
Copyright 2018, ABRACO

Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2018, em São Paulo, no mês de maio de 2018.

As informações e opiniões contidas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade do(s) autor(es).

Técnica de injeção de corrente como ferramenta de inspeção de estruturas enterradas do setor elétrico

Juliana Victorino Dias^a, Elber Vidigal Bendinelli^b

Abstract

In the electrical sector, excavation coupled with visual inspection and electrode potential measurement are the main inspection methods to estimate the corrosion state of the towers buried feet. In order to overcome the practical difficulties inherent in these techniques, it was investigated the influence of different types of soil (clayey and sandy) in the use of the current injection technique to determine the corroded area of galvanized steel specimens with different percentages of exposed area of carbon steel. The preferred path of electric current in each type of soil was evaluated, depending on its resistivity. The current injection measurements were reproducible and reliable when the soil moisture was around 8%, or when the soil resistivity was 100 kΩ.cm. It was possible to obtain graphs of current density as a function of the exposed area of carbon steel for each type of soil, with linear behavior. Furthermore, attributing current density ranges to describe the corrosion degree of different galvanized steel substrates was complementary to the already mentioned graphs.

Keywords: corrosion, electrochemistry, current injection technique, electrical sector, soil.

Resumo

No setor elétrico, a escavação conjugada com a inspeção visual e a medição de potencial de eletrodo são os métodos mais comuns para avaliar o estado de corrosão da parte enterrada de pés de torres de linhas de transmissão. Com o objetivo de contornar as dificuldades de ordem prática presentes nestas técnicas, foi investigada a influência de diferentes tipos de solo (argiloso e arenoso) nos resultados da técnica de injeção de corrente em corpos de prova de aço galvanizado com diferentes porcentagens de área exposta de aço carbono. Avaliou-se o caminho preferencial da corrente elétrica em cada tipo de solo, a depender da sua resistividade. As medidas de injeção de corrente foram reprodutíveis e confiáveis quando a umidade do solo esteve em torno 8%, ou então quando sua resistividade era ≤ 100 kΩ.cm. Foi possível obter gráficos de densidade de corrente com comportamento linear, em função da área exposta de aço carbono, para cada tipo de solo. Além disso, a atribuição de faixas de densidade de corrente para descrever o grau de corrosão de diferentes substratos de aço galvanizado foi mais uma informação relevante, complementar aos gráficos já mencionados.

Palavras-chave: corrosão, eletroquímica, injeção de corrente, setor elétrico, solo.

^a Graduanda, Química Industrial - Centro de Pesquisa de Energia Elétrica

^b M.Sc, Engenheiro Químico - Centro de Pesquisa de Energia Elétrica

Introdução

No setor elétrico brasileiro, parte das torres de linhas de transmissão possui mais de 30 anos de serviço, apresentando sinais de envelhecimento ocasionados pelo processo corrosivo. A dificuldade de inspeção preventiva e da verificação do real estado da corrosão do aço galvanizado é maior para as estruturas enterradas. O processo de corrosão somado a fatores externos (vento fortes, chuvas, etc.) pode provocar o colapso de uma torre e, possivelmente, das torres vizinhas, acarretando a suspensão do abastecimento de energia elétrica e aumento dos custos diretos e indiretos. Como os recursos anuais para substituição de componentes são limitados, as empresas do setor elétrico necessitam de estratégias e técnicas de manutenção para estender a vida útil das linhas de transmissão.

Atualmente, para se avaliar as estruturas enterradas, utiliza-se a técnica de escavação conjugada com a inspeção visual, porém este procedimento tem baixa produtividade [1]. Além disso, tal metodologia de inspeção apresenta custo elevado para a empresa, mobilizando uma quantidade considerável de mão de obra. Outra técnica bastante utilizada é a medição de potencial de eletrodo das grelhas metálicas enterradas, que apresenta baixa confiabilidade em decorrência de variações nas medições, que são muito dependentes dos parâmetros físicos do solo.

Com o objetivo de contornar tais dificuldades de ordem prática, foi investigada a influência de diferentes tipos de solo (argiloso, arenoso e mistura homogênea desses dois solos) nos resultados da técnica de injeção de corrente aplicada para se estimar a área corroída de corpos de prova de aço galvanizado com diferentes porcentagens de área exposta de aço carbono.

Conforme já investigado [1], dentre diferentes técnicas eletroquímicas, a injeção de corrente mostra-se promissora na avaliação do estado de corrosão de estruturas enterradas, com a vantagem de que, para o aço galvanizado, há a possibilidade de calcular a área de aço carbono exposta, devido à corrosão, tornando o diagnóstico mais preciso. Por fim, avaliar a influência da resistividade do solo e do teor de umidade, em diferentes solos, nos resultados da técnica de injeção de corrente fez parte da etapa de otimização da técnica, para que a mesma possa ser utilizada com confiança e reprodutibilidade pelas equipes de manutenção do setor elétrico brasileiro.

Metodologia

Como substratos utilizaram-se placas de aço galvanizado com dimensões de 100 mm x 150 mm x 6,3 mm produzidas pelo processo de galvanização por imersão a quente, com aproximadamente 100 μ m de espessura de camada de zinco. As medidas eletroquímicas foram realizadas semanalmente até aproximadamente 60 dias de ensaio.

Antes dos corpos de prova serem enterrados, certas regiões da camada de galvanização foram removidas pelo processo de decapagem ácida, a fim de simular as áreas onde o zinco foi consumido pelo processo corrosivo. Tais regiões eram circulares e a decapagem consumiu quimicamente apenas o zinco destas regiões, deixando exposto o aço carbono.

Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, pode-se observar a identificação dos diferentes corpos de prova ensaiados e as respectivas porcentagens de área exposta de aço carbono, considerando a parte enterrada das peças.

Tabela 1 – Identificação dos corpos de prova com diferentes porcentagens de área exposta de aço carbono.

Identificação do corpo de prova	Área exposta de aço carbono (%)
100AC	100
75AC	75
50AC	50
25AC	25
AG	0

Na Figura 1, é possível observar o aspecto visual dos corpos de prova que foram enterrados. As regiões circulares são aquelas em que o revestimento de zinco foi removido por decapagem. Essa remoção simulou o processo de envelhecimento do aço galvanizado promovido pela corrosão em solo, de modo que a técnica de injeção de corrente pudesse ser aplicada em substratos com diferentes relações de área e de aço carbono (metal base).

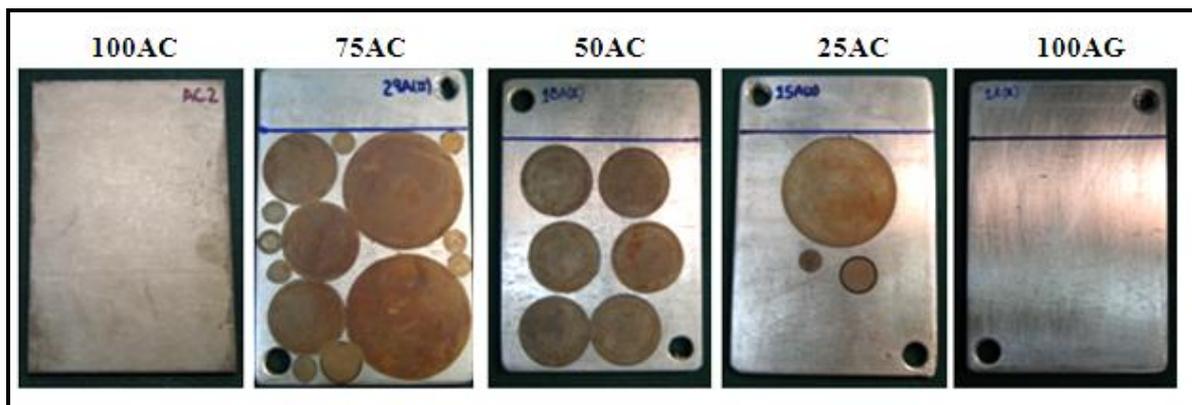


Figura 1 – Aspecto visual dos corpos de prova com diferentes porcentagens de área exposta de aço galvanizado e de aço carbono (metal base), antes de serem enterrados.

Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** 2, observam-se as células utilizadas nas medidas de injeção de corrente. As mesmas eram constituídas de recipientes de *teflon* e possuíam um volume unitário de, aproximadamente, 1.450 cm^3 que foram preenchidas com os diferentes tipos de solo.



Figura 1 - Corpos de prova de aço galvanizado enterrados na célula de ensaio em solo.

Os solos estudados foram secos na estufa a 100°C por 24h, sendo posteriormente macerados e peneirados (mesh #16). Em seguida, as células foram completadas com a quantidade determinada de cada tipo de solo. Na Tabela 2 são apresentadas as três combinações de solo diferentes que foram estudadas.

Tabela 2 – Tipos de solos ensaiados

Identificação do solo	Tipo de solo ensaiado
100ARE	Solo 100% (v/v) arenoso
100ARG	Solo 100% (v/v) argiloso
50HOM	Mistura homogênea com 50% (v/v) argiloso e solo 50% (v/v) arenoso

Para a realização das medidas de resistividade em solo, foram utilizados os equipamentos *Soil Resistance Meter 400* e *Soil Box*. Esta metodologia consiste em aplicar uma corrente contínua constante entre os eletrodos das extremidades da *Soil Box* e medir a diferença de potencial entre os eletrodos centrais da célula. O equipamento registra estes valores e determina a resistividade do solo em questão, com base na Lei de Ohm e na geometria da célula.

Inicialmente, a célula foi preenchida com os diferentes tipos de solo, e a resistividade inicial de cada um foi medida. Em seguida, foram adicionados 4 mL de água em linha reta ao longo de toda a *Soil Box* (Figura 3). Esperou-se um tempo de 5 min para a estabilização e permeação da água pelo solo e mediu-se a resistividade do solo novamente. Essa adição em linha reta tem como objetivo direcionar o fluxo de corrente elétrica na região molhada, criando um caminho preferencial para a sua distribuição.

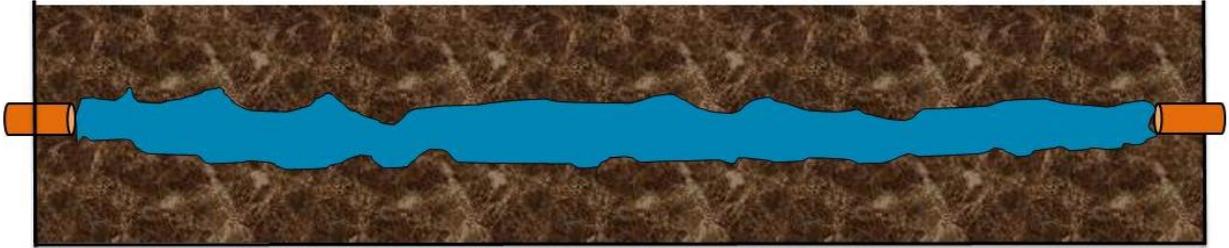


Figura 3 - Ilustração esquemática do topo da célula de medida de resistividade, mostrando como foi adicionada água durante as medidas para o solo.

Este procedimento foi repetido várias vezes até a obtenção da resistividade mínima de cada solo, que é um parâmetro físico característico de cada tipo de solo e não varia com a quantidade de água acrescentada [2]. A resistividade mínima é a condição mais agressiva para cada tipo de solo, onde se tem baixa resistência ao fluxo de corrente elétrica e grande quantidade de água, o que acelera o processo corrosivo. Por isso, conhecer essa condição é de grande importância na caracterização dos solos estudados.

O teor de umidade contido em cada solo, após o acréscimo de água, foi calculado segundo a metodologia indicada na norma ABNT NBR 6457 [3].

Após a preparação inicial dos corpos de prova, do solo e da medição das resistividades, foram realizadas as medidas de injeção de corrente, com o auxílio de um potenciostato *Field Machine Standard 2.2* portátil e um *data logger* NOVUS modelo AA. O *Field Machine* foi utilizado como fonte de corrente contínua para a polarização das estruturas enterradas e o *data logger* foi usado como registrador da variação de potencial e corrente com o tempo. A célula eletroquímica continha 3 eletrodos, onde: os eletrodos de trabalho utilizados foram os corpos de prova de aço galvanizado/aço carbono, o contra-eletródo era de grafite e o eletródo de referência era de cobre-sulfato de cobre.

Resultados e discussão

Com base na metodologia adotada, serão apresentados e discutidos os resultados obtidos para cada ensaio realizado.

Medida de resistividade dos solos

Compreender a influência da resistividade nas medidas eletroquímicas em solo, e principalmente na injeção de corrente, é de fundamental importância para o desenvolvimento de uma técnica confiável e reproduzível. Este é o parâmetro físico do solo de maior importância para as medidas eletroquímicas, pois esta influencia o fluxo de elétrons no solo.

Na Figura 4 pode ser observada a variação da resistividade do solo arenoso com o acréscimo de água. O gráfico partiu da resistividade do solo totalmente seco até a resistividade mínima.

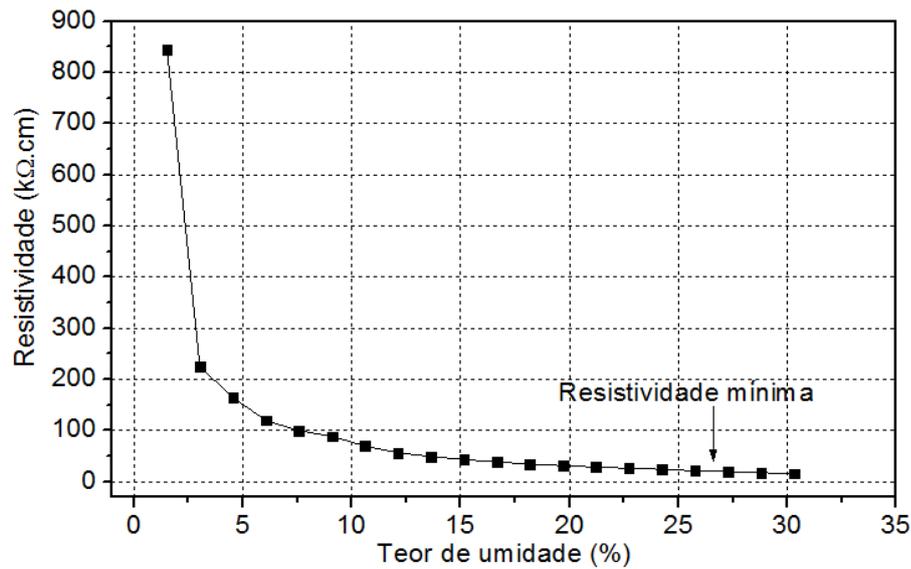


Figura 4 - Variação da resistividade do solo 100ARE com o acréscimo de água

O valor da resistividade inicial do solo arenoso (100ARE) foi o mais alto, quando comparado com os outros solos em questão (apresentados adiante), cerca de 850 kΩ.cm. Segundo o critério de agressividade de solos, este solo é considerado pouco agressivo, visto que sua resistividade é maior que 2,5 kΩ.cm [4]. Após a primeira adição de água, a resistividade do solo cai drasticamente para aproximadamente 200 kΩ.cm (Figura 4). Este comportamento pode ser explicado pelo preenchimento gradual da água nos vazios presentes no solo arenoso, com isso os vazios que até então não permitiam condução elétrica passam a permitir através da presença da água. A Figura 5 ilustra como esse processo de preenchimento de vazios pela água ocorre.

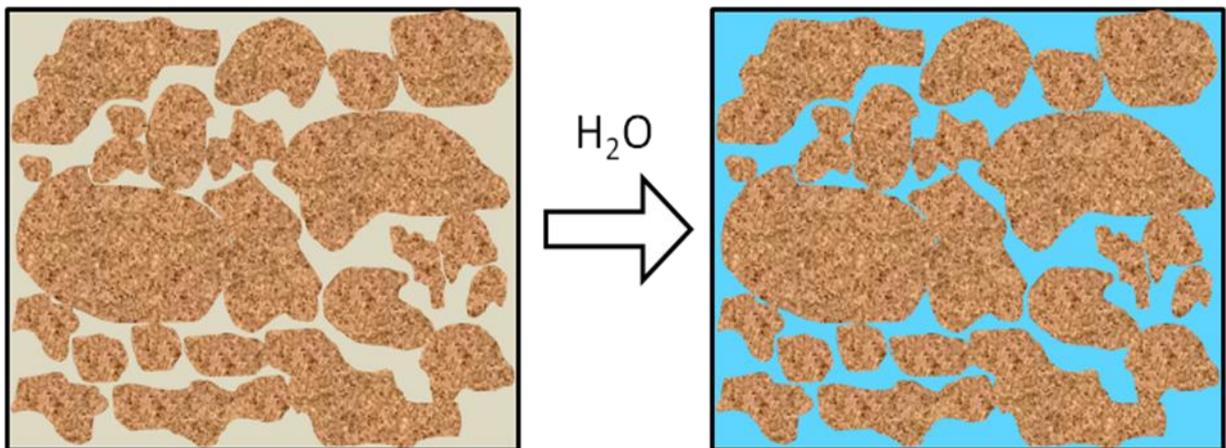


Figura 5 - Ilustração esquemática da percolação da água entre os vazios do solo arenoso.

Pode ser observado que a resistividade mínima foi de 16,5 kΩ.cm, evidenciando uma grande diferença entre o valor mínimo e aquele inicial. Por outro lado, este valor de resistividade

inicial, $850 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$, não permite a aplicação da técnica de injeção de corrente, já que é um valor muito elevado dificultando a distribuição do fluxo de corrente. Por essa razão, as medidas de injeção de corrente foram realizadas com um teor de umidade aproximado de 8%, obtendo-se uma resistividade de, aproximadamente, $100 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$.

Ao analisar a Figura 6, que apresenta a variação da resistividade do solo argiloso (100ARG) com o acréscimo de água, observa-se que este solo tem resistividade inicial de, aproximadamente, $40 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$, cerca de 20 vezes menor do que a resistividade inicial do solo arenoso. Isto se deve ao fato do solo argiloso ser de mais fácil compactação e devido à sua composição química. Além disso, o valor inicial obtido para este solo está bem mais próximo da resistividade mínima, $40 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$ a $2,5 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$, respectivamente, quando comparada com o solo arenoso, $850 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$ a $16,5 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$, respectivamente.

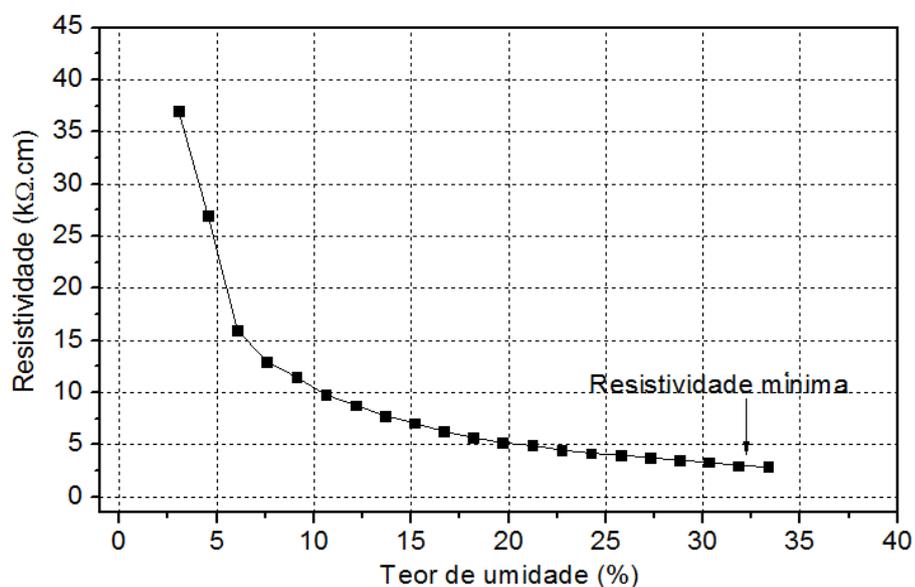


Figura 6 - Variação da resistividade do solo 100ARG com o acréscimo de água.

A Figura 7 demonstra uma ilustração esquemática da percolação da água entre os vazios do solo argiloso. Observa-se que a quantidade de vazios presentes neste solo é menor do que no solo arenoso, não havendo muito espaço disponível para a ocupação da água, o que reflete em uma menor queda na resistividade inicial à medida que se acrescenta água.

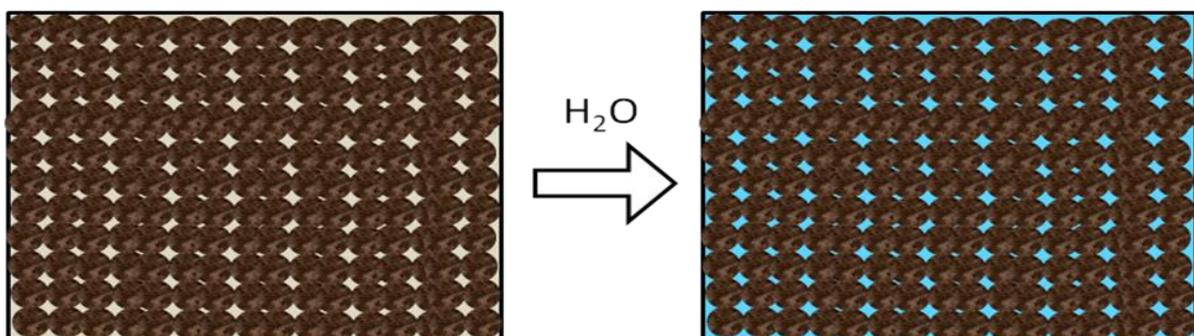


Figura 7 - Ilustração esquemática da percolação da água entre os vazios do solo argiloso.

Em relação a mistura homogênea do solo argiloso com o arenoso (50HOM), a Figura 8 exibe a variação da resistividade com a adição de água.

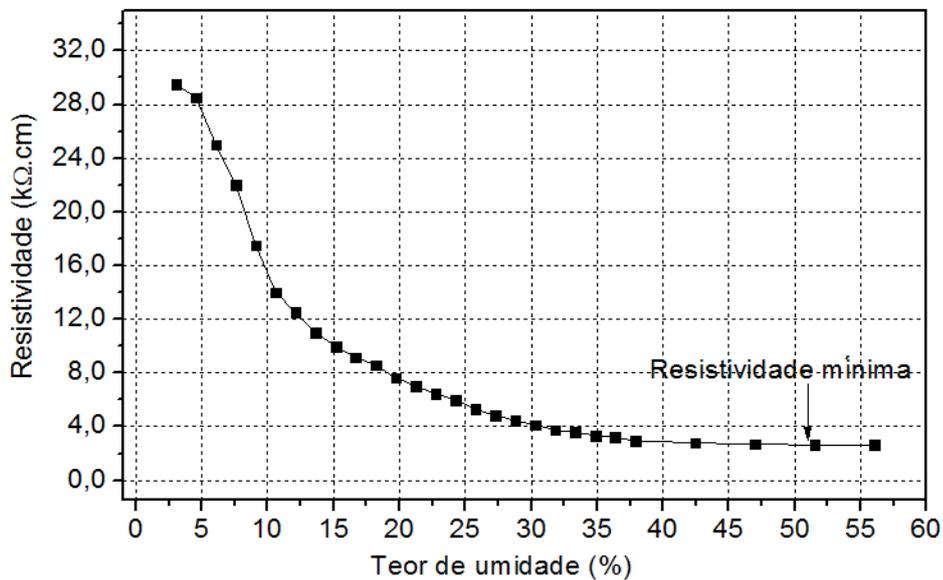


Figura 8 - Variação da resistividade do solo 50HOM com o acréscimo de água.

A partir da Figura 8, observa-se que o comportamento da resistividade da mistura homogênea dos solos é muito similar ao comportamento do solo argiloso (100ARG), em relação ao valor de resistividade inicial, resistividade mínima e o formato da curva, que são bastante semelhantes. Estes fatos indicam que a corrente elétrica emitida pelos eletrodos laterais da célula de resistividade passa preferencialmente pelo solo argiloso, ao longo do caminho até os eletrodos centrais, evitando, assim, o solo arenoso mais resistivo. Esta constatação está de acordo com o que diz a literatura, ou seja, a corrente elétrica sempre percorre o caminho de menor resistência elétrica [5].

Os resultados obtidos durante as medidas de resistividade foram de grande importância para caracterizar a aplicação da técnica de injeção de corrente, apresentada no tópico seguinte.

Aplicação da técnica de injeção de corrente

Os resultados da aplicação da técnica de injeção de corrente no solo arenoso (100ARE) relacionados com a variação da área exposta de aço carbono estão apresentados na Figura 9. Observa-se que a técnica apresentou boa resposta, com $R^2 = 0,94$, indicada pela linearidade dos pontos experimentais obtidos. Assim, com base nesse gráfico pode-se encontrar a área exposta de aço carbono em uma estrutura enterrada, sabendo-se apenas a densidade de corrente injetada na estrutura.

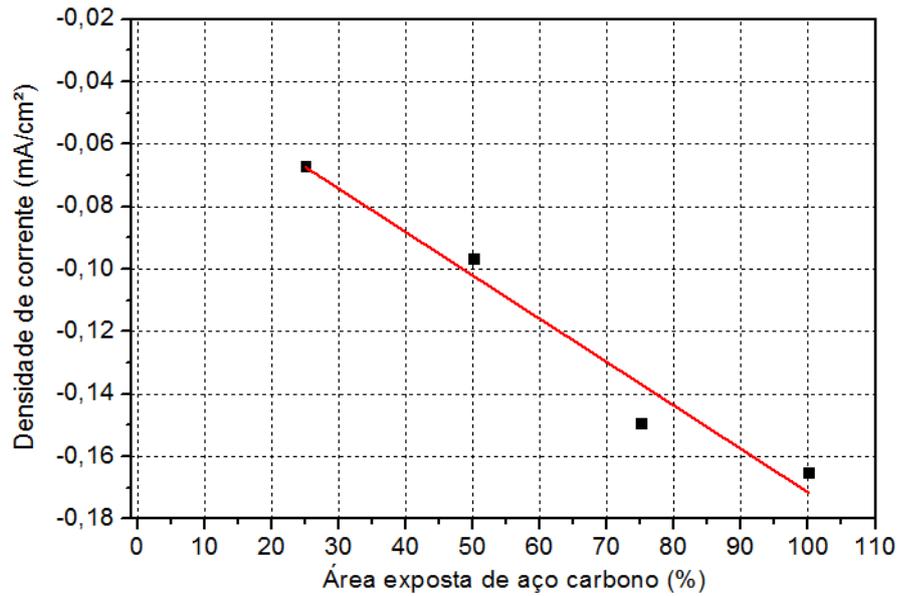


Figura 9 - Aplicação da técnica de injeção de corrente para o solo 100ARE.

Essas medidas foram realizadas com 8% de umidade no solo, esse valor foi escolhido para simular uma condição de campo e uma situação crítica, quando o solo estiver com baixos níveis de umidade. Apesar de o solo arenoso ser o mais resistivo entre os solos estudados (Figura 4), a presença de vazios, que posteriormente foram ocupados pela água, facilitou a circulação de corrente entre os eletrodos enterrados.

A Figura 10 demonstra os resultados da aplicação da técnica de injeção de corrente no solo argiloso (100ARG), essas medidas foram realizadas com 8% de umidade no solo. Para o solo argiloso, observa-se que a técnica apresentou excelente resposta, com $R^2 = 0,99$, demonstrando alta linearidade entre os pontos experimentais.

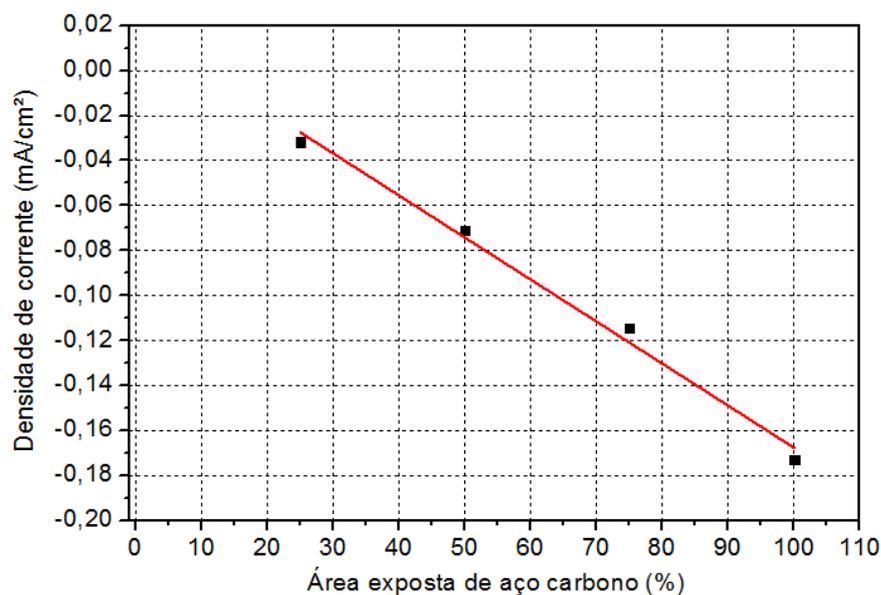


Figura 10 - Aplicação da técnica de injeção de corrente para o solo 100ARG.

As pequenas diferenças apresentadas entre os dois solos podem ser associadas às diferentes composições químicas dos mesmos. Os solos arenosos têm grande parte de suas partículas classificadas na fração areia,

formada principalmente por cristais de quartzo e minerais primários, com consistência granulosa, sendo muito permeável à água [6]. Já os solos argilosos têm grande parte de suas partículas classificadas na fração argila, de tamanho menor que 0,002 mm. Esse tipo de solo não é arejado sendo, geralmente, mais impermeável. Sua composição é constituída, em sua maior parte, de óxidos de alumínio (gibbsita) e de ferro (goethita e hematita) [6].

Ao comparar os resultados obtidos através da aplicação da técnica de injeção de corrente nos dois solos em questão (Figura 11) é nítido verificar que os pontos mais próximos entre si são aqueles referentes ao corpo de prova com 100% de área exposta de aço carbono. Neste caso, o solo argiloso apresentou o valor de densidade de corrente igual a 0,17 mA/cm², enquanto o solo arenoso apresentou o valor igual a 0,16 mA/cm². O fato de haver uma pequena diferença entre os outros pontos experimentais, não é considerado um problema para a aplicação da técnica, podendo-se estabelecer faixas de densidade de corrente de acordo com a área exposta de aço carbono e de acordo com o tipo de solo.

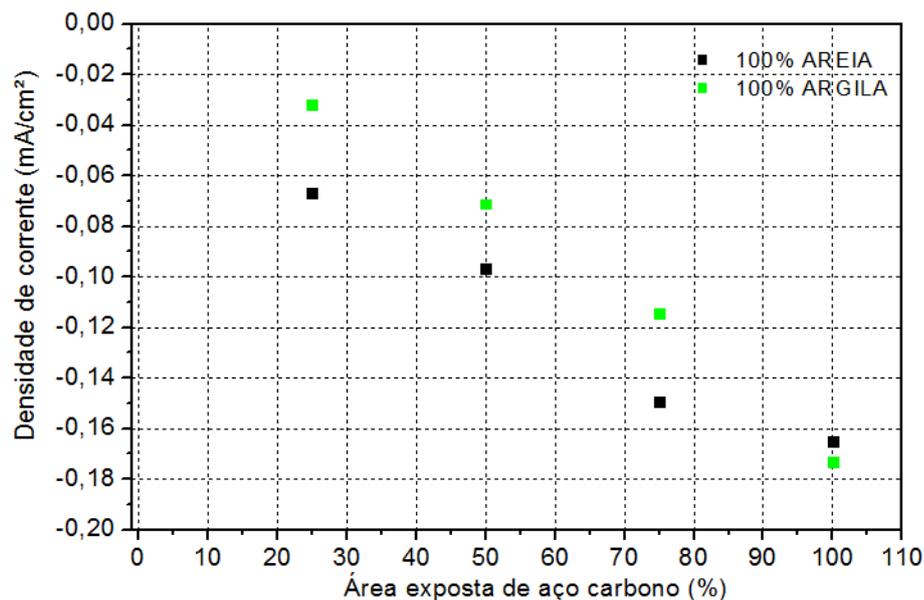


Figura 11 - Comparação dos resultados obtidos no solo 100ARG e 100ARE.

Já em relação aos resultados da aplicação da técnica de injeção de corrente na mistura homogênea dos solos arenoso e argiloso (50HOM), as medidas também foram realizadas com 8% de umidade no solo. Para esse solo, observa-se na Figura 12 que a técnica apresentou uma excelente resposta, com $R^2 = 0,99$, demonstrando alta linearidade entre os pontos experimentais.

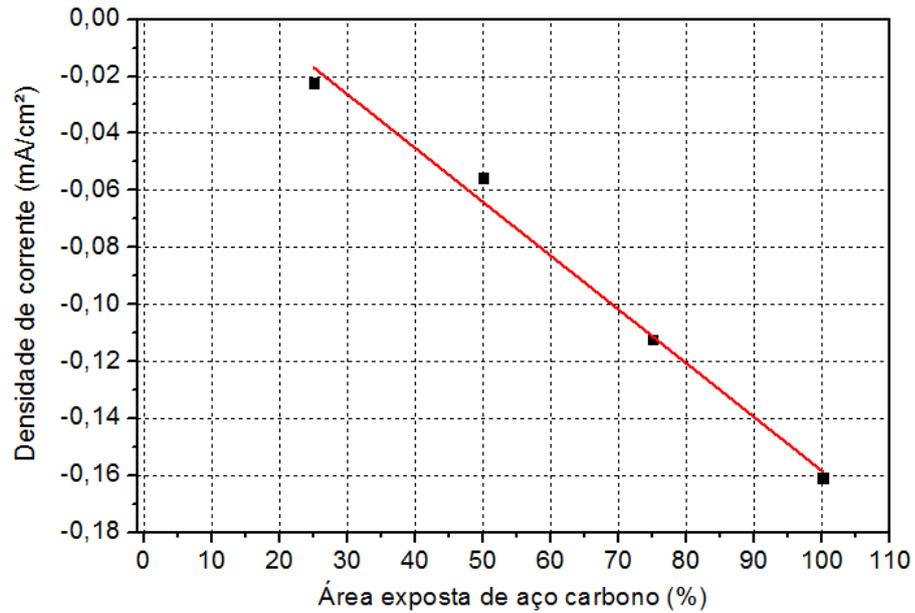


Figura 12 - Aplicação da técnica de injeção de corrente para o solo 50HOM.

Pode-se concluir que quando os solos arenosos e argilosos são misturados homogeneamente, a corrente flui preferencialmente pelo solo argiloso. Este resultado corrobora aquele obtido durante as medidas de resistividade do solo, que indicaram que a corrente fluiu preferencialmente pelo solo argiloso. A Figura 13 demonstra a comparação entre os solos 100ARE, 100ARG e 50HOM, pode-se observar que o 50HOM obteve uma linearidade muito similar ao solo 100 ARG.

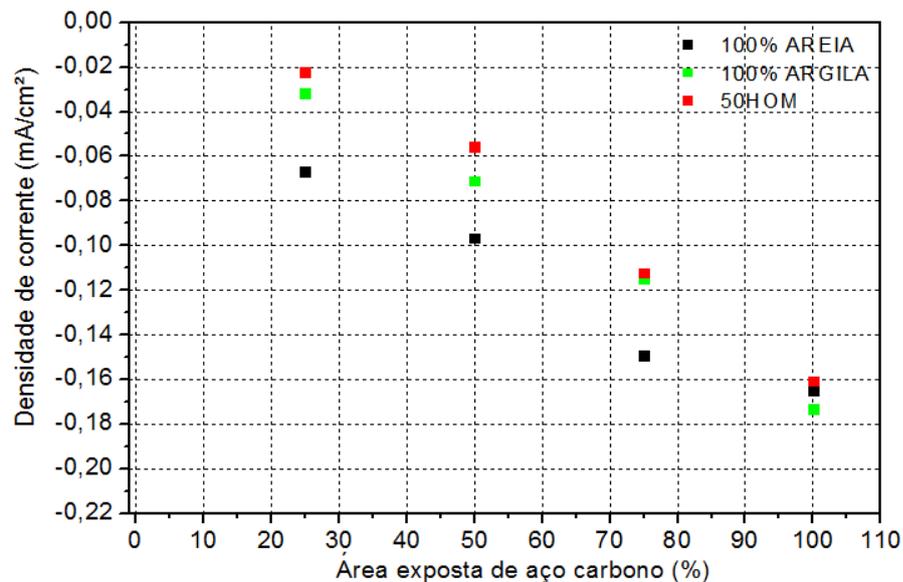


Figura 13 - Comparação dos resultados obtidos no solo 100ARG, 100ARE e 50HOM.

Compreender o fluxo da corrente em solos resistivos é o principal entrave para a aplicação das técnicas eletroquímicas em solo, por isso a grande importância dos resultados obtidos durante esta etapa do trabalho.

A Figura 14 demonstra as faixas de densidade de corrente característica dos corpos de prova (100%AC, 75% AC, 50% AC e 25% AC) para todos os solos. É possível constatar que existem faixas nítidas que limitam as densidades de correntes de cada corpo de prova e naturalmente, quanto maior a área exposta de aço carbono, maior a densidade de corrente injetada no corpo de prova.

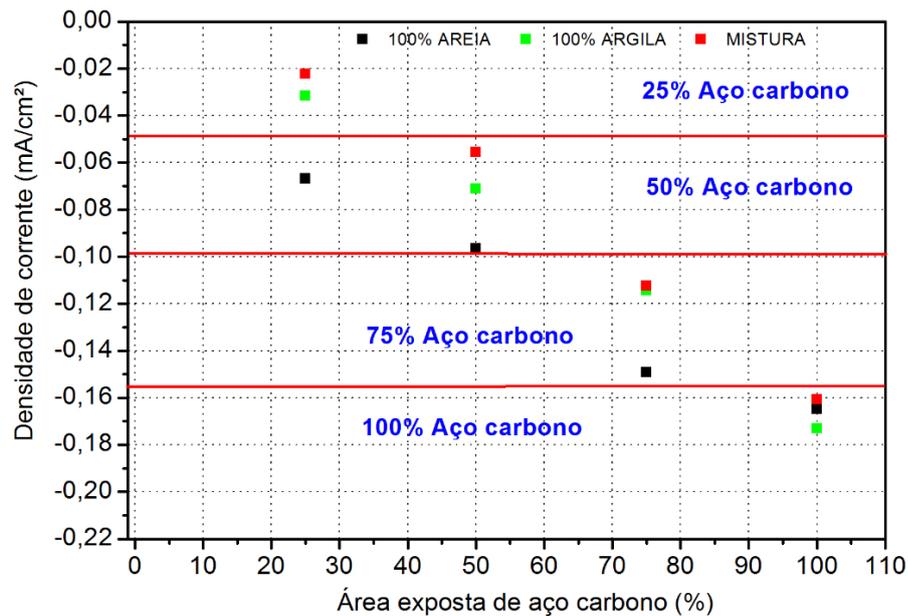


Figura 2 - Faixas de densidade de corrente característica dos corpos de prova estudados (100%AC, 75% AC, 50% AC e 25% AC) para todos os solos estudados.

Como pode-se observar na Figura 14, todas as medidas de injeção de corrente para o substrato 100%AC estão com valores menores do que $-0,155 \text{ mA/cm}^2$. Já o substrato 75%AC tem suas medidas limitadas entre $-0,098 \text{ mA/cm}^2$ e $-0,155 \text{ mA/cm}^2$. Entre os substratos de 50%AC e 25%AC não existe uma linha de separação clara, devido à proximidade entre os valores medidos e a pequena magnitude dos valores de densidade de corrente obtidos, observando-se que para certos solos existe uma sobreposição de faixa de densidade de corrente. Além disso, nessas condições, ainda existe uma grande quantidade de zinco nos corpos de prova, o que acaba por dificultar a separação das diferentes condições de superfície, 25%AC e 50%AC [1]. Porém, estima-se que a densidade de corrente limite entre essas duas faixas está localizada em torno de $-0,05 \text{ mA/cm}^2$, conforme ilustrado na Figura 14.

A separação em faixas de densidade de corrente para o comportamento dos diferentes substratos estudados é mais uma informação extremamente relevante para a constatação do real estado de corrosão dos pés de torres de linhas de transmissão enterrados, juntamente com o gráfico de densidade de corrente versus área exposta de aço carbono, para cada tipo de solo.

Ambas são ferramentas complementares que podem ser utilizadas conjuntamente na otimização das inspeções anticorrosivas realizadas em campo pelas equipes de manutenção.

Conclusões

Os resultados obtidos durante as medidas de resistividade foram de grande importância para compreensão da aplicação da técnica de injeção de corrente nos diferentes solos. A forma com que a água percola o solo também é um fator importante para a realização das medidas de injeção de corrente.

Observou-se que as medidas de injeção de corrente são reprodutíveis e confiáveis quando a umidade do solo encontra-se em torno de 8%, ou então quando a resistividade do solo é ≤ 100 k Ω .cm.

Foi possível obter gráficos de densidade de corrente em função da área exposta de aço carbono para cada tipo de solo, em geral, com comportamento linear entre as grandezas. Evidenciando que a técnica de injeção de corrente é bastante promissora para a avaliação do real estado de corrosão dos pés de torres de linhas de transmissão. Além disso, a separação em faixas de densidade de corrente para o comportamento dos diferentes substratos estudados é mais uma informação extremamente relevante, complementar aos gráficos já mencionados.

A técnica de injeção de corrente pode ser uma ferramenta de diagnóstico utilizada, na otimização das inspeções anticorrosivas realizadas em campo pelas equipes de manutenção. Desta forma, se tem uma ferramenta de inspeção, auxiliando e gerando agilidade ao processo de manutenção de linhas de transmissão.

Referências bibliográficas

- [1] GARCÍA, E.; MALO, J. M.; URUCHURTU, J., “Corrosion Monitoring of Electric Transmission Line Tower Legs by Electrochemical Methods”, InterCorr, 1998.
- [2] SERRA, E. T. Corrosão e proteção anticorrosiva dos metais no solo. Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), Rio de Janeiro, 2006.
- [3] ABNT NBR 6457 - Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016.
- [4] GOTLEB, M.; VIEIRA, R. R. Corrosividade de solos. Metalurgia (ABM), vol 25, nº 152, 1970.
- [5] BOOTH, G. H.; COOPER, A. W.; COOPER PAMELA M. Criteria of soil aggressiveness toward buried metals – I) Experimental Methods, British Corrosion Journal, Volume 2, Issue 3, 1967.

[6] Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) - CNPS. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Brasília: Embrapa-SPI; Rio de Janeiro: Embrapa-Solos, 2006.