



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
ESCOLA DE QUÍMICA

Estudo de Características Físico-Químicas e Eletroquímicas de Solos

Juliana Vasconcelos Dias de Oliveira

Projeto de Final de Curso

Orientadores:

Simone Louise Delarue Cezar Brasil, D.Sc
José Maurílio da Silva, D.Sc

Fevereiro de 2008

ESTUDO DE CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS E ELETROQUÍMICAS DE SOLOS

Juliana Vasconcelos Dias de Oliveira

Projeto de final de curso submetido ao Corpo Docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Químico.

Aprovado por:

Ladimir José de Carvalho, D. Sc.

Eliana Flávia C. Sérvulo, D.Sc.

Lisiane Gonçalves Lima, M.Sc.

**Rio de Janeiro, RJ- Brasil
Fevereiro de 2008**

“Mesmo que as pessoas mudem e suas vidas se reorganizem, os amigos devem ser amigos para sempre, mesmo que não tenham nada em comum, somente compartilhar as mesmas recordações.”

Vinícius de Moraes

Agradecimentos

Aos meus pais, Sergio e Marilim, pelo carinho e apoio dado em todos os momentos da minha vida, dedico a eles esta vitória.

Ao meu marido Charles, pelo companheirismo, carinho, amor e compreensão ao longo de toda essa jornada. Obrigada por estar sempre ao meu lado acreditando, e principalmente me fazendo acreditar que eu iria conseguir.

Aos meus irmãos, Rogerinho e Yasmin, por compreenderem minha ausência e impaciência em alguns momentos e por me alegrarem quando estava triste.

À Professora Simone Brasil, pela confiança, paciência e apoio dados para execução desse trabalho.

A Deus por ter me dado forças para alcançar meus objetivos e paciência para estudar quando eu achava que nada mais seria possível na faculdade.

A todos os amigos que fiz na faculdade ao longo de todos esses anos.

Em especial, às minhas queridas amigas: Claudia, Renata, Sabrina, Roberta, Priscila e Milena que compartilharam comigo momentos que jamais vou esquecer. Os estudos, as brigas e as conversas com certeza estarão sempre guardados no meu coração mesmo que caminharíamos por rumos diferentes, tenho certeza de que sem vocês eu não teria conseguido concluir o curso.

Índice

RESUMO	5
OBJETIVO	5
INTRODUÇÃO	6
I REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
I.1 Solo	7
I.1.1. Textura e Estrutura do Solo	7
I.2 Corrosão em Solos	8
I.2.1 Resistividade	9
I.2.2. Potencial Redox	10
I.2.3. Potencial de Hidrogênio	11
I.2.4. Umidade	11
I.3 Avaliação da Corrosividade dos Solos	11
I.3.1 Critérios de Avaliação da Corrosividade	11
I.3.2 Aplicação de Técnicas Eletroquímicas	12
I.3.3. Avaliação da Corrosividade por Ensaio de Perda de Massa	13
II METODOLOGIA	14
II.1 Amostras de Solo	14
II.2 Curva de Resistividade vs Teor de Umidade	15
II.3 Capacidade de retenção de água do solo	16
II.4 Preparo e medida de pH do Extrato Aquoso	16
II.5 Ensaio de perda de massa	16
II.6 Potencial de corrosão	17
III RESULTADOS E DISCUSSÕES	18
III.1 Critério de avaliação de corrosividade sugerido a partir dos resultados experimentais	22
IV CONCLUSÕES	23
V REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	24

RESUMO

A corrosão de estruturas metálicas pelo solo representa grandes custos para diversos setores industriais devido ao fato de possuir alta complexidade quanto à sua composição e às interações com o ambiente. Diversos fatores climáticos causam mudanças nas propriedades do solo que estão diretamente relacionadas com as taxas de corrosão dos materiais enterrados nele.

Este trabalho visou estudar a corrosividade de diferentes tipos de solos a partir de análises físico-químicas e eletroquímicas. Foram realizadas as seguintes medidas: resistividade, capacidade de retenção de água, pH em extrato aquoso e em KCl, potencial de corrosão no extrato aquoso e no solo na capacidade de retenção e ensaios de perda de massa em amostras de aço-carbono durante um período de, aproximadamente, 4 meses de exposição para que fossem calculados os valores de taxas de corrosão.

OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é a avaliação da corrosividade em diferentes tipos de solos através de análises físico-químicas, eletroquímicas e ensaios de perda de massa.

O objetivo destas análises foi estabelecer um critério original para caracterização da corrosividade dos solos correlacionando características físico-químicas e eletroquímicas, utilizando como base os valores da sobretensão de hidrogênio.

INTRODUÇÃO

O solo possui complexidade quanto à sua composição e às interações com o ambiente e por isso pode ser definido de diversas maneiras. Fatores climáticos causam alterações nas propriedades do solo, as quais estão diretamente relacionadas com as taxas de corrosão dos materiais enterrados.

A corrosão de estruturas metálicas pelo solo representa grandes custos para diversos setores industriais, desta forma tornou-se necessário o estudo do solo como meio corrosivo. Um parâmetro fundamental relativo à corrosividade do solo é sua resistividade. De fato, a taxa de corrosão de uma estrutura metálica enterrada está diretamente relacionada à resistividade, sendo que solos de menor resistividade proporcionam maiores taxas de corrosão.

A necessidade de avaliar o solo em períodos curtos de tempo levou vários pesquisadores a estudar métodos de medidas indiretas que se baseiam na correlação nas propriedades do solo e a corrosividade absoluta do mesmo (Trabanelli et al., 1972; Serra, 1982). Com este objetivo foram propostos diversos critérios de avaliação da agressividade dos solos a partir do conhecimento de suas propriedades.

I REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

I.1 Solo

Solo é um conjunto de corpos naturais, os quais são formados por materiais minerais e orgânicos, que ocupam a maior parte do manto superficial das extensões continentais do nosso planeta; contêm matéria viva e podem possuir vegetação, dependendo do local onde ocorrem. Ocasionalmente, podem ter sido modificados por atividades humanas (EMBRAPA, 1999).

Os diferentes tipos de solo são caracterizados de acordo com suas propriedades morfológicas, que podem ser feitas, inicialmente, através de análise visual e posteriormente completada com análises de laboratório. As principais propriedades morfológicas analisadas são: cor, textura, estrutura e consistência das diversas camadas do solo. As principais propriedades analisadas em laboratório encontram-se descritas a seguir:

- pH do Solo

Os íons presentes na fase aquosa do solo estão geralmente solubilizados, no entanto, uma solução de solo em água não possui distribuição iônica uniforme, pois a capa iônica difusa em argila ácida apresenta atividade dos íons hidrogênio muito maior que aquela existente entre as partículas na solução verdadeira.

Vários fatores exercem influência sobre a acidez do solo e, portanto, sobre o pH do solo. Os mais importantes são: proporção água-solo e presença de sais solúveis (Luchese et al., 2002).

- Proporção água-solo

O pH varia de acordo com o teor de água presente no solo. Observa-se uma diminuição do pH dos solos à medida que a umidade dos mesmos diminui. Este fato pode ser explicado pela diminuição do teor de água no solo torna maior a concentração de íons H^+ solubilizados, íons estes provenientes da capa iônica da argila (Guimarães et al., 1970).

- Presença de sais solúveis no solo

Observa-se que o pH decresce com o aumento da concentração de sais no solo, o que pode ser explicado pela troca iônica efetuada por alguns cátions, como a acidez trocável H^+ e Al^{3+} , que libera ácidos na solução do solo.

I.1.1. Textura e Estrutura do Solo

Os solos são nomeados e classificados de acordo com a faixa de tamanho de seu material particulado: areia, silte e argila. A proporção desses três grupos irá determinar várias propriedades do solo.

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 (Oguzie et al., 2004; Hudak et al., 1999).

I.2 Corrosão em Solos

O fenômeno da corrosão tem sido universalmente aceito como a deterioração de um material, geralmente metálico, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente aliada ou não a esforços (Gentil, 1996).

O sistema corrosivo é composto de duas reações espontâneas acopladas que ocorrem na interface entre o metal e o ambiente aquoso. Uma reação é aquela em que espécies químicas do ambiente aquoso removem elétrons do metal; e a outra é aquela em que os átomos da superfície do metal fornecem elétrons. A troca de elétrons entre as duas reações constitui uma corrente elétrica na superfície metálica (Talbot, 2000).

Nos solos, a corrosão consiste numa reação eletroquímica de oxi-redução onde alguns constituintes do solo são reduzidos, recebendo elétrons do metal, enquanto que o metal é oxidado a íons positivos que vão para solução aquosa do solo que se encontra em contato com o metal. Estes íons metálicos reagem formando produtos, sendo que a corrosão ocorre no momento em que os átomos do metal doam seus elétrons, tornando-se íons (Bradford, 2002).

A corrosividade dos solos pode ser indicada pela habilidade do ambiente em 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 tais como: textura, estrutura e interação água-solo; propriedades químicas, como acidez total, espécies iônicas e suas concentrações na solução; e das propriedades biológicas que dependem do tipo de bactérias (aeróbias ou anaeróbias) (Trabanelli et al., 1972).

O estudo das características físico-químicas e eletroquímicas de solos é de imensa importância devido a grande quantidade de estruturas enterradas (dutos, cabos, tanques e outras) (Romaswamy, Roy, 1975).

Algumas propriedades que influenciam na corrosividade dos solos serão apresentadas a seguir.

I.2.1 Resistividade

A resistividade do solo é um indicador comumente utilizado para avaliar a corrosividade do solo ao metal enterrado. Uma resistividade baixa 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 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:

$$R = \rho L/A$$

Onde:

R= resistência do solo (ohm)

L= comprimento do caminho elétrico (cm)

A= área da seção transversal por onde flui a corrente (cm²)

ρ = resistividade do solo (ohm.cm).

Em laboratório, a medida da resistividade do solo pode ser feita em uma caixa padrão denominada *soil box* (Figura I-1). O solo é compactado e nivelado dentro da *soil box* de modo a não existirem espaços vazios. Dois eletrodos de cobre são colocados nas extremidades da caixa padrão, de modo a possibilitar a medição do potencial quando se aplica corrente ou vice-versa. O uso do cobre se justifica por sua elevada condutividade que, desta forma, não interfere na medida. A resistência é medida entre os dois eletrodos de cobre da *soil box*. As dimensões dessa caixa padrão são tais que seu comprimento (L) é numericamente igual à área (A) transversal ao fluxo de corrente no solo para que o valor da resistência lida se torne o mesmo da resistividade do solo (Bradford, 2002).

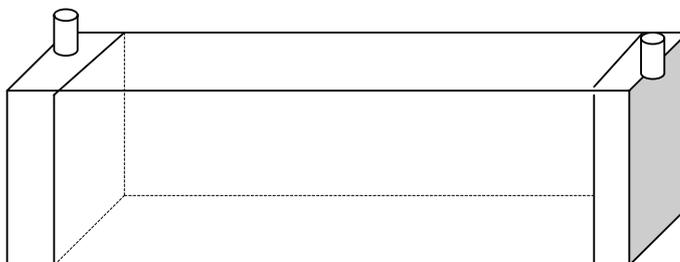


Figura I-1 – Representação da Soil Box.

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 a amostra de solo. O perfil do comportamento da variação da resistividade com o teor de água para um solo hipotético pode ser visto na Figura I-2.

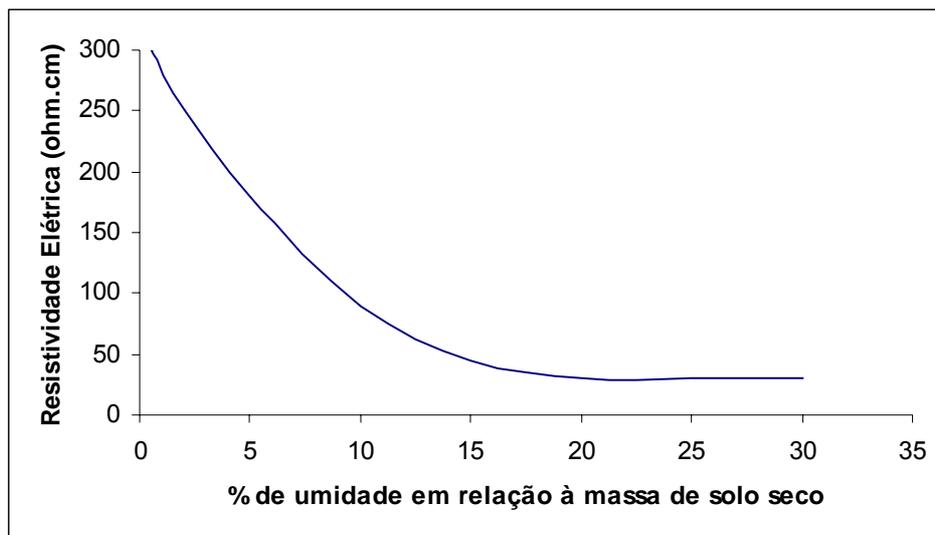


Figura I-2 – Curva de resistividade de um solo hipotético em função do teor de água.

I.2.2. Potencial Redox

Potencial Redox é a tendência de uma espécie química adquirir elétrons e, desse modo, ser reduzida. Através do potencial redox é possível estimar se o solo é aerado ou não aerado e se compostos químicos tais como óxidos de ferro ou nitratos foram quimicamente reduzidos ou ainda estão presentes em suas formas oxidadas (Vepraskas, Faulker, 2001).

Desta forma, o potencial redox corresponde ao potencial de oxidação e redução de um meio, ou seja, mede as cargas negativas e positivas. Um meio oxidante possui, portanto, um potencial redox positivo (mais elementos oxidantes que redutores).

A Tabela I.1 mostra o potencial redox como um indicador de corrosividade de solos.

Tabela I.1 – Potencial redox como um indicador da corrosividade do solo (Bradford, 2002).

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

I.2.3. Potencial de Hidrogênio

Potencial Hidrogeniônico é a medida do pH do solo. Solos com pH abaixo de 5 podem contribuir para uma corrosão severa e uma rápida deterioração dos metais expostos. Solos com pH entre 6,5 e 7,5, em condições de ausência de oxigênio e que possuem bactérias redutoras de sulfato promovem corrosão microbiológica nos metais. Solos com pH maior que 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. Estes tendem a formar camadas protetoras na superfície do ferro (depósitos calcários) através da precipitação de carbonatos, sendo solos favoráveis para inserção de metais (Robinson, 1993).

I.2.4. Umidade

A água promove a ionização dos eletrólitos presentes no solo, completando assim, o circuito do processo corrosivo. Existe uma relação inversa entre o volume d'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 (Shreir et al., 1996).

I.3 Avaliação da Corrosividade dos Solos

I.3.1 Critérios de Avaliação da Corrosividade

Loureiro (2005) citou os diferentes critérios de avaliação da agressividade do solo encontrados na literatura, que estão resumidos na Tabela I.2 a seguir.

Tabela I.2 – Critérios para avaliação de corrosividade (Loureiro, 2005).

Critério	Parâmetros considerados
Índice de Steinrath	ρ , E_{redox} , pH, %H ₂ O, cloreto, sulfato e sulfeto.
Robinson	ρ
Acidez	pH
Starkey e Wight	E_{redox}
Booth	ρ , E_{redox} , %H ₂ O
Girard	ρ do extrato aquoso, umidade de saturação e acidez total.
Gotlieb e Vieira	ρ , sais solúveis, acidez total e coeficiente de despolarização.

Onde:

ρ = resistividade

E_{redox} = Potencial Redox

%H₂O = umidade da amostra

I.3.2 Aplicação de Técnicas Eletroquímicas

Segundo Oliveira (2007), algumas técnicas eletroquímicas podem ser aplicadas na avaliação da corrosividade dos solos. As seguintes técnicas podem ser aplicadas com esta finalidade:

- **Curvas de Polarização:** podem ser obtidas pela passagem de uma corrente entre o metal de trabalho e um segundo metal que tem a função de contra-eletrodo, estas são conhecidas também como diagramas E vs. Log I (potencial de eletrodo vs. densidade de corrente).

- **Resistência de Polarização:** é a resistência devida à reação eletroquímica, chamada também de resistência da reação na interface metal/ meio. Representa também o declive, no potencial de corrosão, da tangente à curva experimental de polarização ΔE vs. I.

- **Impedância Eletroquímica:** é uma técnica de espectroscopia que tem como base a aplicação de um potencial ou corrente alternada, sendo uma dessas variáveis controlada, onde é medida a intensidade e a diferença de fase da outra variável. A partir dos pares de valores de potencial e corrente pode ser definida a impedância.

- Técnica de **Ruído Eletroquímico:** visa obter informações de potencial e de corrente, anteriormente incompreendidos, através de técnicas determinísticas. As medidas do ruído eletroquímico são baseadas na flutuação dos potenciais

eletroquímicos e na corrente de corrosão que ocorre naturalmente durante o fenômeno da corrosão.

Neste trabalho, somente medidas de potencial de corrosão foram realizadas.

I.3.3. Avaliação da Corrosividade por Ensaio de Perda de Massa

Este método consiste na observação do comportamento do corpo-de-prova metálico em função do tempo, pela determinação da perda de massa por unidade de superfície. O teste fornece valores objetivos e é útil para o estudo profundo da agressividade do solo para casos de corrosão generalizada (norma ASTM G1).

Este método de avaliação de corrosão é o mais simples e o mais utilizado, porém existem algumas limitações:

- Os corpos-de-prova não devem ser utilizados para avaliação de mudanças rápidas ou bruscas de processos corrosivos, visto que o princípio básico está na perda de massa como consequência do tempo de exposição na condição de corrosividade;
- Corrosão de característica localizada não deve ser determinada através de cupons, considerando o seu período de nucleação; além disso, o valor da taxa de corrosão não representará o perigo desta forma de corrosão;
- As taxas de corrosão calculadas a partir de cupons de corrosão não podem ser associadas diretamente ao sistema como um todo e sim às regiões cujas características são similares às do teste;
- Algumas formas de corrosão não são detectáveis por cupons de corrosão, por exemplo, aqueles processos associados a tipo de fluxo, efeitos de transferência de calor, mecanismos de danos combinados e cuja geometria do equipamento é fundamental para sua ocorrência (corrosão-erosão).

Após exposição e condicionamento, as taxas de corrosão são determinadas pela perda de massa dos cupons no tempo considerado, através da equação (ASTM G-1, 2003):

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

Onde TC é a taxa de corrosão (mm/ano), Δm é a diferença entre as massas (g) antes e após a exposição, A é a área total do corpo de prova (cm^2), t é o tempo de exposição (h) e ρ é a massa específica (g/cm^3).

II METODOLOGIA

Este trabalho teve como principais etapas: ensaios de perda de massa, estudo da capacidade limite de retenção de água, medidas de pH em extrato aquoso e em KCl, medidas de resistividade vs teor de umidade e medidas de potenciais de corrosão em extrato aquoso e na capacidade de retenção de água.

II.1 Amostras de Solo

As amostras de solo utilizadas no presente trabalho foram gentilmente cedidas pelo Dr. José Maurílio da Silva do LACTEC – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento com sede em Curitiba-PR.

Foram analisadas sete amostras previamente coletadas em postos de gasolina, na profundidade de 1,5 m, que é geralmente a profundidade onde são enterrados os tanques de combustível. Estas amostras foram retiradas em diferentes localidades do sul do Brasil, nos estados do Paraná e de Santa Catarina.

As amostras apresentavam aspectos morfológicos distintos, tanto em coloração quanto em textura, conforme pode ser identificado na Figura II-3. Contudo, todos se apresentavam com características de solos argilosos.

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 resfriado em dessecador.

A Figura II-3 mostra os 7 tipos de solos após peneirados.

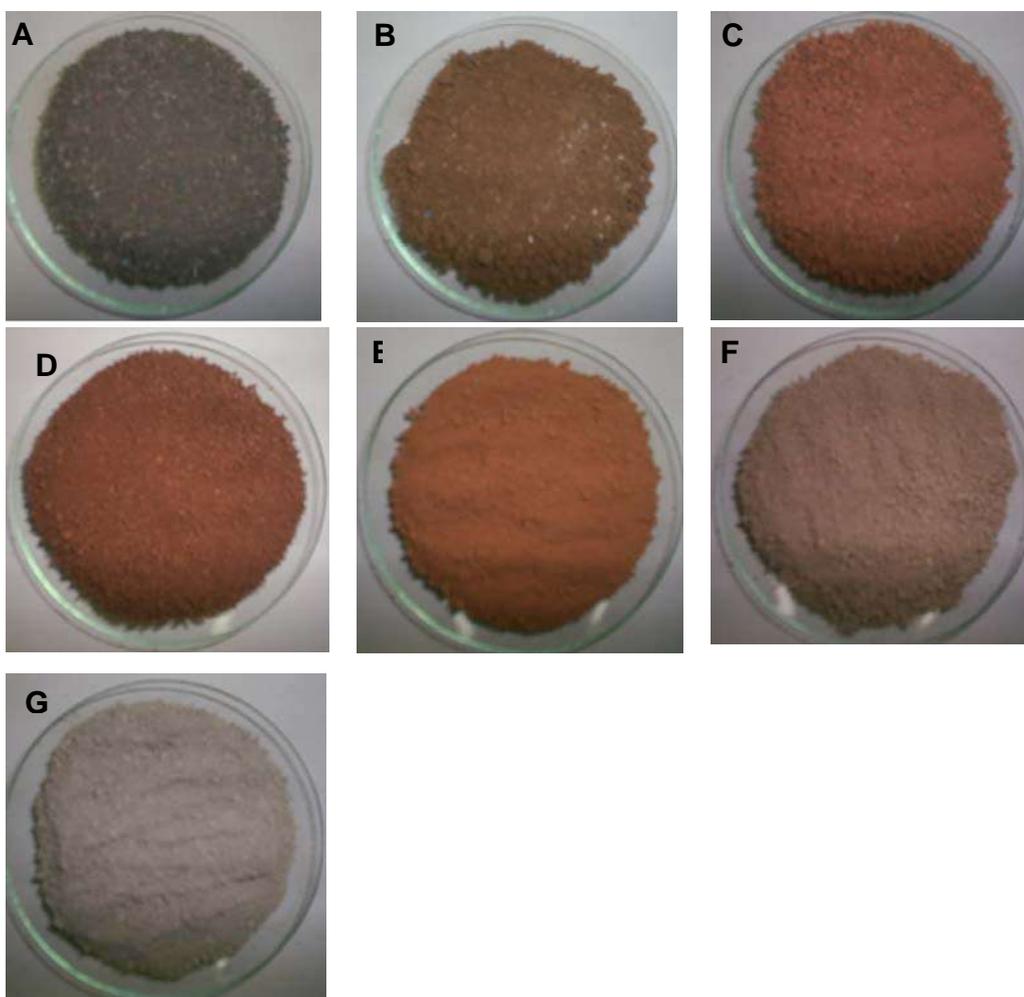


Figura II-3 – Solos analisados.

II.2 Curva de Resistividade vs Teor de Umidade

A curva de resistividade em função da porcentagem de água foi determinada através de procedimento do GCOI/SCM (1995), resumido a seguir:

Secou-se totalmente a amostra do solo em estufa e pulverizou-se em moinho.

Mediu-se o valor da resistividade através de caixa padrão *soil box* com instrumento adequado (Resistivímetro da Nilsson, modelo 400). Adicionou-se água destilada às amostras, com incremento de 5% em volume, medindo-se os valores de resistividade para cada teor de água. As dimensões da *soil box* foram de 6,4

cm de comprimento, 2,5 cm de altura e 2,5 cm de largura. Plotou-se um gráfico com os valores de resistividade obtidos em função do teor de umidade.

II.3 Capacidade de retenção de água do solo

Encheu-se um funil "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. Compactou-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. Nivelou-se a superfície da amostra do solo com uma espátula. Colocou-se o funil cheio em um becher de capacidade de 400 ml, retendo-o em posição para cima, pelas bordas do funil. Adicionou-se água ao becher a uma altura ligeiramente superior ao do papel de filtro. Esperou-se a amostra do solo ficar úmida 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. Cobriu-se o becher, deixando amostra do solo umedecida no mínimo por 12 horas. Cobriu-se o funil com um pano úmido, no qual se coloca um copo invertido. Colocou-se o funil coberto em um frasco de sucção, que estava conectado a um aspirador de água. Após 15 minutos, removeu-se o funil do frasco de sucção, transferindo-se a amostra do solo para um recipiente previamente tarado e determina-se o teor de umidade em porcentagem.

II.4 Preparo e medida de pH do Extrato Aquoso

O extrato aquoso foi preparado de acordo com a norma ASTM G 51-77, de 1984, onde moeu-se o solo até uma granulação bem fina através de um pistilo e secou-se em estufa a 400°C por uma hora. Em um becher de 100ml, adicionou-se 10g de terra fina e seca, juntamente com 25ml de água destilada, agitou-se durante 10 minutos em agitador magnético, deixou-se em repouso por 30 minutos e reagitou-se por 5 minutos.

Os valores de pH dos extratos aquosos foram obtidos através de equipamento específico (pHmetro da Digimed, modelo DMPH-2). Além destas medidas, também foram obtidos os valores de pH em solução de KCl.

II.5 Ensaio de 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 G1-03, de 2003, 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 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:

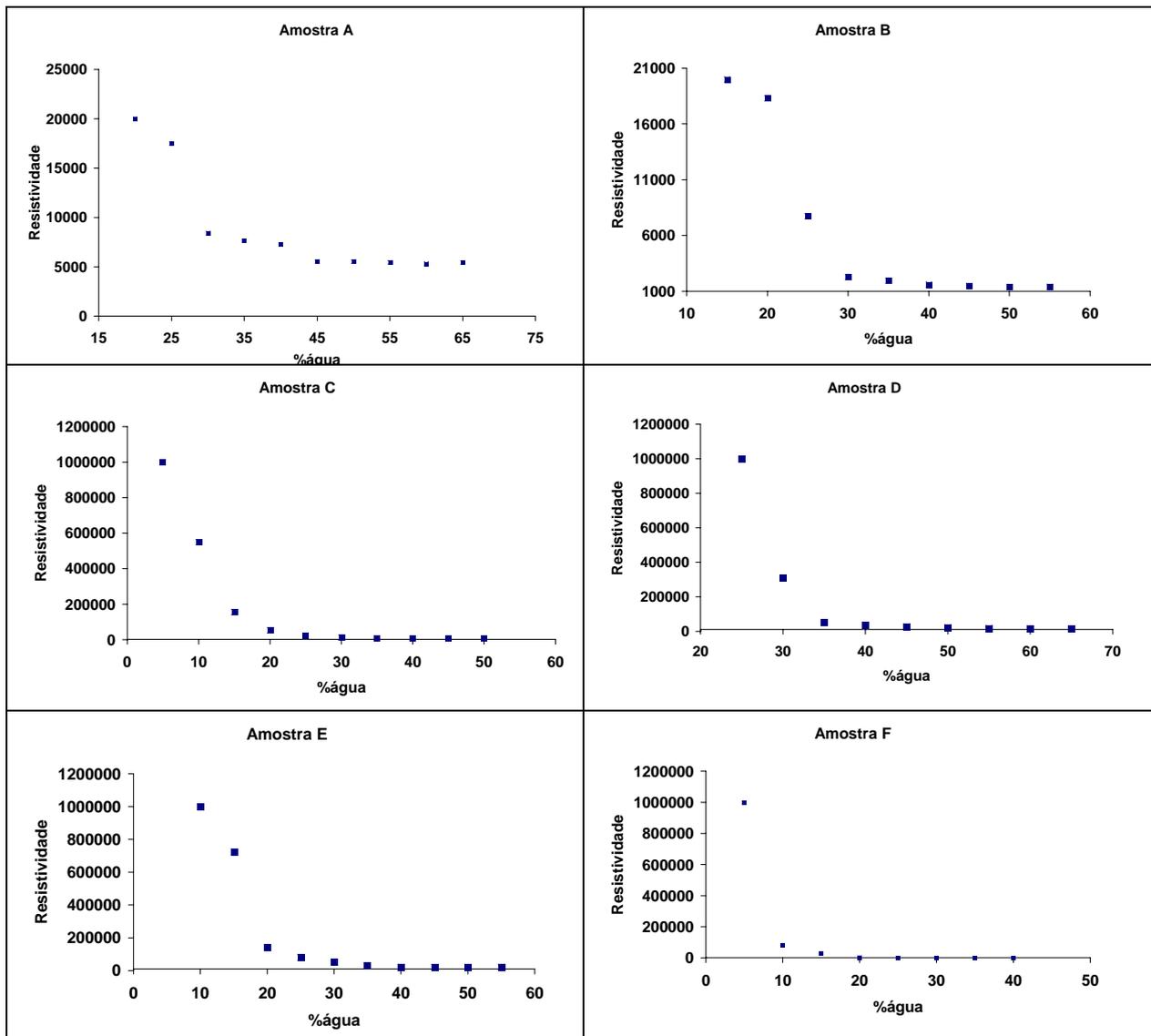
$$TC \text{ (mm/ano)} = 87.600 \times \Delta m \text{ (g)} / A \text{ (cm}^2\text{)} \times \rho \text{ (g/cm}^3\text{)} \times t \text{ (h)}.$$

II.6 Potencial de corrosão

Os valores de potencial de corrosão do aço-carbono nas amostras de solo foram obtidos através do eletrodo de referência de cobre/sulfato de cobre (Cu/CuSO₄).

III RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura III-4 apresentada abaixo mostra as sete curvas de resistividade vs teor de umidade encontradas experimentalmente.



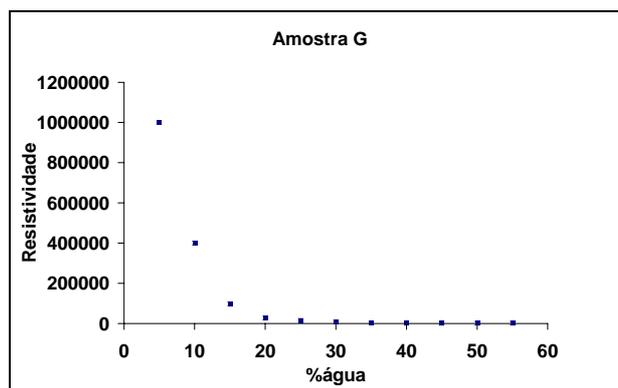


Figura III-4 – Gráficos de resistividade versus %H₂O.

A Tabela III.3 mostra os valores obtidos para o pH em H₂O e em KCl.

Tabela III.3 –pH em H₂O e em KCl.

Amostra	pH H ₂ O	pH KCl
A	4,53	4,00
B	3,97	3,75
C	4,78	3,87
D	5,55	4,77
E	5,60	5,50
F	8,60	7,40
G	6,07	4,88

A Tabela III.4 mostra os valores médio obtidos para perda de massa e taxa de corrosão dos cupons retangulares de aço carbono, calculados para um período de, aproximadamente, 4 meses.

Em anexo, estão os valores encontrados nos três corpos-de-prova expostos em cada amostra de solo.

Tabela III.4 – Perda de massa e taxa de corrosão.

Amostra	Perda de massa (g)	Taxa de corrosão (mm/ano)
A	0,2171	0,0936
B	0,3931	0,1749
C	0,2513	0,1109
D	0,3735	0,1858
E	0,1545	0,0764
F	0,2231	0,1149
G	0,3158	0,1642

A tabela III.5 mostra a capacidade de retenção de água para cada solo analisado.

Tabela III.5 – Capacidade de retenção.

Amostra	Umidade (%H ₂ O)
A	15,1
B	20,2
C	21,9
D	26,1
E	18,6
F	18,9
G	30,0

A tabela III.6 apresenta o potencial de corrosão de cada solo na capacidade de retenção de água e no extrato aquoso.

Em anexo, estão os valores encontrados nas duas amostras de cada solo.

Tabela III.6 – Resultados obtidos de potenciais de corrosão.

Amostra	Capacidade de Retenção	Extrato Aquoso
	E corr (mV _{Cu/CuSO₄})	E corr (mV _{Cu/CuSO₄})
A	-493	-626
B	-605	-736
C	-453	-730
D	-395	-407
E	-303	-388
F	-359	-418
G	-634	-437

A Tabela III.7 apresenta os resultados obtidos para os sete solos analisados, em sua capacidade de retenção de água, dado pelas medidas de resistividade com o aumento gradual de umidade. Nesta tabela são apresentados os valores de taxa de corrosão (TC), dado em mm/ano, obtidos por ensaios de perda de massa após período de, aproximadamente, 4 meses.

Tabela III.7 – Resultados obtidos para as amostras de solo.

Amostra	Solo na capacidade de retenção				
	E corr (mV _{Cu/CuSO})	E corr (mV _{enh})	Umidade %	Resistiv. (ohm.m)	TC (mm/ano)
A	-493	-175	15,1	280	0,0936
B	-605	-287	20,2	180	0,1749
C	-453	-135	21,9	520	0,1109
D	-395	-77	26,1	10000	0,1858
E	-303	15	18,6	1400	0,0764
F	-359	-41	18,9	30	0,1149
G	-634	-316	30	82	0,1642

Observa-se que há, na maioria das amostras, uma relação entre alta resistividade e baixa taxa de corrosão. O solo D apresentou uma característica diferente, sendo de alta resistividade e apresentando, por outro lado, a maior taxa de corrosão entre os solos estudados. Este fato pode ser atribuído ao aspecto do solo observado após os quatro meses de ensaio, onde foi visível a olho nu a presença de fungos filamentosos, que foram identificados devido a sua morfologia, o que poderia estar contribuindo significativamente para o processo corrosivo do aço neste solo.

Na Tabela III.8, são apresentados os resultados das medidas físico-químicas e eletroquímicas realizadas em extratos aquosos dos solos analisados. A partir dos valores de pH dos extratos aquosos puderam ser obtidos os potenciais relativos à reação de hidrogênio que, a partir da equação de Nernst, chega-se à seguinte relação: E_{H_2/H^+} (mV) = 59 pH. Os potenciais de corrosão referentes ao eletrodo de cobre/ sulfato de cobre foram convertidos para referência de eletrodo normal de hidrogênio (através da adição de 318mV) sendo, com isso, obtidos os valores da sobretensão de hidrogênio utilizando a seguinte equação:

$$\eta_{H_2} = E_{corr(enh)} - E_{H_2/H^+}$$

Tabela III.8 – Resultados obtidos para o extrato aquoso.

Amostra	Extrato Aquoso				TC (mm/ano)	η_{H_2}
	pH	E corr (mV _{Cu/CuSO4})	E corr (mV _{enh})	E_{H_2/H^+} (mV _{enh})		
A	4,53	-626	-308	-268	0,0936	-40
B	3,97	-736	-418	-235	0,1749	-183
C	4,78	-730	-412	-282	0,1109	-130
D	5,55	-407	-89	-328	0,1858	239
E	5,60	-388	-70	-331	0,0764	261
F	8,60	-418	-100	-508	0,1149	408
G	6,07	-437	-119	-359	0,1642	240

Os solos F e G apresentaram taxas de corrosão compatíveis com as baixas resistividades observadas. Porém, de acordo com a literatura, solos com baixas resistividades, isto é, com altas condutividades tem a reação de oxigênio como predominante, e como todos os cálculos utilizados no presente trabalho foram baseados na reação de hidrogênio terei que esses dois solos serão excluídos das análises.

A relação entre a sobretensão de hidrogênio e os valores de pH obtidos em extratos aquosos dos solos analisados estão graficamente representados na Figura III-4, onde observa-se uma relação entre tais valores, excluindo-se neste gráfico o solo F que teve suas medidas não condizentes com os demais solos.

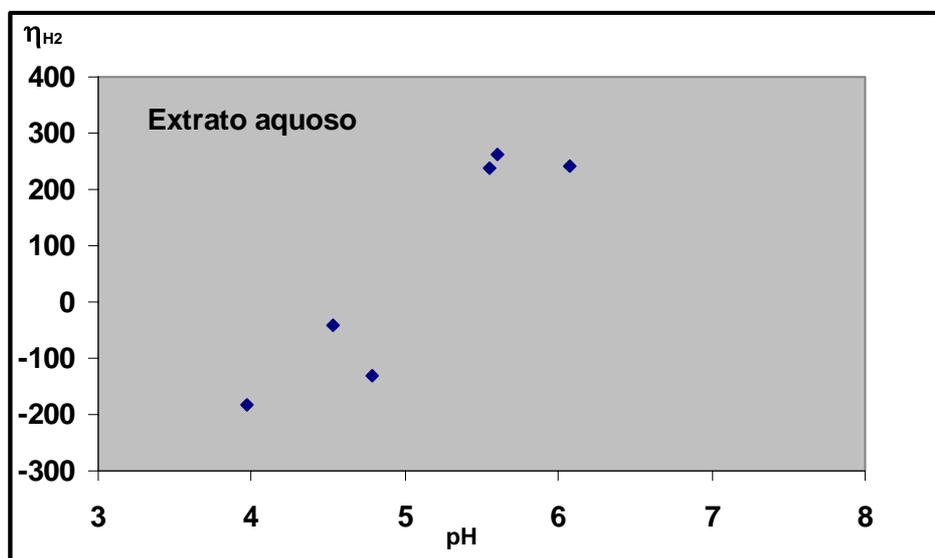


Figura III-4 – Relação entre sobretensão de hidrogênio e pH dos extratos aquosos

III.1 Critério de avaliação de corrosividade sugerido a partir dos resultados experimentais

A partir dos resultados obtidos experimentalmente, foi proposto um novo critério de avaliação da corrosividade baseado na sobretensão de hidrogênio. Este novo critério foi apresentado em trabalho na 9ª Coteq e se encontra em anexo (Brasil et al.,2007).

Com base nos valores de sobretensão e nas taxas de corrosão obtidas, propõe-se um critério de avaliação da corrosividade de solos, conforme Tabela III.9. 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 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.

Tabela III.9 – Critério proposto para avaliação da corrosividade de solos, com base na sobretensão de hidrogênio.

η_{H_2} (mV)	Corrosividade do solo
> 0	Proteção quase permanente
0 a -150	Pouco/médio agressivo
< -150	Agressivo

IV CONCLUSÕES

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 baseada neste parâmetro.

Os resultados obtidos permitiram sugerir um novo critério de corrosividade onde é levado em consideração a sobretensão de hidrogênio para avaliação da corrosividade em função da taxa de corrosão obtida.

V REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM G1-03: **Standard Practice for Preparing, cleaning and Evaluation Corrosion Test Specimens**, ASTM – American Society for Testing and Materials 2003.

ASTM G 51-77: **pH of soil for use in corrosion testing**, ASTM – American Society for Testing and Materials, 1984.

BRADFORD, S. **Practical Handbook of Corrosion Control in Soils**. Albeta: CASTI Publications, 2002.

BRASIL, S.L.D.C., OLIVEIRA, J.V.D., SILVA, J.M. **Estudo de Características Físico-químicas e Eletroquímicas de Solos**. Conferência Internacional sobre Tecnologia de Equipamentos – 9ª.COTEQ, Salvador, Junho 2007.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999.

GCOI/SCM. (1995): **Obtenção da Curva Característica de Resistividade em Relação à Porcentagem de Água em Solos**. III Encontro Técnico de Corrosão e Proteção. Recomendação Técnica.

GENTIL, V. **Corrosão**. 3a. ed.rev. Rio de Janeiro. LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora, 2003.

GUIMARÃES, G.A.; BASTOS, J.B.; LOPES, E.C. **Métodos de Análise Física, Química e Instrumental de Solos**. Série: Química de Solos. Manaus: Instituto de Pesquisas e Experimentação Agropecuárias do Norte (IPEAN), 1970.

HUDAK, P.F.; WACHAL, D.J.; HUNTER, B.A. Managing Subsurface Property Hazards: reactive soils and underground storage tanks. **Urban Water**, v. 1.p. 237-241, 1999.

LOUREIRO, A.M.V. **Estudo da Corrosão de Dutos Enterrados em Solos Contaminados por Substâncias Químicas**. Dissertação de Mestrado – UFRJ/EQ, Rio de Janeiro, 2005.

LUCHESE, E.B.; FAVERO, L.O.B.; LENZI, E. **Fundamentos da Química do Solo**. 2ª.ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 2002.

OGUZIE, E.E.; AGOCHUKWU, I.B.; ONOCHUKWU, A.I. Monitoring the Corrosion Susceptibility of Mild Steel in Varied Soil Textures by Corrosion Product Count Technique. **Materials Chemistry and Physics**, v. 84, p. 1-6, 2004.

OLIVEIRA, J.R. **Aplicação de Métodos Eletroquímicos para Avaliação da Corrosividade do Solo**, Dissertação de Mestrado – UFRJ, COPPE, Rio de Janeiro, 2007.

ROBINSON, W.C. Testing Soil for Corrosiveness. **Environmental Effects**, p.56-58, april 1993.

ROMASWAMY, S.D.; ROY, S.K. The Importance of Evaluating Subsoil Corrosion and its Effects on Buried Structures. In: Symposium on Recent Development in the Analysis of Soil Behavior and their Application to Geotechnical Structures, 1975, Australia. **Annals of Symposium on Recent Development in the Analysis of Soil Behavior and their Application to Geotechnical Structures**. Kensington: The University of New South Wales, 1975. p. 325-334.

SHREIER, L.L.; JARMAN, R.A.; BURSTEIN, G.T. **Principles and Prevention of Corrosion**. 2nd ed. Oxford: Butterworth Heineman, 1996.

SERRA, E.T. Corrosão pelo Solo: agentes, avaliação e soluções. **Eletricidade Moderna**, p. 28-39, jun.1982.

TRABANELLI, G.; ZUCCHI, F; ARPAIA, M. Methods of Determination of Soil Corrosiveness with Respect to Metallic Structures. In: Annali Dell'Università Di Ferrara, 1975, Ferrara. **Chimica Pura Ed Applicata**, 1970, vol.III, n.4, p. 43-60, .1972

TALBOT, David; TALBOT, J. **Corrosion Science and Technology**, Boston: CRC Press, 1998.

VEPRASKAS, M.J.; FAULKNER, S.P. **Redox Chemistry of Hidric Soil**. Boca Raton: CRC Press, 2001.

ANEXOS

Anexo 1



COTEQ-081

ESTUDO DE CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS E ELETROQUÍMICAS DE SOLOS

SIMONE L.D.C.BRASIL¹, JULIANA V.D.OLIVEIRA²,
JOSÉ MAURÍLIO DA SILVA³

Copyright 2007, ABENDE, ABRACO e IBP

Trabalho apresentado durante a 9ª. COTEQ – Conferência Internacional sobre Tecnologia de Equipamentos, em Salvador/BA, no mês de junho de 2007.

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

Sinopse

A corrosão de estruturas metálicas pelo solo representa grandes custos para diversos setores industriais. Este trabalho visou estudar a corrosividade de diferentes tipos de solos a partir de análises físico-químicas e eletroquímicas. Medidas físico-químicas e ensaios de perda de massa foram acompanhadas de medições do potencial eletroquímico em sete solos oriundos de diferentes regiões. As medidas físico-químicas foram baseadas na capacidade limite de retenção de água e no pH de extratos: aquosos e em KCl. 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 tais análises foi possível fazer uma correlação entre a agressividade de solos e suas características eletroquímicas e físico-químicas. Nessa correlação busca-se apresentar um critério original para caracterizar a agressividade dos solos estudados, a partir dos valores encontrados de sobretensões das reações de redução do hidrogênio.

Introdução

A corrosão de estruturas enterradas pode ser causada tanto pelas propriedades físico-químicas e biológicas do solo (agressividade específica) como por fatores externos (agressividade relativa). Como fatores externos podem-se citar correntes de fuga e contato entre diferentes metais. A agressividade específica está intimamente ligada às propriedades locais, tais como: resistividade, umidade, acidez ou alcalinidade, permeabilidade, presença de sais solúveis e microorganismos. Estes fatores atuam em conjunto e a corrosividade dos

solos não deve ser avaliada com base em propriedades isoladas. A presente proposta descreverá ensaios laboratoriais sobre alguns parâmetros que influenciam a corrosividade dos solos e fornecerá um método e/ou critério alternativo para a avaliação da mesma. Este critério é mais um entre os vários existentes e, como nenhum envolve todas as variáveis, vários critérios devem ser avaliados de forma a se obter resultados confiáveis.

1 D.Sc., Eng^a Química, Escola de Química/UFRJ

2 Escola de Química/UFRJ

3 D.Sc., Químico, LACTEC

Metodologia

Foram analisadas sete amostras previamente coletadas em postos de gasolina, na profundidade de 1,5 m, que é geralmente a profundidade onde são enterrados os tanques de combustível. As amostras apresentam valores de pH na faixa entre 4 e 6, diferindo significativamente em suas características físicas.

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

Coleta de amostras

O solo pode ser coletado da profundidade desejada e trazida para a superfície através de uma sonda ou um cavador de buracos (pá) ou um trado circular. A amostra deve ser colocada em um recipiente de vidro ou em saco plástico limpo e impermeável ao ar. Além disso, a amostra de solo não deve entrar em contato com alguns metais. A amostra recolhida do campo deve sofrer análise no prazo máximo de 24 horas. Caso isso não seja possível, a amostra de solo deve ser mantida em local frio para retardar possíveis alterações devido a reações químicas e biológicas. Caso o solo sofra evaporação não acrescente água, pois a adição de água no solo não é recomendada, já que alguns solos são tamponantes pobres e um aumento de umidade mudará o seu pH.

Curva de resistividade do solo

A curva de resistividade em função da porcentagem de água, foi determinada^[1] através de procedimentos do GCOI/SCM (1995), resumida 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. Foi adicionada 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. Esta propriedade, expressa em porcentagem, foi avaliada^[2] neste trabalho e resumida a seguir:

“Enche-se um funil "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 2mm. 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. Nivelada-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 porcentagem.”

Preparação do extrato aquoso

Para a preparação do extrato aquoso^[3], o solo foi moído até uma granulação bem fina através de um pistilo e secado em estufa a 400°C por uma hora. Em um becher de 100ml, adicionou-se 10g de terra fina e seca, juntamente com 25ml de água destilada, agitou-se durante 10 minutos em agitador magnético, deixa-se em repouso por 30 minutos e reagita-se por 5 minutos.

pH do extrato aquoso

Os valores de pH dos extratos aquosos^[3] foram obtidos através de equipamento específico (pHmetro da Digimed, modelo DMPH-2). Além destas medidas, também foram obtidos os valores de pH em solução de KCl.

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 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:

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

Potencial Redox

A obtenção do potencial redox, consistiu^[5] na determinação do potencial de oxidação-redução do eletrodo de platina enterrado no solo, medido em relação ao eletrodo de referência Cu/CuSO₄ saturado.

Resultados e Discussão

A Tabela 1 apresenta 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. Nesta tabela são apresentados os valores de taxa de corrosão (TC), dado em mm/ano, obtidos por ensaios de perda de massa após período de, aproximadamente, 4 meses.

Na Tabela 2, são apresentados os resultados das medidas físico-químicas e eletroquímicas realizadas em extratos aquosos dos solos analisados. A partir dos valores de pH dos extratos aquosos e dos potenciais de corrosão, foram levantados os valores de sobretensão de hidrogênio.

A relação entre a sobretensão de hidrogênio e os valores de pH obtidos em extratos aquosos dos solos analisados estão graficamente representados na Figura 1, onde observa-se uma relação entre tais valores, excluindo-se neste gráfico o solo F que teve suas medidas não condizentes com os demais solos.

Com base nos valores de sobretensão e nas taxas de corrosão obtidas, propõe-se um critério de avaliação da corrosividade de solos, conforme Tabela 3.

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 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.

Tabela 1 – Medidas realizadas no solo

Amostra	Solo na capacidade de retenção						Solo saturado com água		
	E corr (mV _{Cu/CuSO})	E corr (mV _{enh})	Umidade %	pH	Resistiv. (ohm.m)	TC (mm/ano)	Eredox (mV _{enh})	Resistividade mínima (ohm.m)	Umidade %
A	-493	-175	28	5,13	280	94	292	227	80
B	-605	-287	28	4,57	80	175	281	30	35
C	-453	-135	26	5,26	2000	111	318	470	45
D	-395	-77	46	7,63	8400	186	264	1660	60
E	-303	15	35	7,04	1200	76	324	823	50
F	-359	-41	34	7,37	75	115	365	69	45
G	-634	-316	51	6,62	60	164	396	49	60

Tabela 2– Medidas realizadas nos extratos aquosos

Amostra	Extrato Aquoso			TC (mm/ano)	η_{H_2}	
	pH	E corr (mV _{Cu/CuSO4})	E corr (mV _{enh})			E _{H2/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

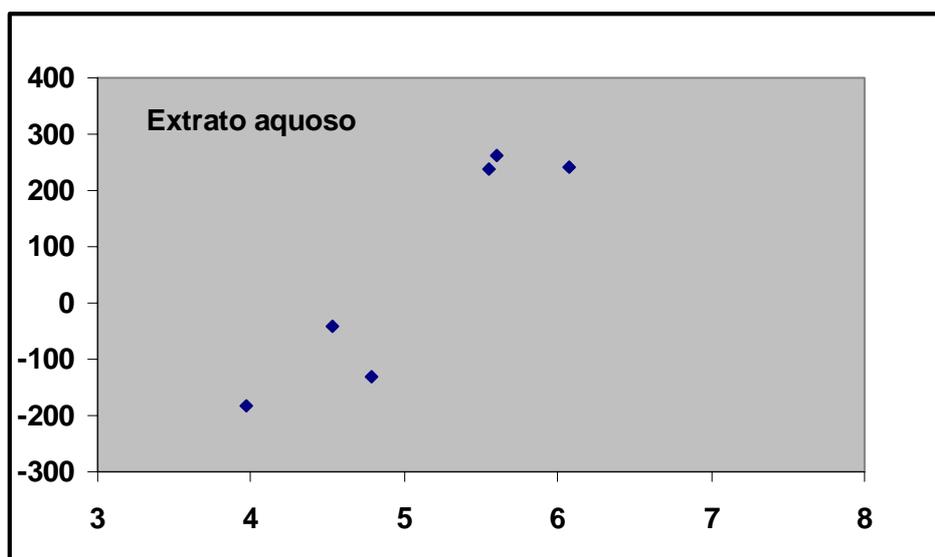


Figura 1 – Relação entre sobretensão de hidrogênio e pH dos extratos aquosos

Tabela 3 – Critério proposto para avaliação da corrosividade de solos, com base na sobretensão de hidrogênio.

η_{H_2} (mV)	Corrosividade do solo
> 0	Proteção quase permanente
0 a -150	Pouco/médio agressivo
< -150	Agressivo

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 200mV e, portanto, neste solo deve estar existindo 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 porcentagem 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 a redução de oxigênio ser regida pela condutividade do solo. Como o critério proposto está somente baseado na redução do hidrogênio, já que está relacionado ao pH, esse critério se aplica 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 se aplica e, antes de aplicar o critério, é necessário que seja feito um balanço entre o pH, a resistividade mínima e a resistividade na capacidade de retenção de água.

Conclusões

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

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 bibliográficas

[1] GCOI/SCM. (1995): Obtenção da Curva Característica de Resistividade em Relação a Porcentagem de Água em Solos. III Encontro Técnico de Corrosão e Proteção. Recomendação Técnica.

[2] E.T.SERRA – Corrosão e Proteção Anticorrosiva dos Metais no Solo – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL – Rio de Janeiro (2006) 169p.

[3] ASTM G 51-77 –1984: - pH of soil for use in corrosion testing.

[4] ASTM G1-03: Standard Practice for Preparing, cleaning and Evaluation Corrosion Test Specimens, 2003, ASTM – American Society for Testing and Materials

[5] F.E. COSTANZO and R.E.MCVEY - Development of the redox probe field technique - corrosion Vol.14, No 6, (1958) 26-30.

Anexo 2

Ensaio de perda de massa									
Amostra	tempo(dias)	tempo (h)	massa inicial (g)	massa final (g)	delta m	média delta m	Área (cm ²)	taxa de corrosão	média
A	158	3792	6,3401	6,1314	0,2087		7,012	9,05E-02	0,0936
A	158	3792	6,6701	6,4339	0,2362		7,0766	1,01E-01	
A	158	3792	6,4071	6,2006	0,2065	0,2171	7,0533	8,90E-02	
B	154	3696	6,322	5,9519	0,3701		6,9181	1,67E-01	0,1749
B	154	3696	6,1576	5,7343	0,4233		6,8944	1,91E-01	
B	154	3696	7,6787	7,2928	0,3859	0,3931	7,2339	1,66E-01	
C	154	3696	7,6809	7,4431	0,2378		7,2172	1,03E-01	0,1109
C	154	3696	6,7445	6,4983	0,2462		7,0013	1,10E-01	
C	154	3696	6,6004	6,3305	0,2699	0,2513	6,9964	1,20E-01	
D	138	3312	6,3532	6,0276	0,3256		6,9338	1,63E-01	0,1858
D	138	3312	7,7423	7,3547	0,3876		7,1576	1,88E-01	
D	138	3312	6,3379	5,9305	0,4074	0,3735	6,8983	2,06E-01	
E	138	3312	6,8776	6,7529	0,1247		6,9458	6,25E-02	0,0764
E	138	3312	7,434	7,3081	0,1259		7,1182	6,16E-02	
E	138	3312	6,817	6,604	0,213	0,1545	7,0434	1,05E-01	
F	131	3144	6,8689	6,6528	0,2161		6,9744	1,14E-01	0,1149
F	131	3144	7,6714	7,426	0,2454		7,1751	1,25E-01	
F	131	3144	7,6189	7,411	0,2079	0,2231	7,2026	1,06E-01	
G	131	3144	7,8167	7,4881	0,3286		7,2532	1,66E-01	0,1642
G	131	3144	5,7796	5,4657	0,3139		6,7409	1,71E-01	
G	131	3144	7,3927	7,0877	0,3050	0,3158	7,1843	1,56E-01	

Anexo 3

Capacidade de retenção de água						
Amostra	Massa funil(g)	Massa(funil + solo)(g)	Massa(funil + solo + água)(g)	água+solo(g)	%água	E corrosão(V)
A	131,5	222,24	238,22	106,72	15,0	-0,493
A dupl.	136,05	224,94	240,97	104,92	15,3	
B	135,96	232,76	257,29	121,33	20,2	-0,605
B dupl	131,46	228,84	253,47	122,01	20,2	
C	145,35	235,1	260,41	115,06	22,0	-0,453
C dupl	137,15	232,4	258,96	121,81	21,8	
D	136,01	207,29	231,71	95,7	25,5	-0,395
D dupl	131,44	199,83	224,6	93,16	26,6	
E	145,44	234,07	254,29	108,85	18,6	-0,303
E dupl	137,27	230,94	252,29	115,02	18,6	
F	131,58	220,87	240,95	109,37	18,4	-0,359
F dupl	145,5	232,41	253,3	107,8	19,4	
G	136,11	220,88	257,14	121,03	30,0	-0,634
G dupl	137,27	225,5	263,37	126,1	30,0	