



Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos

10 a 13 de maio de 2011

COTEQ-016

EFETIVIDADE DE MATERIAIS METÁLICOS COM O SOLO EM SISTEMA DE ATERRAMENTO.

Mário Seixas Cabussú¹, Rogério N. Salles², Daíton P. Cerqueira³, Príncia Ap. M. Pereira⁴,
Kleber F. Portella⁵, José Maurílio Silva⁶

Copyright 2009, ABENDI.

Trabalho apresentado durante a 11ª Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos.

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

31º CONBRASCORR - Congresso Brasileiro de Corrosão

TEMÁRIO: Corrosão pelo solo e correntes de interferência

APRESENTAÇÃO: ORAL

SINOPSE

This work presents the several types of metallic materials and connections, used in grounding system. It has been commented the methods used in erthing materials for performance analysis during grounding system life.

The phenomenon of corrosion, it has been verified in erthing materials (cables, stems and connections). It has been characterized as one of the main decisive factors for grounding system life. It is necessary the accompaniment of the same with the time.

This work, suggests a model of degradation in erthing materials for the different soil. It has been recommended the possible frequency of inspections in grounding system.

1 Mestre – COELBA

2 Engenheiro – COELBA

3 Engenheiro – COELBA

4 Mestre – LACTEC

5 Doutor – LACTEC

6 Doutor – LACTEC

RESUMO

Este trabalho apresenta os diversos tipos de materiais metálicos e conexões, além de comentar os ensaios que os materiais metálicos terão que serem submetidos antes do uso, em sistemas de aterramento. Os fenômenos da corrosão que têm sido verificado nos cabos, hastes e conexões caracterizam-se como um dos principais fatores determinantes da vida útil de um sistema de aterramento. Desta forma, torna-se necessário o acompanhamento do mesmo no decorrer do tempo. Sugere ainda um modelo de degradação dos materiais metálicos pelo solo, relata os possíveis ensaios e recomenda a frequência de inspeções que devem ser realizadas em sistema de aterramento. A necessidade de obtenção da avaliação da agressividade do solo em períodos de tempo curtos, faz com que sejam realizadas medidas indiretas (ensaios físico-químicos). A partir de tais ensaios, analisa-se a corrosividade absoluta do solo baseado em critérios de corrosividades existentes na literatura. Os ensaios propostos são àqueles de uso convencionais (**condutividade e resistividade; capacidade de retenção de água; umidade do solo; potencial de corrosão; pH do solo saturado com água; sobre-tensão do hidrogênio; potencial redox; pH do extrato aquoso e Cloretos**). Com base nos resultados desses ensaios, a amostra de solo em questão pode ser classificada como: solo condutivo ou não, agressivo ou não, seco ou úmido, ácido ou alcalino e muito ou pouca quantidade de cloretos e sulfatos. Após sua classificação, o solo de alta resistividade pode ser melhorado a partir de mistura de componentes sintéticos na proporção otimizada, após ter sido obtido o coeficiente de redução pelo tratamento químico. Para solos agressivos, os materiais metálicos e as conexões deverão estar dimensionados para suportar vida útil de pelo menos 30 anos, então propõem-se ensaios para atender requisitos mínimos exigidos para garantir a durabilidade do sistema com sua eficiência. Em relação a manutenção do sistema de aterramento, recomenda-se verificar as características iniciais do projeto, o seu desempenho (corrosivo, elétrico e mecânico) e a periodicidade de suas inspeções.

Palavras-chave: Sistema de aterramento, Materiais metálicos, Corrosão pelo Solo.

1. INTRODUÇÃO

No ano de 2000, a aneel (Agência Nacional de Energia Elétrica) estabeleceu condições gerais⁽⁰¹⁾ de fornecimento de energia elétrica através da portaria 456, onde passa a fiscalizar andamento normal das concessionárias do setor elétrico brasileiro. Nessa época, criou-se a NR-10, a qual é uma norma⁽⁰²⁾ regulamentadora do ministério do trabalho cujo objetivo é estabelecer os requisitos e condições mínimas objetivando a implementação de medidas de controle e sistemas preventivos, de forma a garantir, a segurança e a saúde dos trabalhadores que, direta ou indiretamente, interajam em instalações elétricas e serviços com eletricidade. Desta forma, as empresas e estabelecimentos estão obrigados a manter esquemas unifilares das instalações elétricas com especificações do sistema de aterramento e demais equipamentos e dispositivo de proteção, conforme item 10.2.3 da NR-10. Também obriga as empresas a manter documento das inspeções e medições do sistema de proteção contra descarga atmosférica e aterramentos elétricos, para carga instalada superior a 75kW, conforme item 10.2.4 da NR-10. Além de, exigir que todas as instalações elétricas tenham um sistema de aterramento. Seguindo a NR-10 foi criada a NBR 14039 em que toda instalação elétrica de média tensão⁽⁰³⁾, para que se possa garantir, de forma adequada, a segurança das pessoas e o seu funcionamento correto, deve ter uma instalação de sistema de aterramento. Algo similar e baseado na IEEE-80⁽⁰⁴⁾ foi feito para as instalações elétricas de baixa tensão⁽⁰⁵⁾ (NBR 5410). Em paralelo, foi criado o subcomitê 064.10 (ligado ao comitê 03, eletricidade) para elaborar uma norma sobre proteção de estruturas contra descargas atmosféricas.

Visando desenvolver tecnologias para resolver problemas do setor elétrico brasileiro, iniciou-se uma série de trabalhos na comissão de estudos 102.01, que culminou na formação de vários grupos

de trabalho. Destes, publicaram-se as normas ABNT(06) NBR 15749 (medição da resistência de aterramento e de potenciais na superfície do solo em sistemas de aterramento), ABNT(07) NBR 15751 (sistemas de aterramento de subestações) e ABNT(08) NBR 7117 (determinação da resistividade do solo através do método de wenner). Esta norma está sendo revisada e já está na fase de consulta pública com o título de “medição da resistividade e determinação da estratificação do solo”. Em fase inicial, também, estamos trabalhando em 3 textos distintos. Um texto relacionado com sistema de aterramento em alimentadores de distribuição elaborado por um grupo de trabalho chamado de GT3(09), um outro texto relacionado com aterramento temporário elaborado por um grupo de trabalho chamado de GT8(10) e um outro texto relacionado com materiais de aterramento elaborado por um grupo de trabalho chamado de GT1(11).

A norma ABNT NBR 15749 mede o potencial de toque e passo, além de medir a resistência de terra de um sistema de aterramento. A norma ABNT NBR 15751 especifica os requisitos para dimensionamento do sistema de aterramento de subestações de energia elétrica acima de 1 kV, quando sujeitos a solicitações em frequência industrial. Também estabelece as condições de segurança para pessoas e instalações dentro e fora dos limites da subestação, assim como, fornece detalhes de aterramento dos mais variados equipamentos. O texto GT3 fixa diretrizes para elaboração de projetos de aterramento de sistemas elétricos de distribuição primária e secundária, em tensões alternadas inferiores ou iguais a 34,5kV. Ela trata dos aterramentos do condutor neutro e dos dispositivos de proteção contra sobretensões, os quais objetivam promover o escoamento de correntes estranhas ao sistema elétrico (surtos de origem atmosférica), garantindo a manutenção da confiabilidade do sistema e a segurança dos usuários. Ainda com relação às descargas atmosféricas é importante consultar a NBR(12) 5419 que trata do projeto de instalação de SPDA (sistema de proteção contra descarga atmosférica) para a comunidade em geral. Em relação a surtos atmosféricos em linhas de transmissão de alta tensão, é sabido que para condutores horizontais, onde interessa considerar o comprimento efetivo de condutores longos, tem-se procurado equacionar o fenômeno para saber o comprimento efetivo (L_e) ou requisitos mínimos para um bom funcionamento do sistema de aterramento. Esse comprimento efetivo é calculado pela equação abaixo:

$$L_e = A(\rho t)^{1/2} \quad (1)$$

Onde “t” é o tempo de frente do surto (μs); **A** vale **1,4** para injeção de corrente na extremidade do condutor, vale **1,55** para injeção de corrente no centro do condutor e **1,85** para injeção de corrente no centro de uma configuração estrela de 4 braços e “ ρ ” é a resistividade do solo. Esta equação não considera a ionização do solo e representa o fator $R.t/L_s = 0,57$. Onde R é a resistência em 60 Hz, “t” é o tempo de frente do surto e L_s a indutância do eletrodo. Ao trabalhar com estas 3 situações de surtos pode-se construir um gráfico do comprimento efetivo do aterramento com a resistividade do solo. A partir desse trabalho verificou-se um comprimento de L_s menor que 200 metros para resistividade de até 2000 Ohm.m. A partir desse trabalho decidiu-se o uso de 4 rabichos de 50 metros de comprimentos colocados um em cada pé de torres de linhas de transmissão. O texto GT8 fixa diretrizes para efetuar aterramento durante um processo de manutenção e o GT1 discute a efetividade dos materiais metálicos de acordo com cada tipo de solo. O fenômeno da corrosão que tem sido verificado nos cabos, hastes e conexões caracteriza-se como um dos principais fatores determinantes da vida útil de um sistema de aterramento. Desta forma, torna-se imperioso o acompanhamento do mesmo no decorrer do tempo.

Este trabalho, apresenta os diversos tipos de materiais metálicos e conexões, que devem ser usados em sistemas de aterramento, além de sugerir um modelo de degradação dos materiais metálicos pelo solo, relata os possíveis ensaios e recomenda-se frequências de inspeções que devem ser realizadas.

2. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Os ensaios a serem realizados estão constituídos de: ensaios sobre o comportamento elétrico dos materiais e conexões e ensaios sobre o comportamento corrosivo desses materiais ao longo do tempo.

2.1 Ensaios sobre o comportamento elétrico dos materiais

O comportamento elétrico dos materiais deve ser checado a partir do dimensionamento térmico e mecânico. Os condutores e as conexões devem ser dimensionados considerando-se as solicitações térmicas e mecânicas, que esses materiais devem suportar, durante as circulações de correntes elétricas.

2.1.1 Dimensionamento térmico

O condutor deve ter uma seção (S) capaz de suportar a circulação de uma corrente máxima (I_f) durante um tempo (t) em que a temperatura se eleve acima de um valor limite suportável (T_m), considerando uma temperatura ambiente (T_a) e que toda energia térmica fica retida no condutor devido à pequena duração da corrente de curto.

A equação abaixo permite o cálculo desta seção, e é dada por:

$$S = I_f \sqrt{\frac{t \times \alpha_r \times \rho_t \times 10^4}{TCAP \times \ln \frac{(k_0 + T_m)}{(k_0 + T_a)}}} \quad (2)$$

onde

S é a seção, expressa em milímetros quadrados (mm^2);

I_f é a corrente de falta fase-terra, expressa em quiloampères (kA);

t é o tempo, expresso em segundos (s);

α_r é o coeficiente térmico de resistividade do condutor a t °C ($^{\circ}\text{C}^{-1}$);

ρ_t é a resistividade do condutor de aterramento a t °C, expressa em ohm x centímetro ($\Omega \times \text{cm}$);

$TCAP$ é o fator de capacidade térmica, em joule por centímetro cúbico vezes graus Celsius [$\text{J}/(\text{cm}^3 \times ^{\circ}\text{C})$];

T_m é a temperatura máxima suportável, expressa em graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$), conforme Tabela 1;

T_a é a temperatura ambiente, expressa em graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$);

$k_0 = 1/\alpha_0$ ou $(1/\alpha_r) - T_r$;

k_0 é o coeficiente térmico de resistividade do condutor a 0 °C;

T_r é a temperatura de referência das constantes do material, em graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$).

A Tabela 1 apresenta os valores dos parâmetros acima para os tipos de materiais mais utilizados em aterramento elétrico.

Tabela 1 — Valores dos parâmetros para os tipos de materiais mais utilizados em aterramentos(04)

Tipo do condutor	Condutância %	Coeficiente térmico de resistividade		Temperatura de fusão ^a (°C)	Resistividade ρ_r (20 °C) ($\mu\Omega\cdot\text{cm}$)	TCAP [J/(cm ³ ×°C)]
		α_0 (0 °C)	α_r (20 °C)			
Cobre (macio)	100,0	0,004 27	0,003 93	1 083	1,724	3,422
Cobre (duro)	97,0	0,004 13	0,003 81	1 084	1,777	3,422
Aço cobreado 40%	40,0	0,004 08	0,003 78	1 084	4,397	3,846
Aço cobreado 30%	30,0	0,004 08	0,003 78	1 084	5,862	3,846
Haste de aço cobreado ^a	20,0	0,004 08	0,003 78	1 084	8,62	3,846
Fio de alumínio	61,0	0,004 39	0,004 03	657	2,862	2,556
Liga de alumínio 5005	53,5	0,003 80	0,003 53	660	3,222	2,598
Liga de alumínio 6201	52,5	0,003 73	0,003 47	660	3,284	2,598
Aço-alumínio	20,3	0,003 88	0,003 60	660	8,480	2,670
Aço 1020	10,8	0,001 65	0,001 60	1 510	15,90	3,28
Haste de aço ^b	9,8	0,001 65	0,001 60	1 400	17,50	4,44
Aço zincado	8,5	0,003 41	0,003 20	419	20,1	3,931
Aço inoxidável 304	2,4	0,001 34	0,001 30	1 400	72,0	4,032
^a Aço cobreado baseado em uma espessura de 254 μm de cobre.						
^b Aço inoxidável baseado em 508 μm n° 304 de espessura sobre o aço 1020.						

Para as conexões, o valor de T_m é função do tipo de conexão a ser utilizada conforme Tabela 2. Os valores de K_f para as conexões de aterramento mais utilizadas estão listados na Tabela 3. Assim, a equação (2) pode ser simplificada para:

$$S = I_f \times K_f \times \sqrt{t} \quad (3)$$

onde

K_f é a constante para materiais considerando temperatura ambiente (T_a) de 40 °C

Tabela 2 — Tipos de conexões e seus limites máximos de temperatura(04)

Conexão	T_m (°C)
Mecânica (aparafusada ou por pressão)	250
Emenda tipo solda oxiacetilênica	450
Emenda com solda exotérmica	850 ^a
Emenda à compressão	850 ^b
^a Solda exotérmica, conhecida como aluminotermia, cuja conexão é feita através da fusão obtida pela ignição e combustão de uma formulação em um molde.	
^b Obtida por meio de conectores com compressão por ferramenta hidráulica.	

Para a constante K_f , onde a temperatura de fusão da conexão for inferior à temperatura de fusão do condutor, deve-se utilizar a temperatura da conexão no cálculo da constante K_f . A Tabela 3 exemplifica o K_f para o cobre, considerando o limite de fusão da conexão.

Caso a seção do condutor calculada pela equação (3) resulte em um valor inferior ao previsto, deve ser utilizada a seção mínima estabelecida.

Tabela 3 — Constantes K_f (04)

Conexão	K_f
Mecânica (aparafusada ou por pressão)	11,5
Emenda tipo solda oxiacetilênica	9,2
Emenda com solda exotérmica	7,5
Emenda à compressão ^a	7,5
^a Obtida por meio de conectores com compressão por ferramenta hidráulica.	

2.1.2 Dimensionamento mecânico

Considerando a necessidade de suportar esforços mecânicos e eletromagnéticos, necessita-se de usar os materiais com as bitolas mínimas dos condutores. Assim, as seções não devem ser inferior ao valor determinado pela seguinte expressão.

$$S = (1/k)\sqrt{I^2 t} \quad (4)$$

onde

k é uma constante e inversa a K_f ;

S é a seção, expressa em milímetros quadrados (mm²);

I é a corrente de falta fase-terra, expressa em quiloampères (kA);

t é o tempo, expresso em segundos (s);

A equação 4 é aplicável apenas para tempos de atuação dos dispositivos de proteção que não excedam 5s. A Tabela 4 apresenta um resumo das várias seções mínimas dos materiais a serem usados em aterramentos.

2.2 Ensaios sobre o comportamento corrosivo dos materiais

2.2.1 Determinação da condutividade

O principal uso da condutividade(13) é obter, de forma indireta, o parâmetro “resistividade do solo”, pois com isso é possível identificar condições na qual a corrosão dos metais pode ser bastante acentuada. A Tabela 5, apresenta as condições de corrosividade em função da resistividade.

Tabela 4 - Eletrodos de aterramento convencionais da norma ABNT NBR 5410(05)

Tipo de eletrodo	Dimensões mínimas	Observações
Tubo de aço zincado	2,40 m de comprimento e diâmetro nominal de 25 mm	Enterramento totalmente vertical
Perfil de aço zincado	Cantoneira de (20 mm x 20 mm x 3 mm) com 2,40 m de comprimento	Enterramento totalmente vertical
Haste de aço zincado	Diâmetro de 15 mm com 2,00 m ou 2,40 m de comprimento	Enterramento totalmente vertical
Haste de aço revestida de cobre	Diâmetro de 15 mm com 2,00 m ou 2,40 m de comprimento	Enterramento totalmente vertical
Haste de cobre	Diâmetro de 15 mm com 2,00 m ou 2,40 m de comprimento	Enterramento totalmente vertical
Fita de cobre	50 mm ² de seção, 2 mm de espessura e 10 m de comprimento	Profundidade mínima de 0,60 m. Largura na posição vertical
Fita de aço galvanizado	100 mm ² de seção, 3 mm de espessura e 10 m de comprimento	Profundidade mínima de 0,60 m. Largura na posição vertical
Cabo de cobre	50 mm ² de seção e 10 m de comprimento	Profundidade mínima de 0,60 m. Posição horizontal
Cabo de aço zincado	95 mm ² de seção e 10 m de comprimento	Profundidade mínima de 0,60 m. Posição horizontal
Cabo de aço cobreado	50 mm ² de seção e 10 m de comprimento	Profundidade mínima de 0,60 m. Posição horizontal

Tabela 5 – Critério proposto para avaliação da corrosividade de solos com base na resistividade(13).

ρ ($\Omega.m$)	Corrosividade do solo
> 1000	Pouco agressivo
120 a 1000	Média agressividade
< 120	Agressivo

2.2.2. Determinação da capacidade de retenção de água no solo

A capacidade de retenção de água no solo é um parâmetro característico para cada tipo de solo (impressão digital de cada solo). O principal uso da capacidade de retenção de água é classificar o solo como sendo: seco, normal ou úmido e pode ser realizada através da determinação da umidade do solo por um sensor de umidade, quando a relação de solo água é de 2/1. A Tabela 6 cita a classificação do solo em função da capacidade de retenção de água no solo.

Tabela 6 – Critério proposto para classificação de solos com base na capacidade de retenção de água no solo(13).

Qdade (ml)	R/KOHms	% na C.R.H2O	%napmínima (%)	Classificação do solo
50	2	<15	< 40	Solo seco
50	> 2	15 a 30	40 a 50	Solo não seco
100	2	15 a 30	40 a 50	Solo semi-úmido
100	> 2	>30	> 50	Solo úmido

2.2.3. Determinação do pH

O principal uso do pH é como complemento do parâmetro “resistividade do solo”, pois com isso é possível identificar condições na qual a corrosão dos metais pode ser bastante acentuada. Além da

corrosão, o pH tem relação com a condutividade do solo e, portanto tem relação indireta com a resistividade deste. Através do pH, pode-se calcular a sobretensão do hidrogênio e ter uma idéia sobre as características redutoras do solo. A medida do pH(14) é feita por meio do equipamento eletrônico denominado de (pH-metro). A tabela 7 caracteriza a corrosividade em função do pH do solo.

Tabela 7 – Critério proposto para avaliação da corrosividade de solos com base no pH(14).

PH_{água}(1:2,5)	Corrosividade do solo
> 6	Pouco agressivo
4 a 6	Média agressividade
< 4	Agressivo

2.2.4. Determinação do potencial redox

O potencial redox é um indicativo da probabilidade de haver bactérias redutoras de sulfatos no solo. A quantidade de bactérias redutoras de sulfatos tem relação direta com a corrosão microbiológica do solo. A obtenção do potencial redox(15), consiste na determinação do potencial de oxidação-redução do eletrodo de platina enterrado no solo, medido em relação ao eletrodo de referência Cu/CuSO₄ saturado. A tabela 8 cita a probabilidade de haver bactérias redutoras de sulfato no solo em função do potencial redox.

Tabela 8 – Critério proposto para avaliação da corrosividade de solos com base no potencial redox(15).

Eredox/mV	Aeração	Probabilidade de haver bactérias no solo
<300	Não aerado	Muito provável
300 a 400	Pouco aerado	Média probabilidade
>400	Fortemente aerado	Pouco provável

2.2.5 Determinação de cloretos

A quantidade de cloretos está relacionada com a condutividade do solo, pois quanto maior a quantidade de cloretos, maior a corrosividade do solo. A determinação de cloretos(16) é feita a partir de titulação volumétrica. A tabela 9, correlaciona a corrosividade em função da quantidade de cloretos.

Tabela 9 – Critério proposto para avaliação da corrosividade de solos com base na quantidade de cloretos(16).

[cloretos]/ppm	Corrosividade do solo
<40	Pouco agressivo
40 a 180	Média agressividade
>180	Agressivo

2.2.6 Determinação do potencial de repouso

O potencial de corrosão do aço é um indicativo da corrosão pelo solo, devido à redução do oxigênio e dos íons hidrogênios dissolvidos na umidade do solo, assim como está relacionado

com a quantidade de vazios e/ou estrutura física do solo (porosidade e quantidade de vacâncias). O potencial de corrosão(17) é determinado a partir da diferença de potencial entre o eletrodo de cobre/sulfato de cobre saturado com o eletrodo de ferro. A tabela 10, correlaciona a corrosividade em função do potencial de repouso.

Tabela 10 – Critério proposto para avaliação da corrosividade de solos com base no potencial de corrosão(17).

Erep./mV inicial	Erep./mV após 30 minutos de exposição	Probabilidade de haver corrosão por aeração diferencial
Mais positivo que -200 e/ou evolução a valores mais positivos	Mais positivo que -700 e/ou evolução a valores mais positivos	Muito provável
-200 a -700	-700 a -800	Média probabilidade
Mais negativo que -700	Mais negativo que -800	Pouco provável

2.2.7 – Resumos dos ensaios de corrosividade

- Determinação da condutividade e resistividade;
- Determinação da capacidade de retenção de água;
- Determinação da umidade do solo;
- Determinação do potencial de corrosão;
- Determinação do pH do solo saturado com água;
- Determinação da sobretensão do hidrogênio;
- Determinação do potencial redox;
- Determinação do pH do extrato aquoso;
- Determinação de cloretos.

2.2.8 – Equipamentos utilizados

- PHmetro marca Stick;
- Condutímetro da Cole Parmer;
- Estufa para secagem do solo;
- Balança de precisão com até duas casas decimais;
- Variac.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Características dos materiais ensaiados

Os materiais utilizados foram: cordoalha de aço galvanizado com diâmetro nominal de 9,5 mm, constituída de 7 fios de 3,05 mm de diâmetro; cordoalha de aço galvanizado com diâmetro nominal de 6,4 mm, constituída de 7 fios de 2,03 mm de diâmetro; cabo de alumínio nu, bitola 2/0 AWG, constituído de 7 fios de 3,5 mm e tempera H19 e cabo misto (cobre-aço) com alma de cobre e exterior em aço galvanizado, diâmetro externo de 13,8 mm. As características desses materiais são conforme a Tabela 1.

3.2 Medida da resistência elétrica

Através de uma ponte Kelvin foram realizadas medições da resistência elétrica dos cabos escolhidos para este estudo. Os resultados referem-se à média de três medidas, com correção para 20 °C e estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Valores de resistências elétricas medidas(04)

Condutor	Resistência (Ohm/m)
Cordoalha de aço 9,5mm	0,00364
Cordoalha de aço 6,5mm	0,00883
Cabo de alumínio	0,000421
Cabo misto (cobre-aço)	0,000714

Levando-se em consideração um cabo de cobre com bitola nominal de 70 mm² (0,000279 Ohm/m) comumente utilizado para o aterramento de equipamentos e estruturas, pode-se comparar os resultados obtidos nas medições em termos percentuais, tal comparação é apresentada na Tabela 12.

Tabela 12 - Valores de resistências elétricas em percentuais relativas a um cabo de cobre de 70 mm²

Condutor	%
Cordoalha de aço 9,5mm	7,66
Cordoalha de aço 6,5mm	3,15
Cabo de alumínio	66,3
Cabo misto (cobre-aço)	39,1

Na Tabela 12, pode-se verificar que quanto menor o valor da resistência percentual, pior é o desempenho do cabo em comparação com um cabo de cobre.

3.3 Medida da capacidade térmica

O fator de capacidade térmica indica a quantidade de energia que pode ser dissipada pelo cabo. Quanto maior for o fator de capacidade térmica mais corrente o condutor poderá transportar sem sofrer danos em sua estrutura. Este parâmetro é dado em joules/(cm³ °C). Para o cabo de alumínio o valor do fator de capacidade térmica foi de 2,556 joules/(cm³ °C) e para o cabo de aço galvanizado o valor do fator de capacidade térmica foi de 3,931 joules/(cm³ °C). Isto significa que a cordoalha de

aço galvanizado possui uma capacidade de dissipação de energia 54% maior que um cabo de alumínio de massa equivalente. A menor dissipação térmica do alumínio se comparado com o aço carbono leva a conclusão de que a melhor solução para a substituição do cobre possa estar relacionada com a parte externa do condutor em aço galvanizado. A utilização da cordoalha inclusive como cabo de descida de pára-raios é prevista na norma ABNT 5419(18), com condição de que a bitola mínima seja de 50mm², independentemente do comprimento de cabo a ser utilizado.

3.4 Critério de corrosividade existente na literatura

A Tabela 13 mostra como os solos podem ser avaliados a partir dos critérios de corrosividade existentes na literatura. Com base na Tabela 13, pode realizar a classificação de um solo. Como exemplo, um solo contendo os parâmetros físico-químicos mostrados na Tabela 14, e a partir da Tabela 13, pode-se classificar o solo como: solo condutivo de média agressividade (solo de características não redutoras), úmido, levemente alcalino, poucos cloretos e pouca probabilidade de existência de bactérias e não apresenta condições adequadas para proliferação de bactérias redutoras de sulfato, caso haja. Com base nessa classificação pode-se afirmar que: Para uma estrutura enterrada, de aço galvanizado e sem revestimento orgânico, com espessura de 6 a 10 mm, tem-se uma expectativa de 30 anos até a perfuração. Caso essa estrutura esteja com revestimento orgânico, tem-se uma expectativa de vida próxima de 50 anos. Para uma estrutura enterrada, de aço galvanizado e sem revestimento orgânico, tem-se uma expectativa de que após 10 anos haverá perda da galvanização com início de corrosão vermelha.

3.5 Melhoramento de solos

Para realizar o melhoramento de solos, constrói-se uma curva de resistividade em função da quantidade de água adicionada em solos. Nesta curva é comum, verificar que quando o solo está seco (porcentagem de água próximo de 20%), a resistividade é muito alta, decrescendo rapidamente com o aumento do conteúdo de água no solo até alcançar o ponto de saturação. Após o ponto de saturação a resistividade permanece constante. O decréscimo da resistividade está relacionado com a condutividade do solo, que é função do teor de água, fator diretamente relacionado com a solubilidade dos sais existentes. Com isto pode ser esperado um valor mínimo de resistividade no gráfico em questão. Este valor é característico para cada tipo de solo. Juntamente com essa Figura faz-se a determinação da capacidade de retenção de água (C.R.H₂O). A resistividade nesta condição é a verdadeira resistividade do solo. A resistividade mínima pode ser considerada como a porcentagem em que este solo está saturado com água. Para se realizar melhoramento de solos, faz-se a mistura dos componentes sintéticos ao solo na proporção desejada e faz-se a caracterização do solo contendo a mistura. A caracterização da mistura é feita através do critério da sobretensão do hidrogênio, juntamente com a curva de resistividade em função da quantidade de água adicionada na mistura.

Tabela 13 – Classificação do solo em estudo através de critérios de literatura.

PARAMETROS		BAHIA OESTE	
		Valor obtido	Índice dos critério
Trabanelli e/ou Steirath	Resistividade	500 Ω.m	Índice = -2 solo pouco agressivo
	Cloreto	6 mg/Kg	
	Potencial redox	315 (mV/NHE)	
	Sulfato	<1 mg/Kg	
	PH	4,55	
	Umidade	44 %	
Starkey & White	Potencial	315 (mV/NHE)	300 a 400 solo de média

	redox		probabilidade de bactérias
Booth	Resistividade	500 Ω.m	Pouco agressivo
	Potencial redox no pH=7	315 mV/NHE)	
	Teor de água	44%	
Girard	Resistividade do extrato aquoso	500 Ω.m	C = 9 Baixa agressividade
	Umidade de saturação	44 %	
	Acidez total	1,8 (meq/litro)	
Sobretensão do H ₂	η_{H_2}	-120 mV	Pouco agressivo
Stratfull	Resistividade mínima	500Ω.m	50 μm/ano
	pH	4,55	
Dpto. Transp. USA	Resistividade mínima	500 Ω.m	30 anos de vida
	pH	4,55	
CLASSIFICAÇÃO FINAL		Pouco condutivo, Seco, ácido e com pouco cloreto.	

Tabela 14 – Resultados físico químicos

PARÂMETROS	Resultados
Condutividade (μ S/cm)	90
Resistividade mínima (Ω .m)	100
PH	7,87
Eredox (mV)	370
Ecorrosão (mV)	-760
Cloretos (ppm)	<180
C.R.H2O (%)	30

Legenda

- **ppm:** parte por milhão
- **mV:** mili Volt
- **μ S/cm:** micro siemens por centímetro
- **Ω .m:** Ohms metro
- **C.R.H2O (%):** Capacidade de retenção de água em porcentagem.

Para o caso de solos condutivos, onde não há necessidade de diminuir a resistência do aterramento, porém deseja corrigir o pH do solo, ou deseja fazer com que o solo permanece úmido em um maior tempo, pode-se realizar a instalação de um poço redutor simples. Para o caso de solos não condutivos onde há necessidade de diminuir a resistência do aterramento, usa-se instalar poço redutor à base de cimento.

3.6 Efetividade dos materiais com o solo

A efetividade no uso dos materiais metálicos de acordo com o solo devem ser usados todos os materiais metálicos indicados (cobre, aço galvanizado, aço cobreado e alumínio), desde que feita à aquisição e ensaios preliminares com critérios. Assim como devem ser usado as conexões do tipo: solda exotérmica, solda a compressão, conector tipo cunha e conexão por aperto.

Devem ser usadas, hastes de aço cobreadas cilíndricas, dependendo do local a ser executado o aterramento e dos padrões vigentes em cada empresa. Nos casos de solos comprovadamente pouco agressivos, poderão ser utilizadas cantoneiras galvanizadas. Por questão de segurança contra danos provocados por terceiros: os condutores de aterramento deverão ser mecanicamente protegidos até uma altura mínima de 3 m; as cabeças de eletrodos de aterramento deverão ser enterradas a uma profundidade mínima de 0,50 m; quando localizados em áreas sujeitas à passagem de arados, esse valor deverá ser elevado para 1,00 m. O número de hastes e a configuração devem ser àquelas que assegurem um valor de resistência de, no máximo, 50% do valor recomendado durante a elaboração de projeto específico para cada aterramento.

3.7 Manutenção do sistema de aterramento

O requisito básico que deve atender um sistema de aterramento projetado conforme metodologia adotada é o de proporcionar o adequado funcionamento dos sistemas de energia elétrica e, sobretudo, garantir as condições de segurança, tanto durante operação normal destes sistemas quanto nas situações de defeito. Para tanto, os sistemas de aterramento devem cumprir as exigências de desempenho elétrico, mecânico e corrosivo previsto no projeto, através das características originais do projeto verificados durante a realização de medições periódicas no campo, levando em conta a época e o tipo de amostragem que devem ser realizadas as medições.

4. CONCLUSÕES

A periodicidade das medições eletroquímicas para saber o desempenho corrosivo e das medições elétricas para saber o desempenho elétrico, deve ser independente da constatação ou não de possíveis irregularidades. A frequência de verificações através de medições elétricas e eletroquímicas não devem ser superior a 30% da durabilidade prevista para o sistema de aterramento. Entretanto, recomenda-se a realização dessas medições com vistas à verificação da constância dos valores iniciais em períodos de aproximadamente 5 anos.

Em relação à amostragem a ser feita durante as medições, sugere-se um número mínimo de pontos a serem considerados para inspeção próximo de 10% do universo em estudo.

Em relação à época da realização das medidas e como a resistividade do solo varia diretamente com a quantidade de água contida no solo, as medições devem ser executadas em período seco, de forma a não se obter resultados distorcidos. Em casos excepcionais, sugere-se coletar amostras do solo. Em laboratório podem ser obtidas curvas de resistividade em função da quantidade de água adicionada ao solo, além de realizar ensaios de capacidade de retenção de água. O perfil do comportamento da variação da resistividade com o teor de água para um solo hipotético, mostra a resistividade mínima (quando o solo está saturado com água), a resistividade na capacidade de retenção de água e a resistividade quando o solo está totalmente seco. Este método pode ser mais um recurso a ser utilizado como auxílio durante análise dos resultados encontrados pelo método dos quatro pontos durante a obtenção da resistividade no campo.

5. AGRADECIMENTOS

A equipe técnica agradece:

À COELBA (Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia); ao Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC; à Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, pelo apoio recebido, confiança depositada, liberação de recursos financeiros e disponibilização da

infra-estrutura, para a realização deste trabalho. E agradece a todos aqueles profissionais que, de forma direta e indireta, colaboraram para a conclusão deste trabalho.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (01) “Resolução aneel No 456”, Agência nacional de energia elétrica, 29 novembro (2000).
- (02) “NR 10 – Segurança em instalações e serviços em eletricidade”, Portaria GM No 598, 07 dezembro (2004).
- (03) ABNT NBR 14039, “Instalações elétricas de média tensão de 1,0 kV a 36,2 kV”, 30 junho (2005).
- (04) IEEE STD 80-2000, “IEEE guide for safety in a.c. substation grounding”, 30 janeiro (2000).
- (05) ABNT NBR 5410, “Instalações elétricas de baixa tensão”, novembro (1997).
- (06) ABNT NBR 15749, “Medição da resistência de aterramento e de potenciais na superfície do solo em sistemas de aterramento”, outubro (2009).
- (07) ABNT NBR 15751, “Sistemas de aterramento de subestações”, outubro (2009).
- (08) ABNT NBR 7117, “Determinação da resistividade do solo através do método de wenner”, dezembro (1981).
- (09) PROJETO 03:102.01-007, “Projeto para aterramento em sistemas de distribuição” (2011).
- (10) PROJETO 03:102.01-011, “Aterramento temporário” (2011).
- (11) PROJETO 03:102.01-008, “Materiais para aterramento” (2011).
- (12) ABNT NBR 5419, “Proteção de estruturas contra descargas atmosféricas”, janeiro (1993).
- (13) J.M.SILVA, V. TADEU, S.L.D.C.BRASIL. Metodologia de Avaliação da Corrosividade de Solos em Campo. INTERCORR 2008 (28º Congresso Brasileiro de Corrosão e 2º International Corrosion Meeting). Maio (2008).
- (14) ASTM G 51-77, “pH of soil for use in corrosion testing”, (1984).
- (15) F.E. COSTANZO and R.E.MCVEY, “Development of the redox probe field technique”, *Corrosion*, vol.14, nº 6, p. 26-30 (1958).
- (16) M.A.C.. LIORCA, E.V.PÉREZ, M.M.L.ATALAYA. Embeddable Ag/AgCl Sensors for IN-SITU Monitoring Chloride Contents in Soils. *Cement and Concrete Research*, Vol.26 No. 8, (1996) 1157-1161.
- (17) GCOI/SCM. (1995): “Obtenção do Potencial de Corrosão em Solos”. III Encontro Técnico de Corrosão e Proteção. Rio de Janeiro. Brasil. Recomendação Técnica (1995).
- (18) NORMA ABNT – NBR 5419 – Instalações Elétricas de Baixa Tensão – novembro (1997) 131p.