

AVALIAÇÃO PRELIMINAR DA CORROSIVIDADE DE SOLO COM O EMPREGO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA EM UMA PLANTA INDUSTRIAL UTILIZADA PARA ARMAZENAMENTO DE DERIVADOS DE PETRÓLEO

Carlos Alberto de NÓBREGA ¹, CHANG Hung Kiang ¹, Antonio Celso de Oliveria BRAGA ¹,
Josely FERREIRA ², Andreza OLIVA ³, Marco Aurélio Zequim PEDE ⁴

(1) Departamento de Geologia Aplicada, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP. Avenida 24-A, 1515 - Bela Vista. CEP 13506-900. Rio Claro, SP. (2) Doutoranda da Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP. Rua Mendeleiev, s/n - Cidade Universitária Zeferino Vaz - Barão Geraldo. CEP: 13083-970. Campinas, SP. (3) Doutoranda do Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP. Avenida 24-A, 1515 - Bela Vista. CEP 13506-900. Rio Claro, SP. (4) Mestrando do Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP. Avenida 24-A, 1515 - Bela Vista. CEP 13506-900. Rio Claro, SP.

Introdução
Corrosão de Materiais Metálicos
Aspectos Geológicos do Local Investigado
Avaliação da Resistividade Elétrica Através de Sondagens Elétricas Verticais – SEVs
Sondagens Mecânicas e Ensaio para a Determinação da Condutividade Hidráulica
Considerações sobre o Potencial de Corrosão do Solo
Análise dos Resultados
Conclusões e Considerações Finais
Referências Bibliográficas

RESUMO: Estruturas de metal enterradas em solo são usualmente projetadas para uma longa vida útil. Antes que uma estrutura desse tipo seja instalada, a taxa de corrosão (corrosividade) e a necessidade de medidas de proteção precisam ser estimadas. Às vezes, há interesse em estimar a corrosão em estruturas metálicas que já se encontram enterradas no solo. Também neste caso, uma primeira providência consiste na estimativa da corrosividade. A corrosão é um fenômeno complexo. Diversas variáveis têm influência na taxa de corrosão, que entre outras incluem: composição química, textura e estrutura, condições de aeração e difusão do oxigênio (potencial redox), nível do lençol freático, pH, sais solúveis e resistividade elétrica, esta última, por sua vez, afetada por alguns dos outros fatores mencionados. A importância relativa de cada variável muda conforme o material considerado, tornando difícil, senão impossível, uma classificação universal para corrosão. A corrosividade pode ser estimada medindo-se todos os parâmetros mencionados acima. Entretanto, no presente artigo, apresenta-se uma estimativa expedita preliminar da corrosividade do solo em uma planta industrial de armazenamento de derivados de petróleo, com base principalmente na resistividade elétrica.

Palavras-chave: Corrosividade do solo; estimativa preliminar; estruturas metálicas subterrâneas; resistividade elétrica; investigação do subsolo; ensaio de campo.

ABSTRACT: *C. de A. Nóbrega, Chang, H.K., A.C. de O. Braga, J. Ferreira, A. Oliva, M.A.Z. Pede - Preliminary assessment of soil corrosivity using electrical resistivity in an oil storage industrial plant.* Underground metal structures are usually expected to have a long working life. Before such a structure is put in place, the rate of corrosion (corrosivity) and the need for protection measures should be estimated. Sometimes it is of interest to estimate the on-going corrosion of metal structures already buried in the soil. Also in this case a first measure is to make an estimate of the corrosivity of the soil. Soil corrosion is a complex phenomenon. Several variables have been identified to have an influence on corrosion rates in soil. These include among others: chemical composition, texture and structure, aeration and oxygen diffusion conditions (redox potential), ground water level, pH, soluble salt content, and electrical resistivity which is affected by some of the other factors mentioned. The relative importance of each variable changes for different materials, making difficult if not impossible a universal classification to corrosion. Corrosivity can be estimated by measurement of all the parameters mentioned above. In the present paper, however, a quick preliminary estimate of soil corrosivity in an oil storage industrial plant is presented, based chiefly on electrical resistivity measurements.

Keywords: Soil corrosivity; preliminary estimate; underground metal structures; electrical resistivity; site characterization; *in situ* testing.

INTRODUÇÃO

O presente trabalho descreve a aplicação de metodologia expedita baseada principalmente no emprego do método geofísico da eletrorresistividade para avaliação preliminar da corrosividade do solo em uma instalação para armazenamento de derivados de petróleo. Os ensaios geofísicos de campo fazem parte de um conjunto de estudos e atividades resultantes de uma solicitação para avaliação das características

hidrogeológicas e do potencial de corrosão do solo em uma área ocupada por um terminal de distribuição de derivados de petróleo localizado na cidade de São Paulo, como parte integrante do material solicitado pelo órgão ambiental para a liberação de licença de instalação do referido empreendimento. Tal caracterização, além do potencial de corrosão do solo, visou inicialmente mapear a superfície potenciométrica, determinar o sentido de

fluxo da água subterrânea, bem como caracterizar outras propriedades hidrogeológicas do local.

A corrosão de metais em contacto com solo é um fenômeno bastante complexo em que estão envolvidas múltiplas variáveis. Comparado à corrosão atmosférica e outros tipos de corrosão, este ainda é um assunto menos investigado dada a complexidade do solo como meio corrosivo. Os estudos no Brasil têm privilegiado a abordagem de questões específicas relacionadas, por exemplo, ao diagnóstico de casos em que ocorrem correntes de fuga e ao detalhamento de soluções de engenharia (revestimentos, proteção catódica, proteção anódica etc). Excetuando-se algumas contribuições esporádicas, como a de Gibotti Jr.(1999), poucos trabalhos abordam a questão do ponto de vista da caracterização das propriedades do meio físico, intervenientes no fenômeno. São diversos os fatores que contribuem para a corrosividade dos solos. Dentre estes se incluem: o tipo de solo, suas características estruturais, texturais (composição granulométrica), permeabilidade, teor de umidade, posição do nível do lençol freático, grau de aeração, conteúdo de sais solúveis, acidez, presença de microorganismos etc. Para tornar o problema ainda mais difícil, alguns destes fatores são inter-relacionados.

A determinação de propriedades do solo através de ensaios realizados em laboratório possibilita maior controle; entretanto, freqüentemente, apresenta como desvantagens: a necessidade da coleta de amostras indeformadas no campo, seu transporte e preparação, além da menor representatividade das amostras e conseqüentemente dos resultados obtidos. Por estes motivos, sempre que possível, é preferível realizar os ensaios *in situ*.

Profissionais que militam nas áreas de Hidrogeologia e Geotecnia freqüentemente se deparam

com a necessidade de caracterizar o comportamento de solos e rochas de forma ágil e com baixo custo. Visando a redução destes custos e do tempo despendido na caracterização dos materiais através de ensaios convencionais, tem-se recorrido cada vez mais ao emprego de correlações empíricas entre propriedades índices dos materiais e suas propriedades de engenharia, e à realização de ensaios expeditos de laboratório e de campo. A investigação preliminar através da utilização de estimativas baseadas em parâmetros “índices”, combinada com a execução de ensaios expeditos tem como principais características a simplicidade, rapidez de execução e baixo custo, quando comparada às metodologias que empregam ensaios de laboratório e de campo convencionais.

Apesar das limitações típicas inerentes às técnicas expeditas, estas, quando bem planejadas e conduzidas, possibilitam a obtenção de informações representativas das condições dos locais de interesse.

No presente caso, o emprego do método geofísico da eletrorresistividade para avaliação preliminar da corrosividade do solo atendeu aos pré-requisitos de rapidez e baixo custo, uma vez que estes ensaios foram programados visando caracterizar também outras propriedades hidrogeológicas do local.

Pretende-se aqui contribuir para a sistematização deste assunto, privilegiando metodologias que possibilitem diagnósticos e avaliações expeditas. A investigação detalhada de situações específicas envolvendo, por exemplo, o potencial corrosivo em virtude de correntes de fuga ou ainda a corrosão bacteriana, não constitui o escopo do presente estudo. Estas e outras situações particulares já vêm sendo objeto de estudos por parte de especialistas nas áreas de Engenharia de Materiais, Engenharia Elétrica, Engenharia Química, Bioquímica, Biologia etc.

CORROSÃO DE MATERIAIS METÁLICOS

A corrosão é um processo de deterioração química natural que resulta da inerente tendência dos metais reverterem para sua forma mais estável. A maioria dos metais é encontrada na natureza na forma de compostos estáveis como óxidos, sulfetos, silicatos etc. Durante o processo de extração e refino, é adicionada uma determinada quantidade de energia aos minérios para extrair o metal ou metais neles contidos. É esta mesma energia que possibilita o aparecimento de forças capazes de reverter o metal à sua forma primitiva de composto mais estável. Como esclarece Pimenta (2002), nos processos de corrosão, os metais reagem com os elementos não metálicos presentes no meio, O₂, S, H₂S, CO₂ entre outros, produzindo compostos semelhantes aos encontrados na natureza, dos quais foram extraídos.

Conclui-se, portanto, que nestes casos, a corrosão corresponde ao inverso dos processos metalúrgicos.

Segundo artigo disponível no *site* da Associação Brasileira de Corrosão (ABRACO, 2002), excetuando alguns tipos, como a bacteriana ou por ataque químico direto, pode-se dizer que a corrosão, como normalmente encontrada numa tubulação metálica, é basicamente um processo eletroquímico por natureza. Uma tubulação é essencialmente um pedaço de metal envolvido por um eletrólito. Ao longo do tempo, os potenciais elétricos podem variar de um ponto da tubulação para outro, como resultado da existência de áreas anódicas e catódicas. Estas áreas de diferentes potenciais elétricos são a base para uma célula de corrosão. Segundo o artigo acima mencionado, as

seguintes condições devem estar presentes para que uma célula de corrosão passe a atuar:

- existência de um anodo e de um catodo;
- existência de uma diferença de potencial elétrico entre o anodo e o catodo;
- existência de um caminho metálico conectando eletricamente o anodo e o catodo;
- o anodo e o catodo devem estar imersos num

eletrólito eletricamente condutivo. (a mistura de solo e água, circundando tubulações, é normalmente suficiente para preencher esta condição).

Caso as condições anteriores estejam presentes, uma célula de corrosão é criada, uma corrente elétrica fluirá, e o metal será consumido no anodo. Se uma dessas quatro condições for removida, a corrosão é interrompida.

ASPECTOS GEOLÓGICOS DO LOCAL INVESTIGADO

A área onde está instalado o terminal de distribuição de derivados de petróleo, objeto do presente estudo, situa-se na bacia hidrográfica do Alto Tietê. A geologia caracteriza-se pela presença de sedimentos da Bacia Sedimentar de São Paulo, de idade terciária, e de depósitos sedimentares aluviais quaternários que se sobrepõem a rochas granitóides pré-cambrianas foliadas do embasamento, pertencentes ao Complexo Embu (Ricomini, 1992) (Figura 1).

Os sedimentos terciários de natureza lamítica, arenosa a argilosa, cobrem as porções mais elevadas da área. Nas proximidades das drenagens, observam-se depósitos sedimentares aluviais quaternários argilo-arenosos. Rochas granitóides foliadas e metasedimentos do embasamento cristalino ocorrem nas proximidades do local, porém não afloram, na área do terminal de derivados de petróleo.

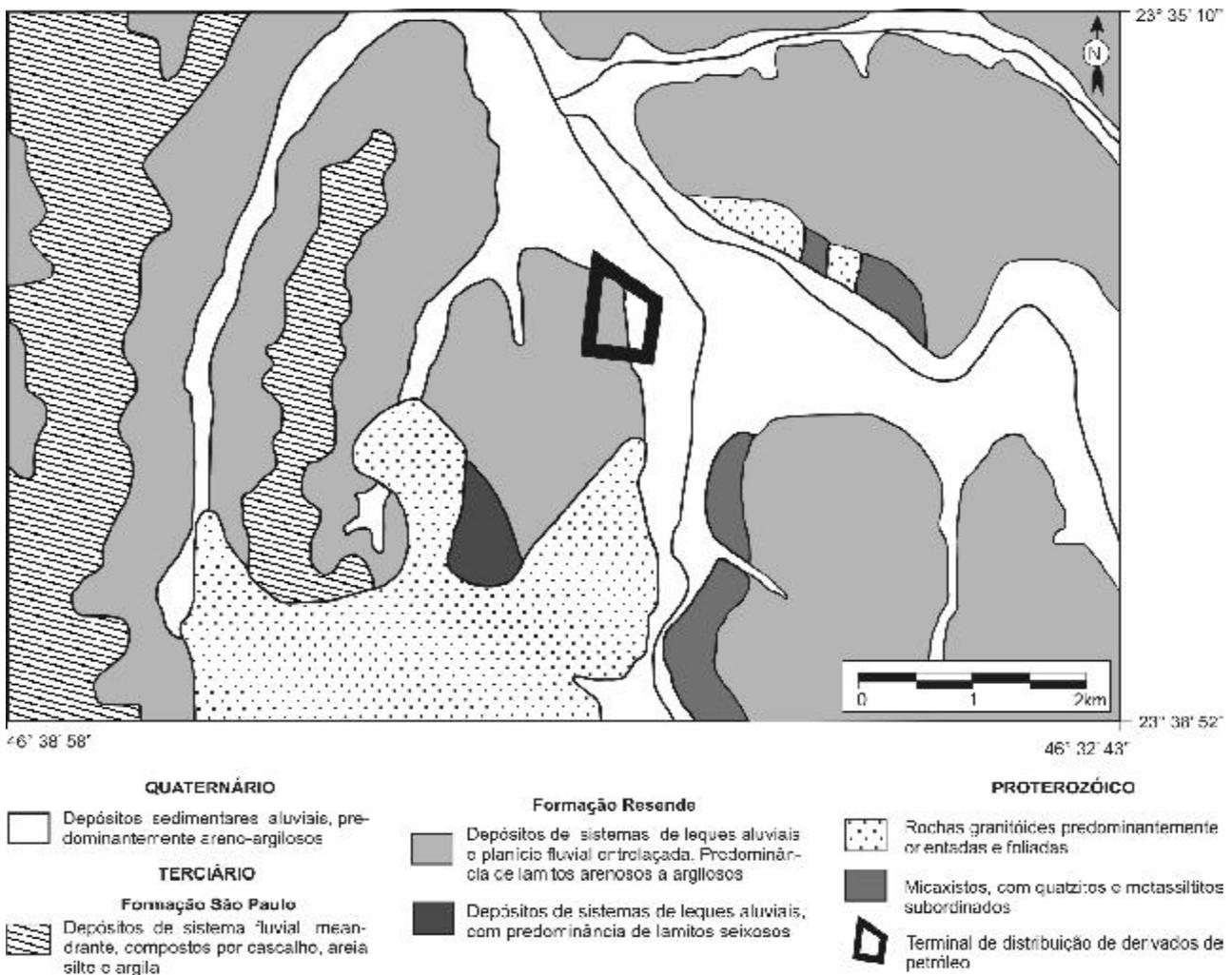


FIGURA 1. Mapa geológico da bacia hidrográfica do Alto Tietê nas vizinhanças do empreendimento.

A construção do empreendimento exigiu a execução de cortes nos morros preexistentes. A finalidade dessas escavações foi dupla: primeiro, regularizar a topografia do terreno; segundo, conseguir terra para o aterro de áreas alagadiças circunvizinhas, formando uma faixa de solo firme, onde seriam fundados os tanques, edifícios etc. Desses cortes, resultou o material

de empréstimo para aterros e o espaço livre para fundações em terreno firme. O material utilizado nesses aterros constitui-se em um solo vermelho silto-argiloso, originado da alteração dos sedimentos terciários e das rochas granitóides pré-cambrianas. Em toda a área do terminal, os aterros recobrem os sedimentos quaternários nos locais de topografia mais baixa.

AVALIAÇÃO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA ATRAVÉS DE SONDAGENS ELÉTRICAS VERTICAIS – SEV’S

Os diferentes tipos de materiais existentes no ambiente geológico apresentam, como uma de suas propriedades fundamentais, o parâmetro físico resistividade elétrica. De forma simplificada, a resistividade pode ser definida como uma medida da dificuldade que a corrente elétrica encontra na sua passagem por determinado material, o que depende dos mecanismos de propagação da corrente elétrica.

A resistividade de solos e rochas é função da quantidade de água, da natureza dos sais dissolvidos e da porosidade efetiva. Praticamente todas os materiais possuem poros, em maior ou menor proporção, que podem estar ocupados, total ou parcialmente, por eletrólitos. Isto faz com que estes se comportem como condutores iônicos de resistividades muito variáveis.

De forma geral, a resistividade é influenciada pelos seguintes fatores:

- resistividade dos minerais que formam o arcabouço sólido;
- resistividade dos líquidos e gases que preenchem os poros;
- teor de umidade;
- porosidade;
- textura e a forma e distribuição dos poros;
- processos que ocorrem nas interfaces da fase líquida contida nos poros do arcabouço sólido (minerais), envolvendo, por exemplo, a adsorção de íons na superfície das partículas dos minerais, e contribuindo para a diminuição da resistividade total destes materiais.

O método da eletrorresistividade consiste na introdução de uma corrente elétrica no subsolo e no cálculo das resistividades dos materiais geológicos em diferentes profundidades.

Os arranjos de campo dos principais métodos geoelétricos empregados (Wenner ou Schlumberger) constam de quatro eletrodos cravados na superfície do terreno. Um par de eletrodos serve para introduzir a corrente elétrica no subsolo. O outro par é utilizado para medir a diferença de potencial que se estabelece entre eles, como resultado da passagem da corrente.

A resistividade r do meio investigado é calculada mediante a seguinte equação:

$$\rho = K \frac{\Delta V}{I} \quad (\text{ohm.m}),$$

onde:

$$K = 2\pi \left[\frac{1}{AM} + \frac{1}{BM} + \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right]$$

Na prática, o subsolo não pode ser considerado um meio homogêneo. Desta forma, a grandeza que de fato se obtém constitui a resistividade aparente (r_a), uma vez que representa a média ponderada de todas as resistividades verdadeiras de um volume relativamente grande de material em subsuperfície. A unidade em que se expressa a resistividade aparente r_a é o ohm.m.

A técnica da sondagem elétrica, na forma como foi realizada no presente trabalho, consiste de medições sucessivas da resistividade aparente (r_a), efetuadas a partir da superfície do terreno, aumentando-se a distância entre os eletrodos de emissão de corrente e recepção de potencial.

Quando a disposição dos eletrodos alinhados na superfície do terreno é simétrica e, durante a sucessão de medidas, a direção do arranjo e o centro do dipolo de recepção de potencial (MN) permanecem fixos, tem-se a sondagem elétrica vertical ou abreviadamente SEV.

As resistividades elétricas para avaliação da corrosividade do solo podem ser medidas *in situ* por intermédio dos arranjos Wenner e Schlumberger. No Brasil não há normas que disciplinem a questão. Normas norte-americanas (ASTM, 2001) indicam a primeira alternativa. Entretanto, optou-se pelo arranjo Schlumberger pelas razões apontadas a seguir.

A idéia básica deste arranjo é fazer com que a distância que separa os eletrodos MN tenda a zero em relação à distância crescente entre AB (Figura 2).

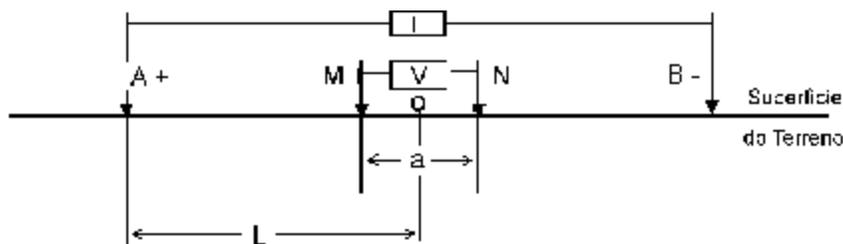


FIGURA 2. Arranjo de campo linear e simétrico – técnica da SEV.

Neste arranjo, as leituras estão pouco sujeitas a variações laterais no parâmetro físico medido, às irregularidades da superfície topográfica e aos ruídos produzidos por fontes artificiais. Com isto, as leituras de campo apresentam maior precisão, resultando numa interpretação mais próxima da realidade e coerente com os princípios gerais que norteiam a técnica da SEV.

O valor da resistividade aparente na técnica da SEV – arranjo de campo Schlumberger – após simplificar a equação geral para o coeficiente geométrico K , é dado por:

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \quad (\text{ohm.m}),$$

onde:

$$K = \pi \frac{\overline{AM} \cdot \overline{AN}}{\overline{MN}}$$

No desenvolvimento da técnica da SEV, introduz-se no subsolo a corrente elétrica (I), por meio dos eletrodos A e B , e mede-se, entre os eletrodos M e N , a diferença de potencial criada (DV). As medidas obtidas são utilizadas para o cálculo da resistividade aparente, empregando-se as equações referidas no item anterior.

Ao aumentar-se a distância entre os eletrodos de corrente A e B , o volume amostrado também aumenta, permitindo alcançar camadas cada vez mais profundas. Os resultados sucessivos estarão, portanto, estritamente relacionados às variações da resistividade com a profundidade.

Para efeito de programação de campanhas de sondagens elétricas verticais, as profundidades teóricas de investigação, atingidas pelas SEV's, podem ser estimadas segundo as relações: $AB/3$ a $AB/4$. Ressalta-se que, dependendo dos contrastes entre as resistividades das camadas geoeletricas, na prática estas relações podem ser alteradas.

Foram executadas no local 21 SEVs com espaçamento máximo, entre os eletrodos de corrente AB , de 200 m (permitindo a investigação de uma profundidade teórica de 50 m), com objetivo principal de determinar a profundidade do nível d'água; e 7 SEVs com espaçamento máximo de 10 m, para refinar a malha de resistividade superficial, objetivando especificamente subsidiar a análise do potencial de corrosão do solo. As SEVs foram posicionadas procurando distribuí-las em uma malha regular, respeitadas as limitações operacionais da técnica e questões de segurança locais (Figura 3).

SONDAGENS MECÂNICAS E ENSAIOS PARA A DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

Além das SEV's foram realizados 17 ensaios na área do terminal, utilizando permeâmetro Guelph (Soil Moisture Corporation, 1987) e visando avaliar a condutividade hidráulica de materiais (solo natural e aterro) da zona não-saturada. Em 10 sondagens

mecânicas realizadas para a instalação de poços de monitoramento no local, testes de *slug* foram efetuados com o objetivo de determinar a condutividade hidráulica do meio poroso saturado (Figura 3).

CONSIDERAÇÕES SOBRE O POTENCIAL DE CORROSÃO DO SOLO

O comportamento do solo como meio corrosivo em uma planta industrial depende de muitos variáveis, algumas que dizem respeito a características inerentes ao meio físico e biótico: estrutura, textura (composição granulométrica), permeabilidade, teor de umidade,

posição do nível do lençol freático, grau de aeração, conteúdo de sais solúveis, acidez, presença de microorganismos redutores de sulfato etc., e outras que não possuem qualquer relação com propriedades intrínsecas do solo, tais como: a melhor ou pior qualidade



FIGURA 3. Mapa de localização dos ensaios de campo e das sondagens mecânicas para a instalação de poços de monitoramento.

do revestimento utilizado em tubulações, a existência de contatos bimetalícos ou de correntes de fuga etc. Essa grande quantidade de variáveis faz com que o solo seja considerado um meio corrosivo complexo, tornando difícil determinar-se com exatidão sua ação agressiva sobre os diversos materiais metálicos que nele podem ser enterrados. Portanto, a importância relativa de cada variável muda conforme o material considerado, tornando difícil senão impossível uma classificação universal para a corrosão. Frequentemente, no entanto, o aço e o ferro fundido são os materiais de emprego mais comum em plantas industriais. Apesar da multiplicidade de variáveis que influem, o fenômeno da corrosão dos materiais metálicos, a agressividade do solo e os problemas de corrosão podem, entretanto, ser avaliados em caráter preliminar com precisão compatível, mediante a determinação da sua resistividade elétrica.

Uma avaliação mais detalhada da corrosividade necessariamente vai requerer o emprego de diversos parâmetros representativos das características do meio

físico, biótico e dos materiais envolvidos, método construtivo empregado, a existência de correntes de fuga etc. Este tipo de investigação detalhada de situações específicas, entretanto, não constitui o escopo da presente proposta, uma vez que este detalhamento já vem sendo objeto de estudos por parte de especialistas nas áreas de Engenharia de Materiais, Engenharia Elétrica, Engenharia Química, Bioquímica, Biologia, etc. Por outro lado há uma demanda crescente por estimativas expeditas acerca da corrosividade dos solos em estudos de avaliação de impacto ambiental, licença de instalação de empreendimentos industriais diversos, postos de combustíveis, oleodutos, gasodutos, fundações de torres de transmissão etc.

Diferentes classificações, apresentadas sob a forma de tabelas e planilhas, têm sido propostas visando a estimativa preliminar da probabilidade da ocorrência de corrosão envolvendo condutos metálicos, tanques de armazenamento a céu aberto e subterrâneos, assim como diversos tipos de componentes estruturais cujas superfícies externas estejam em contacto com o solo.

É necessário, novamente esclarecer, que a probabilidade de corrosão destes elementos metálicos não é função apenas da corrosividade do solo. Na realidade, esta depende de uma série de outros fatores que incluem as características dos materiais empregados, detalhes do projeto, dimensões, e também de efeitos externos, como por exemplo, a existência de correntes de fuga. Este fato, porém não invalida a necessidade de se contemplar os aspectos relacionados ao potencial de corrosão do solo local.

Nogueira Junior & Silva (1990) já haviam apontado que o emprego de tabelas de classificação do grau de corrosividade do solo é procedimento controverso, devido à diversidade de critérios adotados.

Na opinião dos autores deste artigo, este fato é ainda mais acentuado no Brasil, porque os critérios de avaliação utilizados foram formulados em locais com características climáticas, pedológicas e hidrogeológicas muitas vezes diversas das que prevalecem no Brasil. Deste modo, a seleção de parâmetros e principalmente dos intervalos de valores a serem empregados nos sistemas de classificação, requer uma análise mais aprofundada. A prudência recomenda que a escolha de um ou mais critérios de classificação, seja

feita após uma análise específica para cada caso em particular.

Apesar das limitações apontadas, a propriedade do meio físico que sempre aparece incluída entre os parâmetros utilizados pelas diversas classificações relativas ao grau de corrosividade do solo, é a resistividade elétrica ou seu inverso, a condutividade. Quanto menor a resistividade, mais facilmente a corrente elétrica irá fluir através do solo. Deste modo, a resistividade é geralmente aceita como indicador primário da corrosividade do solo, porque seu valor reflete as características texturais e de composição mineralógica, teor de umidade e conteúdo de sais em solução.

O Quadro 1 apresenta algumas classificações que visam a estimativa preliminar da corrosividade dos solos, com base exclusivamente em valores de resistividade. O exame deste quadro mostra que valores de resistividade superiores a 100 ohm.m são indicativos de baixo grau de corrosão. Abaixo deste valor, os diversos autores estabelecem detalhamentos distintos no espectro dos valores de resistividade associados ao grau de corrosividade. No entanto, valores inferiores a 20 ohm.m são considerados por todos como indicativos de alta corrosividade.

QUADRO 1. Classificações quanto ao grau de corrosividade do solo, com base em valores de resistividade elétrica.

FELIPE & ANDRADE (1991)		ROBERGE (1999)		NOGUEIRA JR. & SILVA (1990)		KELLY & MARES (1993)		U.S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE (2001)	
Resistividade (Ohm.m)	Grau de Corrosividade	Resistividade (Ohm.m)	Grau de Corrosividade	Resistividade (Ohm.m)	Grau de Corrosividade	Resistividade (Ohm.m)	Grau de Corrosividade	Resistividade (Ohm.m)	Grau de Corrosividade
< 10	Muito Alto	< 10	Extremamente corrosiva	< 10		< 25	Muito alto	< 20	Alto
10 a 25	Alto	10 a 30	Muito corrosivo	10 a 20	Alto	25 a 50	Alto		
25 a 50	Moderado	30 a 50	Corrosivo	20 a 60	Médio	50 a 100	Médio	20 a 50	Moderado
50 a 100	Baixo	50 a 100	Marginalmente corrosivo	60 a 100	Baixo				
> 100	Muito baixo	100 a 200	Levemente corrosiva	100 a 150	Devidoso	> 100	Muito baixa	> 50	Baixo
		> 200	Essencialmente não corrosiva	> 150	Não corrosivo				

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Basicamente foram identificadas no local três litofácies, constituídas por: (1) aterro argilo-siltoso, (2) sedimentos quaternários e (3) embasamento cristalino alterado, composto por material areno-siltoso, muitas vezes com foliação preservada. O aquífero raso, de caráter não confinado (livre), situa-se principalmente nos sedimentos quaternários e no embasamento alterado.

O modelo geoeletrico, obtido a partir da interpretação dos resultados das SEVs associada à observação

de níveis d'água em poços de monitoramento, possibilitou a identificação de uma zona não saturada, correspondente à porção localizada acima do nível d'água e uma zona saturada, localizada abaixo do nível d'água.

A interpretação conjunta das SEV's e das sondagens mecânicas permitiu que se chegasse à seguinte compartimentação geológico-geotécnica:

- zona não saturada: aterro argilo-siltoso e sedimentos superficiais parcialmente saturados;
- zona saturada: sedimentos predominantemente arenosos e/ou argilosos;

- rocha cristalina correspondente ao embasamento.

Para a zona não saturada, os valores de resistividade obtidos apresentam uma ampla gama de variação, típica de sedimentos parcialmente saturados (Figura 4). Tradicionalmente, os valores de resistividades dos sedimentos não saturados são elevados e variam amplamente de um local para outro. Pequenas variações de saturação, principalmente nos níveis mais superficiais, podem resultar em valores de baixa resistividade. Entretanto, foram obtidos em alguns locais na área estudada, valores muito baixos para esses sedimentos em algumas SEVs (SEV 04, SEV 05, SEV 18 e SEV 19). Essas faixas muito condutoras estão provavelmente associadas a bolsões localizados com composição mais argilosa, que resultam também em teores de umidade mais elevados em relação às áreas circunvizinhas, ou ainda à contaminação por despojos industriais decorrentes de vazamentos de derivados de petróleo.

Na zona saturada, à semelhança do que ocorreu em relação à zona não saturada, obteve-se alguns níveis geoeletricos de resistividades muito baixas (menores do que 50 ohm.m). Esses provavelmente apresentam contaminação e, apesar de localizados, deverão ser objeto de investigação mais detalhada uma vez que

são indicadores de potencial corrosivo mais acentuado (Figura 5). Como exemplo, pode-se citar a SEV 01, cujas quarta e quinta camadas apresentam valores de 27 ohm.m e 4 ohm.m respectivamente. Estas anomalias encontram-se na região dos tanques, englobando as SEVs 1 e 18. Nas extremidades leste e sudeste do empreendimento, os baixos valores podem estar afetados por artefatos de interpolação introduzidos pelo *software* de interpretação.

A área do empreendimento assenta-se sobre um aquífero livre, com profundidades do nível d'água observadas nos poços de monitoramento variando de 0,5 m a 3,5 m. Essa observação associada à interpretação dos resultados das SEV's possibilitou a confecção de um mapa de espessura da zona não saturada (Figura 6). Essa informação é relevante quando futuramente for necessária uma análise de detalhe do potencial corrosivo em pontos localizados do empreendimento, uma vez que há a possibilidade da formação de pilhas de corrosão devido ao fato do solo estar submetido a diferentes condições de aeração, originando corrosão por aeração diferencial em tubulações enterradas. Nesse caso, as regiões mais atacadas seriam aquelas que ficam pouco abaixo do solo.

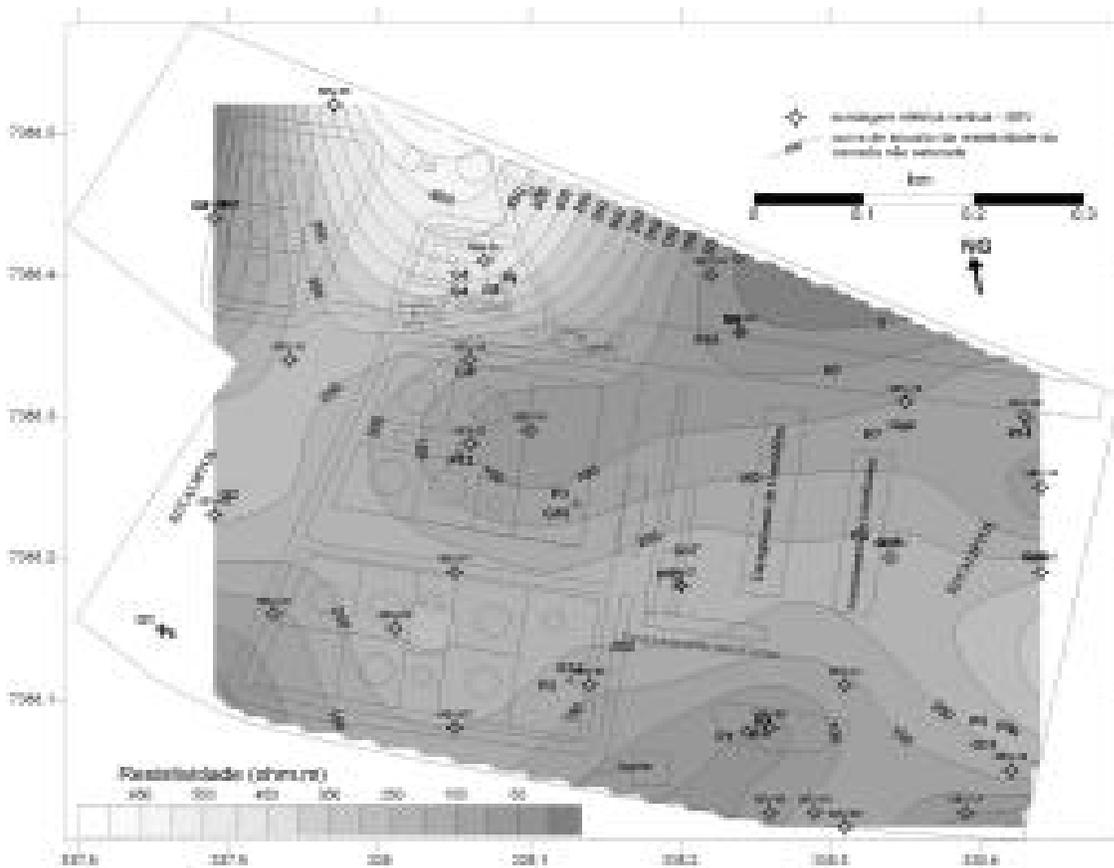


FIGURA 4. Mapa de resistividade da camada geoeletrica não saturada.

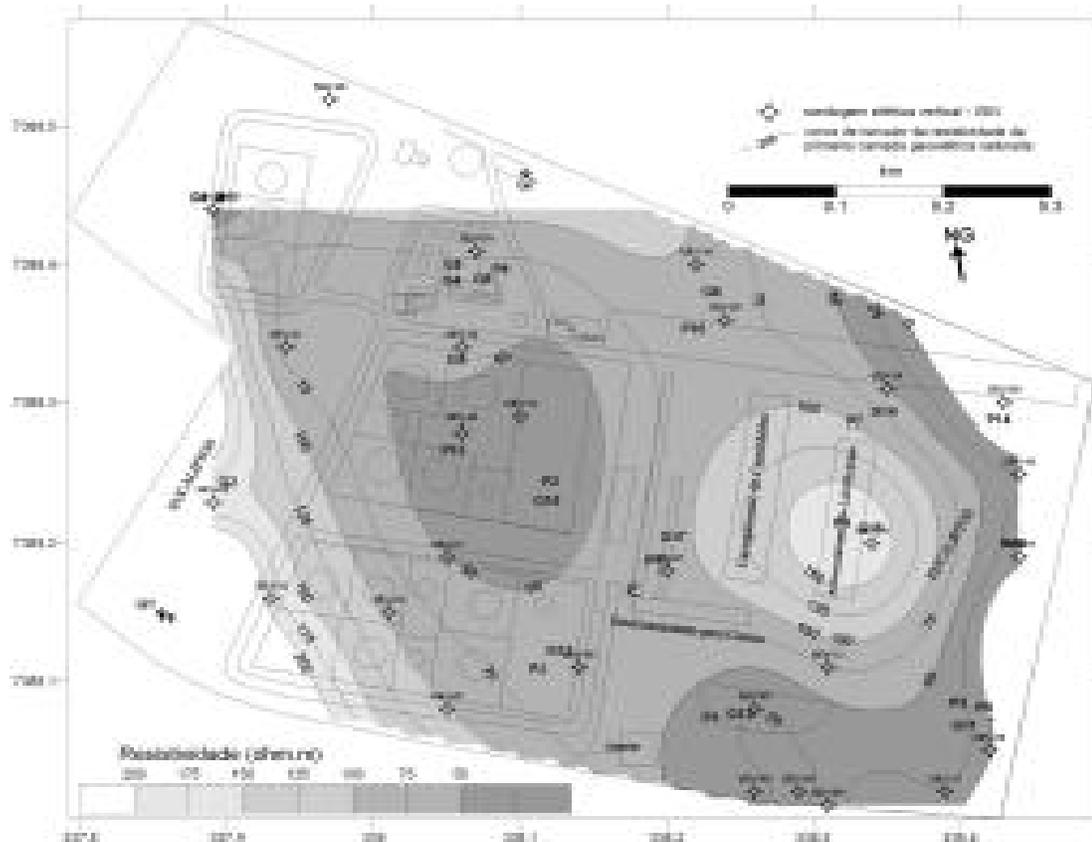


FIGURA 5. Mapa de resistividade da primeira camada geolétrica saturada.

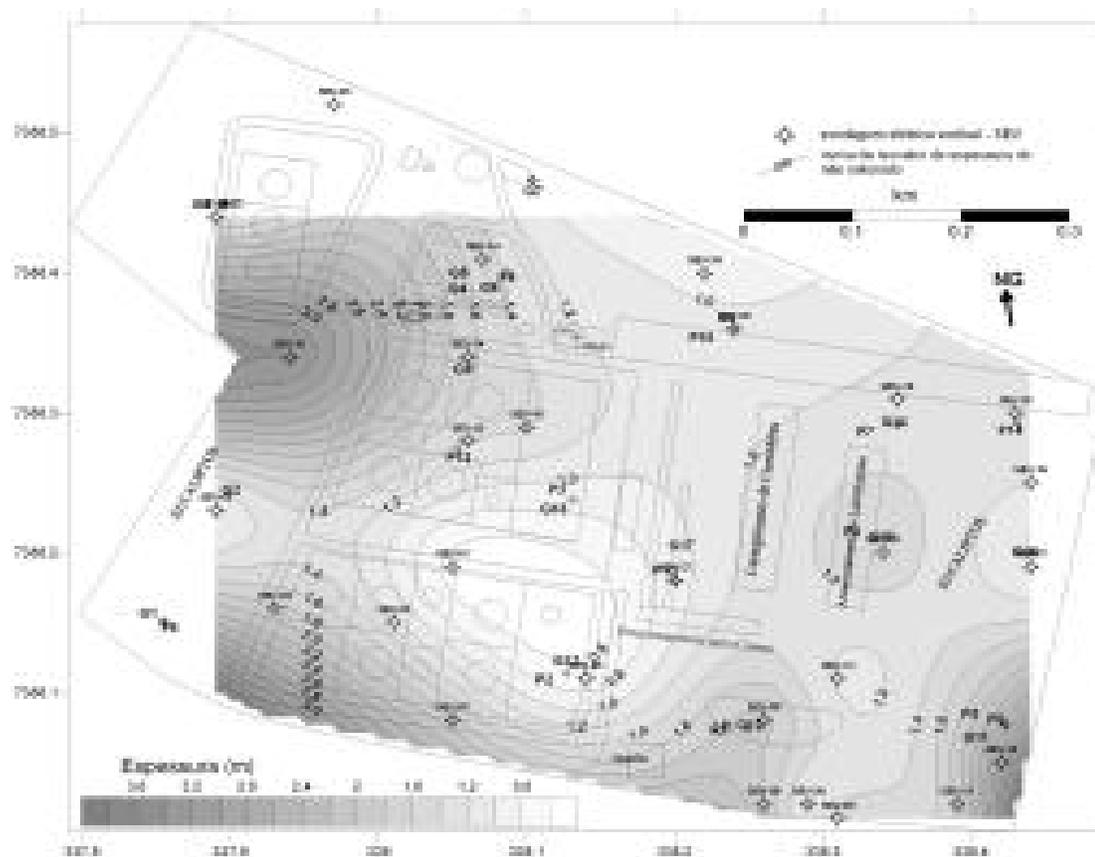


FIGURA 6. Mapa de espessura da camada geolétrica não saturada.

Resultados de ensaios de condutividade hidráulica *in situ*, utilizando permeâmetro Guelph, revelaram que a permeabilidade do solo superficial (aterro) é baixa, apresentando valores de K na sua quase totalidade inferiores a $1,0 \times 10^{-5}$ cm/s. Testes de *slug* efetuados em 10 poços perfurados no local forneceram valores de condutividade hidráulica média do meio saturado, que variam de $1,64 \times 10^{-1}$ cm/s a $2,79 \times 10^{-5}$ cm/s. Estas variações refletem essencialmente as características do substrato saturado (sedimento e rocha alterada). A análise dos resultados de ambos os ensaios revela que na zona saturada há uma predominância de valores de condutividades hidráulicas mais altas do que na zona não-saturada. O fato do material utilizado nos aterros ter sofrido compactação e apresentar textura predominantemente argilosa, explica os valores de condutividade hidráulica mais elevados obtidos nesses ensaios. Condutividade hidráulica e permeabilidade têm relação direta com a corrosividade uma vez que estão também

associadas às condições de aeração do solo.

Para a avaliação do potencial de corrosão dos solos, foram utilizados os mapas de resistividade gerados a partir do levantamento geofísico. Foram analisadas as duas camadas mais próximas à superfície que são as que normalmente interagem com as obras subterrâneas, em unidades industriais.

Uma análise expedita, utilizando como referência o valor de resistividade de 50 ohm.m, mostra que as áreas mais susceptíveis à corrosão, no terminal, localizam-se no setor de tancagem de álcool, na bacia de tanques escuros e na área leste, junto à área de eucaliptos. O restante do terminal situa-se numa faixa de potencial de corrosividade que pode ser considerada como baixa (Figura 7).

O valor de 50 ohm.m, conforme observado nas classificações apresentadas na Quadro 1, corresponde, grosso modo, ao limite entre o grau de corrosividade moderada/alta e moderada/baixa.

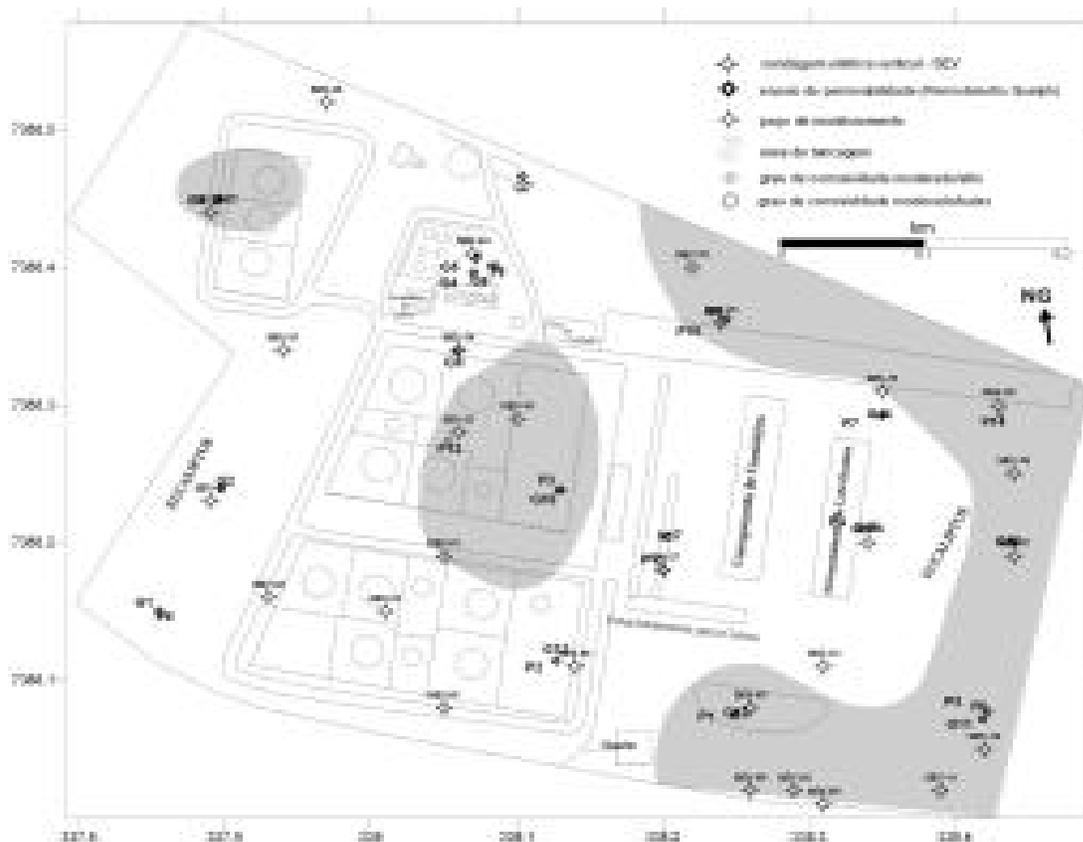


FIGURA 7. Mapa representando o potencial de corrosão.

CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para a avaliação expedita preliminar do potencial de corrosão dos solos foi utilizado o parâmetro resistividade elétrica determinado no campo através de sondagens elétricas verticais. Investigações adicionais

relativas às características hidrogeológicas locais obtidas através de sondagens mecânicas, ensaios de determinação de propriedades hidráulicas dos materiais, além da coleta de dados de poços de monitoramento,

complementaram o quadro de informações. Mapas de resistividade gerados a partir do levantamento geofísico foram analisados levando em consideração as duas camadas mais próximas à superfície do terreno, que são as que normalmente interagem com as obras subterrâneas em unidades industriais.

Uma análise expedita, utilizando como referência o valor de resistividade de 50 ohm.m, mostra que as áreas mais susceptíveis à corrosão no empreendimento, localizam-se no setor de tancagem de álcool, na bacia de tanques escuros e na área leste, junto à área de eucaliptos. O restante do terminal situa-se numa faixa de potencial de corrosividade que pode ser considerada como baixa.

Em alguns locais na área estudada, valores muito baixos de resistividade elétrica foram detectados. Esses locais muito condutores estão provavelmente associadas a bolsões restritos com composição mais argilosa, que resultam também em teores de umidade mais elevados em relação às áreas circunvizinhas, ou ainda à contaminação por despejos industriais decorrentes de vazamentos de derivados de petróleo. Estes deverão futuramente ser estudados e monitorados mais detalhadamente.

O terminal assenta-se sobre um aquífero livre e heterogêneo, com profundidades do nível d'água variando entre 0,5 m a 3,5 m. Essa informação é relevante para análises de detalhe do potencial

corrosivo em pontos localizados do empreendimento que eventualmente venham a ser necessárias, porque há sempre a possibilidade da formação de pilhas de corrosão devido ao fato do solo estar submetido a diferentes condições de aeração, originando corrosão por aeração diferencial em tubulações enterradas. Nesse caso, as regiões mais atacadas seriam aquelas que ficam pouco abaixo da superfície.

O conhecimento do comportamento do solo como meio corrosivo é fundamental, levando-se em consideração a importância das instalações industriais que empregam tanques metálicos de armazenamento de produtos diversos e as enormes extensões de tubulações metálicas enterradas nos oleodutos, minerodutos, gasodutos, cabos telefônicos e tubulações de água, que exigem um controle rigoroso de manutenção para evitar a corrosão acelerada. Há sempre também uma grande possibilidade da corrosão externa de estruturas metálicas ter seus efeitos intensificados pela contaminação do solo por produtos diversos.

Diagnósticos detalhados e definitivos acerca da corrosividade do solo normalmente requerem outros parâmetros além dos valores de resistividade elétrica. Na prática entretanto, a realização de ensaios de campo empregando o método geofísico da eletrorresistividade, apresenta características quanto à rapidez e baixo custo que tornam esta propriedade índice ideal para a avaliação expedita preliminar do potencial corrosivo de solos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABRACO - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CORROSÃO. **Corrosão em tubulações**. Traduzido por Rodolfo Huhn. Disponível em: <<http://www.abraco.org.br/corrosi.htm>>. Acesso em 15 de fevereiro de 2002.
2. ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **Standard test method for field measurement of soil resistivity using the Wenner Four-Electrode Method**. G57-95a. Annual Book of ASTM Standards, 2001.
3. FELIU, S. & ANDRADE, M.C. Corrosión y protección metálicas. **Journal of Applied Geophysics**, v. 38, p. 219-233, 1998.
4. GIBOTTI JUNIOR, M. **Subsídios geológico-geotécnicos para a implantação de tanques de armazenagem subterrânea de combustíveis: estudo de caso em um solo da Formação Rio Claro**. Rio Claro, 1999. 94 p. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.
5. KELLY, W.E. & MARES, S. (Editores). **Applied geophysics in hydrological and engineering practice**. Amsterdam: Elsevier, Developments in Water Science, 1993, v. 44, 289 p.
6. NOGUEIRA JUNIOR & SILVA, E.F. Agressividade dos solos da bacia do Jatobá – diagnóstico para as fundações das adutoras metálicas enterradas do sistema de irrigação de Itaparica - PE. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 6, 1990, Salvador. **Anais...** São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1990, v. 1, p. 519-524.
7. PIMENTA, G.S. **O que é corrosão - Uma abordagem geral**. Disponível em: <<http://www.abraco.org.br/corros10.htm>>. Acesso em 15 de fevereiro 2002.
8. RICOMINI, C.; COIMBRA, A.M.; TAKIYA, H. Tectônica e sedimentação na Bacia de São Paulo. In: SEMINÁRIO SOBRE PROBLEMAS GEOLÓGICO-GEOTÉCNICOS NA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO, 1992, São Paulo. **Atas...** São Paulo: Associação Brasileira de Água Subterrânea, Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, Sociedade Brasileira de Geologia, 1992, p. 21-45.
9. ROBERGE, P.R. **Handbook of Corrosion Engineering**. McGraw-Hill, 1999, 1.140 p.
10. SOIL MOISTURE CORPORATION. **Model 2800K1 Guelph Permeameter: Operating Instructions**. USA, Santa Bárbara, 1991.
11. U.S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **National Soil Survey Handbook**. Natural Resources Conservation Service, 2001, Disponível em: <http://www.statlab.iastate.edu/soils/nssh/>. Acesso em 15 de fevereiro 2002.