



13ª Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos

COTEQ 2015-060

Resistência de Contato em Função do Arranjo de Leito de Anodos Utilizados em Sistemas de Proteção Catódica

Laerce de P. Nunes¹, Anderson T. Kreischer², Luciano Gabriel de Oliveira Coelho³, José Ricardo Maciel⁴, Antônio Pires Caetano⁵, Leonardo Ribeiro Machado⁶

Copyright 2015, ABENDI, ABRACO e IBP

Trabalho apresentado durante 13ª Conferencia sobre Tecnologia de Equipamentos.

As informações e opiniões contidas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade dos autores.

SINOPSE

A técnica de proteção anticorrosiva de estruturas enterradas ou submersas, por meio de proteção catódica é uma prática importantíssima, muito conhecida e exaustivamente aplicada em todas as partes do mundo.

Para definição da corrente de proteção obtida nos sistemas galvânicos e por corrente impressa, o adequado domínio sobre a resistência de contato ânodos/eletrólitos é fundamental para o desempenho dos mesmos.

Alguns parâmetros são primordiais na determinação destas resistências de contato, por exemplo, o formato e as dimensões dos ânodos, a resistividade elétrica do meio, o espaçamento e o arranjo entre eles.

A influência de alguns parâmetros na resistência de contato ânodo/eletrólito em leitos superficiais e profundos é bem conhecida para aplicações típicas em sistemas por corrente impressa no solo, tais como: a resistividade e as dimensões do conjunto ânodos/camisa; entretanto, a influência do arranjo dos ânodos é ainda pouco explorada na literatura tradicional.

Procuramos estabelecer neste trabalho correlações sobre a influência das dimensões, da resistividade elétrica do meio, do espaçamento, na resistência de contato, principalmente quanto à eficiência de leitos paralelos tanto superficiais quanto profundos.

Palavras Chaves: Proteção Catódica, Resistência de Leito de Anodos

1 Eng. Metalúrgico – IEC – Instalações e Engenharia de Corrosão Ltda. – Gerente de Projetos

2 Eng. Metalúrgico – IEC – Instalações e Engenharia de Corrosão Ltda. – Gerente de Projetos

3 Eng. Eletricista - IEC – Instalações e Engenharia de Corrosão Ltda. – Eng. de Projetos

4 Eng. Eletricista - IEC – Instalações e Engenharia de Corrosão Ltda. – Eng. de Projetos

5 Eng. Eletricista - IEC – Instalações e Engenharia de Corrosão Ltda. – Gerente de Engenharia

6 Eng. Eletricista - IEC – Instalações e Engenharia de Corrosão Ltda. – Gerente de Projetos

1. INTRODUÇÃO

A técnica de proteção anticorrosiva de estruturas enterradas ou submersas por meio de proteção catódica é uma prática importantíssima, muito conhecida e exaustivamente aplicada em todas as partes do mundo.

Para definição da corrente de proteção obtida nos sistemas galvânicos e por corrente impressa, o adequado domínio sobre a resistência de contato ânodos/eletrolitos é fundamental para o desempenho dos mesmos.

Nos sistemas por corrente impressa é comum o projetista não dispor de espaço suficiente para a instalação de leitos de ânodos, e desta forma ter a necessidade de utilizar arranjos e disposições não convencionais.

Abordam-se estas situações e simulam-se alternativas para arranjo de leitos, nos sistemas por corrente impressa, principalmente em função de dificuldades de espaço para instalação dos leitos.

2. TIPOS DE LEITOS DE ÂNODOS

Os leitos de ânodos utilizados em sistemas por corrente impressa podem ser classificados de várias formas em função da profundidade, do posicionamento, do arranjo e da disposição dos ânodos.

2.1 – Classificação de Leitos de Ânodos Quanto à Profundidade

Com relação à profundidade dos ânodos, os leitos podem ser: leitos profundos, semi-profundos e superficiais. Nos leitos profundos os ânodos são instalados em furos verticais a uma profundidade superior a 60 m, podendo chegar até 120 m. Os leitos semi-profundos são instalados também em furos verticais, porém, menores, de 10 a 60 m. Já os leitos superficiais são instalados em fileiras, a uma profundidade inferior a 10 m.

As figuras 01, 02 e 03 ilustram leitos de ânodos quanto à profundidade.

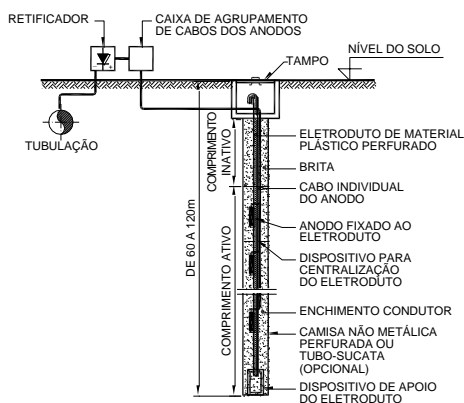


Fig.01 – Leitos Profundos (Profundidade do Furo Superior a 60 m)

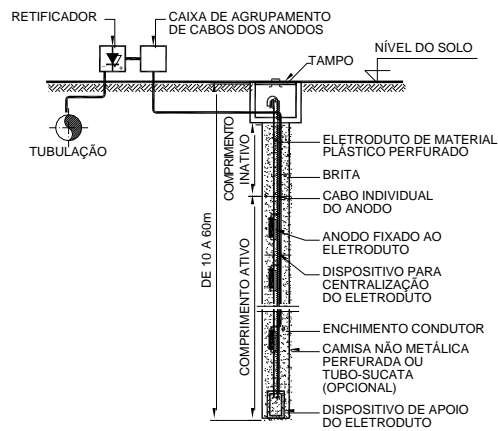


Fig.02 – Leitos Semi-profundos (Profundidade do Furo entre 10 e 60 m)

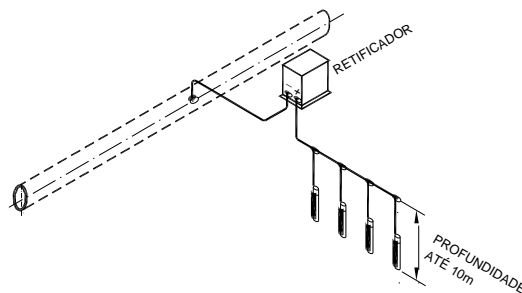


Fig.03 – Leitos Superficiais (Profundidade do Furo inferior a 10 m)

2.2 – Classificação de Leitos de Ânodos Quanto ao Posicionamento para Leitos Superficiais e Semi-profundos

O posicionamento define a forma de injeção da corrente de proteção, podendo quanto à forma de injeção da corrente os leitos serem classificados em Leitos Distribuídos e leitos remotos.

Os leitos distribuídos são aqueles em que os ânodos são dispostos ao longo da estrutura, buscando levar a corrente de forma localizada nos pontos desejados por aproximação, reduzindo-se as perdas. São usados em áreas industriais ou em situações onde haja forte tendência à dispersão ou dificuldade para chegada da corrente à estrutura desejada.

Os leitos são classificados como leitos concentrado-remotos quando os ânodos são reunidos e concentrados em uma área, dispersando a corrente no meio, a partir de um ponto determinado da estrutura. São leitos indicados para sistemas por corrente impressa de estruturas com bons

revestimentos e adequadamente isoladas de outras estruturas. Os leitos profundos são geralmente utilizados de forma remota.

As figuras 04, 05 e 06 ilustram Leitos Distribuídos e Concentrado-remotos.

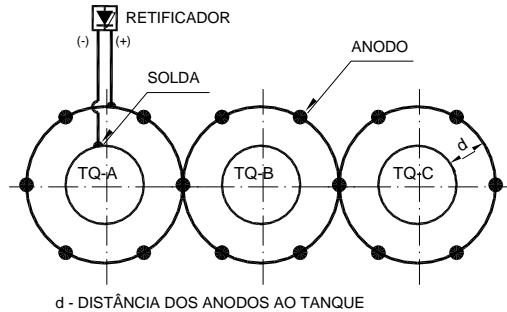


Fig.04 – Leitos Superficiais Distribuídos

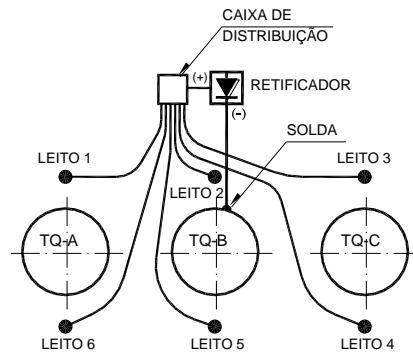


Fig.05 – Leitos Semi-profundos Distribuídos

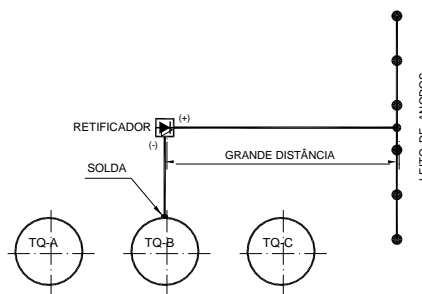


Fig.06 – Leitos Superficiais Concentrado-Remotos

2.3 – Classificação de Leitos de Ânodos Quanto ao Arranjo para Leitos Superficiais

Os leitos de ânodos superficiais podem ser instalados basicamente de duas formas: Leitos Perpendiculares, quando os anodos formam fileiras perpendiculares à estrutura

e Leitos Paralelos, quando os anodos formam fileiras paralelamente à estrutura. Os leitos perpendiculares dispersam melhor a corrente no meio do que os leitos paralelos, portanto, sendo preferidos quando as condições de campo são propícias aos leitos perpendiculares.

Os leitos profundos e semi-profundos são utilizados, de modo geral, perpendiculares à estrutura.

As figuras 07 e 08 ilustram leitos quanto ao arranjo.

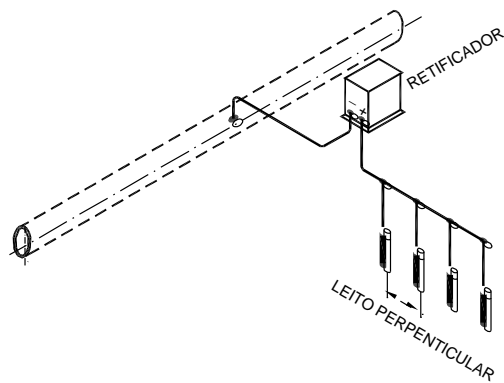


Fig.07 – Leitos Superficiais Perpendiculares à Estrutura

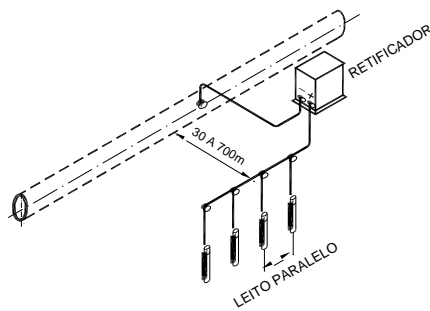


Fig.08 – Leitos Superficiais Paralelos à Estrutura

2.4 - Classificação de Leitos de Ânodos Quanto à Disposição para Leitos Superficiais

Os leitos de ânodos superficiais podem ser dispostos basicamente de duas formas: Leitos com ânodos Verticais e Leitos com Ânodos Horizontais.

Os ânodos verticais são preferidos por abrangerem as camadas de solo da mesma forma como se mediu a resistividade elétrica. Quanto aos ânodos horizontais só devem

ser usados nos casos em que seja inadequado o uso dos ânodos verticais, por exemplo, devido à presença de rochas e resistividade elétrica muito alta nas camadas inferiores. As figuras 09 e 10 ilustram leitos quanto à disposição.

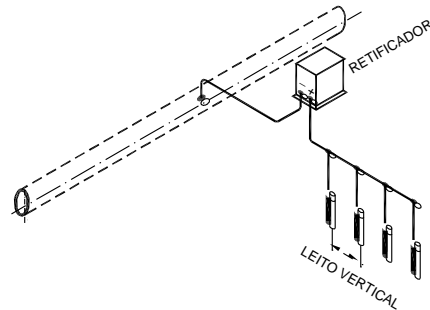


Fig.09 – Leitos Superficiais com Ânodos Dispostos na Vertical

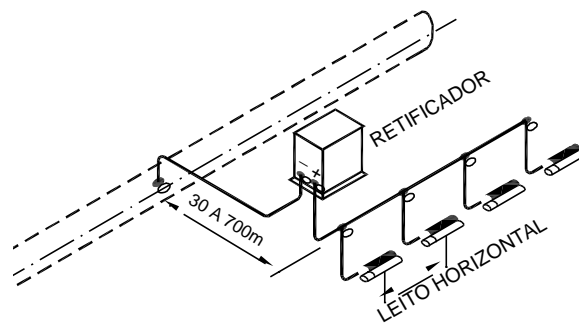


Fig.10 – Leitos Superficiais com Ânodos Dispostos na Horizontal

3. CONSIDERAÇÕES SOBRE O ARRANJO DE LEITOS SUPERFICIAIS E SEMI-PROFUNDOS

Os leitos superficiais com arranjos paralelos ou perpendiculares à estrutura, dispostos na horizontal ou na vertical, deparam-se muitas vezes com a dificuldade de espaço físico para instalação dos ânodos necessários ao projeto em fileira única, necessitando serem instalados várias fileiras.

Na utilização de leitos profundos e semi-profundos também muitas vezes precisam ser instalados em mais de um poço ao invés de um poço único.

A literatura existente e tradicional utilizada, de modo geral, não aborda de forma clara os critérios mais adequados para realização dos cálculos e por esta razão procuramos simular algumas situações comuns neste tipo de trabalho, efetuando os cálculos com o

uso dos critérios tradicionais (equações de Dwight), e também utilizando o pacote de software CDEGS (Current Distribution, Electromagnetic Fields, Grounding and Soil Structure Analysis), na versão 14.0.380, da empresa SESTECH – Safe Engineering Services & Technologies LTD., sediada em Quebec, Canadá. Este software CDEGS é composto pelos módulos: RESAP, MALT, MALZ, TRALIN, SPLITS, FCDIST e SESCAD. Para o caso em questão foi utilizado o módulo MALT, que permite o cálculo de resistências de aterramento.

4. MODELOS PROPOSTOS

Para as diversas simulações consideramos os casos: leitos de anodos superficiais em fileira única e fileira dupla, leito profundo e dois semi-profundos paralelos. As figuras 11 e 12 apresentam os modelos propostos.

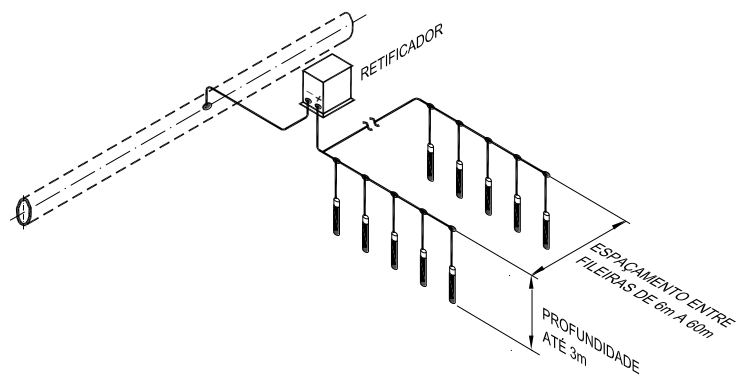


Fig.11 – Leitões Superficiais com Ânodos Dispostos na Vertical em Fileira Dupla

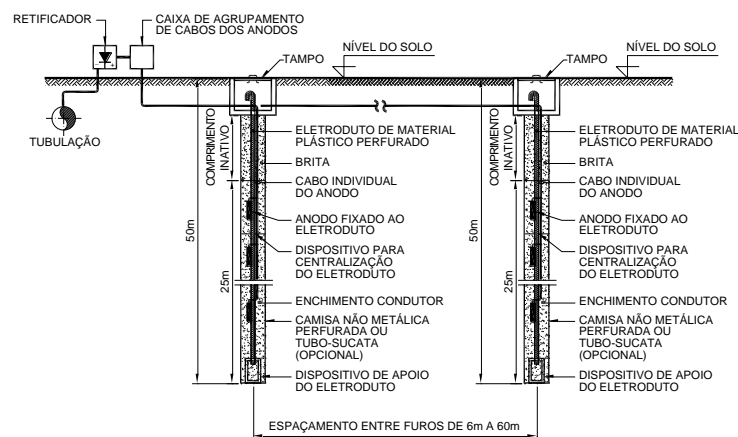


Fig.12 – Leitos Semi-profundos em Furos Duplos

4.1 – Leitões Superficiais

No caso de leitões superficiais usamos um modelo bem tradicional nos cálculos de leitões de anodos de acordo com a figura 11:

Leito superficial com 10 e com 20 ânodos em solo com resistividade de 10.000 Ohm.cm. Ânodos de 1,5 m por 5 cm de diâmetro em camisas com enchimento de moínha de coque metalúrgico ou coque calcinado de petróleo com 2,5 m e diâmetro de 15 cm.

Adotamos um espaçamento médio de 6 m, muito utilizado pelos projetistas.

Consideramos o leito em fileira única (com 10 ou 20 ânodos) e em duas fileiras paralelas de 05 ou 10 ânodos cada.

Para o cálculo analítico utilizamos a fórmula tradicional de Dwight:

$$R_v = \frac{\rho}{2\pi NL} \left[\ln\left(\frac{8L}{d}\right) - 1 + \frac{2L}{S} \ln(0,656N) \right]$$

Onde:

R_v = Resistência de Contato de Ânodos Verticais no Solo, em Ohm;

ρ = Resistividade Elétrica Média do Solo, em Ohm.cm;

N = Número de Ânodos;

L = Comprimento da Camisa, em cm;

d = Diâmetro da Camisa, em cm.

Para o cálculo com o software utilizamos o módulo MALT citado no item 3.

Resultados

Resistência dos leitões em fileira única: calculadas pelo método analítico e com o uso do software, conforme tabela 01.

Tab. 01 - Resistência de ânodos em fileira única

QUANTIDADE DE ÂNODOS	RESISTÊNCIA (Ohm)	
	MÉTODO ANALÍTICO	UTILIZANDO O SOFTWARE
10	3,48	3,32
20	1,92	1,83

Resistência dos leitos em fileira dupla e em diversos espaçamentos: calculadas com o uso do software encontra-se na tabela 02, para o leito de 10 ânodos divididos em duas fileiras de 05 ânodos; e na tabela 03, para o leito de 20 divididos em duas fileiras de 10 ânodos.

Tab. 02 - Resistência de ânodos em fileira dupla com 05 ânodos por fileira

ESPAÇAMENTO ENTRE FILEIRAS (m)	RESISTÊNCIA (Ohm)
Fileira única	3,32
6	3,70
7	3,67
8	3,62
9	3,58
10	3,59
15	3,42
18	3,36
20	3,34
25	3,28
28	3,29
30	3,24
35	3,20
40	3,18
45	3,16
50	3,15
55	3,13
60	3,12

Tab. 03 - Resistência de ânodos em fileira dupla com 10 ânodos por fileira

ESPAÇAMENTO ENTRE FILEIRAS (m)	RESISTÊNCIA (Ohm)
Fileira única	1,83
6	2,17
7	2,14
8	2,19
9	2,09
10	2,07

ESPAÇAMENTO ENTRE FILEIRAS (m)	RESISTÊNCIA (Ohm)
15	1,99
20	1,94
25	1,90
30	1,87
35	1,85
40	1,83
45	1,82
50	1,80
55	1,79
60	1,78

O gráfico da figura 13 mostra a comparação da eficiência entre leitos com 10 e 20 anos, considerando os leitos em fileira única como referencial de 100 %.

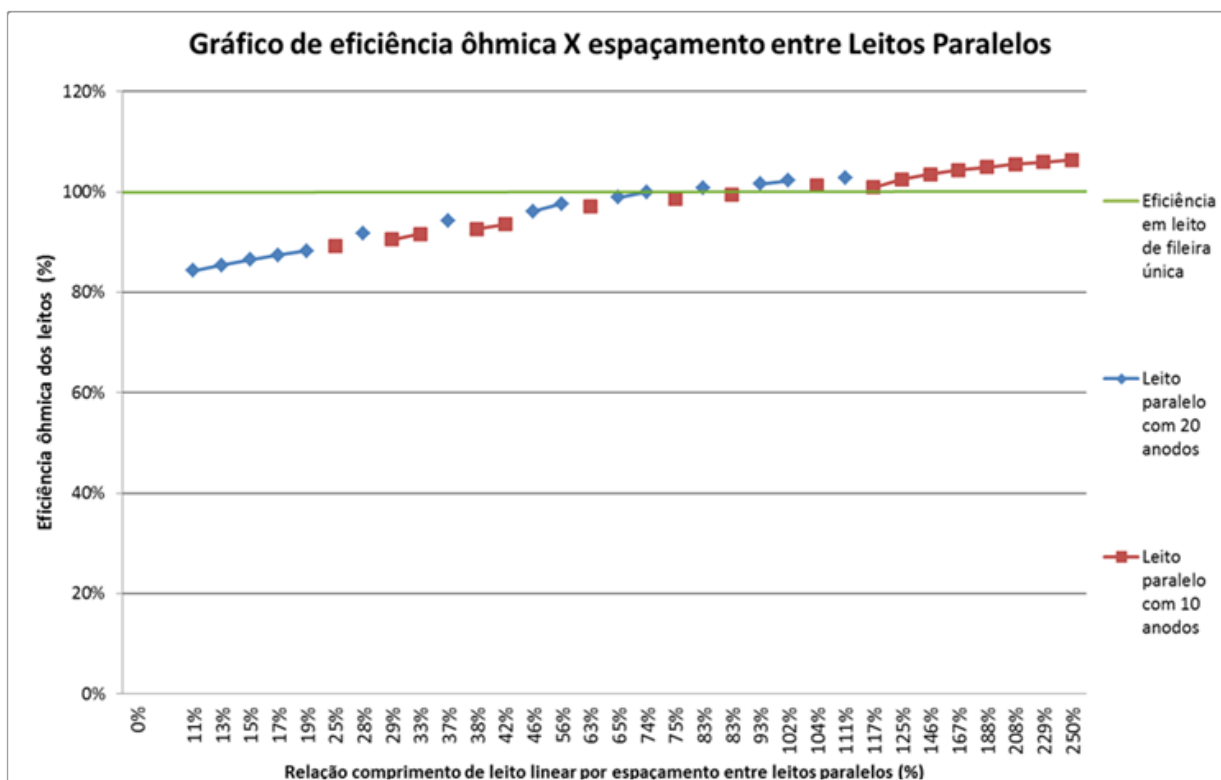


Fig.13 – Comparação da Eficiência para Leitos com 10 e 20 anos

4.2 – Leitões Profundos e Semi-profundos

No caso de leitões profundos usamos um modelo também bem tradicional nos cálculos de leitões de anodos de acordo com a figura 12:

Leito profundo com área ativa de 50 m em solo com resistividade de 10.000 Ohm.cm. Consideramos o leito em furo único e em dois furos paralelos com área ativa de 25 m (leitões semi-profundos paralelos).

Para o cálculo analítico utilizamos a fórmula tradicional de Dwight:

$$R_v = \frac{\rho}{2\pi L} \left[\ln \left(\frac{4L}{d} \right) - 1 \right]$$

Onde:

R_p = Resistência de Contato de Leitões Profundos e Semi-profundos, em Ohm;

ρ = Resistividade Elétrica Média do Solo, em Ohm.cm;

L = Comprimento da Área Ativa, em cm;

d = Diâmetro da Camisa, em cm.

Para o cálculo com o software utilizamos módulo MALT o citado no item 3.

Resultados

Resistência dos leitões em furo único: calculadas pelo método analítico e com o uso do software.

Leito profundo com diâmetro de 25 cm e 50 m de área ativa.

Método Analítico: $R_p = 1,81$ Ohms.

Pelo Software: $R_p = 2,10$ Ohms.

Resistência dos leitões em furo duplo com diâmetro de 25 cm e comprimento de área ativa de 25 m e em diversos espaçamentos: calculadas com o uso do software encontra-se na tabela 04.

Tab. 04 - Resistência de ânodos em furo duplo com 25 m de área ativa.

ESPAÇAMENTO ENTRE FUROS (m)	RESISTÊNCIA (Ohm)
6	2,14
7	2,41
8	2,37
9	2,33
10	2,30
15	2,28
18	2,18
20	2,15
25	2,13
30	2,09
35	2,07
40	2,05
45	2,04
50	2,02
55	2,01
60	2,01

A tabela 05 mostra a comparação da eficiência entre leitos, considerando o leito em furo único com área ativa de 50 m, como referencial de 100 % e leitos semi-profundos em dois furos de áreas ativas de 25 m.

ESPAÇAMENTO ENTRE FUROS (m)	EFICIÊNCIA (%)	RELAÇÃO ESPAÇAMENTO/ COMPRIMENTO DO LEITO (%)
6	88,8	12,0
7	90,4	14,0
8	91,8	16,0
9	93,1	18,0
10	94,1	20,0
15	98,1	30,0
18	99,8	36,0
20	100,6	40,0
25	102,3	50,0
30	103,6	60,0

ESPAÇAMENTO ENTRE FUROS (m)	EFICIÊNCIA (%)	RELAÇÃO ESPAÇAMENTO/ COMPRIMENTO DO LEITO (%)
35	104,5	70,0
40	105,2	80,0
45	105,8	90,0
50	106,3	100,0
55	106,8	110,0
60	107,1	120,0

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste trabalho deixamos de aprofundar nossas observações sobre os parâmetros que são bastante conhecidos e alguns relativamente padronizados no cálculo de leitos de ânodos, tais como: a resistividade elétrica do solo, as dimensões dos ânodos e do enchimento e concentramos nossas análises na formação de leitos em fileiras paralelas para leitos superficiais e furos paralelos em leitos semi-profundos.

Os leitos em fileiras paralelas podem ser necessários quando o espaço para instalação em fileira única e para o caso de leitos profundos restrições à instalação dos mesmos em um único furo, por exemplo, a existência de rochas ou uma resistividade muito alta a profundidades maiores.

Verificamos que os resultados em termos de resistência em fileira dupla mostram que um espaçamento entre elas a partir de 75% do comprimento do leito o comportamento é similar à fileira única ou melhor.

Já para os leitos profundos esta aproximação de resultados ocorre para valores de cerca de 40%.

Na impossibilidade de afastamentos muito significativos para leitos superficiais, para um afastamento igual ao afastamento dos ânodos, ou seja, 6 m a perda prevista em eficiência é da ordem de 20%, enquanto que para leitos profundos esta perda para o mesmo afastamento de 6 m é de aproximadamente 12%.

6. CONCLUSÕES

Com base no exposto podemos concluir:

- O uso de leitos em fileiras paralelas ou furos paralelos é uma alternativa que pode ser usada pelo projetista, mesmo com alguma perda de eficiência, porém, com a vantagem de ocupação de um espaço eventualmente mais restrito;
- Caso o afastamento entre tramos possa ser maior que 75% no caso de leitos superficiais ou maior que 40% no caso de leitos profundos a eficiência será superior aos leitos em fileira ou furos únicos.

REFERÊNCIAS

- (1) Dutra, Aldo C. e Nunes, Laerce P. – Proteção Catódica – “Técnica de Combate à Corrosão” – Editora Interciência, Rio de Janeiro, 5ª edição, 2012.
- (2) Nunes, Laerce P. e Kriescher, Anderson T. – “Dimensionamento de Sistemas de Proteção Catódica” – Considerações Sobre o Fator Galvânico – COTEQ – ABRACO, Anais, 2011.
- (3) Cochran Jerry, “Anode-to-electrolyte Resistance Equations for Offshore Cathodic Protection”, Materials Performance, NACE; Houston, EUA, 1985.
- (4) - Nunes, Laerce P. e Kriescher, Anderson T. “Influência na Resistência de Contato Ânodo/Eletrólito dos Parâmetros Utilizados no Dimensionamento de Sistemas de Proteção Catódica”, ABRACO –INTERCORR, 2014, Fortaleza.