Corros. Prot. Mater., Vol. 29, Nº 1 (2010)

CRITÉRIO DE AVALIAÇÃO DA CORROSIVIDADE DE SOLOS BASEADO NA SOBRETENSÃO DE HIDROGÊNIO

Artigo submetido em Agosto de 2009
e aceite em Outubro de 2009

JOSÉ MAURÍLIO DA SILVA[1] e SIMONE L. BRASIL[2](*)

Resumo

A corrosão de estruturas metálicas enterradas representa custos significativos para diversos setores industriais. A necessidade de avaliação da agressividade de solos tem levado ao estudo de medidas indiretas que correlacionam as propriedades do solo com sua corrosividade absoluta. Neste trabalho foram realizadas medidas físico-químicas e eletroquímicas para determinação de resistividade, pH, potencial de corrosão e sobretensão de hidrogênio em diferentes tipos de solos. Tais medidas, em conjunto com ensaios de perda de massa, visaram definir um critério original para caracterizar a corrosividade de solos. Este critério é baseado na redução do hidrogênio e se aplica a solos onde tal reação é predominante. Em solos com baixos valores de resistividade, onde a reação catódica de redução do oxigênio pode estar facilitada, esse critério deve ser cuidadosamente analisado.

Palavras-Chave: Corrosão, Solos, Sobretensão de Hidrogênio

EVALUATION OF SOIL CORROSIVITY CRITERION BASED ON HYDROGEN OVERPOTENTIAL

Abstract

The corrosion of buried metallic structures demands significant costs from many industrial sectors. The necessity of proper evaluation of the soil aggressiveness, for instance, requires indirect measurements that correlate the soil properties with its absolute corrosivity. In this work, physical-chemical and electrochemical parameters have been obtained for several soil samples, such as resistivity, pH, corrosion potential and hydrogen overpotential. Such measurements, including weight loss results, define an original criterion to characterize the soil corrosivity. This criterion is based on the hydrogen reduction cathodic reaction. In soils with low resistivity values, oxygen reduction can be present and, in this case, the study should be carefully analyzed.

Keywords: Corrosion, Soils, Hydrogen Overpotential

1. INTRODUÇÃO

Os solos são formados por materiais orgânicos e minerais, contendo matéria viva e vegetação em alguns locais. Atividades humanas podem variar significativamente as características dos solos [1]. As propriedades morfológicas tais como: cor, textura, estrutura e consistência das diversas camadas do solo, podem ser identificadas visualmente ou através de ensaios mais específicos em laboratório.

De acordo com as dimensões dos materiais particulados de um solo, este pode ser denominado areia, silte ou argila. Várias propriedades dos solos são atribuídas a relações entre esses constituintes. Solos argilosos possuem partículas finas, de baixa permeabilidade e, por isso, há a tendência de retenção de umidade que normalmente favorece a corrosão do metal. A quantidade de umidade presente no solo é diretamente proporcional à superfície disponível e, portanto, ao tamanho da partícula.

Os solos arenosos, por apresentarem grandes vazios, permitem rápida penetração de ar e alta permeabilidade de água, ocasionando pouca retenção de água, o que gera baixa corrosividade. A extensão da aeração do solo é inversamente proporcional à quantidade de umidade presente nos poros [2].

[1] Departamento de Materiais/Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC)
[2] Escola de Química/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Centro de Tecnologia, sala E-206 – Cidade Universitária, Rio de Janeiro, Brasil
[*] A quem a correspondência deve ser dirigida, e-mail: simone@eq.ufrj.br

As propriedades do solo exercem grande influência na corrosão eletroquímica de estruturas metálicas, em função de alterações que podem ser observadas nos processos anódicos e catódicos. A corrosão de estruturas em contato com solo, por exemplo fundos externos de tanques de armazenamento ou tubulações enterradas, pode ser ocasionada tanto por propriedades físico-químicas e biológicas do solo (agressividade específica) como por fatores externos (agressividade relativa). Dentre estes últimos podem-se citar correntes de fuga e contato entre diferentes metais. Propriedades locais, tais como: resistividade, umidade, acidez ou alcalinidade, permeabilidade, presença de sais solúveis e microorganismos, ditam a agressividade específica. Estes fatores atuam em conjunto e a corrosividade dos solos não deve ser avaliada com base em propriedades isoladas [3]. O estudo das características físico-químicas e eletroquímicas de solos é de grande importância e pode dar informações relevantes sobre a agressividade do solo.

Ensaios para determinação da perda de massa em materiais metálicos constituem a forma mais precisa de avaliação da agressividade dos solos, para casos de corrosão uniforme [4]. Contudo, este acompanhamento deve ser conduzido durante períodos longos, muitas vezes incompatíveis com os projetos de engenharia. A necessidade de obtenção da avaliação da agressividade do solo em períodos de tempo curtos tem levado vários pesquisadores a estudar métodos de medidas indiretas que se baseiam na correlação das propriedades do solo e a corrosividade absoluta do mesmo [5,6]. A Tabela 1 sumariza diferentes critérios sugeridos na literatura, apresentando os principais parâmetros considerados.

A resistividade do solo é um indicador comumente considerado nestes critérios, confirmando sua influência nos processos corrosivos de estruturas metálicas enterradas. A baixa resistividade do solo indica que há abundância de corrente fluindo entre as áreas anódicas e catódicas na superfície do metal, enquanto que solos de alta resistividade

Tabela 1 - Critérios de avaliação da corrosividade de solos [7].

Critério	Parâmetros considerados
Índice de Steinrath	resistividade, potencial redox, pH, %H_2O, cloreto, sulfato e sulfeto
Robinson	resistividade
Acidez	pH
Starkey e Wight	potencial redox
Booth	resistividade, potencial redox, %H_2O
Girard	resistividade do extrato aquoso, umidade de saturação e acidez total
Gotlieb e Vieira	resistividade, sais solúveis, acidez total e coeficiente de despolarização

as suprimem. A resistência à passagem de corrente elétrica é uma propriedade do material, sendo independente de sua quantidade. Para o solo, a resistência pode ser medida através de sua relação com a resistividade, segundo a equação abaixo:

$$R = \rho L/A \quad (1)$$

onde:

R = resistência do solo (Ohms)
L = comprimento do caminho elétrico (cm)
A = área da seção transversal por onde flui a corrente (cm^2)
ρ = resistividade do solo (Ohm.cm).

Em laboratório, a medida da resistividade do solo pode ser feita em uma caixa padrão, também denominada de *soil box* (Figura 1). Para que tal medida seja criteriosamente realizada, é necessário que não fiquem vazios e, sendo assim, o solo deve ser bem compactado dentro da *soil box*. A medição do potencial quando se aplica corrente ou vice-versa é feita através de dois eletrodos de cobre posicionados nas extremidades da caixa padrão. Cobre é utilizado com essa finalidade, devido à sua alta condutividade que não interfere nas medidas. Ao se aplicar corrente e ler o potencial, está sendo obtida a resistência entre os terminais de cobre. Como as dimensões dessa caixa padrão são tais que seu comprimento (L) é numericamente igual à área (A) transversal ao fluxo de corrente, o valor da resistência lida é a própria resistividade do solo [8].

O teor de umidade do solo pode alterar de forma significativa a resistividade do solo. A obtenção da resistividade em campo, através de métodos tradicionais, pode levar a valores muito variados dependendo das condições de umidade do solo. Medidas realizadas em períodos secos podem indicar valores totalmente diferentes dos obtidos após períodos de chuvas. Como se observa que o solo saturado

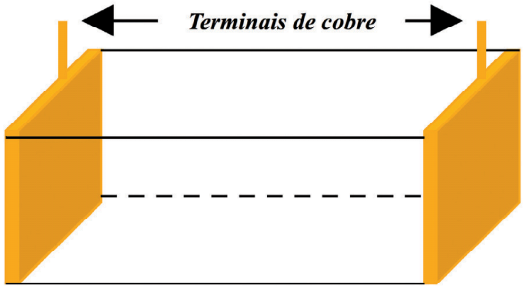


Fig. 1 - Caixa padrão para medição de resistividade de solos em laboratório.

com água se encontra em sua resistividade mínima, a medição deste parâmetro nesta condição indica, em geral, a condição mais severa do solo em relação à sua corrosividade. Sendo assim, a medição da resistividade em uma amostra de solo saturada com água estaria indicando a condição mais severa que, no caso de projetos de engenharia, estaria favorecendo a segurança do sistema de proteção aplicado.

A água promove a ionização dos eletrólitos presentes no solo, completando assim, o circuito do processo corrosivo. Existe uma relação inversa entre o volume de água e a concentração de oxigênio no solo. Em solos secos, as condições tornam-se mais aeróbias e as taxas de difusão de oxigênio são maiores [9].

Um estudo da variação da resistividade em função do teor de água pode ser feito através de medidas de resistividade do solo na *soil box* com adições graduais de água destilada à amostra de solo. O perfil do comportamento da variação da resistividade com o teor de água, para um solo hipotético, é apresentado na Figura 2.

Outro parâmetro físico-químico de grande relevância é o pH do solo que pode indicar o favorecimento de um processo corrosivo severo ou de corrosão microbiologicamente induzida. Em geral, valores baixos de pH, por exemplo menores que 5,0, indicam solos de maior agressividade e que favorecem processos mais severos de corrosão. Em solos alcalinos e calcários, com pH maiores do que 6,0, há presença de sais dissolvidos que podem resultar em baixas resistividades. Solos alcalinos têm elevados teores de sódio e potássio, enquanto que os solos calcários possuem cálcio e magnésio. Nestes solos observa-se a formação de camadas protetoras na superfície do aço (depósitos calcários) através da precipitação de carbonatos, sendo solos favoráveis para inserção de metais [10].

Em valores intermediários de pH, entre 6,5 e 7,5 pode ocorrer biocorrosão em ausência de oxigênio e presença de bactérias redutoras de sulfato (BRS).

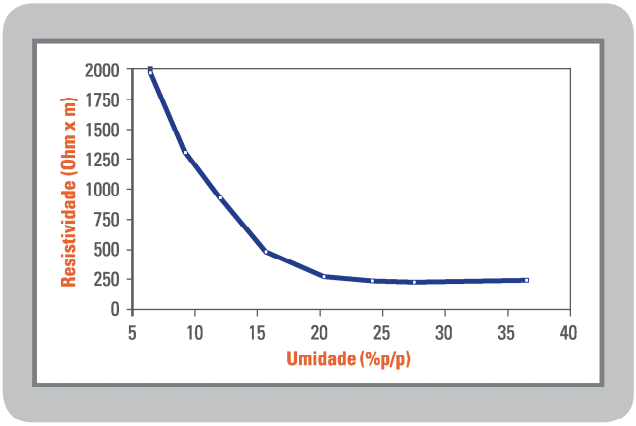


Fig. 2 - Variação da resistividade do solo em função do teor de umidade.

Um parâmetro que indica a possibilidade de ocorrência de biocorrosão é o potencial redox. Através de medidas entre um eletrodo inerte, em geral platina, e um eletrodo de referência, obtém-se o potencial redox e, como visto na Tabela 2, pode-se estimar a corrosividade dos solos. É possível definir a característica aeróbia ou anaeróbia ou, ainda, se houve redução de compostos como óxidos de ferro ou nitratos a partir de medidas do potencial redox que corresponde, portanto, ao potencial de oxidação e redução de um meio. Um meio oxidante possui, portanto, um potencial redox positivo (mais elementos oxidantes que redutores) [11].

A obtenção de extratos aquosos e de amostras em capacidade de retenção de água é um procedimento executado em laboratório. A capacidade de retenção de água representa a umidade que o solo terá, na sua maior parte do tempo, pois este fator está relacionado com a penetração de água no solo pelo efeito de capilaridade. Assim a resistividade nessa percentagem é a resistividade mais representativa do solo.

Como visto, diversos parâmetros são indicativos da agressividade de um solo e devem ser avaliados em conjunto. Neste trabalho, está sendo proposto um critério original que representa mais uma forma de avaliação da agressividade de um solo. Como nenhum critério envolve todas os parâmetros que influenciam os processos corrosivos, vários critérios devem ser avaliados de forma a se obter resultados confiáveis. O critério apresentado é baseado em medições de pH e potencial de corrosão obtidos em extratos aquosos de solos e perdas de massa no solo em sua capacidade de retenção de água. Esta definição se baseou no fato de que a reação catódica de redução do hidrogênio está otimizada no extrato aquoso e a perda de massa no solo representa a condição mais agressiva quando este se encontra em sua capacidade máxima de retenção de umidade [12]. Tal crité-

Tabela 2 - Potencial redox como um indicador da corrosividade do solo [8].

Potencial Redox (mV ENH)	Aeração	Corrosividade do solo
<0	Não aerado	Extremamente severa
0 – 100	Fracamente aerado	Severa
100 – 200	Pouco aerado	Moderada
200 – 400	Aerado	Fraca
> 400	Fortemente aerado	Não corrosivo

rio poderia ser aplicado a solos com alta resistividade mínima e baixo pH. Qualquer que seja o critério proposto deve ser feito um balanço entre o pH, a resistividade mínima e a resistividade na capacidade de retenção de água para definir sua representatividade.

2. METODOLOGIAS

Foram analisadas sete amostras coletadas em diferentes regiões ao sul do Brasil, em profundidade de 1,5 m, que é, em geral, a região onde as estruturas enterradas se situam. As amostras coletadas apresentam valores de pH na faixa entre 4 e 6, diferindo significativamente em suas características físicas, conforme pode ser visto na Figura 3. Para a realização das análises, os solos passaram por peneira de 2 mm sendo em seguida secos em estufa a 100°C por 24h e resfriados em dessecador.

Foram realizadas medidas com as amostras de solo em sua capacidade de retenção de água, em saturação (resistividade mínima) e em extratos aquosos. As medidas físico-químicas foram baseadas na capacidade limite de retenção de água e no pH de extratos aquosos.

Ainda em relação aos ensaios físico-químicos, foram obtidos os pontos de saturação de água a partir de medidas de resistividade *vs* teor de umidade. As medidas eletroquímicas foram baseadas nos potenciais de corrosão nos extratos aquosos e na capacidade de retenção de água. Também foram determinados os valores de taxas de corrosão a partir de ensaios de perda de massa em amostras de aço-carbono durante um período de, aproximadamente, 4 meses de exposição.

Com o intuito de averiguar uma possível relação entre a agressividade dos solos e a sobretensão de hidrogênio, finalidade deste estudo, foram realizados diversos ensaios laboratoriais. A seguir são apresentados os procedimentos cumpridos em cada etapa envolvida neste trabalho.

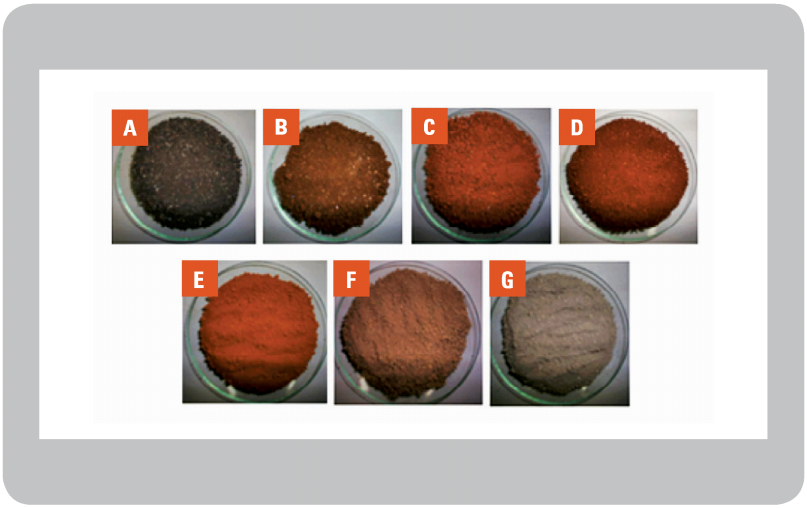


Fig. 3 - Amostras de solos utilizadas no presente estudo.

Procedimento para coleta de amostras de solos

As amostras de solo foram coletadas da profundidade de 1,5 m e trazidas para a superfície através de uma sonda ou um cavador de buracos (pá) ou um trado circular. As amostras foram colocadas em um recipiente de vidro ou em saco plástico limpo e impermeável ao ar, não entrando em contato com metais.

Curva de resistividade do solo

A curva de resistividade em função da percentagem de água foi determinada através de procedimentos do GCOI/SCM [12], como resumido a seguir:

Seca-se totalmente a amostra do solo em estufa e pulveriza-se em moinho. Mede-se o valor da resistividade através de caixa padrão *soil box* com instrumento adequado. Adiciona-se água destilada às amostras, com incremento de 5% em volume, medindo-se os valores de resistividade para cada teor de água.

Capacidade de retenção de água do solo

A resistividade mínima do solo pode ser obtida através da curva de resistividade com a umidade, juntamente com a capacidade de retenção de água [12]. Esta propriedade, expressa em percentagem, foi avaliada neste trabalho e resumida a seguir:

"Enche-se um funil de *buchner* de aproximadamente 5 cm de diâmetro e 2,5 cm de profundidade, coberto com um papel de filtro qualitativo, com amostra de solo, além da sua capacidade. Esta deve estar seca e peneirada previamente em peneira de malha de 2 mm. Compacta-se a amostra do solo, contida no funil, deixando-o cair três vezes, de uma altura de 1 cm em cima de uma superfície de madeira. Nivela-se a superfície da amostra do solo com uma espátula. Coloca-se o funil cheio em um *becher* de capacidade de 400 mL, retendo-o em posição para cima, pelas bordas do funil. Adiciona-se água ao *becher* a uma altura ligeiramente superior ao do papel de filtro. Espera-se a amostra do solo ficar úmido por capilaridade de modo a evitar encapsulamento de ar na coluna. Quando a parte superior da amostra de solo apresentar sinais de umidade, adiciona-se mais água até seu nível aproximar-se do topo do funil. Cobre-se o *becher*, deixando amostra do solo umedecida no mínimo por 12 horas. Cobre-se o funil com um pano úmido, no qual se coloca um copo invertido. Coloca-se o funil coberto em um frasco de sucção, que esteja conectado a um aspirador de água. Após 15 minutos, remove-se o funil do frasco de sucção, transferindo-se a amostra do solo em um recipiente previamente tarado e determina-se o teor de umidade em percentagem".

Preparação do extrato aquoso

Foram obtidos extratos aquosos das amostras de solo, seguindo o seguinte procedimento: "O solo deve ser moído até uma granulação bem fina através de um pistilo e secado em estufa a 80°C por uma noite. Em um *becher* de 500 mL, adiciona-se 80 g de terra fina e seca, juntamente com 200 mL de água destilada, agita-se durante 10 minutos em agitador magnético e deixa-se em repouso por 30 minutos.

pH do extrato aquoso

Os valores foram obtidos através do medidor de pH da marca STIK, modelo pH100, com resolução de 0,01 pH [13].

Perda de Massa

Corpos-de-prova de aço-carbono foram mantidos em recipientes com solo em sua capacidade de retenção de água, totalmente vedados de forma a não alterar sua umidade, sendo medida sua perda de massa em balança analítica com precisão de 0,1mg, após período de aproximadamente, 4 meses. Os procedimentos de limpeza dos corpos-de-prova seguiram a Norma ASTM G1 [4] sendo todos os ensaios realizados em triplicata. Em cada caso foi realizada uma curva de decapagem para avaliação do tempo necessário de imersão em solução de Clark (1L HCl + 50 g $SnCl_2$ + 20 g Sb_2O_3) para total remoção dos óxidos gerados sobre os corpos-de-prova. A seguir, os valores de perda de massa foram transformados em taxa de corrosão, segundo a seguinte expressão: (2)

$$TC\ (mm/ano) = 87.600 \times \Delta m\ (g) / A\ (cm^2) \times \rho\ (g/cm^3) \times t\ (h) \quad (2)$$

Potencial Redox

A obtenção do potencial redox, consistiu [14] na determinação do potencial de oxidação-redução do eletrodo de platina enterrado no solo, medido em relação ao eletrodo de referência $Cu/CuSO_4$ saturado.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Tabelas 3 e 4 apresentam os resultados obtidos para os sete solos analisados, denominados de A a G, em sua capacidade de retenção de água e em seu limite de saturação, dado pelas medidas de resistividade com o aumento gradual de umidade. Na Tabela 3 são apresentados os valores de taxa de corrosão (TC), convertidos em µm/ano, obtidos por ensaios de perda de massa após período de, aproximadamente, 4 meses.

Pelos dados apresentados, pode-se verificar uma relação entre a resistividade na capacidade de retenção de água e a resistividade mínima, como visto na Figura 4.

Na Tabela 5 são apresentados os resultados das medidas físico-químicas e eletroquímicas realizadas em extratos aquosos. A partir dos valores de pH dos extratos aquosos e dos potenciais de corrosão, foram levantados os valores de sobretensão de hidrogênio. Com base nos valores de sobretensão e nas taxas de corrosão obtidas, propõe-se um critério de avaliação da corrosividade de solos, conforme Tabela 6.

A relação entre a sobretensão de hidrogênio e os valores de pH obtidos em extratos aquosos dos solos analisados está graficamente representada na Figura 5, excluindo-se neste gráfico o solo F que teve suas medidas não condizentes com os demais solos.

Este critério se baseia em resultados de pH e potencial de corrosão obtidos nos extratos aquosos e perdas de massa no solo em sua capacidade de retenção de água. Esta definição se baseia no fato de que a reação catódica de redução do hidrogênio no extrato aquoso acontece com mais facilidade devido à completa dissociação dos íons hidrogênio e a perda de massa no solo, quando este se encontra em sua capacidade máxima de retenção de umidade, representa a condição mais real em campo. Pelo critério proposto, o solo mais agressivo (amostra B) apresentou a maior taxa de corrosão. A amostra D apresentou o maior valor de taxa de corrosão, entre os solos estudados, mas este solo não deve ser inserido no critério, pois foi verificada uma grande formação de colônia de bactérias e o potencial redox foi o menor de todos, em torno de 200 mV e, portanto, neste solo deve estar exis-

Tabela 3 - Medidas realizadas no solo na capacidade de retenção de água.

Amostra	Solo na capacidade de retenção					
	E corr ($mV_{Cu/CuSO_4}$)	E corr (mV_{enh})	Umidade (%)	pH	Resistiv. (Ohm.m)	TC (µm/ano)
A	-493	-175	28	5,13	280	94
B	-605	-287	28	4,57	80	175
C	-453	-135	26	5,26	2000	111
D	-395	-77	46	7,63	8400	186
E	-303	15	35	7,04	1200	76
F	-359	-41	34	7,37	75	115
G	-634	-316	51	6,62	60	164

Tabela 4 - Medidas realizadas no solo saturado com água.

Amostra	Solo saturado com água		
	E_{redox} (mV_{enh})	Resistividade mínima (Ohm.m)	Umidade (%)
A	292	227	80
B	281	30	35
C	318	470	45
D	264	1660	60
E	324	823	50
F	365	69	45
G	396	49	60

Tabela 5 - Medidas realizadas em extratos aquosos.

Amostra	Extrato Aquoso				TC (µm/ano)	η_{H_2}
	pH	E corr ($mV_{Cu/CuSO_4}$)	E corr (mV_{enh})	E_{H_2/H^+} (mV_{enh})		
A	4,53	-626	-308	-268	94	-40
B	3,97	-736	-418	-235	175	-183
C	4,78	-730	-412	-282	111	-130
D	5,55	-407	-89	-328	186	239
E	5,60	-388	-70	-331	76	261
F	8,60	-418	-100	-508	115	408
G	6,07	-437	-119	-359	164	240

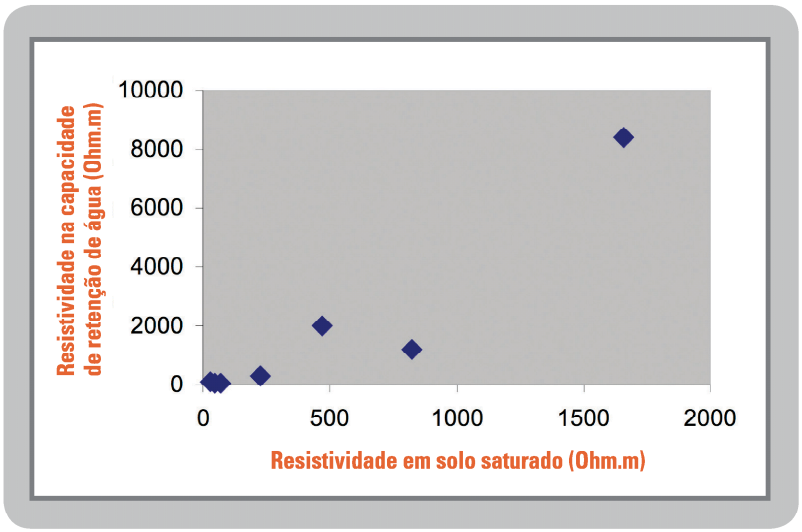


Fig. 4 - Relação entre resistividade na capacidade de retenção de água e resistividade mínima.

tindo corrosão microbiológica além da corrosão eletroquímica. A taxa de corrosão observada pode estar também relacionada a este fato, ficando este solo, portanto, fora do critério proposto.

O solo menos agressivo pelo critério proposto (amostra E) apresentou a menor taxa de corrosão e a amostra A pode ser classificada como pouco agressiva, apresentando, de fato, a segunda menor taxa de corrosão. A amostra C pode ser classificada de medianamente agressiva por este critério, tendo apresentado uma taxa de corrosão coerente com a média agressividade (compatível com a esperada).

As amostras F e G ficaram fora do critério, sendo que essa exceção pode ser explicada pelas relações resistividade de solo em função da percentagem de água. Os valores de resistividade mínima das amostras F e G foram de 70 Ohm.m e 50 Ohm.m, respectivamente. Tais valores são muito baixos, o que pode significar que nesses solos a reação catódica de redução do oxigênio está facilitada, tendo em vista que a redução de oxigênio tem relação com a condutividade do solo. Como o critério proposto está somente baseado na redução do hidrogênio, já que está relacionado ao pH, esse critério é facilmente aplicado a solos onde tal reação é predominante. Pode-se observar que os valores de resistividade mínima dos outros solos estão acima de 200 ohm.m e, portanto, nesses solos a redução do oxigênio é desprezível em relação a redução do hidrogênio.

No caso da amostra B, a resistividade mínima é bastante reduzida, porém, este solo também apresenta baixo pH. A alta agressividade do solo B, segundo o critério proposto, pode ser inferida ao fato de que a redução do hidrogênio é mais forte que a redução do oxigênio, quando as duas reações estão facilitadas. Portanto, o baixo pH é mais importante que a baixa resistividade quando as duas reações estão acontecendo.

A exclusão dos solos F e G do critério demonstram que nem sempre o critério

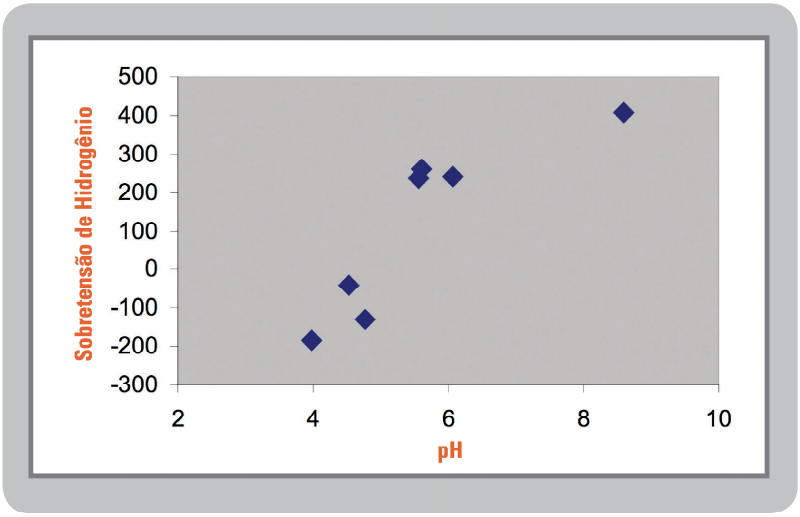


Fig. 5 - Relação entre sobretensão de hidrogênio e pH dos extratos aquosos.

Tabela 6 - Critério proposto para avaliação da corrosividade de solos, com base na sobretensão de hidrogênio.

η_{H_2} (mV)	Taxa/(µm/ano)	Corrosividade do solo
> 0	<25	Pouco agressivo
0 a -150	25 a 100	Normal
< -150	>100	Agressivo

se aplica e, antes de aplicar o critério, é necessário que seja feito um balanço entre o pH, resistividade mínima e resistividade na capacidade de retenção de água.

4. CONCLUSÕES

Com base nos resultados apresentados, pode-se concluir que:

A resistividade do solo não indica, necessariamente, a corrosividade dos solos. Como exemplo, o solo D apresenta a maior resistividade e, contudo, a maior taxa de corrosão obtida no trabalho.

Os solos apresentam valores muito diferenciados de capacidade de retenção. Foram verificados valores entre 15 e 30%.

Os valores de pH encontrados são fundamentais para a avaliação da agressividade do solo visto que a sobretensão de hidrogênio está relacionada com o pH.

É possível estabelecer um critério de avaliação da corrosividade de solos com base nos valores de pH e dos potenciais de corrosão de materiais metálicos expostos ao solo. Este critério se baseia, portanto, na sobretensão de hidrogênio e pode ser aplicado em solos onde a reação catódica predominante é a redução do hidrogênio.

Antes da aplicação deste critério, é necessário que seja feito um balanço entre o pH, a resistividade mínima e a resistividade na capacidade de retenção de água, de forma a avaliar sua aplicabilidade.

Referências

[1] Embrapa (Sistema Brasileiro de Classificação de Solos), Embrapa Solos, Rio de Janeiro, Brasil (1999).

[2] E. E. Oguzie, I. B. Agochukwu and A. I. Onuchukwo, *Mater. Chem. Phys.*, 84, 1 (2004).

[3] E. T. Serra (Corrosão e Proteção Anticorrosiva dos Metais no Solo), Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL, Rio de Janeiro, Brasil, (2006).

[4] ASTM G1-03. (Standard Practice for Preparing, Cleaning and Evaluation Corrosion Test Specimens), ASTM, International, West Conshohocken, USA, (2003).

[5] G. Trabanelli, F. Zucchi and M. Arpaia, *Chimica Pura et Applicata*, V. III, Sezione V, 4, 43 (1972).

[6] A. Loureiro, S. Brasil e I. Yokoyama, *Corros. Prot. Mater.*, 26, 113 (2007).

[7] A. Loureiro (Estudo da Corrosão de Dutos Enterrados em Solos Contaminados por Substâncias Químicas), Dissertação para obtanção do grau de Mestre em Ciências, Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil (2005).

[8] S. Bradford (Practical Handbook of Corrosion Control in Soils), CASTI Publications, Alberta, Canadá (2002).

[9] L. L. Shreier, R. A. Jarman, G. T. Burstein (Principles and Prevention of Corrosion), 2nd Ed., Oxford: Butterworth Heineman, USA (1996).

[10] W. C. Robinson, *Mater. Performance*, 32, 56 (1993).

[11] M. J. Vepraskas and S. P. Faulkner (Redox Chemistry of Hydric Soil) *in* Wetland Soils - Genesis Hydrology, Landscape and Classification, CRC Press LLC, USA (2001).

[12] GCOI/SCM. (1995), (Obtenção da Curva Característica de Resistividade em Relação à Percentagem de Água em Solos) *in Procedimentos do III Encontro Técnico de Corrosão e Proteção. Recomendação Técnica*, Julho, Rio de Janeiro, Brasil (1995).

[13] ASTM G 51-77 (pH of soil for use in corrosion testing), ASTM International, West Conshohocken, USA (1984).

[14] F. E. Costanzo and R. E. Mcvey, *Corrosion*, 14, 26 (1958).