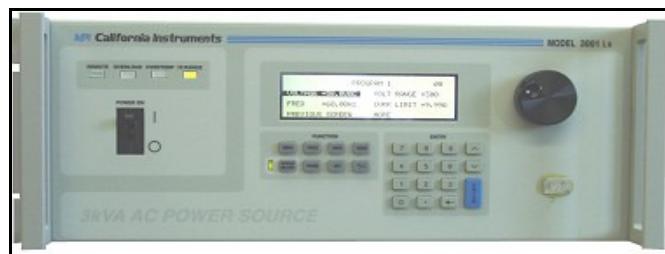


FIGURA 3.4 - Fonte de tensão alternada utilizada nos ensaios experimentais de bancada.

3.4 Curvas do Potencial DC em função da Densidade de corrente DC para diferentes valores de corrente AC

Para o levantamento das curvas do potencial DC (E_{DC}) em função da densidade de corrente DC (J_{DC}), para meios de diferentes resistividades e diferentes níveis de corrente AC, foram utilizados os mesmos eletrodos, o mesmo recipiente de ensaio e os mesmos equipamentos descritos no item anterior. Nestes ensaios, os cupons de corrosão foram imersos em meios de diferentes resistividades e submetidos a diferentes níveis de proteção catódica e interferência AC, para cada condição adotada, era aplicado um potencial DC e imediatamente o valor da corrente DC era medido.

3.5 Ensaio com proteção catódica e com interferência de corrente AC

Estes ensaios foram realizados com eletrodo de referência e cupons idênticos aos descritos nos ensaios sem proteção catódica (item 3.3). Como contra-eletrodos ou eletrodos auxiliares, simulando o leito de anodos, foram utilizadas barras cilíndricas de aço inoxidável ABNT 316 com as mesmas dimensões daquelas utilizadas nos ensaios sem proteção catódica.

O arranjo experimental adotado consta de um sistema de proteção catódica composto de um retificador de tensão DC da Tectrol mod. TCA, com o qual era imposta a corrente de proteção catódica e um sistema para simular a interferência de corrente alternada composto por uma fonte de tensão alternada da *California Instruments* com o qual era imposta a corrente AC, como mostra a Figura 3.5.

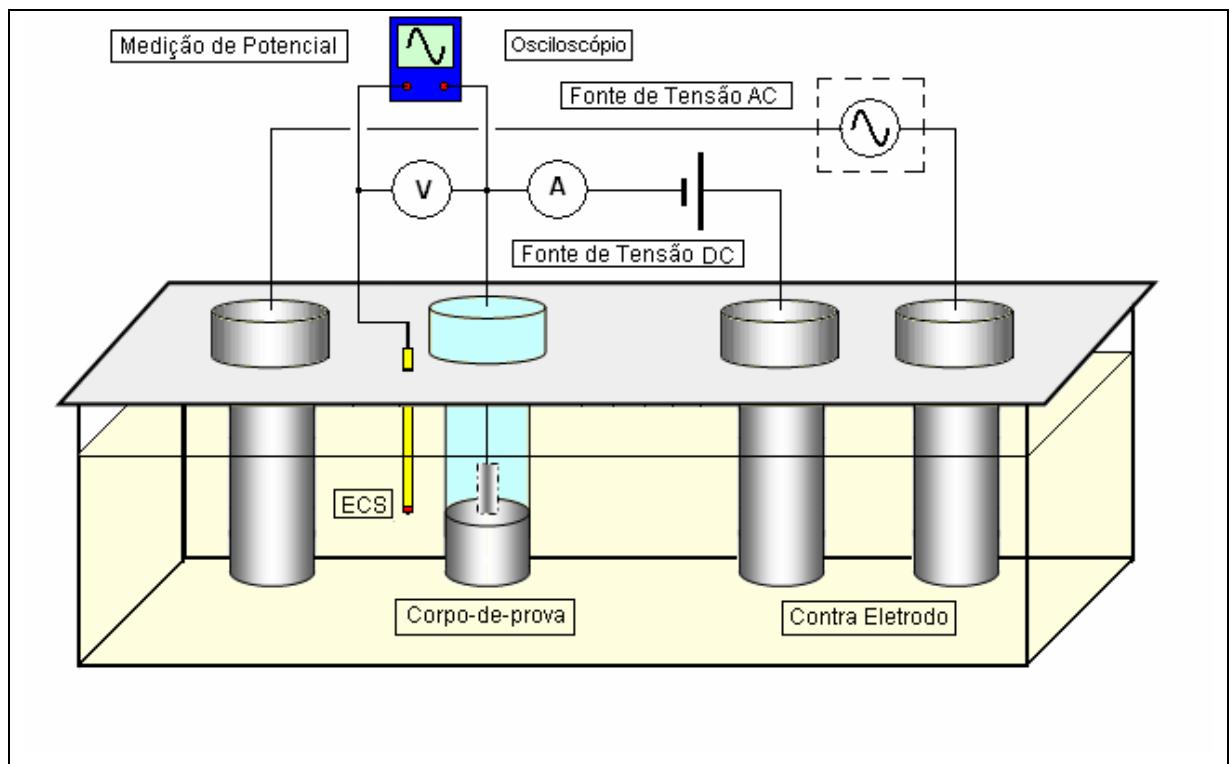


FIGURA 3.5 – Arranjo dos ensaios com proteção catódica e interferência de corrente AC.

Nesse caso, devido à adoção de valores de correntes elevadas e ao longo período de ensaio, não foi possível a utilização da cuba de vidro com capacidade de dois litros, como nos ensaios sem proteção catódica. Foi necessário um volume de solução maior para

evitar o aquecimento excessivo da solução de ensaio. O recipiente de ensaio consistiu-se de uma cuba de polipropileno com capacidade de quinze litros. A Figura 3.6 mostra o arranjo utilizado nesse ensaio.

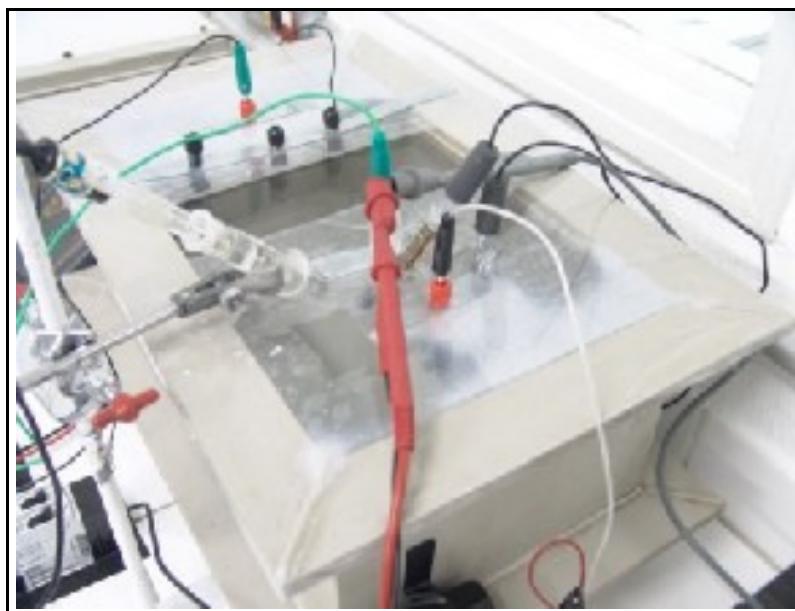


FIGURA 3.6 - Montagem dos ensaios com proteção catódica e com interferência de corrente AC.

Para a realização desses ensaios foi utilizada a solução de sulfato de sódio com resistividade de $5.000 \Omega \cdot \text{cm}$ e aplicou-se uma densidade de corrente de proteção catódica de $0,5 \text{ A/m}^2$. Este valor de corrente foi capaz de levar o potencial de eletrodo do sistema em estudo para a condição termodinâmica de imunidade e, portanto, o sistema ficou catodicamente protegido ($-1,0 \text{ V}_{\text{ECS}}$). Em seguida, aplicaram-se valores crescentes de densidades de corrente alternada de modo a elevar o potencial de eletrodo para a condição de equilíbrio e para a condição de corrosão, e assim mantido durante sete dias. Os experimentos foram acompanhados de medidas de potencial de eletrodo, determinação da taxa de corrosão e exame visual com documentação fotográfica.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Ensaios em cupons sem proteção catódica

Nestes ensaios, buscou-se avaliar a maneira pela qual alguns fatores afetam a taxa de corrosão do sistema cupom/eletrolito: densidade de corrente AC, resistividade do eletrolito, freqüência da corrente AC, temperatura e pH.

Vários ensaios foram realizados para diferentes níveis de cada fator e sempre na condição sem proteção catódica e com aplicação de corrente AC. Para fins de comparação, os ensaios foram conduzidos também sem aplicação de corrente AC. Após a realização de cada ensaio, os cupons foram submetidos a exame visual com documentação fotográfica e a sua perda de massa foi calculada.

O sistema foi constituído de uma fonte de tensão AC e de uma célula eletroquímica composta de solução aquosa de resistividade conhecida, cupom de aço-carbono, contra-eletrodo de aço inoxidável e um eletrodo de referência de calomelano saturado, conforme já descrito na metodologia. Devido a uma diferença de potencial entre o cupom de aço-carbono e o contra-eletrodo de aço inoxidável, circulava uma corrente galvânica entre os dois eletrodos que acarretava em um aumento da taxa de corrosão. Para evitar este problema acoplou-se, em série ao sistema, um capacitor eletrolítico de capacidade 25 μF (determinado em função da impedância da fonte de tensão e comercialmente viável) de maneira a bloquear a corrente galvânica circulante. Para avaliar como a corrente galvânica circulante e a corrente AC imposta afetavam a taxa de corrosão, foram montados os arranjos experimentais ilustrados na Figura 4.1.

As montagens ilustradas na Figura 4.1 foram concebidas de tal maneira a avaliar como o par galvânico formado pela conexão elétrica entre o cupom e o contra eletrodo de aço inoxidável afetavam a taxa de corrosão do cupom e como era possível isolar o efeito galvânico, a saber:

- **montagem A** (Figura 4.1a): nesta montagem, esperava-se que a taxa de corrosão obtida fosse devida apenas ao contato do cupom com o eletrolito;

- **montagem B** (Figura 4.1b): nesta montagem, esperava-se que a taxa de corrosão do cupom fosse influenciada pela corrente galvânica que circulava entre o cupom e o contra-eletrodo de aço inoxidável;
- **montagem C** (Figura 4.1c): nesta montagem, esperava-se que o capacitor de $25 \mu\text{F}$, acoplado em série ao circuito galvânico, bloqueasse por completo a corrente galvânica circulante e que os resultados de taxas de corrosão obtidos fossem idênticos ao da montagem A;
- **montagem D** (Figura 4.1d): nesta montagem, esperava-se que a taxa de corrosão fosse influenciada tanto pela imposição da corrente AC como pela corrente galvânica
- **montagem E** (Figura 4.1e): com esta montagem, esperava-se eliminar a influência da corrente galvânica isolando, assim, a influência da imposição da corrente AC.

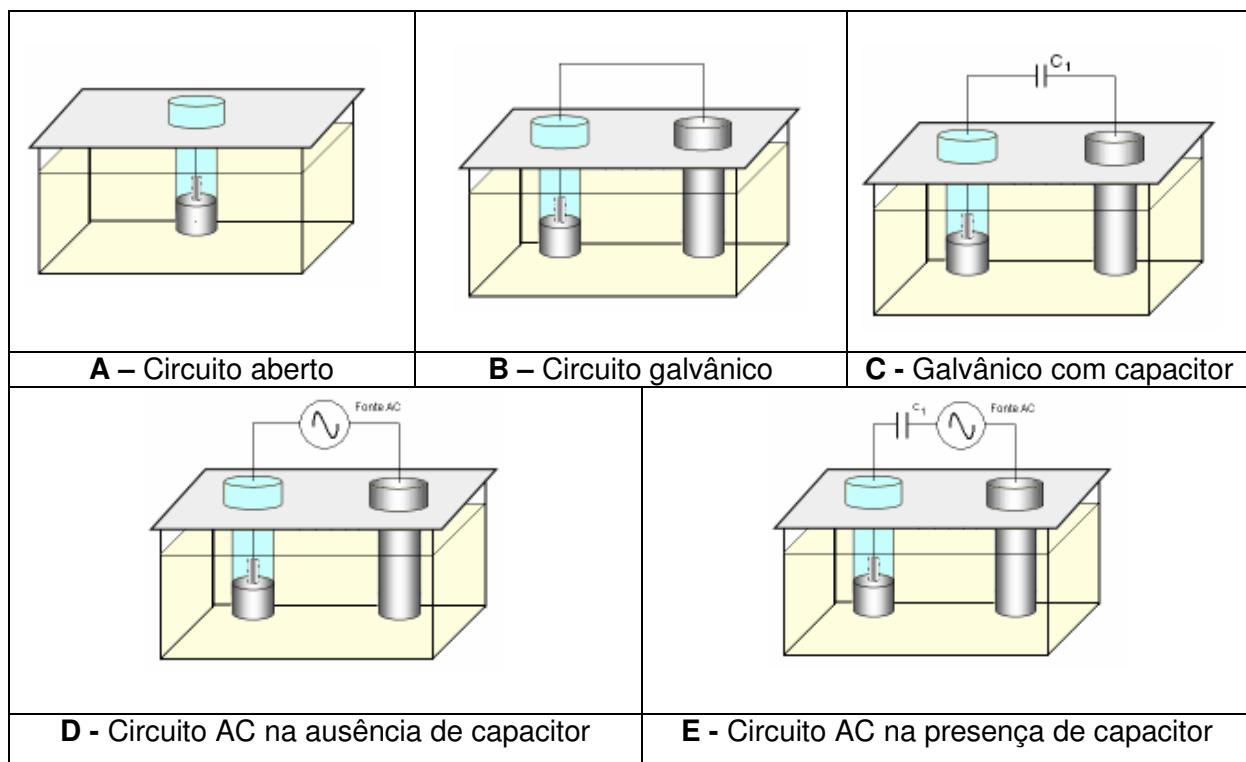


FIGURA 4.1 – Arranjos experimentais realizados em laboratório para avaliar como a corrente galvânica e a corrente AC afetam a taxa de corrosão do cupom.

Para confirmar estes fatos, ensaios de perda de massa foram conduzidos com os cinco arranjos experimentais da Figura 4.1 e os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 4.1.

TABELA 4.1

Resultados dos ensaios conduzidos com os cinco arranjos experimentais apresentados na Figura 4.1.

Condições	Condições experimentais	Taxa de corrosão (mm/a)	Incremento (mm/a)
$T = 25^\circ\text{C}$ $\text{pH}_{\text{initial}} = 4,0$ $\rho = 10.000 \Omega \cdot \text{cm}$ $F = 60 \text{ Hz}$	Círculo aberto (Montagem A)	0,20	---
	Círculo galvânico (Montagem B)	0,56	0,36 ⁽¹⁾
	Círculo galvânico com capacitor (Montagem C)	0,20	---
	50 A/m ² de corrente AC sem capacitor (Montagem D)	0,75	0,19 ⁽²⁾
	50 A/m ² de corrente AC com capacitor (Montagem E)	0,39	0,19 ⁽³⁾

Observação: todos os ensaios foram feitos em duplicata e tiveram duração de sete dias.

Nota 1: Incremento (círculo galvânico) = Taxa de corrosão do círculo galvânico – Taxa de corrosão do círculo aberto, ou seja, $0,36 = 0,56 - 0,20$

Nota 2: Incremento (com AC e sem capacitor) = Taxa de corrosão (com AC e sem capacitor) – Taxa de corrosão (círculo galvânico), ou seja, $0,19 = 0,75 - 0,56$

Nota 3: Incremento (com AC e com capacitor) = Taxa de corrosão (com AC e com capacitor) – Taxa de corrosão (círculo galvânico com capacitor), ou seja, $0,19 = 0,39 - 0,20$

Com base nos resultados mostrados na Tabela 4.1, as seguintes conclusões foram obtidas:

- a corrente galvânica contribui para o aumento da taxa de corrosão do cupom, pois se obteve um incremento de 0,36 mm/a, na montagem B, quando comparado à taxa de corrosão do cupom em círculo aberto, montagem A.

- o capacitor eletrolítico bloqueou por completo a corrente galvânica circulante, visto que as taxas de corrosão do cupom em circuito aberto e em circuito galvânico com capacitor foram idênticas e iguais a 0,20 mm/a.
- os incrementos para os ensaios realizados com 50 A/m² de corrente AC, com e sem capacitor, foram idênticas e iguais a 0,19 mm/a.

Assim, decidiu-se que todos os ensaios subseqüentes seriam realizados com capacitor a fim de se eliminar a influência da corrente galvânica na taxa de corrosão do cupom.

4.1.1 Efeito da resistividade e da densidade de corrente AC na taxa de corrosão.

Para verificar o efeito da resistividade e da densidade de corrente AC na taxa de corrosão do cupom de aço-carbono, foram realizados ensaios fixando-se a temperatura nas condições ambiente (25ºC), pH igual a 4,0 e freqüência de corrente alternada 60 Hz. Estes ensaios foram realizados nas resistividades de 5000 Ω.cm e 10000 Ω.cm em circuito aberto e utilizando-se diferentes densidades de corrente AC: 20 A/m², 50 A/m² e 100 A/m². Os resultados destes ensaios encontram-se na Tabela 4.2.

Conforme verificado na Tabela 4.2, foram obtidas maiores taxas de corrosão do cupom em maiores densidades de corrente AC e em meios menos resistivos. Estes resultados já eram esperados, pois, já é bem conhecido na literatura (Padrão Europeu CEN/TS 15280, 2006; POOKOTE e CHIN, 1978; SONG, 2002; FUNK et al, 1992; HELM et al, 1993; GUMMOW et al, 1998) que a taxa de corrosão aumenta com o aumento da densidade de corrente AC e, por parte dos pesquisadores que estudam corrosão pelo solo, já é bem conhecido o fato de que a corrosão é sempre menor em solos de alta resistividade (PEABODY, 2001).

TABELA 4.2

Efeito da resistividade e da densidade de corrente AC na taxa de corrosão

Condições	Resistividade ($\Omega \cdot \text{cm}$)	Densidade de corrente alternada (A/m^2)			
		Círculo aberto	20	50	100
T = 25°C pH=4,0 F = 60 Hz	5000				
Taxa de corrosão (mm/a)		0,22	0,26	0,39	0,67
T = 25°C pH=4,0 F = 60 Hz	10000				
Taxa de corrosão (mm/a)		0,20	0,25	0,32	0,54

4.1.2 Efeito da freqüência da corrente alternada na taxa de corrosão

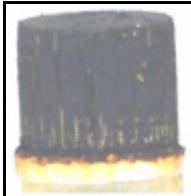
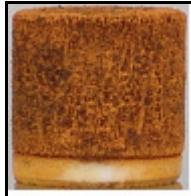
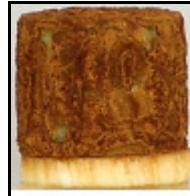
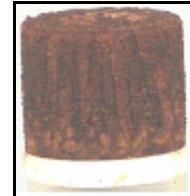
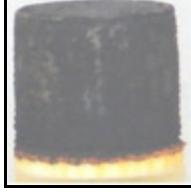
Para verificar o efeito da freqüência da corrente AC na taxa de corrosão do cupom foram realizados ensaios fixando-se a temperatura nas condições ambiente (25°C), pH igual a 4,0 e densidade de corrente AC em 100 A/m^2 . Os ensaios foram realizados nas freqüências de corrente AC de 30 Hz, 60 Hz, 120 Hz e 180 Hz e em duas resistividades diferentes, 5000 $\Omega \cdot \text{cm}$ e 10000 $\Omega \cdot \text{cm}$. Os resultados encontram-se na Tabela 4.3.

Pelos resultados mostrados na Tabela 4.3, pode-se verificar maiores taxas de corrosão para meios menos resistivos.

Quanto ao efeito da freqüência, verifica-se que quanto maior a freqüência da corrente AC menor é a taxa de corrosão do cupom, o que confirma a maioria dos trabalhos encontrados na literatura (GUMMOW et al, 1998; WOLYNEC, 2003; THOMSON, 2004; GENTIL, 2007).

TABELA 4.3

Efeito da freqüência da corrente alternada na taxa de corrosão

Condições	Círculo aberto	Freqüência da corrente AC (Hz)			
		30	60	120	180
$T = 25^\circ\text{C}$ $\text{pH} = 4,0$ $J_{\text{AC}} = 100$ A/m^2 $5000 \Omega\text{-cm}$					
Taxa de corrosão (mm/a)	0,22	0,83	0,67	0,54	0,47
$T = 25^\circ\text{C}$ $\text{pH} = 4,0$ $J_{\text{AC}} = 100$ A/m^2 $10000 \Omega\text{-cm}$					
Taxa de corrosão (mm/a)	0,20	0,74	0,54	0,51	0,43

O efeito da freqüência está relacionado à existência da dupla-camada elétrica, a qual, conforme já visto na revisão bibliográfica (PEABODY, 2001), é composta por um capacitor e um resistor em paralelo. Para altas freqüências, o capacitor da dupla-camada elétrica (C_{dc}) é um curto-circuito e a corrente circulante no resistor da dupla camada (R_{dc}) é nula. Portanto, altas freqüências de corrente AC não devem afetar a taxa de corrosão. Médias freqüências de corrente AC afetam moderadamente a taxa de corrosão, pois parte da corrente AC circulante é dirigida para o capacitor da dupla camada (C_{dc}) e parte da corrente alternada é dirigida para o resistor da dupla camada (R_{dc}). Baixas freqüências de corrente AC afetam muito a taxa de corrosão, visto que a totalidade da corrente AC circulante no sistema é dirigida para o resistor da dupla camada (R_{dc}). A Figura 4.2 mostra o circuito equivalente da dupla-camada elétrica do cupom e a circulação de corrente nas freqüências altas, médias e baixas.

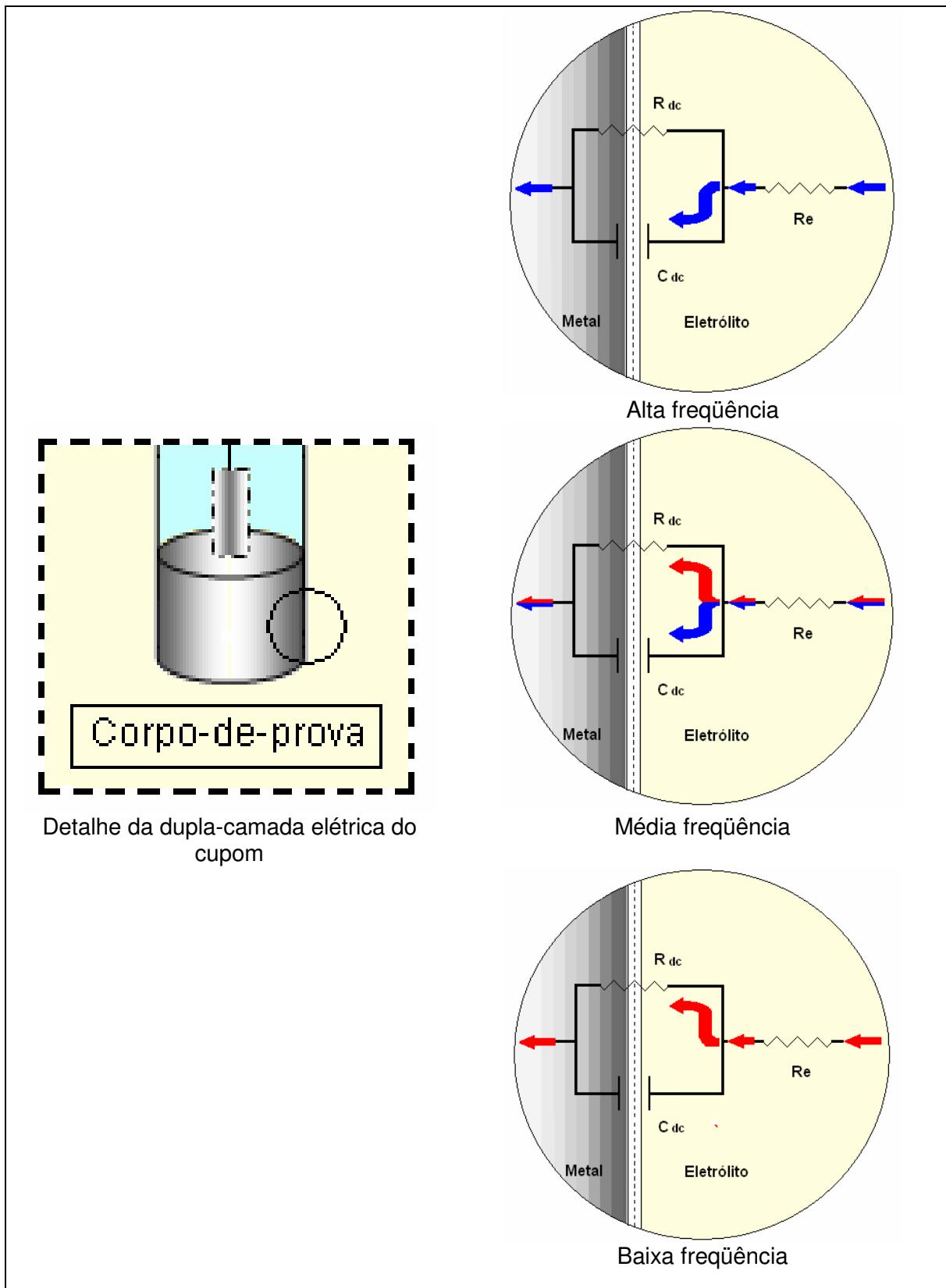


FIGURA 4.2 – Circuito equivalente da dupla-camada elétrica do cupom e a circulação de corrente em altas freqüências, médias freqüências e baixas freqüências.

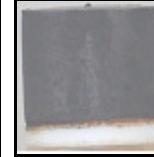
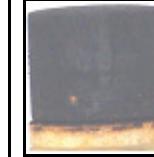
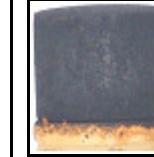
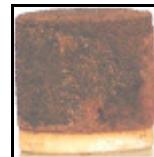
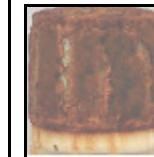
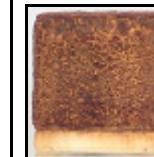
4.1.3 Efeito da temperatura na taxa de corrosão

Para verificar o efeito da temperatura na taxa de corrosão foram realizados ensaios fixando-se o pH inicial igual a 4,0 e freqüência de corrente AC em 60 Hz. Os ensaios foram realizados em duas densidades de corrente AC distintas, 50 A/m² e 100 A/m², resistividades de 5000 Ω.cm e 10000 Ω.cm e temperaturas de 25°C e 40°C. Os resultados dos ensaios encontram-se na Tabela 4.4.

Como já foi verificado em ensaios anteriores, nestes ensaios também foram obtidas maiores taxas de corrosão em meios menos resistivos e em cupons submetidos a maiores densidades de corrente AC. Quanto ao efeito da temperatura, maiores taxas de corrosão foram obtidas nos meios de maior temperatura. Pode-se verificar que o efeito da temperatura contribui para o aumento da taxa de corrosão conforme já evidenciado na literatura (BRUCKNER, 1964; POOKOTE e CHIN, 1978 p. 13; DÉVAY et al, 1964).

TABELA 4.4

Efeito da temperatura na taxa de corrosão.

Condições	25°C			40°C		
	Círculo aberto	50 A/m ²	100 A/m ²	Círculo aberto	50 A/m ²	100 A/m ²
5000 Ω.cm pH _{inicial} = 4,0 f _{AC} = 60 Hz						
Taxa de corrosão (mm/a)	0,22	0,39	0,67	0,25	0,48	0,71
10000 Ω.cm pH _{inicial} = 4,0 f _{AC} = 60 Hz						
Taxa de corrosão (mm/a)	0,20	0,32	0,54	0,23	0,56	0,75

4.1.4 Efeito do pH na taxa de corrosão

Os ensaios para verificar o efeito do pH foram realizados em duas resistividades distintas, $5000 \Omega\text{.cm}$ e $10000 \Omega\text{.cm}$, 100 A/m^2 de densidade de corrente AC e freqüência de corrente alternada 60 Hz. As condições avaliadas foram: pH igual a 4,0 (meio ácido) e pH igual a 10 (meio alcalino). Os resultados encontram-se na Tabela 4.5.

TABELA 4.5

Efeito do pH do meio na taxa de corrosão.

Condições	pH = 4,0		pH = 10	
	Círculo aberto	100 A/m^2	Círculo aberto	100 A/m^2
$5000 \Omega\text{.cm}$ $T = 25^\circ\text{C}$ $f_{\text{AC}} = 60 \text{ Hz}$				
Taxa de corrosão (mm/a)	0,22	0,67	0,16	0,29
$10000 \Omega\text{.cm}$ $T = 25^\circ\text{C}$ $f_{\text{AC}} = 60 \text{ Hz}$				
Taxa de corrosão (mm/a)	0,20	0,54	0,15	0,26

Pode-se verificar pela Tabela 4.5 que foram obtidas maiores taxas de corrosão para meios mais ácidos. Os resultados obtidos já eram esperados, visto que o meio ácido é mais agressivo ao aço-carbono que o meio alcalino (GREGOOR e POURBAIX, 2003).

4.2 Curvas de Potencial DC em função da Densidade de Corrente DC para verificação da influência da corrente AC

Estes ensaios tiveram a finalidade de mostrar como varia o potencial de eletrodo E_{DC} de cupons de corrosão imersos em meios de diferentes resistividades e com a imposição da corrente DC e da corrente AC.

Caso o cupom esteja com potencial acima do potencial de equilíbrio estará em estado termodinâmico ativo e, caso esteja com potencial abaixo do equilíbrio, estará no estado termodinâmico imune (DUTRA e NUNES, 1999; BS EN12954, 2001; GREGOR e POURBAIX, 2003; PETROBRAS N-2801).

Na Figura 4.3 pode-se observar que as imposições das densidades de corrente DC menores que zero (proteção catódica) levaram o cupom a um estado termodinâmico imune e densidades de correntes DC maiores que zero levaram o cupom ao estado termodinâmico ativo, para todas as resistividades trabalhadas. Comparando-se cupons protegidos catodicamente e imersos em meios de resistividades distintas, observou-se que meios mais resistivos exigem menores intensidades de corrente DC para mantê-los protegidos. Por exemplo, para levar o cupom ao potencial de proteção de $-1,3V_{ECS}$, necessitou-se de cerca de -8000 mA/m^2 de corrente DC para resistividade $5000 \Omega\text{.cm}$ e cerca de -4000 mA/m^2 de corrente DC para resistividade de $10000 \Omega\text{.cm}$. Para a resistividade de $65000 \Omega\text{.cm}$, pequenas variações de corrente DC foram capazes de levar o cupom à imunidade.

A diferença entre as curvas deve-se exclusivamente à queda ôhmica, que é maior quanto maior a resistividade do meio. Observando tais curvas, verifica-se que, mesmo nas condições de laboratório, nas quais é possível a aproximação do eletrodo de referência ao cupom de corrosão, a queda ôhmica exerce uma influência significativa, especialmente em soluções que representam solos de alta resistividade.

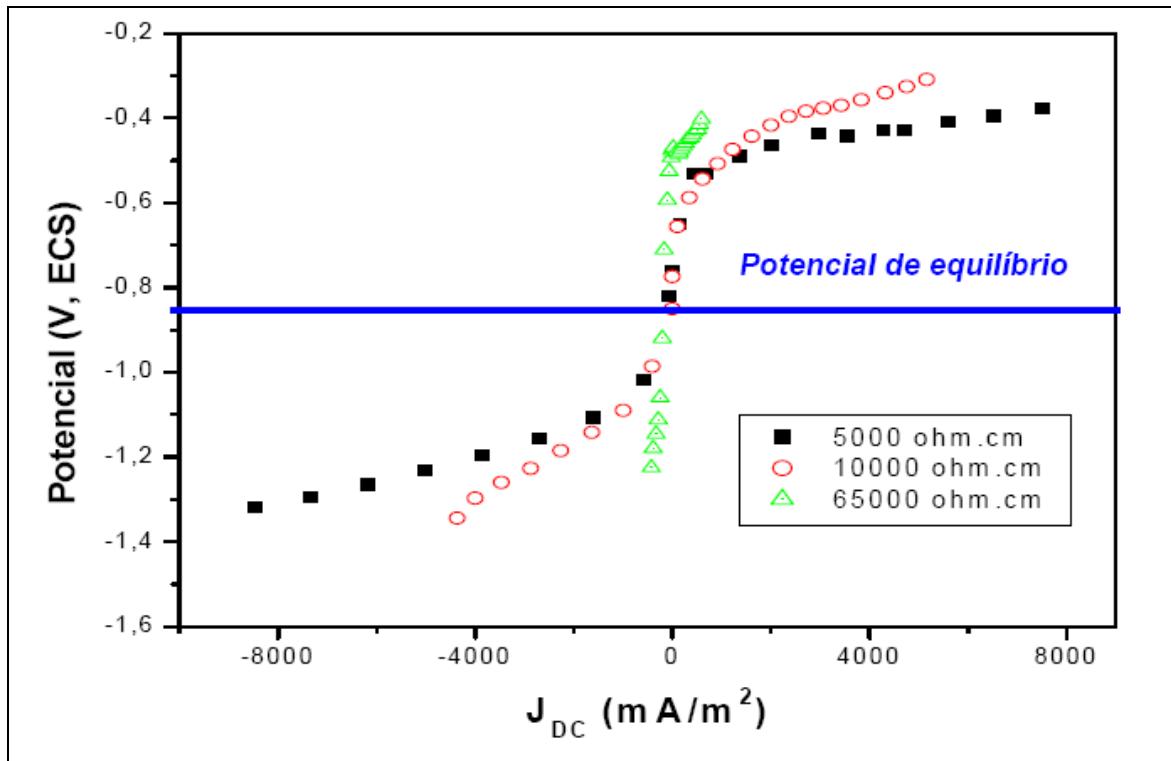


FIGURA 4.3 - Curvas de potencial de proteção versus densidade de corrente de proteção catódica para um sistema na ausência de corrente AC.

A Figura 4.4 mostra as variações do potencial de eletrodo para o cupom imerso num meio de resistividade de 5000 $\Omega\text{.cm}$ em função da corrente DC e sob a influência de corrente AC. As medidas de potencial foram realizadas aplicando-se densidades de corrente DC variando de -10 000 mA/m² a 10 000 mA/m², com sobreposição de corrente AC.

Na ausência de corrente AC, a curva preta da Figura 4.4 é a própria curva de polarização do aço-carbono no meio estudado (PANOSSIAN, 1993). Aplicaram-se densidades de corrente AC com intensidades de 50 A/m², 100 A/m², 147 A/m² e 200 A/m².

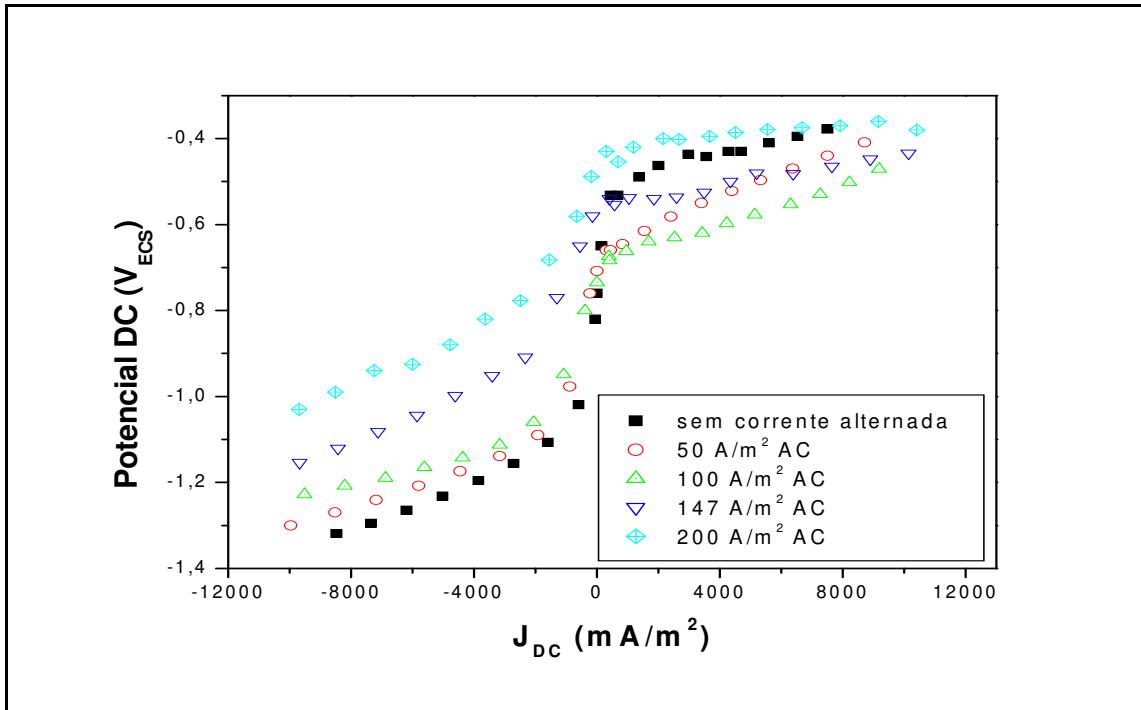


FIGURA 4.4 - Curvas de potencial de proteção E_{DC} em função da densidade de corrente J_{DC} , em meio de resistividade $5000 \Omega \cdot \text{cm}$, para diferentes densidades de corrente AC.

Pode-se verificar que as curvas de potencial versus densidade de corrente DC seguem um formato equivalente, para todas as densidades de corrente AC impostas ao sistema. Verificaram-se aumentos de potencial de eletrodo com a diminuição da proteção catódica e com a intensificação da corrente alternada, visto que, com o aumento da corrente alternada, as curvas são deslocadas para cima em relação à curva sem corrente alternada. Como consequência desta intensificação, o cupom tende a passar do estado termodinâmico imune para o estado termodinâmico ativo.

As medidas também foram realizadas em meios com resistividade de $10000 \Omega \cdot \text{cm}$ e $65000 \Omega \cdot \text{cm}$, como mostrado nas Figuras 4.5 e 4.6, respectivamente. Observando tais figuras, pode-se verificar que o aumento da resistividade causa distorções mais acentuadas do que aquelas observadas nas Figuras 4.3 e 4.4, visto que a queda ôhmica é aumentada não só pelo aumento da resistividade como pelo aumento da corrente total circulante com a imposição da corrente AC.

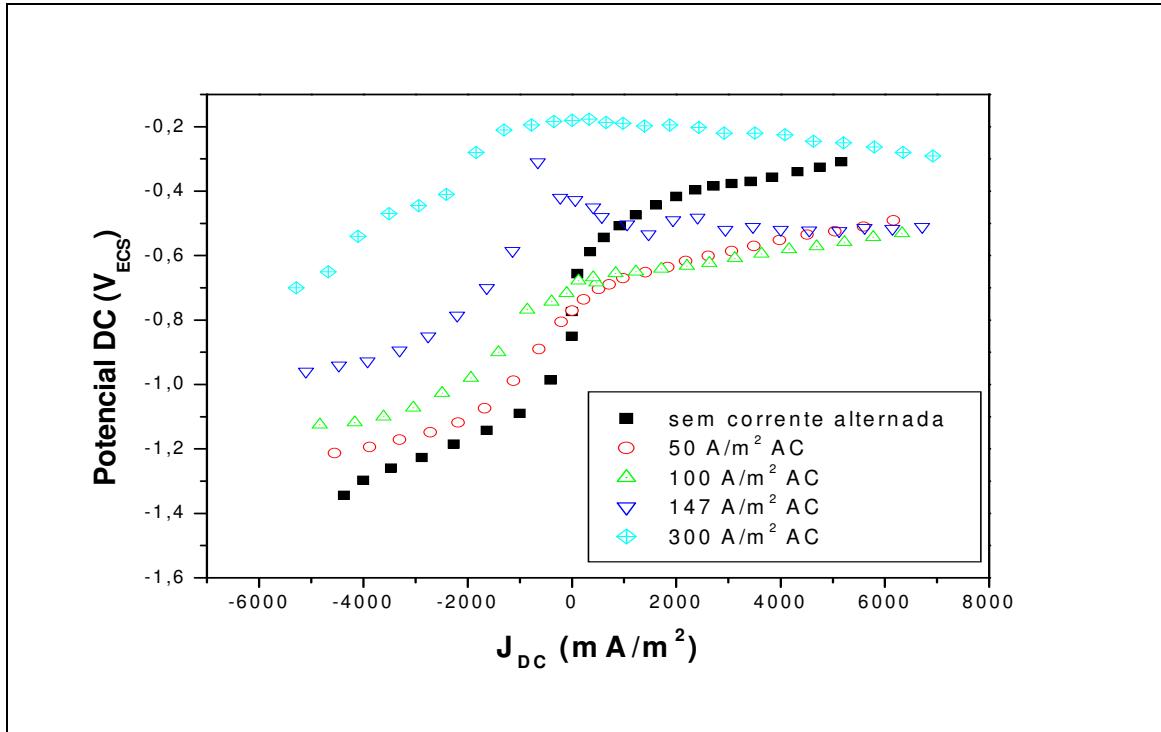


FIGURA 4.5 Curvas de potencial de proteção E_{DC} em função da densidade de corrente J_{DC} , em meio de resistividade $10000 \Omega \cdot \text{cm}$, para diferentes densidades de corrente AC.

Na figura 4.5 também são observados deslocamentos das curvas de potencial para cima, em relação à curva sem corrente alternada, na medida em que a corrente alternada se intensifica. Além disso, o meio de resistividade de $10000 \Omega \cdot \text{cm}$ exigiu menores densidades de corrente DC (proteção catódica) para levar o cupom à imunidade quando comparada à resistividade de $5000 \Omega \cdot \text{cm}$ (Figura 4.4) e 300 A/m^2 de corrente alternada foi capaz de torná-lo completamente ativo na ampla faixa de corrente DC imposta.

Da Figura 4.6, pode-se verificar que menores intensidades de corrente DC (proteção catódica) são necessárias para tornar o cupom imune, quando comparadas com as duas outras resistividades mencionadas anteriormente (Figuras 4.4 e 4.5). Como explicado, corpos-de-prova imersos em meios mais resistivos exigem menores intensidades de corrente de proteção para o sistema atingir a imunidade (Padrão Europeu CEN/TS 15280, 2006; POOKOTE e CHIN, 1978; SONG, 2002; FUNK et al, 1992; HELM et al, 1993; GUMMOW et al, 1998). Também foram observados deslocamentos das curvas para potenciais mais elevados, na medida em que a corrente alternada se intensifica, levando o corpo-de-prova para o estado termodinâmico ativo.

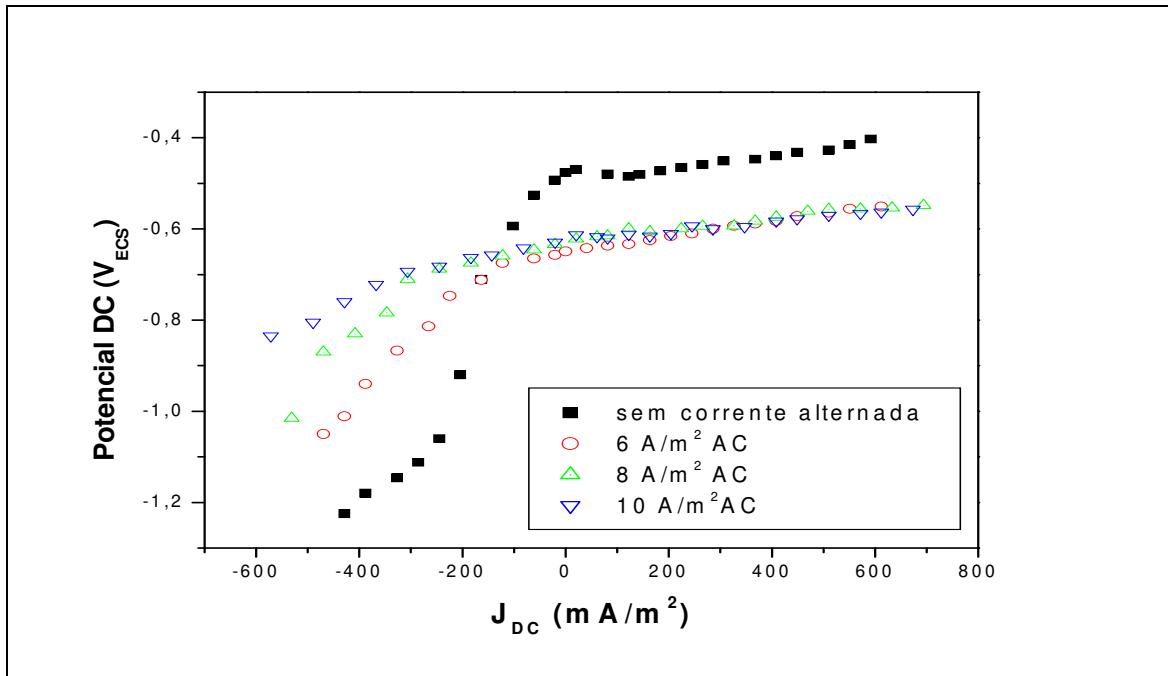


FIGURA 4.6 - Curvas de potencial de proteção E_{DC} em função da densidade de corrente J_{DC} , em meio de resistividade $65000 \Omega \cdot \text{cm}$, para diferentes densidades de corrente AC.

Pelos resultados de medidas de potencial mostradas nas Figuras 4.4, 4.5 e 4.6 pode-se verificar que cupons imersos em um meio de resistividade de $65000 \Omega \cdot \text{cm}$ são muito mais vulneráveis à ação da corrente alternada que cupons imersos em meio de resistividade $5000 \Omega \cdot \text{cm}$ ou $10000 \Omega \cdot \text{cm}$, mas exige menores intensidades de corrente de proteção catódica para protegê-lo. Por exemplo, com proteção catódica, 10 A/m^2 de corrente alternada torna ativo o corpo-de-prova imerso em meio de resistividade $65000 \Omega \cdot \text{cm}$, enquanto que, para $10000 \Omega \cdot \text{cm}$, 100 A/m^2 de corrente alternada não é suficiente para torná-lo completamente ativo na ampla faixa de corrente de proteção catódica imposta. Em suma, corpos-de-prova imersos em meios mais resistivos exigem menores densidades de correntes catódicas para protegê-los e são mais vulneráveis à ação da corrente AC.

4.3 Ensaios em cupons com proteção catódica e com interferência AC

Nestes ensaios aplicou-se corrente de proteção catódica no cupom e em seguida aplicaram-se valores crescentes de corrente alternada, utilizando a metodologia e os arranjos experimentais mostrados no item 3.5. Utilizou-se a solução de sulfato de sódio de resistividade 5.000 $\Omega \cdot \text{cm}$ e com pH inicial de 4. A corrente alternada, simulando uma interferência, foi imposta com a freqüência de 60 Hz nos eletrodos auxiliares, a simulação está representada na Figura 4.7.

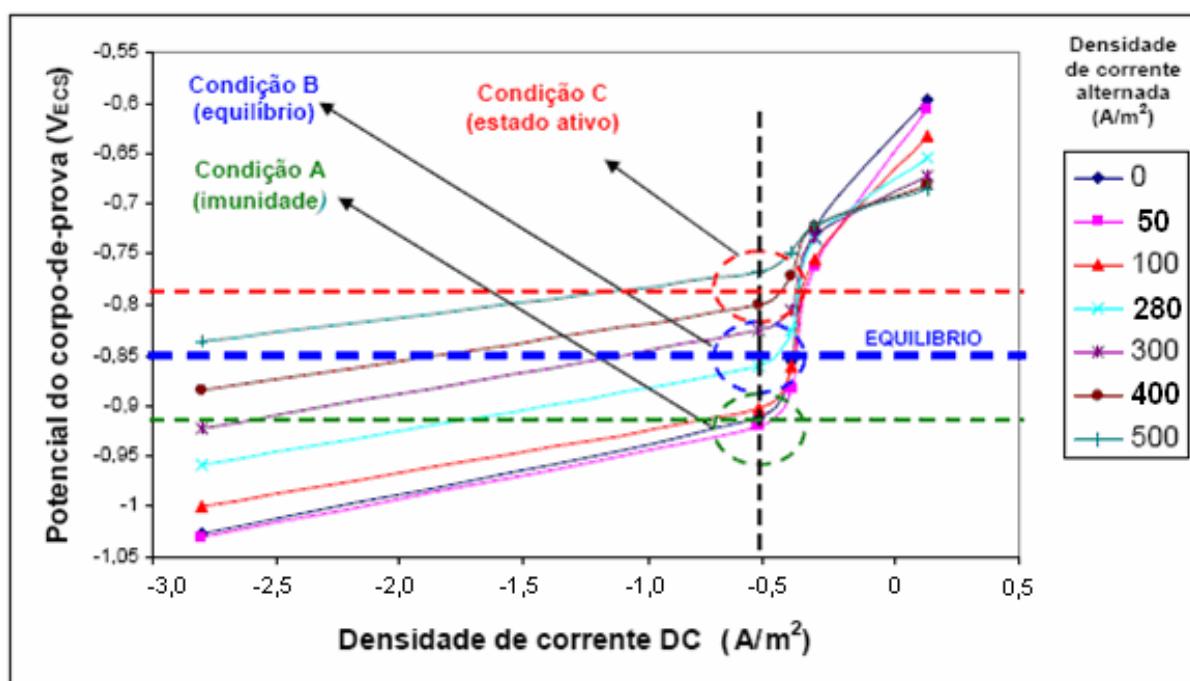


FIGURA 4.7 – Ensaio na presença de proteção catódica simulando três condições: A) imunidade, B) equilíbrio e C) estado ativo ou de corrosão

Consideraram-se três condições de ensaio distintas:

- **condição A:** aplicou-se uma densidade de corrente de proteção catódica (J_{DC}) de 0,5 A/m^2 e uma densidade de corrente alternada (J_{AC}) de 50 A/m^2 . O potencial de proteção E_{DC} medido entre o cupom e o eletrodo de referência de calomelano saturado era de -0,93 V (ECS), deste modo o cupom manteve-se abaixo do potencial de equilíbrio do ferro (-0,85 V, ECS), ou seja, na condição de imunidade;
- **condição B:** aplicou-se uma densidade de corrente de proteção catódica (J_{DC}) de 0,5 A/m^2 e uma densidade de corrente alternada (J_{AC}) de 280 A/m^2 . O potencial de proteção

E_{DC} medido entre o cupom e o eletrodo de referência de calomelano saturado era de -0,85 V (ECS), deste modo o cupom manteve-se no potencial de equilíbrio do ferro (-0,85 V, ECS), ou seja, na condição de equilíbrio;

- **condição C:** aplicou-se uma densidade de corrente de proteção catódica (J_{DC}) de 0,5 A/m² e uma densidade de corrente alternada (J_{AC}) de 400 A/m². O potencial de proteção E_{DC} medido entre o cupom e o eletrodo de referência de calomelano saturado era de -0,77 V (ECS), deste modo o cupom manteve-se acima do potencial de equilíbrio do ferro (-0,85 V, ECS), ou seja, na condição de corrosão.

Os três experimentos foram acompanhados de medidas de potencial de eletrodo, determinação da taxa de corrosão e exame visual com documentação fotográfica. Os resultados encontram-se na Tabela 4.6.

TABELA 4.6
Ensaios com proteção catódica em cupons e com interferência de corrente AC

	Condição A - Imunidade		Condição B - Equilíbrio		Condição C - Estado ativo	
Antes do ensaio						
Após o ensaio						
Condições e resultados	Resistividade = 5000 $\Omega \cdot \text{cm}$ Densidade de corrente AC = 50 A/m ² Densidade de corrente DC = -0,5 A/m ² Dens. AC / Dens. DC = 100 Frequência AC = 60 Hz Potencial de eletrodo = -0,93 V, ECS Temperatura = ambiente pH inicial = 4,0 Não foi verificado corrosão	Resistividade = 5000 $\Omega \cdot \text{cm}$ Densidade de corrente AC = 280 A/m ² Densidade de corrente DC = -0,5 A/m ² Dens. AC / Dens. DC = 560 Frequência AC = 60 Hz Potencial de eletrodo = -0,85 V, ECS Temperatura = ambiente pH inicial = 4,0 Taxa de corrosão = 0,04 mm/ano	Resistividade = 5000 $\Omega \cdot \text{cm}$ Densidade de corrente AC = 400 A/m ² Densidade de corrente DC = -0,5 A/m ² Dens. AC / Dens. DC = 800 Frequência AC = 60 Hz Potencial de eletrodo = -0,77 V, ECS Temperatura = ambiente pH inicial = 4,0 Taxa de corrosão = 0,15 mm/ano			

Observação: todos os ensaios foram realizados em duplicata com duração de 7 dias.

Observando-se a Tabela 4.6, verifica-se nitidamente que o cupom de corrosão mantido na condição de imunidade não apresentou alteração do aspecto visual e nem perda de massa. O cupom de corrosão mantido na condição de equilíbrio apresentou escurecimento, indicando a ocorrência de corrosão incipiente, confirmada pela tênue perda de massa do cupom. Já no caso do cupom de corrosão mantido no estado ativo, verificou-se corrosão mais acentuada e perda de massa significativa. Nos três casos, os valores de potencial medidos indicaram claramente o estado termodinâmico de cada cupom de corrosão.

Estes resultados mostram o efeito da aplicação de corrente alternada em sistemas protegidos catodicamente e a importância fundamental das medidas de potencial para avaliar os riscos de corrosão.

5 CONCLUSÃO

Com base nos resultados dos ensaios realizados em sistemas sem proteção catódica, constatou-se que a densidade de corrente alternada a que os dutos enterrados estão expostos, a resistividade do meio em que estão enterrados, a temperatura, o pH e a freqüência da corrente alternada, influenciam no processo de corrosão da seguinte forma:

- quanto maior a densidade de corrente alternada, maior é a taxa de corrosão AC;
- quanto menor a resistividade do solo, maior a taxa de corrosão AC;
- quanto maior a temperatura, maior a taxa de corrosão AC;
- quanto mais ácido o meio, maior a taxa de corrosão AC;
- quanto menor a freqüência, maior a taxa de corrosão AC.

Para sistemas sem proteção catódica constatou-se que a corrosão por corrente alternada é inevitável para quaisquer densidades de corrente. Quando um potencial de corrente alternada (E_{AC}) é acoplado ao potencial de equilíbrio do sistema, o ciclo anódico dessa corrente alternada eleva o potencial de eletrodo do sistema para a condição de corrosão e assim, por menor que seja a amplitude do potencial AC, irá resultar na corrosão do duto.

Os resultados dos ensaios em sistemas com proteção catódica por corrente impressa comprovaram a existência de corrosão provocada pela corrente alternada, mesmo em cupons protegidos catódicamente, o que nos levam a crer que os critérios adotados na literatura para verificar possíveis interferências de corrente alternada e a probabilidade de corrosão, ainda não são totalmente confiáveis, pois não consideram o acoplamento do potencial de corrente contínua com o potencial de corrente alternada ($E_{DC} + E_{AC}$).

É fundamental para a avaliação da probabilidade de corrosão por corrente alternada, além das medições do potencial de proteção catódica (E_{DC}) realizadas tradicionalmente, a medição do potencial de corrente alternada (E_{AC}) acoplado com o potencial de proteção, preferencialmente medido com um osciloscópio ($E_{DC} + E_{AC}$), comparando a forma de onda deste acoplamento com o potencial de equilíbrio do duto.

6 TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros, citam-se:

- conduzir estudos para verificar os mecanismos que envolvem a corrosão por corrente alternada;
- conduzir estudos para determinar critérios de verificação da ocorrência de corrosão alternada. Neste contexto, focar o desenvolvimento de equipamentos para tais medições em campo;
- conduzir estudos para determinar ações preventivas a serem adotadas para evitar a corrosão por corrente alternada. Neste contexto, focar além da proteção catódica, as correntes de interferências induzidas no duto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANSI / IEEE STANDARD 80. **Guide for safety in AC Substation Grounding.** 2000.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. G1-90. Standard practice for preparing, cleaning, and evaluating corrosion test specimens. Philadelphia, 7 p.

BRUCKNER, W. H. **The Effects of 60 Cycle Alternating Current on the Corrosion of steels and Other Metals Buried in Soils.** University of Illinois, Technical Bulletin No. 470, November 1964.

BS EN 12954 – BRITISH STANDARD. **Cathodic Protection of Buried or Immersed Metallic Structures-General Principles and Application for Pipelines.** Jan. 2001, 32 p.

BUCHLER, M.; SCHONEICH, H. G.; STALDER, F. **Discussion of criteria to assess the alternating current corrosion risk of cathodically protected pipelines.** CEOCOR/04, Committee on the Study of Pipe Corrosion and Protection, 7 International Congress, Dresden, Germany, June 2004, 19 p.

CASTINHEIRAS, W. G.; NIELSEN, M. M. **Influência de Linhas de Transmissão de Energia Elétrica em Tubulações Revestidas Enterradas.** In: 14 SEMINÁRIO NACIONAL DE CORROSÃO DA ABRACO, 1987, p. 129-137.

CEN/TS 15280. **Evaluation of A.C. Corrosion Likelihood of Buried Pipelines – Application to Cathodically Protected Pipelines.** 2006.

COLLET, E. et al. **Corrosion due to Ac influence of very high voltage power lines on polyethylene-coated steel pipelines: evaluation of risks – preventive measures.** Anti-Corrosion Methods and materials, Vol. 48, n. 4, France, 2001 p.221-226.

DÉVAY, J.; TAKACS, T. e ABD EL-REHIM, S.S. **Electrolytic AC Corrosion of Iron.** Acta Chimica, Vol. 52, 1967, p. 65.

DIN 50925 - **Verification of the Effectiveness of the Cathodic Protection of Buried Structures.** Berlin, Germany, 1992.

DUTRA, A. C.; NUNES, L. de P. **Proteção Catódica**. 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 1999, 246 p.

FLOYD, R. D. **Testing and Mitigation of AC Corrosion on 8" Line: a Field Study**. CORROSION/2004, paper n. 210, Houston, Texas, 2004.

FUNK, D.; PRINZ, W. e SCHONEICH, H.G. **Investigations of AC Corrosion in Cathodically Protected Pipes**. 3R International, 31, German, June, 1992, p. 336 – 341.

GENTIL, V. **Corrosão**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007, 353 p.

GOIDANICH, L. L.; ORMELLESE, M. e PEDEFERRI, M. P. **Influence of AC on carbon steel corrosion in simulated soil conditions**. 16 ICC, paper n. 04-03, Beijing, China, Sept. 2005.

GORAN, C. **Alternating current corrosion on cathodically protected steel in soil – A long term field investigation**. CEOCOR/2000, Committee on the Study of Pipe Corrosion and Protection, 5 International Congress, Bruxelles, Belgium, 2000.

GREGOOR, R.; POURBAIX, A. **Detection of AC Corrosion**. 3R International, Vol. 42, n. 6, 2003, p. 289 – 395.

GUMMOW, R. A.; WALKELIN, R. G. e SEGAL, S. M. **AC Corrosion – A New Challenge to Pipeline Integrity**. CORROSION/98, paper n. 566, Houston, Texas, 1998, p. 18.

GUTEMBERG, S. P.; MAGALHÃES, A. A. **Técnicas de monitoramento e controle de processos corrosivos**. ABRACO, Rio de Janeiro, 2003, 48 p.

HELM, G.; HEIM, Th.; HEINZEN, H. e SCHWENK, W. **Investigation of Corrosion of Cathodically Protected Steel Subjected to Alternating Currents**. 3R International, 32, German, May 1993, p. 246 – 249.

HIPOLITO, J. L. O. **Interferência Por Corrente Alternada em Dutos**. In: RIO PIPELINE CONFERENCE & EXPOSITION, IBP 495_03, Rio de Janeiro, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás – IBP, out. 2003.

HOSOKAWA, Y.; KAJIYAMA, F.; NAKAMURA, Y. **New cathodic protection criteria based on direct and alternating current densities measured using coupons and their application to modern steel pipelines.** CORROSION/04, Vol. 60, n. 3, Houston, Texas, March 2004, p. 304-312.

IBP – INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO E GÁS. **Curso Inspeção/Operação de Sistemas de Proteção Catódica em Dutos Terrestres e Tanques de Armazenamento.** ABRACO, Vitória, Maio 2005, 192 p.

JORNAL VALE PARAIBANO. Disponível em:
<<http://jornal.valeparaibano.com.br/2004/02/20/lit/oleo1.html>>. Acesso em: 18 maio 2007.

KASAHARA, K.; SOTO, T.; ADACHI, H. **An Improved Method for Measuring Pipe-to-Soil Potential and Current Density at Cathodically Protected Pipelines.** Materials Performance, Vol. 18, n. 3, March 1979.

NACE International, 2007. **AC Corrosion State-of-the-Art: Corrosion Rate, Mechanism, and Mitigation Requirements**, NACE TG 327, Houston, Texas, Fev.2007, 42 p.

NACE Standart RP0177. **Mitigation of Alternating Current and Lightning Effects on Metallic Structures and Corrosion Control Sistems.** NACE International, revised March 1995, Houston, Texas, 1995.

NAGAYASSU, V. Y. **Análise crítica do ensaio NACE TM-0172 para verificação da agressividade de derivados de petróleo.** São Paulo, SP: EDUSP, 2006. Dissertação de mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais 177p.

NIELSEN, L. V. e COHN, P. **AC corrosion and electrical equivalent diagrams.** CEOCOR, Committee on the Study of Pipe Corrosion and Protection, 5 International Congress, Bruxelles, Belgium, 2000.

PANOSSIAN, Z. **Corrosão e proteção contra corrosão em equipamentos e estruturas metálicas.** V.1, São Paulo: IPT, 1993, 280 p.

PANOSSIAN, Z.; ALMEIDA, N. L.; ABUD, S. E. F.; LEITE, M. P. F.; SILVA, D. L.; LAURINO, E. W.; HIPÓLITO, J. L. O.; PIMENTA, S. G. e ALBERTINI, J. A. C. **Proposição de um Mecanismo e de um Critério de Previsão de Corrosão por Corrente Alternada em Dutos Enterrados.** INTERCORR 2008, paper n.106, Recife, Pernambuco, maio, 2008, 43 p.

PEABODY'S, A.W. **Control of Pipeline Corrosion.** 2. ed. Houston, Texas: NACE International, 2001 (1967), 347 p.

PETROBRAS. Disponível em:

<<http://www2.petrobras.com.br/portal/petrobras.htm>>.

Acesso em: 29 maio 2007.

PETROBRAS N-2634. **Avaliação de Corrosão Interna Através de Cupons de Perda de Massa.** Rev. A, Comissão de Normas Técnicas - CONTEC, Rio de Janeiro: Ago. 2003, 10 p.

PETROBRAS N-2801. **Inspeção de Sistemas de Proteção Catódica de Dutos Terrestres.** Comissão de Normas Técnicas - CONTEC, Rio de Janeiro: Dez. 2008, 43 p.

POOKOTE, S. R. e CHIN, D.T. **Effect of Alternating Current on the Underground Corrosion of Steels, Materials Performance.** Vol. 17, (3), march 1978: p. 9-15.

PRINZ, W. **Alternating Current Corrosion of Cathodically Protected Pipelines.** International Gas Research conference, Orlando, Florida, November, p. 16-19, 1992

RAGAULT, I. **AC Corrosion Induced by V.H.V Electrical Lines on Polyethylene Coated Steel Gas Pipelines.** CORROSION/98, paper n. 557, Houston, Texas, 1998, 14 p.

SMART III, J. S.; DIRK L.; OOSTENDORP, D.L. e WOOD, W. A. Induced AC creates problems for pipelines in utility corridors. **Pipeline & Gas Industry**, Houston, Texas, Vol. 82, n. 6, p.10, June. 1999.

SONG, H.; KIM, Y.; LEE, S.; KHO, Y.; PARK, Y. **Competition of AC and DC Current in AC Corrosion Under Cathodic Protection.** CORROSION/2002, paper n. 02117, Houston, Texas, 2002.

STALDER, F. **AC corrosion of cathodically protected pipelines.** Guidelines for risk assessment and mitigation measures, Annex n. 5-4, CEOCOR, Committee on the Study of Pipe Corrosion and Protection, Bruxelles, Belgium, 2001.

THOMPSON, I. **A Review of Induced AC Corrosion.** Advantic Ltd. R6847, London, England, Feb. 2004, 31p.

TRANSPETRO. Disponível em:

[<http://www.transpetro.com.br/portugues/empresa/transpetro/transpetro.shtml>](http://www.transpetro.com.br/portugues/empresa/transpetro/transpetro.shtml).

Acesso em: 17 maio 2007.

TRANSPETRO GÁS NATURAL – Disponível em:

[<http://www.transpetro.com.br/portugues/empresa/gasnatural/gasnatural.shtml>](http://www.transpetro.com.br/portugues/empresa/gasnatural/gasnatural.shtml).

Acesso em: 29 maio 2007.

TRANSPETRO NÚMEROS. Disponível em:

[<http://www.transpetro.com.br/portugues/empresa/transpetro/transpetroemnumeros.shtml>](http://www.transpetro.com.br/portugues/empresa/transpetro/transpetroemnumeros.shtml).

Acesso em: 18 ago. 2007.

TRANSPETRO OLEODUTOS. Disponível em:

[<http://www.transpetro.com.br/portugues/empresa/dutosTerminais/Oleodutos.shtml>](http://www.transpetro.com.br/portugues/empresa/dutosTerminais/Oleodutos.shtml).

Acesso em: 17 maio 2007.

TRANSPETRO TERMINAIS. Disponível em:

[<http://www.transpetro.com.br/portugues/empresa/dutosTerminais/dutosTerminais.shtml>](http://www.transpetro.com.br/portugues/empresa/dutosTerminais/dutosTerminais.shtml).

Acesso em: 17 maio 2007.

TRENCH, C. J.; WEESNER, M.D. **5 year study shows pipeline spills reduced.** Oil & Gas Journal, Houston, Texas, April 2006.

WAKELIN, R.; GUMMOW, R. e SEGALL, S. **AC Corrosion – Case Histories, Test Procedures, and Mitigation.** CORROSION/98, paper n. 98565, Houston, Texas, 1998, p.7.

WOLYNCE, S. **Técnicas Eletroquímicas em Corrosão.** São Paulo: Edusp, 2003, 173 p.