

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

*José Álvaro de Carvalho Albertini*¹

*Susana M. Giampietri Lebrão*²

*Mário Leite Pereira Filho*³

1. *Engenheiro Pleno - PETROBRAS TRANSPETRO, Mestrando em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos - Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia.*
2. *Professora Doutora - Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia.*
3. *Doutor - Instituto de Pesquisa Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT*

Resumo

Os dutos metálicos enterrados utilizados no transporte de fluidos, instalados em áreas comuns às linhas de transmissão de energia elétrica em alta tensão, têm apresentado histórico de corrosão externa mesmo protegidos catodicamente. Estudos atribuem esse problema à presença de corrente alternada induzida na tubulação pelas linhas de transmissão de energia. As empresas de transporte de fluidos, 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 esse tipo de corrosão. No presente trabalho estuda-se e avalia-se, por meio 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 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 do potencial de proteção catódica, com o pH do meio, com a temperatura e com a frequência 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 se verificarem possíveis interferências de corrente alternada, ainda não são totalmente confiáveis.

1. Introdução

O transporte de fluidos por dutos é o principal meio utilizado pelas companhias de petróleo, gás e saneamento. Os dutos metálicos enterrados estão sujeitos à 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. Tais dutos são, em geral, protegidos externamente por revestimentos de espessuras variadas e o mecanismo básico de proteção dá-se por barreira entre o metal e o meio corrosivo. Por melhor que seja o revestimento, não se pode garantir a ausência de falhas. Nessas falhas, pelo fato de o metal constituinte do duto ficar em contato direto com o solo, o processo de corrosão é estabelecido e, por essa razão, adota-se a proteção catódica como técnica complementar aos revestimentos externos anticorrosivos. O principal método utilizado para a proteção desse tipo de corrosão é a proteção catódica por corrente impressa. Porém na literatura há relatos de casos de corrosão em dutos enterrados, protegidos ou não catodicamente, atribuída à 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 fluidos 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. Na Figura 1 apresenta-se um exemplo de cruzamento entre linhas de transmissão de alta tensão com dutos enterrados. Esse fato aumentou a preocupação das empresas com as interferências elétricas causadas nos dutos. Essa preocupação abrange principalmente a segurança pessoal dos funcionários, que geralmente estão em contato com esses dutos, e os 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, seus derivados e gás natural no País, desenvolve um projeto de pesquisa em parceria com o Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, IPT, com o intuito de não só entender o mecanismo de corrosão por corrente alternada como também desenvolver ações para evitá-la.

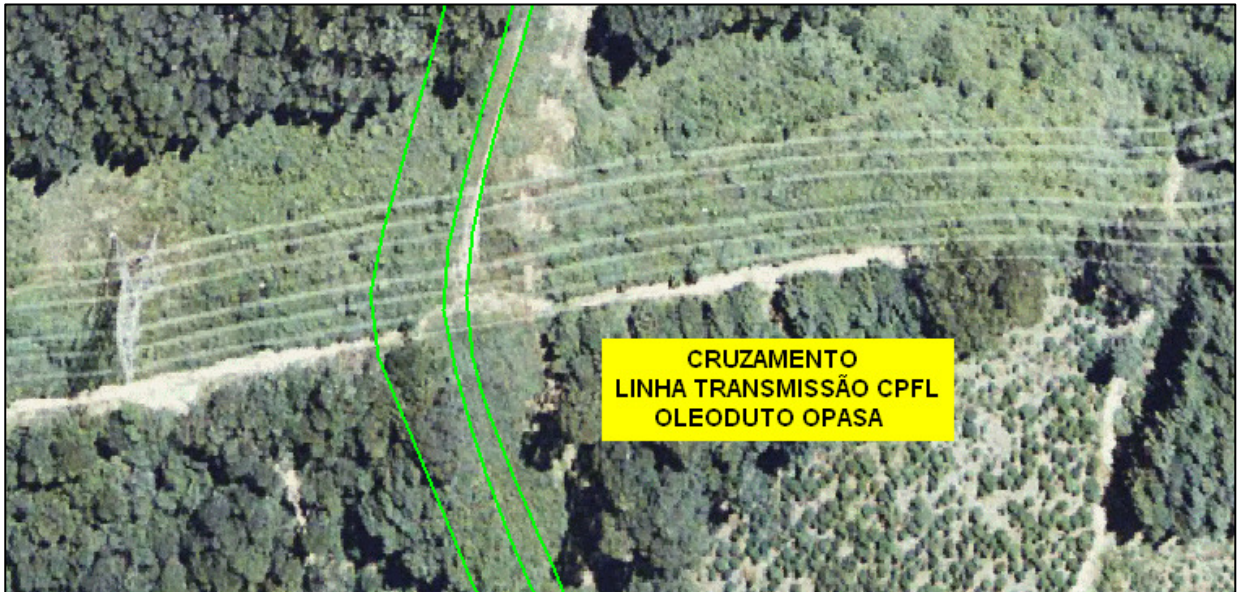


FIGURA 1 – Cruzamento de Linha de Transmissão da CPFL com o Oleoduto Paulínia-Baruerí.

No presente trabalho estuda-se e avalia-se, por meio de abordagem teórica e ensaios laboratoriais, 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.

As seguintes variáveis foram avaliadas: a densidade de corrente alternada (J_{AC}) a que os dutos estão expostos, a resistividade do meio em que eles estão enterrados, a densidade de corrente de proteção catódica (J_{DC}), o pH do meio, a frequência da corrente alternada e a temperatura. Foram avaliados sistemas sem proteção catódica e com proteção catódica por corrente impressa.

2. Metodologia e Resultados

Devido à inexistência de normas ou procedimentos específicos apropriados para a avaliação das variáveis que influenciam o 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 no Laboratório de Corrosão e Laboratório de Equipamentos Elétricos do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, IPT, por intermédio do projeto de pesquisa PROTAN, Programa de Transporte da PETROBRAS, formado pelas equipes da PETROBRAS/CENPES: Consultor Sênior Gutemberg de S. Pimenta, da PETROBRAS/TRANSPETRO: Consultores Técnicos João Hipólito de L. Oliver e Eduardo W. Laurino e do IPT: Dr^a. Zehbour Panossian, Pesquisador Neosvaldo L. de Almeida e Químico Sérgio E. A. Filho.

Na primeira fase, foram desenvolvidos ensaios sem proteção catódica, com e sem a influência de corrente alternada, variando parâmetros, tais como resistividade, nível de corrente AC, temperatura e frequência da corrente AC.

Na segunda fase, desenvolveram-se 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 cilíndricos de aço-carbono COPANT 1020, com cerca de 10 mm de altura e 12 mm de diâmetro, totalizando uma área de 4,8 cm² conforme Figura 2a e contra-eletrodo de aço inoxidável ABNT 316, com cerca de 60 mm de altura e 17 mm de diâmetro, totalizando uma área de 35 cm² conforme Figura 2b. 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.

As medidas de potencial foram realizadas com o auxílio de um eletrodo de referência de calomelano saturado (ECS).

Em busca de uma solução que apresentasse uma resistividade típica dos solos naturais, foram preparadas soluções aquosas com diferentes concentrações de diferentes sais. Entre os sais utilizados, o sulfato de sódio apresentou maior reprodutibilidade em relação aos demais e, por isso, escolheu-se este como eletrólito para os ensaios.

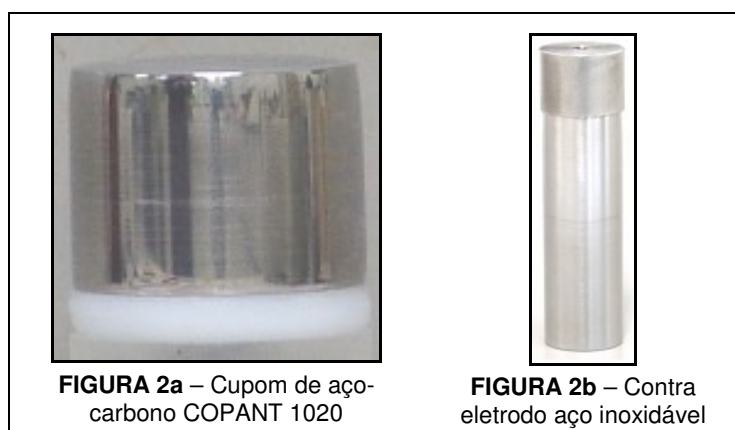


FIGURA 2a – Cupom de aço-carbono COPANT 1020

FIGURA 2b – Contra eletrodo aço inoxidável

2.1 Primeira fase

Ensaio sem proteção catódica

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

Vários ensaios foram realizados para diferentes níveis de cada fator na condição sem proteção catódica e com aplicação de corrente AC. Para fins de comparação, foram desenvolvidos ensaios 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-eletródo de aço inoxidável e um eletródo de referência de calomelano saturado. Devido a uma diferença de potencial entre o cupom de aço-carbono e o contra-eletródo de aço inoxidável, circulava uma corrente galvânica entre os dois eletródos que acarretava num aumento da taxa de corrosão. Para evitar esse problema acoplou-se, em série ao sistema, um capacitor eletrolítico de 25 μF para 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 3.

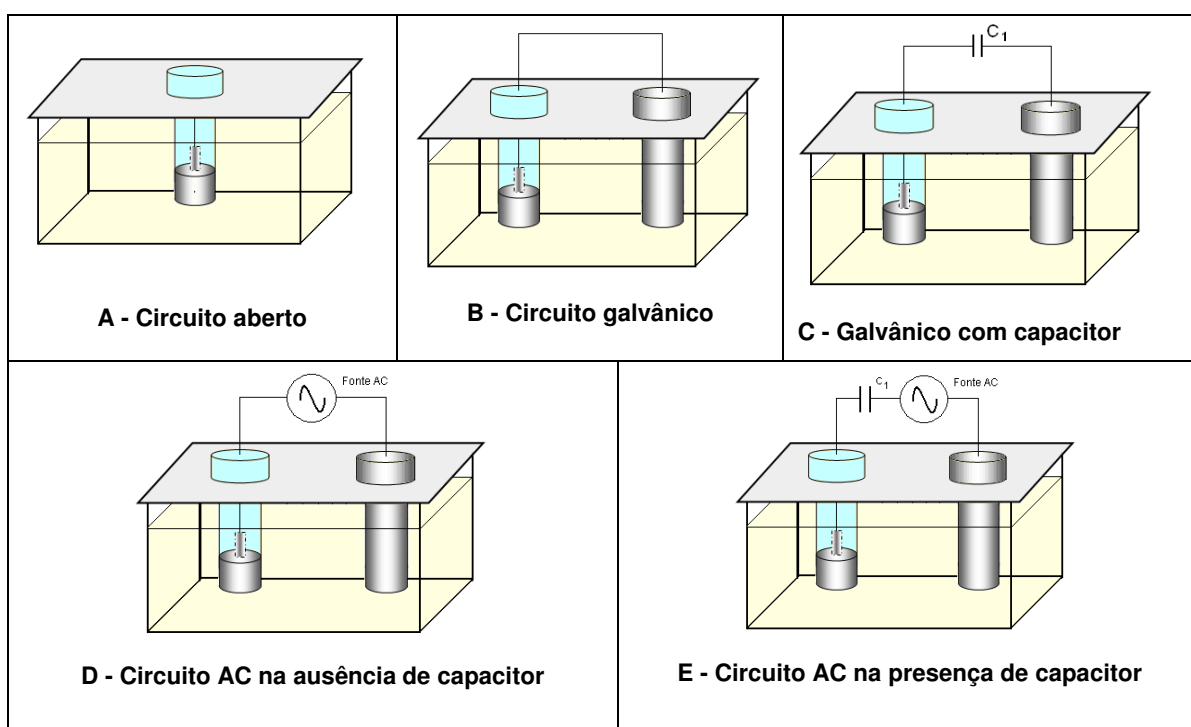


Figura 3 – Arranjos experimentais realizados em laboratório para avaliar como a corrente galvânica e a corrente AC afetam a taxa de corrosão do cupom.

As montagens ilustradas na Figura 3 foram concebidas de maneira que se pudesse avaliar como o para galvânico formado pela conexão elétrica entre o cupom e o contra-eletródo de aço inoxidável afetavam a taxa de corrosão do cupom e como era possível isolar o efeito galvânico, a saber:

- Figura 3 (A): nesta montagem, esperava-se que a taxa de corrosão obtida fosse devida apenas ao contato do cupom com o eletrólito;
- Figura 3 (B): nesta montagem, esperava-se que a taxa de corrosão do cupom fosse influenciada pela corrente galvânica que circulava entre o cupom e o contra-eletródo de aço inoxidável;

- Figura 3 (C): nesta montagem, esperava-se que o capacitor de 25 μF , acoplado em série ao circuito galvânico, bloqueasse completamente a corrente galvânica circulante e que os resultados de taxas de corrosão obtidos fossem idênticos ao da montagem A;
- Figura 3 (D): nesta montagem, esperava-se que a taxa de corrosão fosse influenciada tanto pela imposição da corrente AC como pela corrente galvânica;
- Figura 3 (E): com esta montagem, esperava-se eliminar a influência da corrente galvânica isolando, assim, a influência da imposição da corrente AC.

Para confirmar esses fatos, ensaios de perda de massa foram desenvolvidos com os cinco arranjos experimentais da Figura 3 e os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 1.

TABELA 1

Resultados dos ensaios conduzidos com os cinco arranjos experimentais apresentados na Figura 3.

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

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

Incremento (circuito galvânico) = Taxa de corrosão (circuito galvânico) – Taxa de corrosão (circuito aberto)

Incremento (50 A/m² sem capacitor) = Taxa de corrosão (50 A/m² AC sem capacitor) – Taxa de corrosão (circuito galvânico)

Incremento (50 A/m² com capacitor) = Taxa de corrosão (50 A/m² AC com capacitor) – Taxa de corrosão (circuito aberto)

Com base nos resultados apresentados na Tabela 1, as seguintes conclusões foram obtidas:

- a corrente galvânica contribui muito para o aumento da taxa de corrosão do cupom, pois se obteve um incremento de 0,36 mm/a, quando comparado à taxa de corrosão do cupom em circuito aberto;
- 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.

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

Para se 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 (25°C), pH igual a 4,0 e freqüência de corrente alternada 60 Hz. Estes ensaios foram realizados nas resistividade de 5000 Ω.cm e 10000 Ω.cm em circuito aberto com diferentes densidades de corrente AC: 20 A/m², 50 A/m² e 100 A/m². Os resultados desses ensaios estão na Tabela 2.

TABELA 2

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

Condições	Resistividade (Ω.cm)	Densidade de corrente alternada (A/m ²)			
		Circuito aberto	20	50	100
T = 25°C, pH=4,0, F = 60 Hz	5000	0,22	0,26	0,39	0,67
Taxa de corrosão (mm/a)					
T = 25°C, pH=4,0, F = 60 Hz	10000	0,20	0,25	0,32	0,54
Taxa de corrosão (mm/a)					

Conforme verificado na Tabela 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 que a taxa de corrosão aumenta com o aumento da densidade de corrente AC (J_{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.

Efeito da freqüência da corrente alternada na taxa de corrosão

Para se 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/m². Os ensaios foram realizados nas

freqüências de corrente AC de 30 Hz, 60 Hz, 120 Hz e 180 Hz e em duas resistividade diferentes, 5000 Ω .cm e 10000 Ω .cm. Os resultados estão na Tabela 3.

TABELA 3

Efeito da freqüência da corrente alternada na taxa de corrosão

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

Pelos resultados apresentados na Tabela 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.

Isso se deve à existência da dupla-camada elétrica composta por um capacitor e um resistor em paralelo. Para altas freqüências, o capacitor da dupla-camada elétrica (C_{dc}) é curto-circuitado 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}). Na Figura 4 apresenta-se o circuito equivalente da dupla-camada elétrica do cupom e a circulação de corrente nas freqüências altas, médias e baixas.

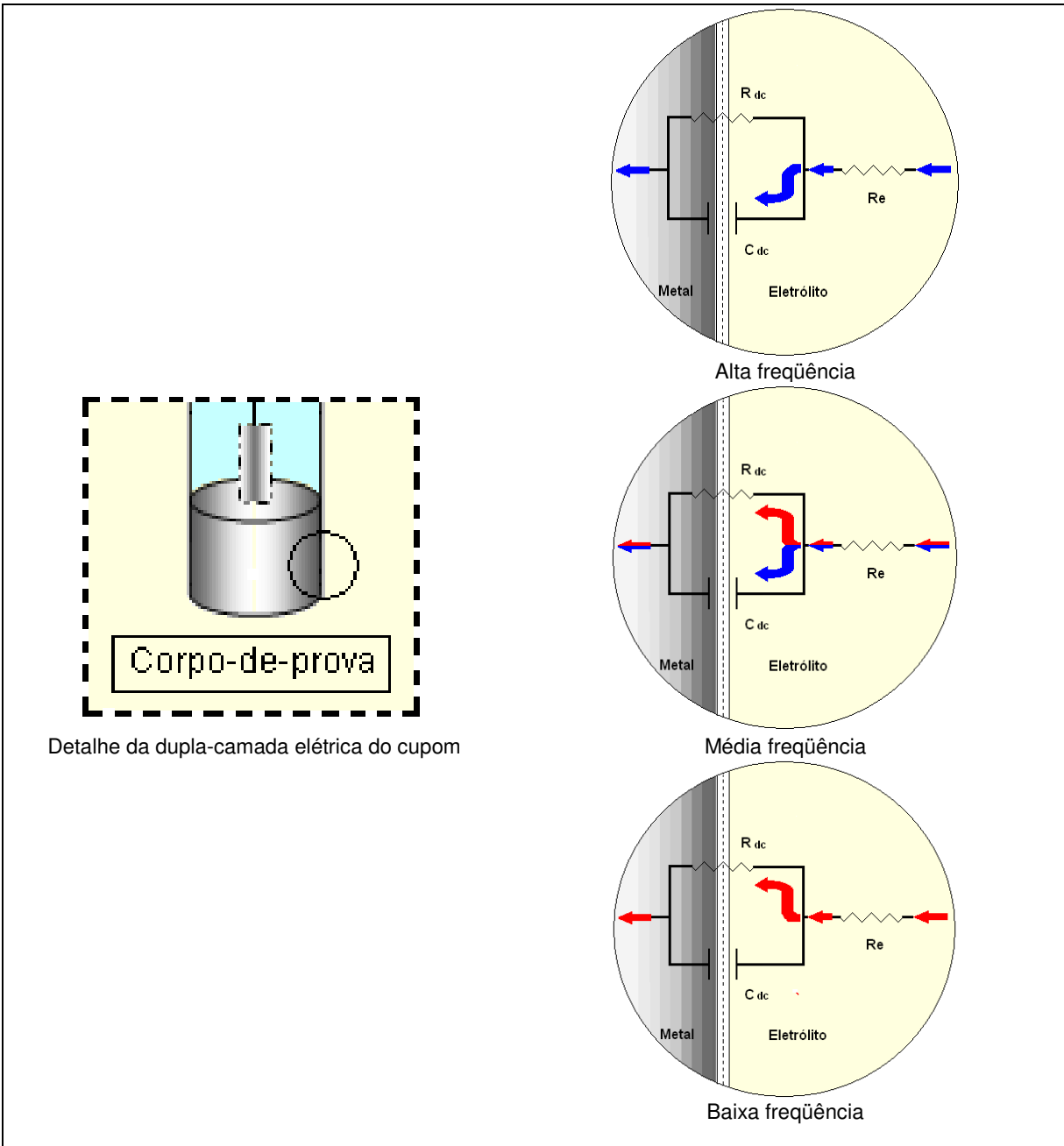


FIGURA 4 – Circuito equivalente da dupla-camada elétrica do cupom e a circulação de corrente em altas frequências, médias frequências e baixas frequências.

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, resistividade de 5000 Ω.cm e 10000 Ω.cm e temperaturas de 25°C e 40°C. Os resultados dos ensaios estão na Tabela 4.

TABELA 4

Efeito da temperatura na taxa de corrosão.

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

Pode-se verificar que o efeito da temperatura contribui para o aumento da taxa de corrosão; maiores taxas de corrosão foram obtidas nos meios de maior temperatura.

Efeito do pH na taxa de corrosão

Os ensaios para se verificar o efeito do pH foram realizados em duas resistividades distintas, 5000 Ω.cm e 10000 Ω.cm, 100 A/m² 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 estão na Tabela 5.

TABELA 5

Efeito do pH do meio na taxa de corrosão.

Condições	pH = 4,0		Ph = 10	
	Circuito aberto	100 A/m ²	Circuito aberto	100 A/m ²
5000 Ω.cm, T = 25°C, f _{AC} = 60 Hz	0,22	0,67	0,16	0,29
Taxa de corrosão (mm/a)				
10000 Ω.cm, T = 25°C, f _{AC} = 60 Hz	0,20	0,54	0,15	0,26
Taxa de corrosão (mm/a)				

Pode-se verificar pela Tabela 5 que foram obtidas maiores taxas de corrosão para meios mais ácidos. Esses resultados eram esperados, visto que o meio ácido é mais agressivo ao aço-carbono que o meio alcalino.

2.2 Curvas de Potencial DC em função da Densidade de Corrente DC para verificação da influência da corrente alternada

Esses 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 apresente potencial acima do potencial de equilíbrio estará em estado termodinâmico ativo e, caso apresente potencial abaixo do equilíbrio, estará no estado termodinâmico imune.

Na Figura 5 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.

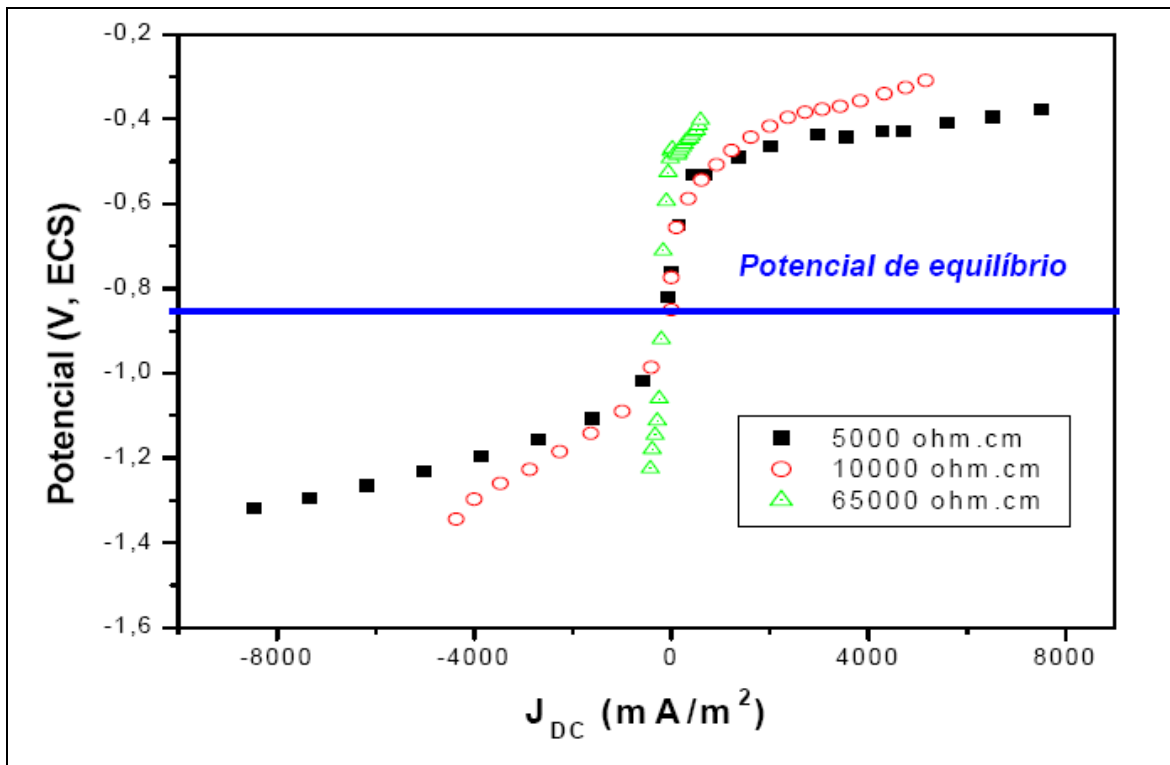


FIGURA 5 – Curvas de potencial versus densidade de corrente de proteção catódica para um sistema na ausência de corrente AC.

Na Figura 6 mostram-se as variações do potencial de eletrodo para o cupom imerso num meio de resistividade de 5000 Ω .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.

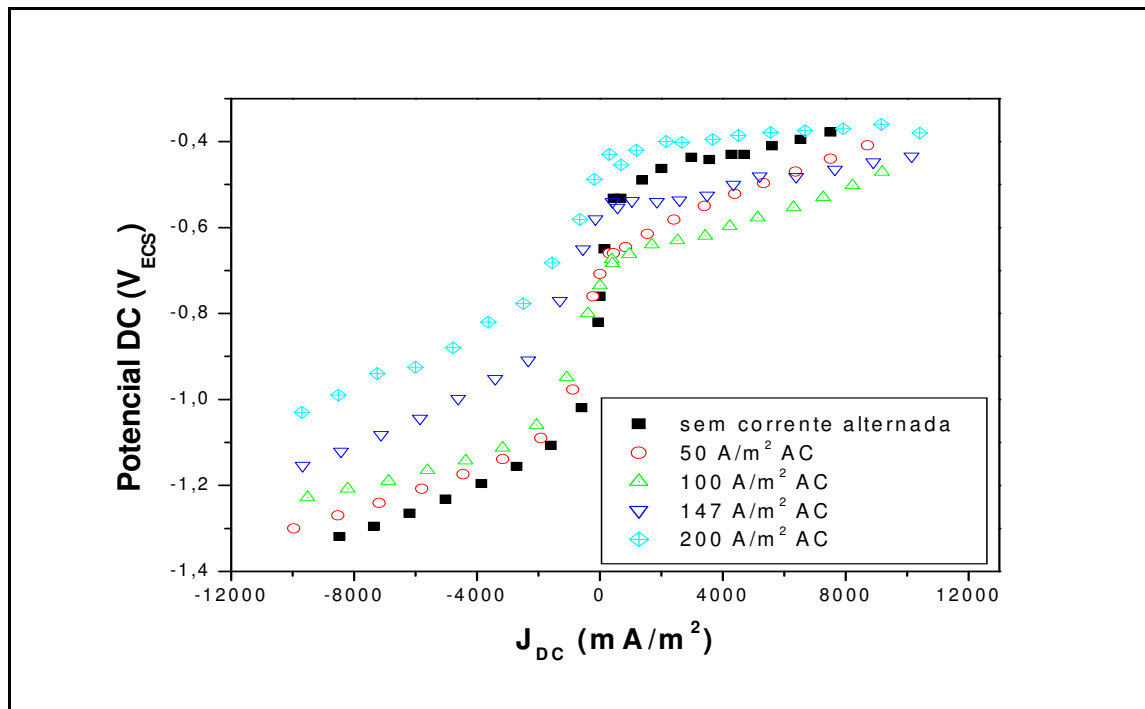


FIGURA 6 – Curvas de potencial E_{DC} em função da densidade de corrente J_{DC} , em meio de resistividade 5000 Ω .cm, para diferentes densidades de corrente AC.

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 dessa 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 Ω .cm e 65000 Ω .cm, como se mostra nas Figuras 7 e 8, respectivamente. Observando-se tais figuras, pode-se verificar que o aumento da resistividade causa distorções mais acentuadas do que aquelas observadas nas Figuras 5 e 6, visto que O INCREMENTO Na queda ôhmica OCORRE não só pelo aumento da resistividade como pelo aumento da corrente total circulante com a imposição da corrente AC.

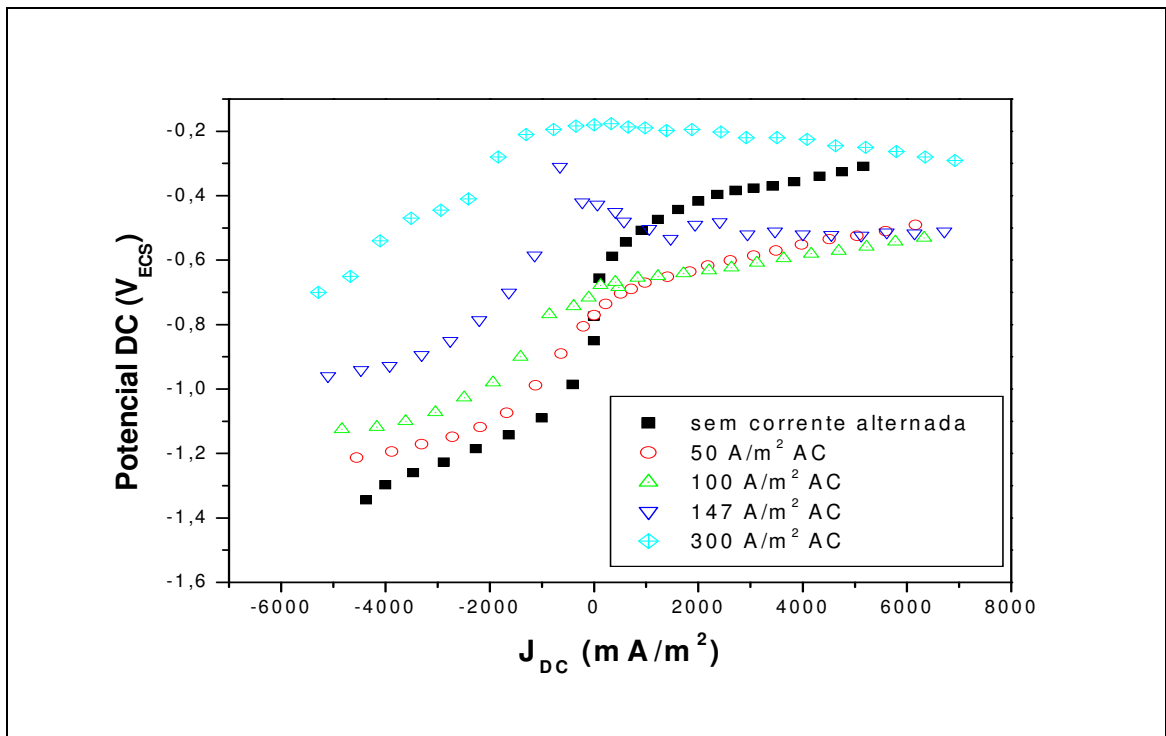


FIGURA 7 – Curvas de potencial E_{DC} em função da densidade de corrente J_{DC} , em meio de resistividade 10000 Ω .cm, para diferentes densidades de corrente AC.

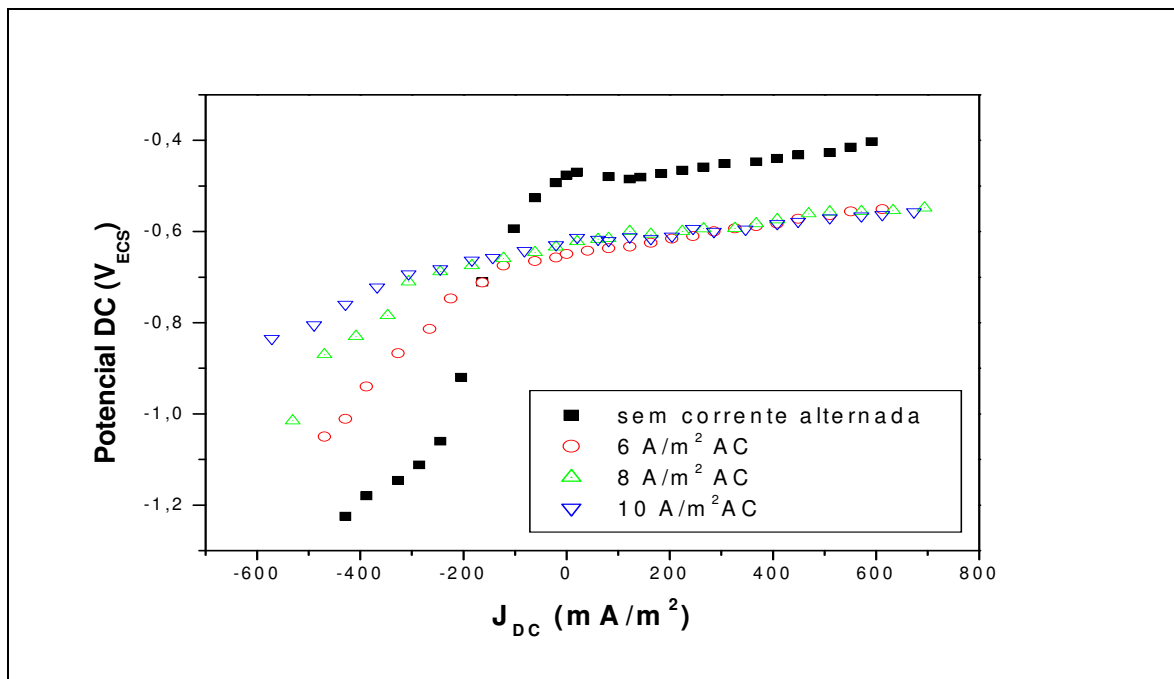


FIGURA 8 - Curvas de potencial E_{DC} em função da densidade de corrente J_{DC} , em meio de resistividade $65000 \Omega \cdot \text{cm}$, para diferentes densidades de corrente AC.

2.3 Segunda fase

Ensaio com proteção catódica e com interferência de corrente alternada

Esses ensaios foram realizados com eletrodo de referência e cupons idênticos aos descritos no item 2. Como contra-eletrodos ou eletrodos auxiliares, simulando o leito de anodos, foram utilizadas barras cilíndricas de aço inoxidável ABNT 316.

O recipiente de ensaio consistiu de uma cuba de polipropileno com capacidade de quinze litros. Na Figura 9 mostra-se o arranjo utilizado nesse ensaio.

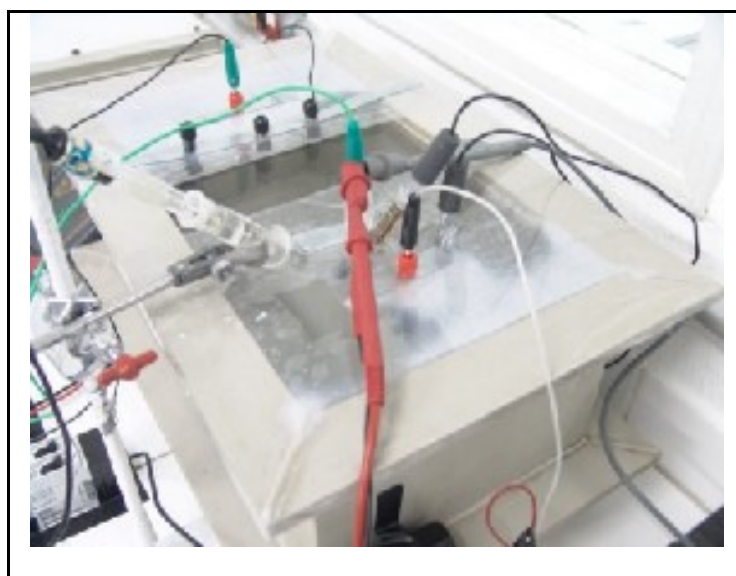


FIGURA 9 - Montagem dos ensaios com proteção catódica e com interferência de corrente AC.

O arranjo experimental adotado consta de um sistema de proteção catódica composto por um retificador de tensão DC, 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, com o qual era imposta a corrente alternada, como mostra a Figura 10.

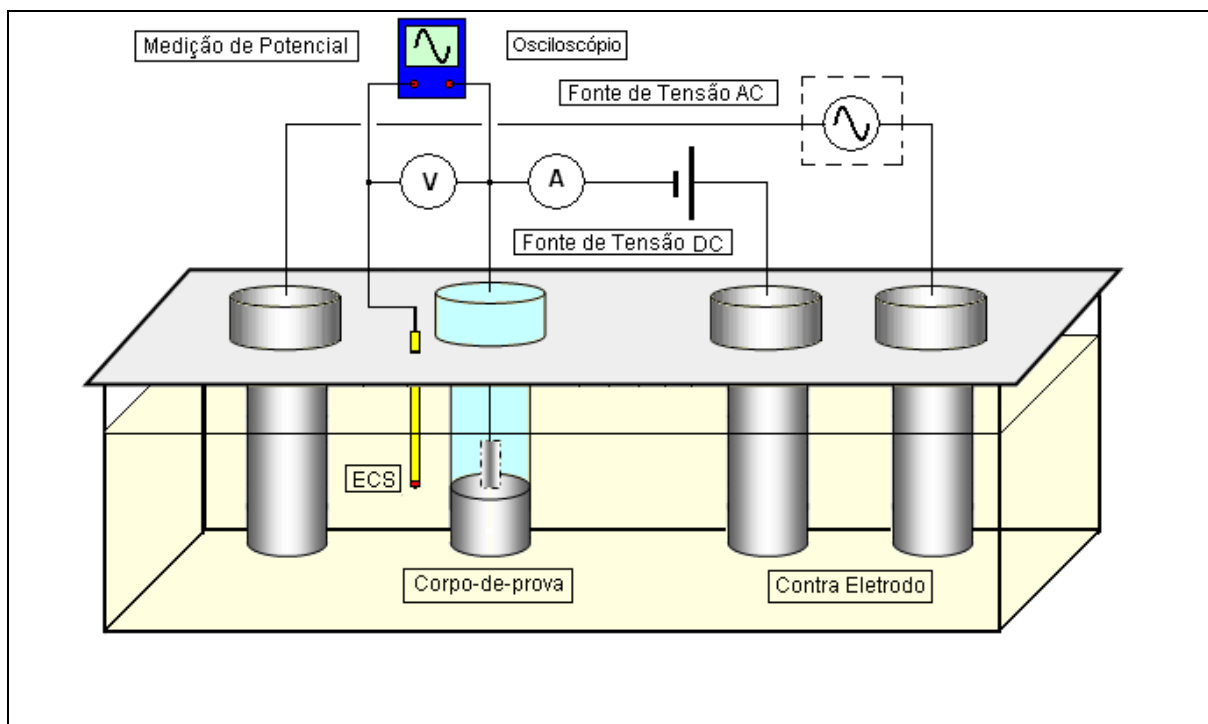


FIGURA 10 – Arranjo dos ensaios com proteção catódica e interferência de corrente AC.

Para esses 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 $0,5 \text{ A/m}^2$. Esse 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 a fim de 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. A corrente alternada, simulando uma interferência, foi imposta com a frequência de 60 Hz nos eletrodos auxiliares. A simulação está representada na Figura 11.

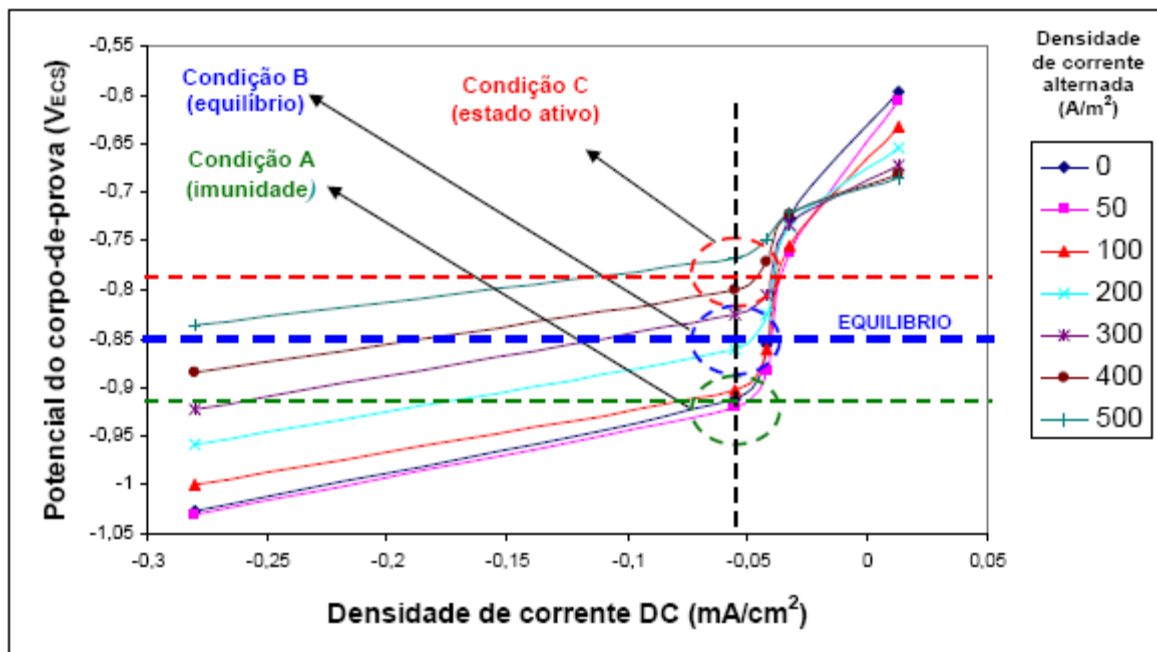


FIGURA 11 - Ensaio na presença de proteção catódica simulando três condições: A) imunidade, B) equilíbrio e C) estado ativo ou de corrosão












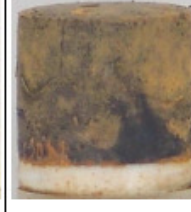
Consideraram-se três condições de ensaio distintas:

- **condição A:** aplicou-se uma densidade de corrente de proteção catódica (J_{DC}) de $0,5 \text{ A/m}^2$ 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 $-0,93 \text{ V (ECS)}$. Desse modo, o cupom manteve-se abaixo do potencial de equilíbrio do ferro ($-0,85 \text{ V, ECS}$), ou seja, na condição de imunidade;
- **condição B:** aplicou-se uma densidade de corrente de proteção catódica (J_{DC}) de $0,5 \text{ A/m}^2$ 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 $-0,85 \text{ V (ECS)}$. Desse modo o cupom manteve-se no potencial de equilíbrio do ferro ($-0,85 \text{ V, ECS}$), ou seja, na condição de equilíbrio;
- **condição C:** aplicou-se uma densidade de corrente de proteção catódica (J_{DC}) de $0,5 \text{ A/m}^2$ e uma densidade de corrente alternada (J_{AC}) de 400 A/m^2 . O potencial de proteção E_{DC} medido entre o cupom e o eletrodo de referência de calomelano saturado era de $-0,77 \text{ V (ECS)}$. Desse modo o cupom manteve-se acima do potencial de equilíbrio do ferro ($-0,85 \text{ V, ECS}$), 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 6.

TABELA 6

Ensaio com proteção catódica em cupons de corrosão com interferência de corrente alternada

	Condição A - Imunidade		Condição B - Equilíbrio		Condição C - Estado ativo	
Antes do ensaio						
Após o ensaio						
Condições e resultados	Resistividade = 5000 Ω .cm Densidade de corrente AC = 50 A/m ² Densidade de corrente DC = -0,5 A/m ² Dens. AC / Dens. DC = 100 Freqüência AC = 60 Hz Potencial de eletrodo = -0,93 V, ECS Temperatura = ambiente pH inicial = 4,0 Não foi verificado corrosão		Resistividade = 5000 Ω .cm Densidade de corrente AC = 280 A/m ² Densidade de corrente DC = -0,5 A/m ² Dens. AC / Dens. DC = 560 Freqüência 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 Ω .cm Densidade de corrente AC = 400 A/m ² Densidade de corrente DC = -0,5 A/m ² Dens. AC / Dens. DC = 800 Freqüência 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 6, verifica-se que o cupom de corrosão mantido na condição de imunidade não apresentou alteração no aspecto visual 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.

3 CONCLUSÃO

Com base nos resultados dos ensaios sem proteção catódica obtidos neste estudo 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 o 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 frequência, 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 (E_{DC}^0), 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 ensaios com proteção catódica por corrente impressa comprovaram a existência de corrosão provocada pela corrente alternada, mesmo em cupons protegidos catodicamente, o que nos leva a crer que os critérios adotados na literatura, para verificar possíveis interferências de corrente alternada, ainda não são totalmente confiáveis.

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 (E_{DC}) preferencialmente medido com um osciloscópio, comparando a forma de onda obtida com o potencial de equilíbrio.

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.

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, 7th 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.º 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^o 4, France, 2001 p.221-226.

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.

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.
- GREGOOR, R.; POURBAIX, A. **Detection of AC Corrosion.** 3R International, Vol. 42, n^o 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.
- 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.
- 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^o 3, March 1979.
- NACE Standart RP0177. **Mitigation of Alternating Current and Lightning Effects on Metallic Structures and Corrosion Control Systems.** NACE International, revised March 1995, Houston, Texas, 1995.
- 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.º106, 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.
- PETROBRAS PRODUT. **Programa de Dutos - Projeto e Desenvolvimento PD-01283.** Rio de Janeiro, 08 de set. 2005.
- 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.
- RAGAUULT, I. **AC Corrosion Induced by V.H.V Electrical Lines on Polyethylene Coated Steel Gas Pipelines.** CORROSION/98, paper n.r 557, Houston, Texas, 1998, 14 p.
- STALDER, F. **AC corrosion of cathodically protected pipelines.** Guidelines for risk assessment and mitigation measures, Annex ^{n.º} 5-4, CEOCOR, Committee on the Study of Pipe Corrosion and Protection, Bruxelles, Belgium, 2001.
- TRANSPETRO PID. **Padrão de Integridade Estrutural dos Dutos da Petrobras.**
Disponível no site Cooperativo:
<<http://s6000ws12.corp.petrobras.biz/dutos/home.htm>>.
Acesso em: 2 maio 2007.
- 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.

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