

ESTUDO DA CORROSIVIDADE DE SOLO CONTAMINADO POR SUBSTÂNCIAS QUÍMICAS ATRAVÉS DE ENSAIOS DE PERDA DE MASSA E ÍNDICE DE STEINRATH

A. Loureiro⁽¹⁾*, S. Brasil⁽¹⁾ e L. Yokoyama⁽¹⁾

Artigo submetido em Outubro de 2006 e aceite em Março de 2007

RESUMO

Este trabalho visa estudar a influência de algumas substâncias químicas na corrosividade do solo sobre o duto de aço-carbono, em condições drásticas tais como isenção de técnica de proteção do metal e alto teor de umidade no meio. Amostras de LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO (solo de maior representação geográfica no Brasil) foram contaminadas por três substâncias químicas: ácido sulfúrico, amônia e 1,2-dicloroetano. A agressividade total deste solo foi avaliada durante quatro meses a partir de ensaios de perda de massa e medidas do Índice de Steinrath. Não houve total concordância do Índice de Steinrath com os resultados obtidos nos ensaios de perda de massa para este solo, mostrando que nem sempre é possível definir a corrosividade de um solo considerando apenas uma forma de avaliação.

Palavras Chave: Corrosividade do Solo, Dutos Enterrados, Contaminação do Solo

STUDY OF THE SOIL CORROSIVITY CONTAMINATED BY CHEMICAL SUBSTANCES THROUGH TESTS OF LOSS OF MASS AND INDEX OF STEINRATH

ABSTRACT

The present study aims to evaluate the influence of some pollutants on the soil aggressiveness, considering pipelines without protection and high moisture content. The soil used in this study is named LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO, the most representative soil in Brazil according to the Brazilian Soil Classification. Chemical compounds (sulfuric acid, ammonia and 1,2-dichloroethane) were added to soil samples in order to evaluate the soil aggressiveness up to four months, by means of weight loss measurements and Steinrath's Index. It wasn't observed total agreement between results obtained by Steinrath's Index and weight loss tests, leading to the conclusion that soil corrosiveness determination needs more than one assessment method.

Key Words: Soil Aggressiveness, Buried Pipeline, Soil Contamination

1. INTRODUÇÃO

Estruturas de metal enterradas em solo são usualmente projetadas para uma longa vida útil. A corrosão provocada pelo solo em dutos enterrados é um assunto de interesse para diversos setores industriais, devido ao elevado número de tubulações e reservatórios instalados no solo. A corrosão pelo solo responde a uma parcela considerável dos custos globais de corrosão, considerando a grande malha dutoviária existente.

A possibilidade de ocorrência de acidentes por vazamentos ou derramamentos de produtos químicos próximos a dutos enterrados é um fator preocupante, já que os mesmos causam poluição do solo, alterando suas propriedades físico-químicas e gerando impactos negativos.

Do ponto de vista da corrosão, a adição de produtos químicos ao solo pode aumentar a sua agressividade, acelerando o processo de corrosão em estruturas enterradas e levando a possíveis vazamentos de produtos, agravando ainda mais o dano ambiental.

O presente trabalho objetiva avaliar a agressividade do LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO na presença de contaminantes químicos. Três substâncias foram consideradas neste estudo:

um ácido (ácido sulfúrico), uma base (amônia) e um composto orgânico (1,2-dicloroetano ou DCE). A corrosividade do solo foi avaliada por ensaios de perda de massa e pelo Índice de Steinrath durante quatro meses.

1.1 Solo

O solo constitui-se numa mistura de compostos minerais e orgânicos, formada pela ação de agentes físicos, químicos e biológicos inicialmente sobre a rocha primária [1].

Segundo a Embrapa – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – o solo é uma coleção de corpos naturais, constituídos por partes sólidas, líquidas e gasosas, tridimensionais, dinâmicos, os quais são formados por materiais minerais e orgânicos, que ocupam a maior parte do manto superficial das extensões continentais do nosso planeta; contêm ainda, matéria viva e podem ser vegetados na natureza onde ocorrem. Ocasionalmente, podem ter sido modificados por atividades humanas [2].

Solos enquadrados como *Ferralsols* correspondem quase que totalmente aos LATOSSOLOS da classificação

⁽¹⁾ UFRJ – Departamento de Processos Inorgânicos da Escola de Química, Rio de Janeiro, Brasil.

* A quem a correspondência deve ser dirigida, e-mail: alinemarta@pop.com.br

brasileira, detendo a maior representação geográfica no Brasil. Em termos globais se estendem por cerca de 750 milhões de hectares, sendo aproximadamente 300 milhões em território brasileiro [3], ocorrendo em todos os estados do Brasil [4].

1.2 Contaminação do Solo

A introdução de contaminantes no solo causa a danificação ou a perda de algumas ou várias das suas funções. Acima de determinados níveis, podem acarretar múltiplas consequências negativas nos organismos da cadeia alimentar e aos ecossistemas naturais [5].

Algumas propriedades físico-químicas são relevantes sob o ponto-de-vista ambiental, tais como solubilidade, lipofobicidade e volatilidade. No caso dos pesticidas organoclorados, compostos persistentes hidrofóbicos, estes são sorvidos rapidamente e fortemente pela maioria de solos e sedimentos. A sorção depende não somente do conteúdo de matéria orgânica do solo, mas também da força iônica da fase aquosa [6].

Os solos são capazes de neutralizar a adição de ácidos ou bases, exibindo diferentes graus de sensibilidade à deposição ácida. Os Compostos Orgânicos Voláteis (COV's) tais como benzeno, tolueno, xilenos, diclorometano, dicloroetano e tricloroetano podem contaminar o solo em áreas industriais e comerciais. Uma das mais comuns fontes desses contaminantes é o vazamento de tanques reservatórios. Alguns poluentes orgânicos que têm estrutura similar às substâncias húmicas presentes no solo são imobilizados pelos compostos do húmus através de ligações covalentes [7].

1.3 Corrosividade de Solos

A corrosividade do solo pode ser definida como a habilidade do ambiente para desenvolver o processo de corrosão. As propriedades do solo exercem uma influência particular na corrosão eletroquímica modificando as condições dos processos anódicos e catódicos.

A agressividade absoluta do solo depende de suas características físicas (textura, estrutura, interação solo-água), propriedades químicas (acidez total, espécies iônicas e suas concentrações) e biológicas (tipos de bactérias aeróbias ou anaeróbias) [8].

Para López e colaboradores [9], os principais fatores que influenciam na corrosão pelo solo são a condutividade, a atividade de microrganismos e a presença de ânions que aumentam o risco de corrosão, como por exemplo, Cl^- , S^{2-} ou SO_4^{2-} .

A seguir, serão apresentadas, de maneira geral, algumas propriedades que influenciam na corrosividade do solo.

• Resistividade

A resistividade é um indicador comumente usado para avaliar a corrosividade do solo ao metal enterrado. 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 as suprimem.

A medida da resistividade do solo em laboratório pode ser obtida através de uma caixa padrão denominada de "soil box", onde o solo é compactado e nivelado de modo a não haver espaços vazios. Dois eletrodos de cobre são colocados nas extremidades da caixa padrão, de forma a ser possível medir o potencial quando se aplica corrente ou vice-versa [10].

A resistividade do solo muda ao longo do ano dependendo das condições pluviométricas. Sendo assim, a proteção contra a corrosão baseada nas piores condições é vista como um fator de segurança. Em laboratório o estudo da variação da resistividade em função do teor de umidade pode ser feito através de medidas da resistividade do solo na "soil box" com adições graduais de água destilada à amostra de solo até quando o valor da resistividade alcança seu valor mínimo.

Para a medição da resistividade do solo em campo é usual a aplicação da técnica do Método de Wenner, ou Método dos Quatro Pinos [10].

Geofísicos têm recentemente feito o mapeamento da resistividade do solo, de modo a obter uma boa descrição da estrutura tridimensional do solo, sem causar-lhe nenhum dano. Os modos usuais de investigação, como a perfuração e a escavação, provocam modificações no solo, destruindo assim, o objeto de estudo [11].

• Potencial Redox

O potencial redox corresponde ao potencial de oxidação e redução de um ambiente. Através deste parâmetro é possível estimar se o solo é aeróbio ou anaeróbio e se compostos químicos foram reduzidos ou ainda estão presentes nas suas formas oxidadas [12]. Robinson descreve que a medida do potencial redox pode ser usada na identificação das condições do solo em relação à presença de bactérias anaeróbias tais como as bactérias redutoras de sulfato [13]. A Tabela 1 mostra o potencial redox como um indicador da corrosividade de solos.

Tabela 1
Potencial redox como um indicador da corrosividade do solo [10]

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

• Potencial de Hidrogênio

Solos com pH inferior a 5 podem contribuir para uma corrosão severa e uma rápida deterioração dos metais expostos. Solos com pH entre 6,5 e 7,5 em condição de ausência de oxigênio e que possuem bactérias redutoras de sulfato promovem corrosão microbiológica nos metais. Solos com pH acima de 8 (alcalinos ou calcários) contêm altas concentrações de sais dissolvidos resultando numa baixa resistividade. Solos alcalinos têm elevados teores de sódio e potássio, enquanto que os solos calcários possuem cálcio e magnésio.

• Cloreto

Os íons cloreto elevam a condutividade do solo e formam produtos de corrosão solúveis que tornam o metal vulnerável a processos corrosivos. Estes íons produzem o ácido clorídrico, que abaixa o pH do solo. Aumentando-se a concentração de íons cloreto, diminui-se a resistividade do solo, facilitando as correntes de corrosão [9].

• Sulfato

Íons sulfato no solo são frequentemente associados à presença de matéria orgânica. Estes íons no solo são agressivos devido à formação de FeSO_4 que é solúvel. Além disso, o sulfato serve como nutriente para as bactérias redutoras de sulfato (BRS) que, se presentes, aumentam significativamente a taxa de corrosão do aço [10].

• Sulfeto

A presença de sulfeto pode ser avaliada em solos pelo fato deste íon ser resultante do processo metabólico de redução

de íons sulfato ou sulfito por bactérias redutoras de sulfato presentes no meio. Uma concentração maior que 0,5 ppm de sulfeto indica que o solo é muito corrosivo, e mesmo sua presença em traços é indesejável [10].

1.4 Avaliação da Corrosividade

Diversos critérios de avaliação da agressividade dos solos foram propostos a partir do conhecimento de suas propriedades. Pesquisadores propõem seus critérios para a avaliação da corrosividade, como o Critério de Starkey e Wight que relaciona o potencial redox com a corrosividade do solo; Critério de Booth que analisa a resistividade, potencial redox e umidade do solo; Critério de Girard que estuda a umidade de saturação, resistividade do extrato aquoso e acidez total; Critério de Gotlieb e Vieira que utiliza os parâmetros: resistividade, sais solúveis, acidez total e coeficiente de despolarização.

• Avaliação da Corrosividade pelo Índice de Steinrath

Um dos critérios mais completos de avaliação da corrosividade dos solos através de suas propriedades foi apresentado por Steinrath, o qual se baseia na determinação dos parâmetros: resistividade, potencial redox, pH, teor de umidade, íons cloreto, íons sulfato e íons sulfeto. O critério adotado por Steinrath atribui índices parciais de corrosividade para cada um dos parâmetros considerados, conforme demonstrado na Tabela 2. A soma algébrica dos índices parciais (Tabela 3) fornece uma avaliação da agressividade absoluta do solo em análise.

Tabela 2
Parâmetros relacionados por Steinrath para avaliação da corrosividade do solo [8]

Parâmetros do Solo	Índice Parcial	Parâmetros do Solo	Índice Parcial
Resistividade / (ohm.cm)	---	Potencial redox / (mV/NHE)	---
> 12,000	0	> 400	+ 2
12,000 – 5,000	- 1	400 – 200	0
5,000 – 2,000	- 2	200 – 0	- 2
< 2,000	- 4	< 0	- 4
pH	---	Sulfato / (mg/Kg)	---
> 5	0	< 200	0
< 5	- 1	200 – 300	- 1
Umidade / (%)	---	>300	- 2
< 20	0	Sulfeto / (mg/Kg)	---
> 20	- 1	ausente	0
Cloreto / (mg/Kg)	---	< 0,5	- 2
< 100	0	> 0,5	- 4
100 – 1000	- 1	---	---
> 1000	- 4	---	---

Tabela 3
Índice total da agressividade do solo segundo Steinrath [8]

Classificação do solo	Índice Total de Agressividade
Sem agressividade	0
Pouca agressividade	- 1 a - 8
Média agressividade	- 8 a - 10
Alta agressividade	< - 10

Bueno [13] afirma que embora Steinrath não explicita a bactéria redutora de sulfato como um dos fatores, a sua influência no processo corrosivo foi avaliada em função dos pesos relativos atribuídos aos parâmetros potencial redox, concentração de sulfato e concentração de sulfeto.

A contribuição dos valores dos índices parciais de corrosividade é subjetiva e nem sempre pesquisadores de diversos países concordam, daí poder resultar diferentes atribuições de importância a ser dada para cada parâmetro para avaliar sua influência no processo corrosivo global [8].

• Avaliação da Corrosividade por Ensaio de Perda de Massa

É o método de avaliação da corrosão mais simples e extensivamente utilizado, sendo útil para o estudo de casos de corrosão generalizada [8].

A Tabela 4 relaciona a taxa de corrosão em mpy (milésimo de polegada por ano) de ligas típicas de ferro e níquel com a sua resistência à corrosão, segundo Fontana [14].

Tabela 4

Classificação da resistência relativa à corrosão de ligas típicas de ferro e níquel de acordo com a taxa de corrosão em milésimo de polegada por ano [14]

Relativa Resistência à Corrosão	Taxa de corrosão / (mpy)
Excelente	< 1
Muito Boa	1 – 5
Boa	5 – 20
Média	20 – 50
Pouca	50 – 200
Inaceitável	> 200

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Amostra de Solo

A amostra de solo utilizada neste trabalho foi o LATOSSOLO VERMELHO-AMARELHO proveniente da cidade de Juiz de Fora, Zona da Mata do Estado de Minas Gerais, Brasil. Para a realização dos experimentos, cerca de 10 kg de solo passaram por peneira de 2,00 mm sendo em seguida seco em estufa a 105°C por 24 h e resfriado em dessecador.

2.2 Contaminantes

A escolha do ácido sulfúrico como um contaminante ácido deveu-se ao seu grande volume produzido para atender a ampla demanda dessa matéria-prima. Dentre alguns usos deste ácido, estão: a fabricação de fertilizantes, sulfato de alumínio, fibras têxteis e detergentes; a produção da celulose e álcool etílico; o tratamento de minérios e metais; além de ser útil nas indústrias farmacêutica e cosmética [15].

A amônia é extremamente importante para a indústria química, pois é matéria-prima para a obtenção de outros produtos, como ácido nítrico, fertilizantes e explosivos. A capacidade mundial anual de produção de amônia supera 120 milhões de toneladas. Outra razão para a escolha deste álcali deveu-se a amônia ser o produto químico mais freqüentemente envolvido em acidentes durante o transporte em dutos [16].

O 1,2-dicloroetano é o principal intermediário do monômero de cloreto de vinila e pode ser usado como solvente de graxas, colas e como componente de produtos de limpeza. Altamente volátil (evapora à temperatura ambiente), provoca impactos negativos, pois apesar de não se acumular em solo quando exposto à luz solar, pode persistir por muitos anos em águas subterrâneas e em solos sub-superficiais [17].

2.3 Corpos-de-prova

Os corpos-de-prova foram utilizados para a realização dos ensaios de perda de massa, em triplicata, sendo constituídos de aço-carbono AISI 1020 por possuir composição química semelhante ao aço empregado nos dutos brasileiros. Os corpos-de-prova possuíam as dimensões 75,5 mm de comprimento x 13,5 mm de largura x 2,0 mm de espessura e com um orifício de 7,2 mm de diâmetro.

2.4 Avaliação da Corrosividade

Foram preparadas amostras de solo com 40% de umidade (considerada como valor mínimo de resistividade em ensaios prévios [18]) para o “ensaio em branco” e amostras contendo este valor de umidade sofrendo a adição de contaminantes. Homogeneizou-se a água destilada ao solo seco em estufa, e no caso das amostras contaminadas, também foi adicionado gradualmente o contaminante. Em resumo, os ensaios realizados foram nas seguintes condições:

- solo + 40% (p/p) de umidade;
- solo + 40% (p/p) de umidade + 5,4% (p/p) de ácido sulfúrico;
- solo + 40% (p/p) de umidade + 1,4% (p/p) de amônia e;
- solo + 40% (p/p) de umidade + 3,8% (p/p) de 1,2-dicloroetano.

Deste modo, para cada uma das condições citadas acima há quatro amostras idênticas entre si para os quatro tempos de exposição (1, 2, 3 e 4 meses). Com o intuito de evitar a perda de água por evaporação, cada recipiente de amostra foi coberto com plástico tipo filme e colocados em um recipiente maior fechado e com um pouco de água no fundo, mantendo assim a umidade do meio constante.

• Ensaios de Perda de Massa

Foi utilizada a norma ASTM G1 [19] como orientação para a preparação dos corpos-de-prova para realização dos ensaios de perda de massa. Antes dos ensaios os corpos-de-prova foram jateados com micro esferas de vidro, desengordurados com acetona e secados. Após os ensaios os corpos-de-prova foram decaçados quimicamente por solução de Clark [19].

Cada corpo-de-prova foi pesado cuidadosamente sem contato manual em balança analítica ao décimo de miligrama, anotada a sua massa inicial, sendo devidamente identificado e inserido no recipiente que se encontra preenchido com a mistura de solo. Após o tempo de contato previamente determinado (1, 2, 3 ou 4 meses), os corpos-de-prova foram retirados, lavados com água corrente, solução de Clark e secos com álcool anidro. Retirou-se a identificação de cada corpo-de-prova, pesou-se em balança analítica ao décimo de miligrama e anotou-se o valor da massa final.

• Índice de Steinrath

- resistividade: medida em soil box;
- potencial redox: medido com eletrodo de platina e eletrodo de Cu/CuSO₄;
- pH: medido em suspensão de solo: água destilada (razão de 1:2,5) [20];

- cloreto: determinado em extrato aquoso (solo:água destilada = 1:1) através da volumetria de precipitação com solução de nitrato de prata, empregando cromato de potássio como indicador [20];
- sulfato: determinado gravimetricamente em extrato aquoso (solo:água destilada = 1:1) através de precipitação com solução de cloreto de bário [20];
- sulfeto: o valor de pH dos solos brasileiros encontra-se geralmente na faixa ácida. Contudo, nos experimentos realizados, foram adicionadas substâncias químicas, dentre estas, o hidróxido de amônio, resultando na elevação do pH do meio. Apesar de não ter sido encontrado na literatura um método quantitativo para sulfeto total em solos, realizou-se um método qualitativo por volatilização do H₂S e precipitação com íons Pb²⁺ [21].

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Perda de Massa

Os resultados do ensaio de perda de massa de todas as amostras estão resumidos na Tabela 5. As taxas de corrosão apresentadas consistem na média aritmética das perdas de massa para os três corpos-de-prova contidos em cada recipiente e encontram-se expressas na unidade milésimo de polegada por ano (mpy).

Tabela 5

Taxas médias de corrosão / (mpy) para solo com 40% de umidade na ausência de contaminantes e com H₂SO₄, NH₃ e DCE

Tempo de Contato	H ₂ O	H ₂ SO ₄	NH ₃	DCE
1 mês	7,6	23,0	1,3	9,5
2 meses	7,5	20,1	1,0	2,2
3 meses	11,5	53,8	1,1	2,1
4 meses	10,6	54,3	3,1	2,2

As Figuras 1 a 4 mostram os gráficos das taxas médias de corrosão para o solo contendo 40% (p/p) de umidade na ausência de contaminantes e na presença de 5,4% (p/p) de ácido sulfúrico, 1,4% (p/p) de amônia e 3,8% (p/p) de 1,2-dicloroetano para os 4 tempos de contato estudados.

De acordo com a Tabela 4 [14] o aço-carbono tem boa resistência à corrosão no solo úmido, média a pouca resistência no caso do solo contaminado pelo ácido, excelente para a contaminação por amônia e de excelente a boa para o solo contendo DCE.

Na amostra com 40% (p/p) de água destilada verifica-se que a taxa de corrosão praticamente não alterou no início do ensaio, porém aumentou no terceiro mês.

O gráfico de perda de massa em solo úmido com 5,4% (p/p) do H₂SO₄ mostra taxas de corrosão semelhantes nos dois primeiros meses, um aumento significativo no terceiro mês, permanecendo constante no quarto mês. Gaber [22] explica que a estabilidade da taxa de corrosão do aço em H₂SO₄ tende a ser limitada pela difusão e pela concentração do íon sulfato.

Portanto, a taxa de corrosão é igual à transferência de massa do ferro do filme saturado de FeSO₄ na superfície metálica.

Em solo úmido com 1,4% (p/p) de NH₃ observou-se no primeiro mês uma taxa de corrosão pouco maior que a observada nos segundo e terceiro meses, enquanto que no quarto mês houve, comparativamente, um aumento significativo de quase três vezes no valor da taxa de corrosão. Os corpos-de-prova apresentaram uma camada negra que, de acordo com a Diagrama de Pourbaix, corresponde à magnetita (Fe₃O₄).

Com adição de DCE, verificou-se no primeiro mês uma taxa de corrosão superior (cerca de 4 vezes) àquela medida para os meses seguintes. Provavelmente o aço-carbono sofreu corrosão no início e, posteriormente foi reduzida devido à proteção dada pelos produtos de corrosão formados na superfície do metal. Estes corpos-de-prova exibiram menor quantidade de produtos de corrosão, o que pode ser justificado por este composto não possuir caráter iônico.

Verificou-se que o H₂SO₄ promoveu maior taxa de corrosão, enquanto que a NH₃ e o DCE resultam em taxas

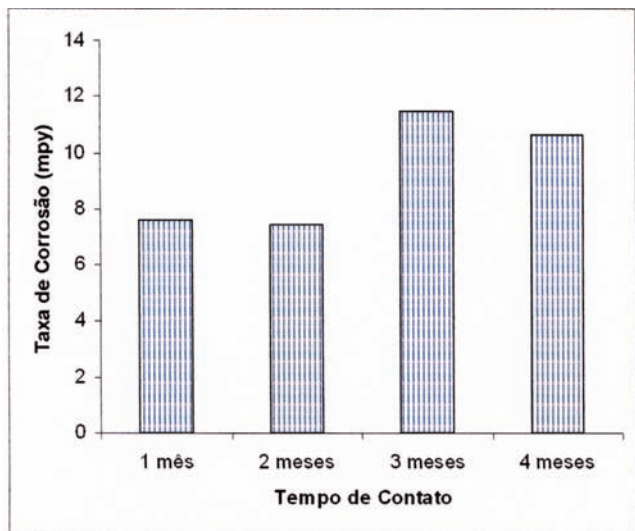


Fig. 1 – Taxas médias de corrosão / (mpy) em solo com 40% de umidade.

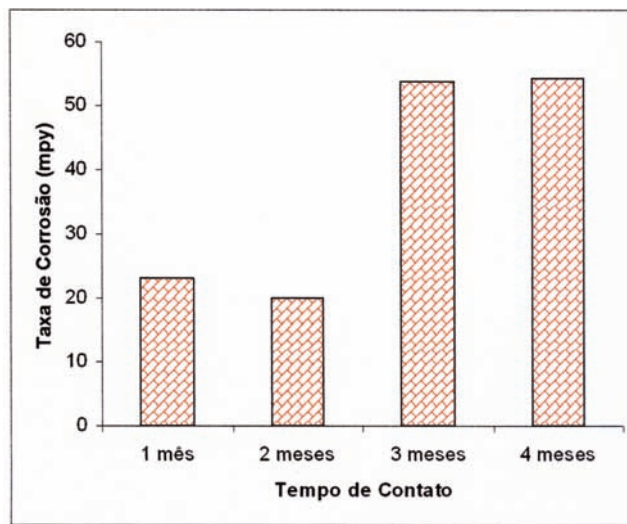


Fig. 2 – Taxas médias de corrosão / (mpy) em solo úmido 5,4% de ácido sulfúrico.

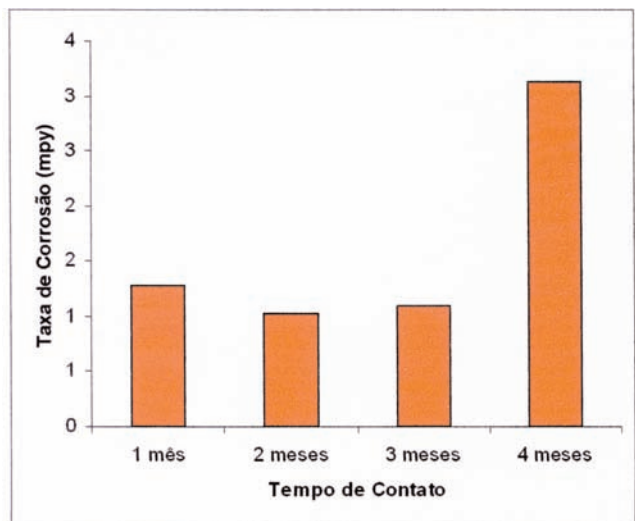


Fig. 3 – Taxas médias de corrosão / (mpy) em solo úmido com 1,4% de amônia.

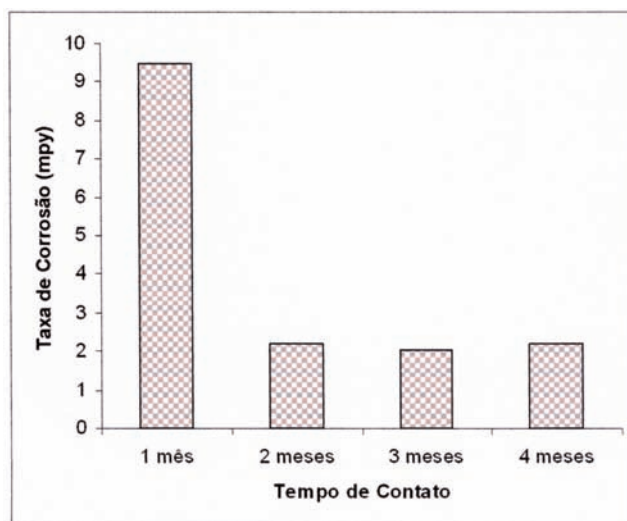


Fig. 4 – Taxas médias de corrosão / (mpy) em solo úmido com 3,8% de DCE.

médias de corrosão menores que no solo na ausência de contaminantes. Através da visualização dos corpos-de-prova retirados em cada tempo de contato observou-se que, tanto no solo sem contaminação como no solo que recebeu a adição de H₂SO₄ e DCE, houve formação de ferrugem castanha, sendo que neste último houve corrosão bem menos intensa, possuindo uma fina camada de tonalidade castanha. Nos corpos-de-prova que estiveram em contato com o solo na ausência de contaminante foi verificado um processo corrosivo menos intenso do que aqueles que estiveram em solo úmido contaminado por ácido sulfúrico.

3.2 Índice de Steinrath

Os resultados obtidos para os sete parâmetros estão apresentados nas Tabelas 6 a 9, sendo os índices parciais dados na Tabela 2.

Segundo esta avaliação de corrosividade proposta por Steinrath, durante quatro meses, o solo na ausência de contaminantes sofre variações de meio não agressivo a pouco agressivo.

O solo úmido com H₂SO₄ apresentou pouca agressividade durante os quatro meses, com constância no somatório dos índices parciais (-7) atribuídos por Steinrath. É verdade que o Índice de Steinrath não pode ser considerado de forma demasiadamente rígida, pois há diferença entre um solo contendo somatório de índices parciais como sendo -1 e outro com -7. Verifica-se, pois, que o solo contendo ácido sulfúrico apesar de estar classificado como meio de pouca agressividade, está próximo da fronteira da média agressividade. Outra observação a ser feita é com relação ao teor de íons cloreto medido para este meio que é bem superior aos demais meios estudados. Como o ácido sulfúrico utilizado foi grau PA e um alto teor cloreto medido ocorreu para cada tempo de exposição estudado, uma explicação provável é que este ácido forte

Tabela 6
Solo com 40% de umidade e sem contaminantes

Parâmetros do Solo	t = 0		t = 1 mês		t = 2 meses		t = 3 meses		t = 4 meses	
	Valor medido	Índice Parcial	Valor medido	Índice Parcial	Valor medido	Índice Parcial	Valor medido	Índice Parcial	Valor medido	Índice Parcial
Resistividade / (ohm.cm)	>19990	0	>19990	0	>19990	0	>19990	0	>19990	0
Potencial Redox / (mVenh)	415,0	2	370,5	0	434,0	2	411,0	2	366,5	0
pH	4,84	-1	7,75	0	8,70	0	7,72	0	7,96	0
Umidade / (%)	40	-1	40	-1	40	-1	40	-1	40	-1
Cloreto / (mg/kg)	88,8	0	71,0	0	112,7	-1	106,6	-1	71,0	0
Sulfeto / (mg/kg)	Ausente	0	Ausente	0	Ausente	0	Ausente	0	Ausente	0
Sulfato / (mg/kg)	18,1	0	13,2	0	20,6	0	21,4	0	23,9	0
Somatório dos Índices Parciais	0		-1		0		0		-1	
Classificação	Sem Agressividade		Pouca Agressividade		Sem Agressividade		Sem Agressividade		Pouca Agressividade	

Tabela 7
Solo com 40% de umidade e 5,4% de ácido sulfúrico

Parâmetros do Solo	t = 0		t = 1 mês		t = 2 meses		t = 3 meses		t = 4 meses	
	Valor medido	Índice Parcial	Valor medido	Índice Parcial	Valor medido	Índice Parcial	Valor medido	Índice Parcial	Valor medido	Índice Parcial
Resistividade / (ohm.cm)	13,0	-4	129,6	-4	157,7	-4	195,4	-4	245,0	-4
Potencial Redox / (mVenh)	523,0	2	578,5	2	539,5	2	423,0	2	559,5	2
pH	3,01	-1	3,45	-1	3,33	-1	2,12	-1	3,64	-1
Umidade / (%)	40	-1	40	-1	40	-1	40	-1	40	-1
Cloreto / (mg/kg)	230,8	-1	319,5	-1	285,8	-1	280,8	-1	248,5	-1
Sulfeto / (mg/kg)	Ausente	0	Ausente	0	Ausente	0	Ausente	0	Ausente	0
Sulfato / (mg/kg)	4667,0	-2	4596,2	-2	5041,0	-2	4760,1	-2	5284,9	-2
Somatório dos Índices Parciais	-7		-7		-7		-7		-7	
Classificação	Pouca Agressividade		Pouca Agressividade		Pouca Agressividade		Pouca Agressividade		Pouca Agressividade	

Tabela 8
Solo com 40% de umidade e 1,4% de amônia

Parâmetros do Solo	t = 0		t = 1 mês		t = 2 meses		t = 3 meses		t = 4 meses	
	Valor medido	Índice Parcial	Valor medido	Índice Parcial	Valor medido	Índice Parcial	Valor medido	Índice Parcial	Valor medido	Índice Parcial
Resistividade / (ohm.cm)	490,0	-4	632,0	-4	812,6	-4	993,0	-4	1173,0	-4
Potencial Redox / (mVenh)	440,0	2	429,0	2	605,5	2	362,0	0	381,5	0
pH	10,67	0	8,45	0	9,63	0	5,07	0	8,25	0
Umidade / (%)	40	-1	40	-1	40	-1	40	-1	40	-1
Cloreto / (mg/kg)	71,0	0	88,8	0	71,4	0	91,8	0	88,8	0
Sulfeto / (mg/kg)	Ausente	0	Ausente	0	Ausente	0	Ausente	0	Ausente	0
Sulfato / (mg/kg)	95,6	0	78,3	0	115,3	0	132,6	0	110,5	0
Somatório dos Índices Parciais	-3		-3		-3		-5		-5	
Classificação	Pouca Agressividade		Pouca Agressividade		Pouca Agressividade		Pouca Agressividade		Pouca Agressividade	

Tabela 9
Solo com 40% de umidade e 3,8% de 1,2-dicloro etano

Parâmetros do Solo	t = 0		t = 1 mês		t = 2 meses		t = 3 meses		t = 4 meses	
	Valor medido	Índice Parcial	Valor medido	Índice Parcial	Valor medido	Índice Parcial	Valor medido	Índice Parcial	Valor medido	Índice Parcial
Resistividade / (ohm.cm)	>19990	0	>19990	0	>19990	0	>19990	0	>19990	0
Potencial Redox / (mVenh)	398,5	0	381,6	0	363,9	0	369,5	0	354,5	0
pH	6,58	0	7,91	0	9,08	0	5,76	0	7,42	0
Umidade / (%)	40	-1	40	-1	40	-1	40	-1	40	-1
Cloreto / (mg/kg)	35,5	0	35,5	0	35,5	0	29,7	0	35,5	0
Sulfeto / (mg/kg)	Ausente	0	Ausente	0	Ausente	0	Ausente	0	Ausente	0
Sulfato / (mg/kg)	14,8	0	21,4	0	18,1	0	19,8	0	18,1	0
Somatório dos Índices Parciais	-1		-1		-1		-1		-1	
Classificação	Pouca Agressividade		Pouca Agressividade		Pouca Agressividade		Pouca Agressividade		Pouca Agressividade	

promoveu a ionização de algumas espécies presentes na complexa composição do solo, acarretando assim, no aumento da concentração de íons cloretos livres.

No caso do solo úmido contaminado por amônia ou pelo composto orgânico, a avaliação de corrosividade de Steinrath classifica estes meios na faixa de pouca agressividade ao metal durante os quatro meses.

Entre os meios estudados, durante os quatro meses, as amostras de solo contaminadas pelo ácido sulfúrico foram as que resultaram no maior somatório em módulo dos índices parciais, e, portanto, este foi o meio mais agressivo, ainda que de pouca agressividade. A adição de amônia, assim como de DCE, também promoveu pouca agressividade ao meio no período estudado. Em resumo, com relação ao somatório dos índices parciais atribuídos por Steinrath, a adição de contaminantes ao solo resultou na seguinte ordem crescente de agressividade ao meio: DCE < NH₃ < H₂SO₄.

4. CONCLUSÕES

- Pela análise dos ensaios de perda de massa verificou-se que o aço-carbono sofre corrosão, em ordem decrescente, nos seguintes meios: H₂SO₄ > H₂O > DCE ≈ NH₃.

- A avaliação da corrosividade do solo através do Índice de Steinrath classificou o solo contendo somente 40% de umidade durante os quatro meses como um meio não agressivo e de pouca agressividade, enquanto que a adição de qualquer um dos contaminantes estudados promoveu ao meio pouca agressividade.

- Em alguns casos não houve concordância entre os ensaios de perda de massa e a avaliação da corrosividade através de índice de Steinrath, não devendo este ser o único critério de avaliação de agressividade de um solo.

AGRADECIMENTOS

Agradece-se o suporte financeiro recebido pela ANP (Agência Nacional de Petróleo) e o suporte institucional prestado pela Escola de Química da UFRJ.

REFERÊNCIAS

- [1] E. B. LUCHESE, L. O. B. FAVERO and E. LENZI (Fundamentos da Química do Solo), 2.ed., Freitas Bastos, Rio de Janeiro, Brasil (2002).
- [2] EMBRAPA (Sistema Brasileiro de Classificação de Solos), Embrapa Solos, Rio de Janeiro, Brasil (1999).
- [3] I. F. LEPSCH (Formação e Conservação dos Solos), Oficina de Textos, São Paulo, Brasil (2002).
- [4] H. PRADO (Manual de Classificação de Solos do Brasil), 3.ed., FUNEP, Jaboticabal, Brasil (1996).
- [5] EUROPA – THE EUROPEAN UNION ON-LINE. Comunicação da Comissão ao Conselho, ao Parlamento Europeu, ao Comité Económico e Social e ao Comité das Regiões – Para uma estratégia temática de protecção do solo. Set. 2002. <http://www.europa.eu.int>, Acesso em: 29 set. 2004.
- [6] V. DREVENKAR, *et al.*, *Environmental Management and Health*, 7, 4, 5 (1996).
- [7] S. E. MANAHAN (*Soil Environmental Chemistry*), CRC Press LLC, Boca Raton, EUA (2000).
- [8] G. TRABANELLI, F. ZUCCHI and M. ARPAIA, *Chimica Pura Ed. Applicata*, 3, 4, 43 (1972).
- [9] E. LOPEZ, A. OSELHA and L. MARTINO, *Corros. Sci.*, 48, 2, 389 (2006).
- [10] S. BRADFORD (Practical Handbook of Corrosion Control in Soils), CASTI Publications, Edmonton, Canadá (2002).

- [11] A. TABBAGH, *et al.*, *Geoderma*, 97, 393 (2000).
- [12] M. J. VEPRASKAS, S. P. FAULKNER (Redox Chemistry of Hydric Soil), CRC Press, Boca Raton, EUA (2001).
- [13] A. H. S. BUENO (Avaliação da Suscetibilidade à Corrosão sob Tensão em Contato com o Solo dos Aços da Classe API X46, X60 e X80), Dissertação para obtenção do grau de Mestre, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil (2003).
- [14] M. G. FONTANA (Corrosion Engineering), 3th ed., McGraw-Hill Book Company, New York, EUA (1986).
- [15] AMONEX DO BRASIL. *Ácido Sulfúrico*. <http://www.amonex.com.br>. Acesso em: 11 dez. 2004.
- [16] F. I. KHAN and S. A. ABBASI, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 12, 361 (1999).
- [17] ESTADÃO. *Ciência e Meio Ambiente*. <http://www.estadão.com.br>. Acesso em 11 dez. 2004.
- [18] A. M. V. LOUREIRO (Estudo da Corrosão de Dutos Enterrados em Solos Contaminados por Substâncias Químicas), Dissertação para obtenção do grau de Mestre, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil (2005).
- [19] ASTM G1 – 90 (Standard Practice for Preparing, Cleaning and Evaluation Corrosion Test Specimens), American Society for Testing and Materials, Philadelphia, EUA (1992).
- [20] EMBRAPA (Manual de Métodos de Análise de Solo), 2.ed., Centro Nacional de Pesquisas de Solos, Rio de Janeiro, Brasil (1997).
- [21] A. VOGEL (Química Analítica Quantitativa), 5. ed., Mestre Jou, São Paulo, Brasil (1981).
- [22] A. M. A. GABER, N. KHALIL and A. A. E. FETOUH, *Anti-Corrosion Methods and Materials*, 50, 6, 442 (2003).