

Copyright 2012, ABRACO

Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2012, em Salvador/BA no mês de maio de 2012.

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

## Otimização do Sistema de Proteção Catódica de Terminal de Múltiplo Uso Através de Simulação Numérica

Simone L.D.C. Brasil<sup>a</sup>, José Claudio F. Telles<sup>b</sup>, José Antônio F. Santiago<sup>c</sup>,  
Leonardo R. Machado<sup>d</sup>, Anderson T. Kreischer<sup>e</sup>

### Abstract

The multiple use terminal (TMUT / PECCEM) is located in the city of São Gonçalo do Amarante - Ceará and its project involves the extension of the breakwater and the bridge to access the terminal, besides the construction of a jetty with two berths. With this expansion, the terminal will facilitate the materials handling to create areas for loading and unloading. The materials flow capacity can be five times greater. The length of terminal is 700 m, and the metal shutter have a metal side facing the sea and the other in permanent contact with the ground covered with a high resistivity sand. On the side facing the earth, there are steel stay bolts that need to be protected. This paper presents a numerical simulation of the cathodic protection system using a computer system based on the Boundary Element Method, developed on the Laboratory of Computational Mechanics (LAMEC) - COPPE / UFRJ. The study was carried out with IEC - Instalações e Engenharia de Corrosão Ltda. Two independent cathodic protection systems were considered and different possibilities for the following parameters were analyzed: anode/structure distance, current applied, coating efficiency and number of anodes. The potential distributions were determined for the metal shutter and the steel stay bolts, considering fourteen configurations for the cathodic protection system of the structure facing the sea and three configurations to the side in contact with soil. Considering the reach of the cathodic protection current according to the variety of parameters involved, the optimized number and positioning of anodes was possible to be defined.

**Keywords:** cathodic protection, impressed current, numerical simulation.

### Resumo

O Terminal de Múltiplo Uso (TMUT/PECCEM) fica localizado no município de São Gonçalo do Amarante - Ceará e seu projeto envolve a ampliação do quebra-mar e da ponte de acesso ao TMUT, além da construção de mais um cais com dois berços de atracação. Com esta ampliação, o terminal facilitará a movimentação de materiais ao criar áreas para o carregamento e descarregamento, com a expectativa de quintuplicar a capacidade de escoamento de alguns produtos. O terminal tem extensão de 700 m, sendo que as cortinas metálicas apresentam um dos lados voltado para o mar e outro em contato permanente com solo contendo cobertura de areia de maior resistividade. No lado voltado para terra estão

<sup>a</sup> D.Sc., Professora, Escola de Química/UFRJ

<sup>b</sup> Ph.D., Professor, COPPE/UFRJ

<sup>c</sup> D.Sc., Professor, COPPE/UFRJ

<sup>d</sup> Engenheiro Eletricista, IEC

<sup>e</sup> Engenheiro Metalúrgico, IEC

presentes, ainda, tirantes de fixação de aço que também necessitam de proteção. Este trabalho apresenta a simulação numérica do sistema de proteção catódica através de um sistema computacional baseado no Método dos Elementos de Contorno, elaborado pela equipe do Laboratório de Mecânica Computacional (LAMEC) da COPPE/UFRJ. O estudo foi realizado em conjunto com a equipe técnica da Empresa IEC - Instalações e Engenharia de Corrosão.

Para a simulação numérica, foram admitidos dois sistemas independentes de proteção catódica, sendo analisadas diferentes possibilidades em relação aos seguintes parâmetros: distância anodo/estrutura, corrente aplicada, eficiência do revestimento protetor e número de anodos. Neste estudo foram determinadas as distribuições de potenciais em cortinas metálicas (estacas tubulares de aço e estacas prancha) e tirantes de fixação de aço, considerando quatorze casos para o sistema de proteção catódica da estrutura voltada para o mar e três casos para o lado em contato com solo. Com a determinação do alcance da proteção catódica em função da variedade de parâmetros envolvidos, foi possível definir a disposição de anodos de forma otimizada para a proteção catódica do Terminal de Múltiplo Uso.

**Palavras-chave:** proteção catódica, corrente impressa, simulação numérica.

## Introdução

Diante das dimensões do Terminal de Múltiplo Uso (TMUT) (Figura 1), tendo sua cortina metálica comprimento de 700 m, profundidade em torno de 33 m e seus tirantes de fixação com extensão média de 34 m, foi considerada a instalação de um sistema de proteção catódica por corrente impressa ao invés de anodos galvânicos. O sistema é formado por conjuntos retificador/leitos de anodos, sendo os anodos localizados em leito marinho (para o lado mar) sendo fixados em poitas de concreto para manutenção de sua localização. No lado voltado para terra, os anodos de corrente impressa são lançados diretamente no solo.



**Figura 1** – Detalhe da cortina metálica

Para correto funcionamento do sistema de proteção catódica, a continuidade elétrica entre as estruturas a serem protegidas deve ser garantida, neste caso, cortina metálica (estacas tubulares e estacas-prancha) e tirantes de fixação. Para o caso da inexistência de continuidade elétrica entre as estruturas, esta deve ser providenciada por intermédio de cabos, vergalhões ou demais materiais metálicos que poderão ou não ser considerados no dimensionamento do sistema de proteção catódica dependendo de suas proporções.

A proteção catódica do TMUT consiste em dois sistemas de corrente impressa independentes. Visando otimizar esses sistemas, foram realizadas simulações numéricas que permitiram avaliar os sistemas em termos de quantidade e posicionamento dos anodos a serem utilizados tanto no lado voltado para água do mar (*lado mar*) quanto no lado em contato permanente com solo (*lado terra*). Através das simulações, foram determinadas as distribuições de potencial em diferentes condições dos sistemas de proteção catódica das cortinas metálicas (estacas tubulares de aço e estacas prancha) e dos tirantes de fixação de aço.

Este estudo compreendeu simulações numéricas realizadas através de um programa computacional elaborado na COPPE/UFRJ<sup>[1,2]</sup>. Tal técnica de avaliação tem sido usada com sucesso na avaliação e otimização de sistemas de proteção catódica<sup>[3-9]</sup>.

## Metodologia

As cortinas metálicas apresentam um dos lados voltado para água do mar (*lado mar*) e outro em contato permanente com solo (*lado terra*) de baixa resistividade (59 ohm.cm), contendo uma cobertura de areia de maior resistividade (8.000 ohm.cm). No lado terra estão presentes, ainda, tirantes de fixação de aço (três por estaca tubular).

O lado de maior extensão do terminal (comprimento de 700m) apresenta as estacas metálicas em posições igualmente espaçadas. Desta forma, objetivando reduzir o sistema a ser analisado, as simulações compreenderam um trecho típico de 98m, aproximadamente, sendo que no lado mar foi considerado um único conjunto de anodos centralizado neste trecho e apoiado em solo marinho.

Os projetos previstos para o lado mar e terra, apresentam as seguintes características:

### lado mar:

15 conjuntos de anodos  
corrente por conjunto de anodos: 75 A

### lado terra:

135 anodos  
corrente por anodo: 5,5 A

## Modelagem do Sistema

Os seguintes dados foram considerados nas simulações numéricas:

- Elementos utilizados para modelagem das cortinas metálicas (estacas tubulares e estacas prancha) e tirantes de fixação: elementos triangulares planos e cilíndricos.
- Anodos de corrente impressa: fontes de corrente posicionadas a diferentes distâncias das cortinas metálicas.
- Eficiência do revestimento protetor:

### lado mar:

- cortina metálica: 80%, 85% e 90%

### lado terra

- cortina metálica: 85%

- tirantes de fixação: 75%
- curvas de polarização / resistividade: obtidos experimentalmente e em campo, em solos coletado em região marinha e em solo arenoso.

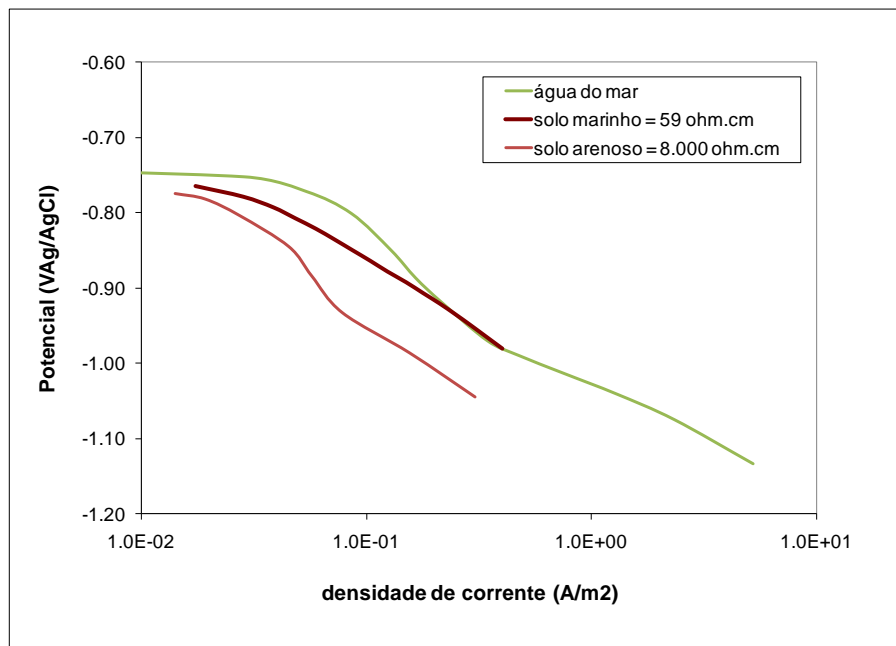
➤ Características da simulação: foram admitidas duas sub-regiões nas simulações:

lado mar: água do mar / solo marinho

lado terra: solo marinho / solo arenoso

### Condições de contorno

Quando se aplica simulação numérica a um sistema de proteção catódica, a curva de polarização é aplicada como condição de contorno para solução das equações diferenciais consideradas. Neste tipo de análise, a distribuição de potencial é função da curva de polarização e da resistividade do meio. Com isso, é fundamental que a curva seja realizada considerando as condições operacionais de trabalho. Neste trabalho, foram adotadas as curvas representadas na Figura 2, adotadas em trabalhos prévios, em condições semelhantes [6,9].



**Figura 2** – Curvas de polarização catódica de aço-carbono em água do mar e solos (marinho e arenoso).

### Resultados e discussão

O alcance total da corrente de proteção catódica, em função da resistividade do meio e da corrente aplicada, é dado nas Tabelas 1 e 2. Os resultados dados nas tabelas permitem determinar a influência dos parâmetros: distância anodo/estrutura, corrente aplicada e eficiência do revestimento.

---

Foram analisados 14 casos para o sistema no lado mar e 3 casos para o lado terra. As tabelas apresentam as características das simulações e os resultados em termos do alcance da proteção catódica, ou seja, o trecho da estrutura onde se observa potencial mínimo de proteção catódica ( $-0,80 \text{ V}_{\text{Ag/AgCl}}$ ).

Tendo em vista a quantidade de casos analisados, neste trabalho são apresentados, em forma gráfica, apenas três casos do *lado mar* e os três casos analisados do *lado terra*. Os resultados são apresentados de duas formas: através do perfil de potencial em estacas, ao longo de sua profundidade, a diferentes distâncias do ponto onde se encontra um anodo. Como há repetição das características estruturais ao longo do terminal, a simulação numérica contempla um trecho de 98m, sendo os resultados repetidos por todo o restante da estrutura.

No lado mar, são vistos os perfis de potenciais e as equipotenciais no trecho de 98m de extensão da cortina metálica, com o anodo centralizado e posicionado a diferentes distâncias da estrutura. Essas figuras visam apresentar o alcance da proteção catódica, que corresponde à distância máxima do centro da cortina metálica, onde está posicionado o anodo, à estaca mais distante que esteja totalmente protegida. Como exemplo, na Figura 3 a estaca situada a 10m do anodo é a última estaca totalmente protegida (valor máximo de potencial em  $-0,8 \text{ V}_{\text{Ag/AgCl}}$ ) e, portanto, considera-se 20 m de trecho protegido pelo anodo centralizado.

No Caso 1 (Figura 3), tem-se a menor distância anodo/estrutura e, também, a menor extensão de superfície com proteção. Aumentando-se a distância para 20m, para a mesma eficiência de revestimento (80%), pode-se atingir total proteção da superfície representada na simulação (98m) com o aumento da corrente injetada pelo sistema de proteção catódica (Caso 7 - Figura 4). Admitindo-se eficiência do revestimento de 90% e distância de 90m entre anodo e estrutura, a completa proteção é observada para valores menores de corrente (Caso 13 - Figura 5).

Nas figuras 3b e 4b foi inserida uma linha delimitando a equipotencial correspondente ao trecho onde a proteção catódica é efetiva ( $-0,8 \text{ V}_{\text{Ag/AgCl}}$ ), de forma a facilitar a visualização do trecho efetivamente protegido. Cabe ressaltar que os gráficos apresentam faixas diferentes de potencial, conforme verificado nas legendas.

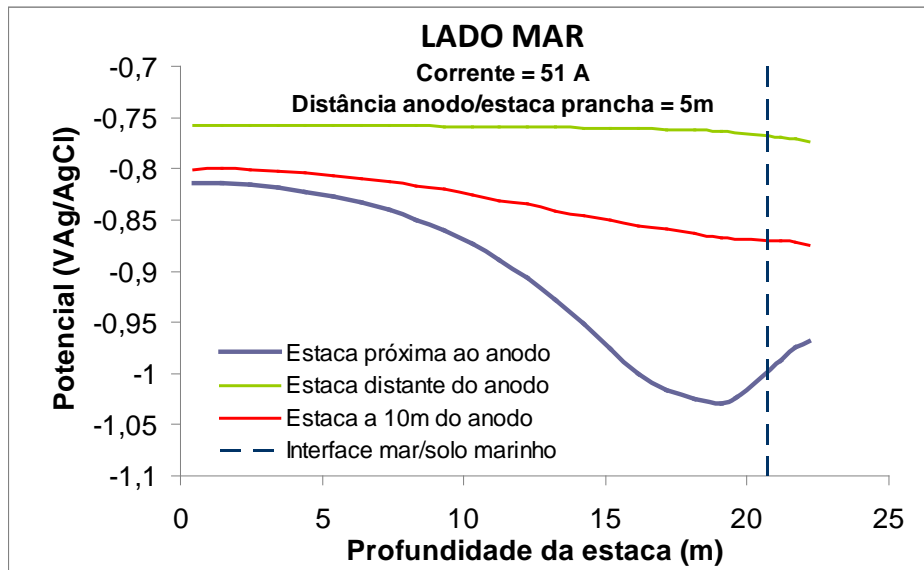
As Figuras 6 e 7 mostram os perfis de potencial nos três tirantes de fixação (lado terra), sendo estes numerados sequencialmente a partir do mais próximo à superfície.

**Tabela 1 - Resultados para o sistema *lado mar*.**

Caso	Distância anodo/estrutura (m)	Corrente impressa (A)	Eficiência do revestimento (%)	Extensão sob PC do trecho linear de 98m
1	5	51	80	20
2	10	51		32
3	15	51		38
4		68		61
5		75		72
6	20	68		72
7		75		total
8	25	51		44
9		80		total
10		100		total
11	20	62,5	85	total
12	25			total
13	25	35	90	total
14		51		total

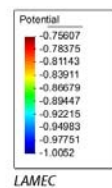
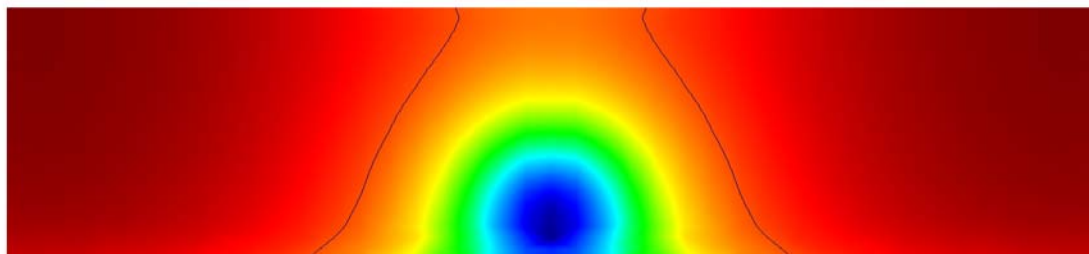
**Tabela 2 - Resultados para o sistema *lado terra*.**

Caso	Distância anodo/estrutura (m)	Corrente impressa/por anodo (A)	Eficiência do revestimento (%)		Número total de anodos	Extensão sob PC do trecho linear de 98m
			Cortina metálica	tirante		
15	15	5,5	85	75	135	total
16		3,0			135	total
17		5,5			75	total



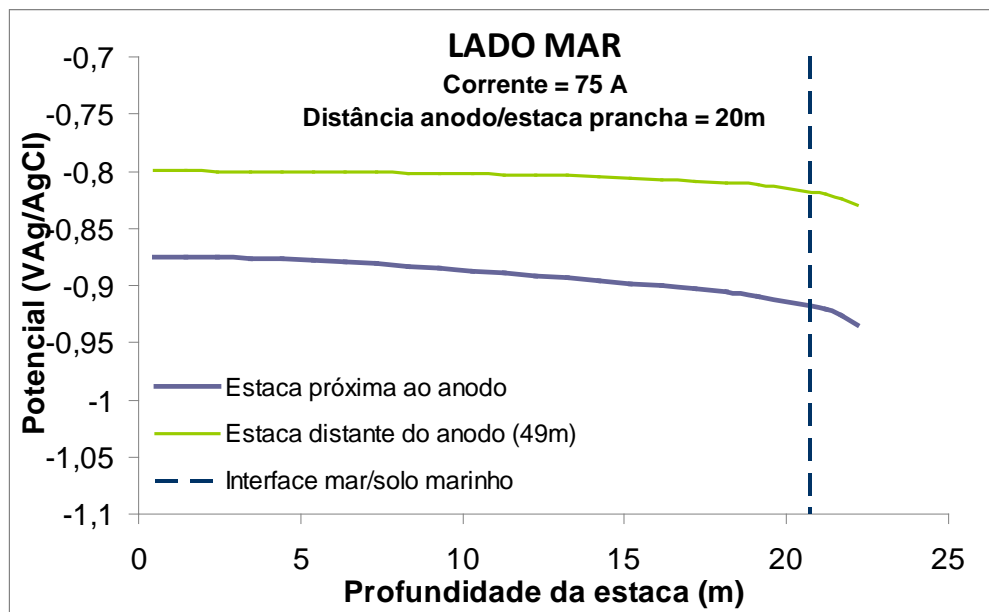
(a)

**Local: Mar**  
**Corrente Impressa: 51A**  
**Distância do Anodo à Estaca-Prancha: 5m**



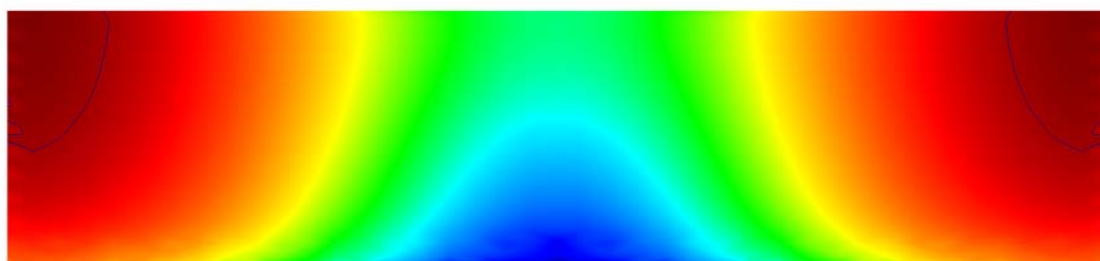
(b)

**Figura 3 – CASO 1: (a) Perfil de Potencial nas estacas;**  
**(b) Distribuição de potencial na cortina metálica.**

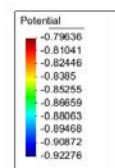


(a)

Local: Mar  
Corrente Impressa: 75A  
Distância do Anodo à Estaca-Prancha: 20m



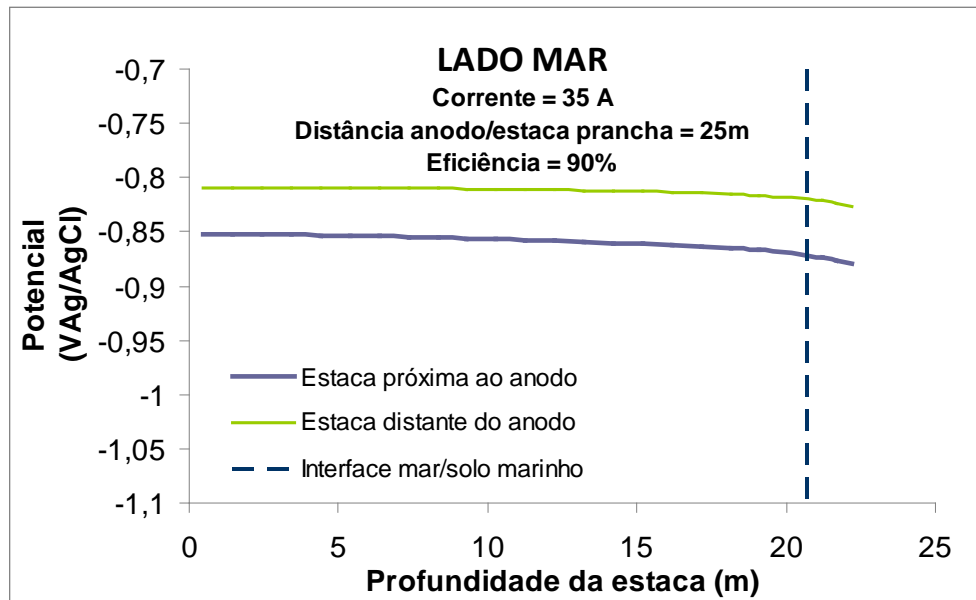
(-----) Potencial de -0,80 V



(b)

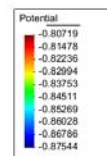
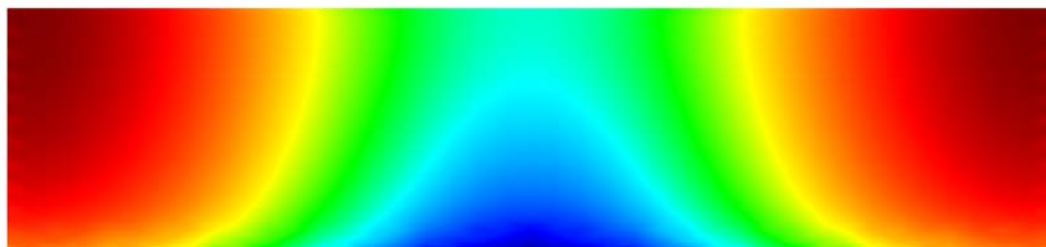
Figura 4 – Caso 7: (a) Perfil de Potencial nas estacas;  
(b) Distribuição de potencial na cortina metálica.





(a)

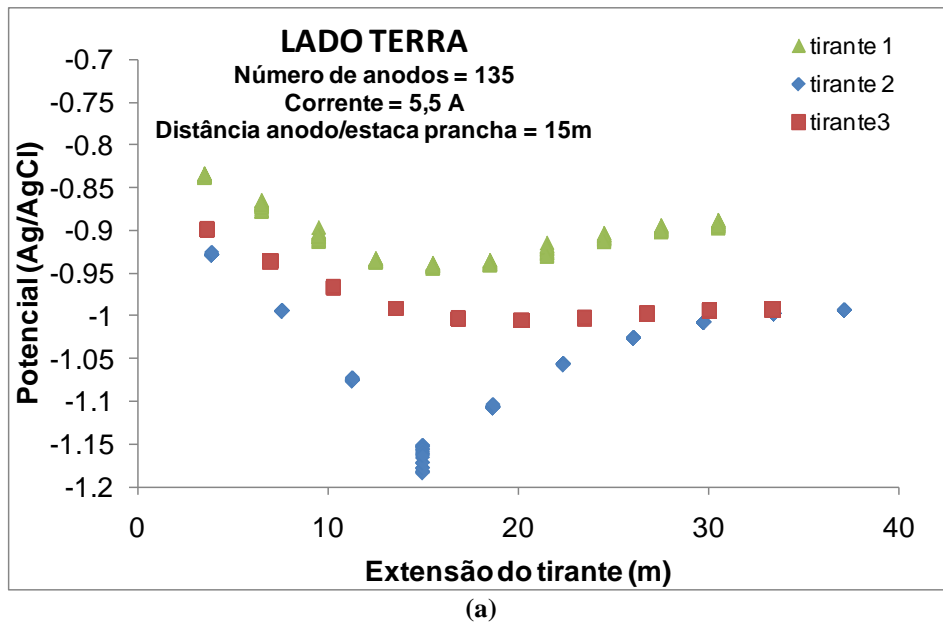
Local: Mar  
Corrente Impressa: 35A  
Distância do Anodo à Estaca-Prancha: 25m - Eficiência = 90%



LAMEC

(b)

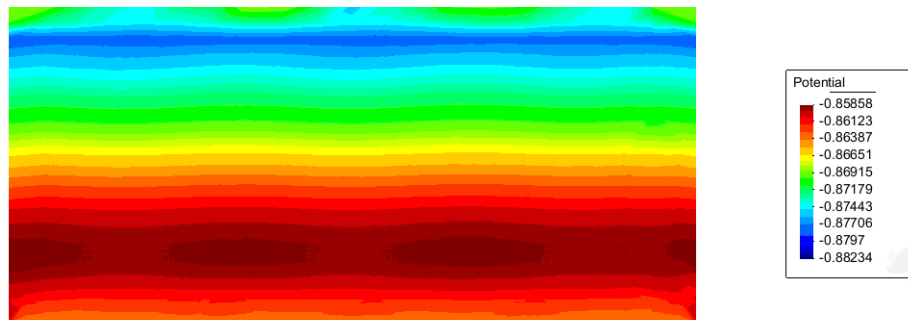
**Figura 5 – Caso 13: (a) Perfil de Potencial nas estacas;  
(b) Distribuição de potencial na cortina metálica.**



Local: Terra

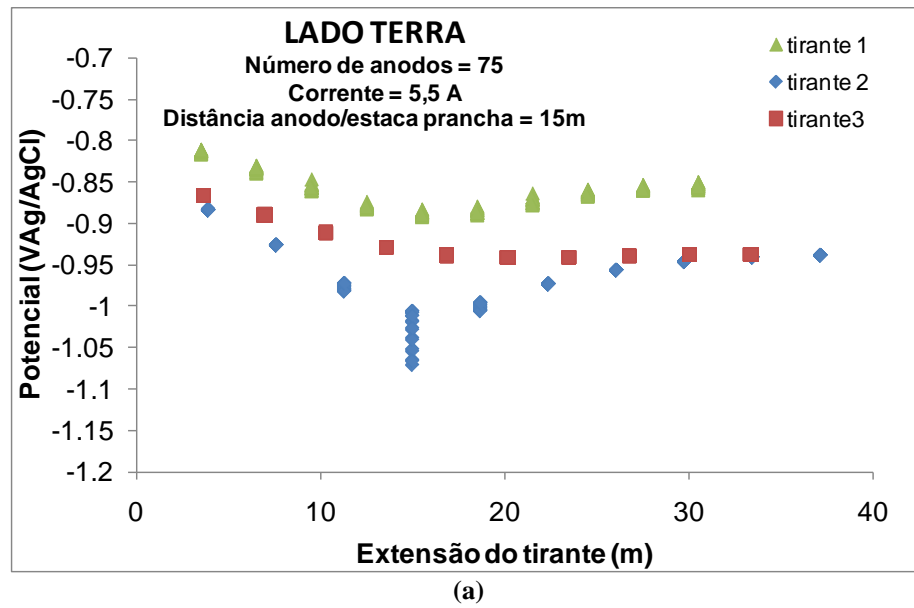
Corrente Impressa: 5,5A

Distância à Estaca-Prancha: 15m - Número de Anodos = 135



(b)

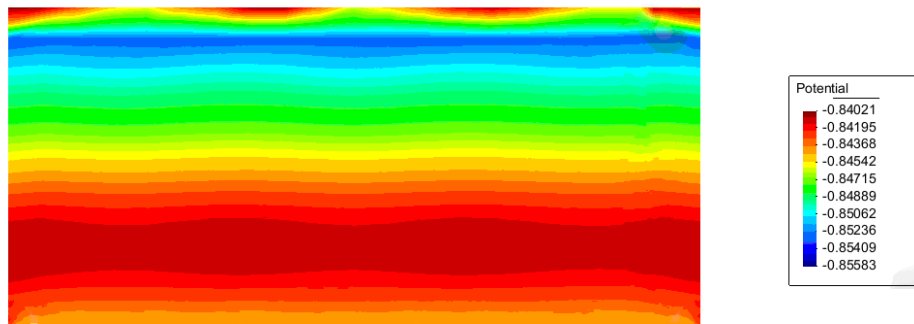
Figura 6 – Caso 15: (a) Perfil de Potencial nos tirantes de fixação;  
(b) Distribuição de potencial na cortina metálica.



Local: Terra

Corrente Impressa: 5,5A

Distância à Estaca-Prancha: 15m - Número de Anodos = 75



(b)

Figura 7 – Caso 17: (a) Perfil de Potencial nos tirantes de fixação;  
(b) Distribuição de potencial na cortina metálica.

---

## Conclusões

---

### Proteção catódica no lado mar

A eficiência do revestimento, a distância anodo/estrutura e a corrente injetada são parâmetros fundamentais para o dimensionamento. A partir de 85% de eficiência foi observada total proteção do trecho de 98m ma, ao considerar eficiência de 80%, o alcance da proteção catódica depende do afastamento do anodo à estrutura e da corrente aplicada.

Com 20m de distância entre anodo e estrutura, é possível a proteção completa do trecho considerado na simulação, de 98m de extensão, com 62,5 A e 75 A, para eficiências de revestimento de 85% e 80% e respectivamente.

Nas simulações, foi observada proteção total a partir de 85% de eficiência do revestimento protetor. No caso mais favorável (90% de eficiência), corrente de 35 A foi suficiente para proteção, estando o anodo a 25 m de distância da estrutura.

### Proteção catódica no lado terra

Foi observada total proteção com a injeção de 5,5A por anodo, com a disposição de 135 anodos (representado proporcionalmente na simulação do trecho de 98m de cortina metálica). Para manter a proteção total deste trecho de 98m, foi possível diminuir o número total de anodos para 75 ou, ainda, reduzir a corrente aplicada para 3A.

---

## Referências bibliográficas

---

- (1) MANSUR,W.J., TELLES,J.C.F., SANTIAGO,J.A.F., “*Boundary Element Technology*”, *Computational Mechanics Publications VI Ed.* C.A.Brebbia, Betech, 1991.
- (2) W.J.MANSUR, L.C.WROBEL, J.C.F.TELLES, J.P.S.AZEVEDO, C.A.BREBBIA, W.S.VENTURINI, “*The PROCAT System for Cathodic Protection Design*”, CML Publications, Southampton, 1987
- (3) S.L.D.C.BRASIL, J.C.F.TELLES, L.R.M.MIRANDA, “On the Effect of Some Critical Parameters in Cathodic Protection Systems: A Numerical/Experimental Study”, **Computer Modeling in Corrosion**, R.Munn Ed., p 277-291, 1992
- (4) W. BAPTISTA, SIMONE L.D.C.BRASIL, J.C.F.TELLES, J.A. F.SANTIAGO, “Avaliação das Condições de Proteção Catódica de Riser Conectado à Plataforma e à Árvore de Natal Molhada”, XXIII CONBRASCORR, Florianópolis, SC, Set 2003
- (5) W.BAPTISTA, S.L.D.C.BRASIL, J.C. F.TELLES, “Assessment of Internal Cathodic Protection in Pipelines for Seawater Collection in Oil Platforms”, **Materials Performance**, vol 43, n.4, p 20-24, Abr 2004.
- (6) W.BAPTISTA, S.L.D.C.BRASIL, J.C. F.TELLES, Evaluating Cathodic Protection on a Steel Catenary Riser Connected to a Platform and a Wet Christmas Tree”, **Materials Performance**, vol 45, n.8, pp 22-25, Ago 2006.
- (7) S.L.D.C.BRASIL, J.C.F.TELLES, J.A.F.SANTIAGO, L.B.S.MARQUES, W.G.CASTINHEIRAS JR, J.P.K.GERVÁSIO, L.C.VIDAL, “Internal Cathodic Protection of Formation Water Pipelines”, **Materials Performance**, vol 49, n.11, p 32-38, Nov 2010.
- (8) S.L.D.C.BRASIL, J.C.F.TELLES, J.A.F.SANTIAGO, L.NERI, “Otimização da Proteção Catódica de Sistema de Refrigeração de Usina Nuclear”, **Corrosão & Proteção**, Aporte Ed., ano 8, n.38, p 22-25, Jul/Ago/2011

- (9) S.L.D.C.BRASIL, J.F.P.COELHO, J.C.F.TELLES, J.A.F.SANTIAGO, “Avaliação da Proteção Catódica de Tubulações em Furos Direcionais”, Intercorr 2010, Fortaleza, Mai 2010