

Copyright 2016, ABRACO

Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2016, em Búzios/RJ no mês de maio de 2016.

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

## **Simulações de diferentes configurações de anodos em sistema de proteção catódica por corrente impressa da área externa de fundo de tanques de armazenamento**

Juliana L. Cardoso<sup>a</sup>, Neusvaldo L. Almeida<sup>b</sup>, Fabiano R. Santos<sup>c</sup>,  
Gutemberg S. Pimenta<sup>d</sup>, Eduardo W. Laurino<sup>e</sup>

### **Abstract**

Unnecessary costs can be avoided using numeric simulations to project cathodic protection systems in industrial facilities. The goal of this study is to employ numeric simulation to define the best configuration of an impressed current cathodic protection (ICCP) system against corrosion of the external face in an atmospheric storage tank (AST) bottom. Results of the simulation of shallow anodes (5 cm under the tank bottoms) are coherent with the measurements obtained on a prototype of tank bottom. However, early simulations of vertical anodes were not successful, indicating that this simulation requires a specific condition to succeed. Thus, considering the soil consumption of oxygen during the reduction reaction, the oxygen was removed from the solution used to obtain polarization curves for the simulation. Then, the results obtained in this new condition indicated a coherent response when compared to the expected profile of polarization of vertical anodes.

**Keywords:** simulation, cathodic protection, tank, soil, base of settlement.

### **Resumo**

Gastos desnecessários com projetos de proteção catódica podem ser evitados com o uso de simulação numérica do sistema de proteção catódica na estrutura que se deseja proteger. O objeto deste estudo é o emprego da simulação para definir a melhor configuração de um sistema de proteção catódica por corrente impressa na proteção contra corrosão em fundo de tanque. Simulações de anodos instalados em baixa profundidade (5 cm do fundo do tanque), apresentaram resultados coerentes com as medidas feitas em modelos em escala reduzida. Por outro lado, simulações iniciais com anodos verticais indicaram que esses precisam de uma condição específica para que o resultado corresponda às medidas de sistemas reais. Assim, considerou-se que ocorre o consumo de oxigênio do meio (solo) pela reação de redução provocada pela polarização e, para tanto, removeu-se o oxigênio da solução de ensaio antes de se levantar as curvas de polarização necessárias à simulação. Os resultados obtidos nessa nova condição apresentaram polarização adequada da chapa de fundo de tanque para anodos verticais.

**Palavras-chave:** simulação, proteção catódica, tanque, solo, base de assentamento.

<sup>a</sup> Doutora em Ciências, Laboratório de Corrosão e Proteção – IPT (jcardoso@ipt.br)

<sup>b</sup> Mestre em Metalurgia, Chefe do Laboratório de Corrosão e Proteção – IPT (neusval@ipt.br)

<sup>c</sup> Tecnólogo em Processos Metalúrgicos, Laboratório de Corrosão e Proteção – IPT

<sup>d</sup> Consultor Sênior, PETROBRAS/CENPES

<sup>e</sup> Consultor Técnico, PETROBRAS TRANSPORTE S.A.

## **Introdução**

---

A simulação computacional de sistemas de proteção catódica para fundo de tanques é uma ferramenta promissora para auxiliar na elaboração de projetos e também no entendimento da atuação do sistema de proteção catódica e tem sido recentemente estudada (1)-(5).

A corrosão verificada nas chapas de fundo é um processo dependente da presença de água, em geral condensada na superfície metálica e com origem no solo da base de assentamento do tanque. Assim, assume-se que as curvas de polarização obtidas em meio aquoso e utilizadas na simulação do sistema de proteção catódica são representativas do processo que ocorre nas superfícies metálicas envolvidas. Além disso, se o meio de ensaio reproduzir as condições de condutividade da base de assentamento, então a curva de polarização irá corresponder à condição de polarização por resistência que ocorre na interface da chapa ou do anodo com a base de assentamento (6).

Em sistemas de proteção catódica que utilizam anodos horizontais instalados logo abaixo da chapa de fundo de tanque (5 cm), a baixa profundidade permite a permeação do oxigênio no solo e repõe o oxigênio consumido durante a polarização da chapa de fundo. Quando um sistema de proteção catódica é composto por anodos verticais, por outro lado, o anodo fica posicionado a uma profundidade maior no solo (por exemplo 5 m), o que dificulta a reposição do oxigênio.

Outra consideração importante é que se a chapa de assentamento, quando em contato direto com o solo, isto é, considerando que o tanque de armazenamento está cheio, dificulta a reposição do oxigênio do solo logo abaixo das chapas, esgotando assim o oxigênio inicialmente presente na interface chapa/solo. Com isso, torna-se importante indicar ao simulador que o sistema está operando sem a presença de oxigênio (7).

Neste trabalho, utilizando o programa Beasy, foram realizadas simulações de sistemas de proteção catódica com curvas de polarização levantadas sem a presença de oxigênio. Os dados obtidos com as simulações são comparados e discutidos, evidenciando a importância da análise das condições de instalação do sistema de proteção catódica para a obtenção de resultados de simulação mais coerentes e próximos da realidade. É importante ressaltar que existem outras configurações de anodo possíveis de serem utilizadas em fundo de tanques (8), porém os anodos horizontais e os anodos verticais são configurações que atendem à comparação de resultados que é proposta.

## **Metodologia**

---

### **1. Modelos computacionais e parâmetros de simulação**

Os parâmetros de entrada de um modelo computacional de sistema de proteção catódica são as propriedades físicas e características de um eletrólito, a geometria do anodo e do catodo (tamanho e localização), a característica de polarização dos materiais envolvidos como eletrodos ativos e a ligação elétrica entre cada uma das partes (9), (10).

O modelo computacional de anodo horizontal em grade e os parâmetros de simulação apresentados nesse trabalho foram baseados em um modelo físico em escala reduzida de um fundo de tanque de armazenamento assentado em solo descrito em trabalhos anteriores (5).

Desse modelo físico foram utilizados no modelo computacional os parâmetros como a dimensão da chapa (2 m de diâmetro), as características do solo (condutividade de  $141 \mu\text{S cm}^{-1}$ ), as respostas eletroquímicas dos materiais da chapa e do anodo (curvas de polarização) e a ausência de contaminação com cloretos. Essas informações contribuíram para as simulações dos anodos horizontais e verticais apresentados. No modelo computacional com anodo horizontal, também foi utilizado o formato em grade e a posição do anodo em relação à chapa.

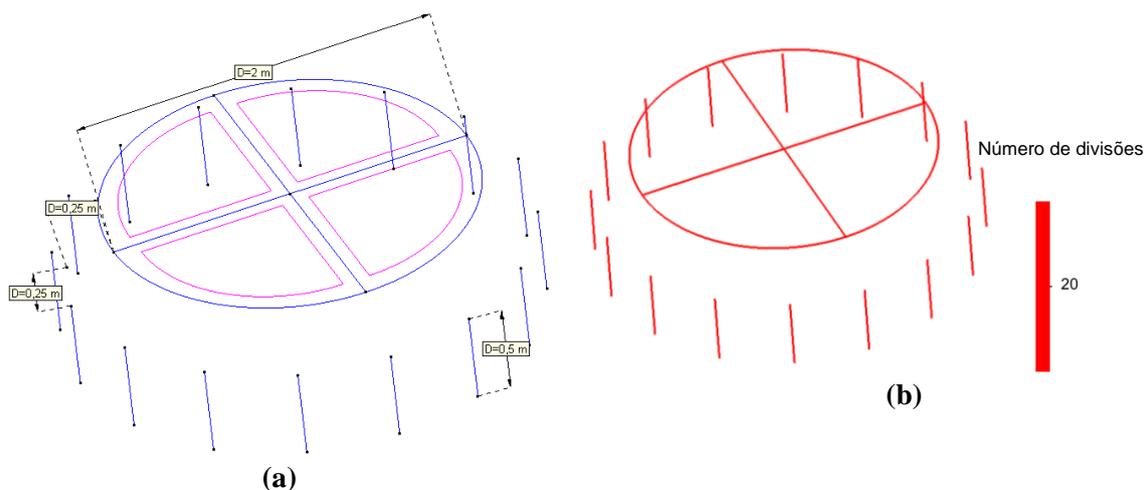
Medidas realizadas no modelo físico, com o sistema de proteção catódica atundo e polarizando a chapa com pelo menos  $-850 \text{ mV}$  ( $\text{Cu}|\text{CuSO}_4(\text{sat})$ ), indicaram que o valor de potencial no retificador se encontrava em  $3,44 \text{ V}$ . Esse valor de potencial foi utilizado como valor inicial de polarização nas simulações apresentadas.

A simulação de um modelo computacional envolve a solução de dois problemas interligados: o eletrólito e o circuito externo. O primeiro envolve o eletrólito e todas as estruturas ao seu redor, incluindo os eletrodos ativos (anodos e catodos) e as superfícies isolantes limitando o eletrólito (geomembrana), enquanto que o segundo incorpora a resistência do circuito de componentes discretos como retificadores, cabos e shunts, quando houver (10).

O programa Beasy utiliza equações de Kirchhoff para resolver as equações de circuito elétrico, que fornecem a distribuição da tensão nos anodos. O modelo matemático de queda de potencial no eletrólito, descrito por uma equação de Laplace, é resolvido utilizando Métodos de Elementos de Contorno. Finalmente, a relação entre a densidade de corrente e a diferença de potencial, por ser não linear, é obtida de forma iterativa (10).

### 1.1. Fundo de tanque com anodos verticais distribuídos ao longo da periferia

Os anodos verticais distribuídos ao longo da periferia foram simulados ao redor de uma chapa com 2 m de diâmetro, apresentado na Figura 1. Essa configuração de anodos é a instalação mais comum de sistema de proteção catódica para fundo de tanque de armazenamento, principalmente quando o sistema de proteção é instalado após a construção do tanque (11).

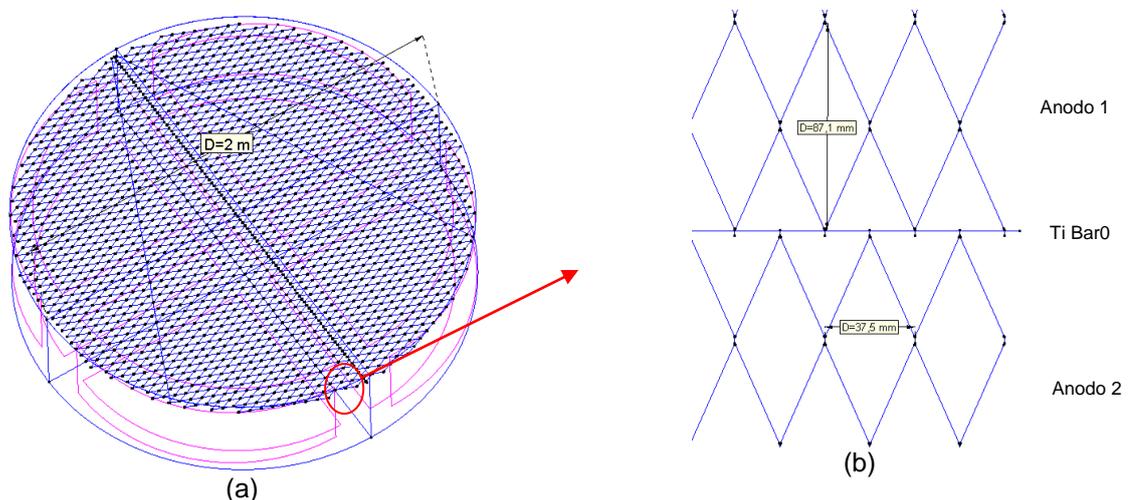


**Figura 1** – (a) Descrição geométrica de uma chapa de 2 m de diâmetro com anodos verticais ao longo da periferia e (b) número de divisões da malha de cálculo em cada estrutura do modelo.

Foram posicionados 16 anodos ao longo da periferia da chapa, conforme mostrado na Figura 1a. Os anodos foram representados com comprimento de 0,5 m e diâmetro de 25 mm. O topo dos anodos está instalado 0,25 m abaixo da chapa e 0,25 m afastados da borda da mesma. Anodos com as dimensões indicadas, fabricados em MMO, são comerciais (12). A malha de cálculo utilizada nesse modelo é apresentada na Figura 1b, em que todas as estruturas foram definidas com 20 divisões. O resultado é a malha de cálculo composta por 2 740 elementos. A quantidade de elementos no modelo é proporcional à sua complexidade geométrica. Nesse modelo não foram utilizadas barras condutoras de Ti, uma vez que a instalação dos anodos permite que sejam ligados diretamente ao retificador por meio de cabos de cobre.

## 1.2. Fundo de tanque com anodo em grade

Na Figura 2a é apresentada a descrição geométrica do modelo computacional, seguindo as características da base de assentamento de um fundo de tanque com 2 m de diâmetro. Nesse modelo, o anodo está posicionado horizontalmente, paralelo à chapa de fundo, com 5 cm de distância entre o anodo e a chapa de fundo.



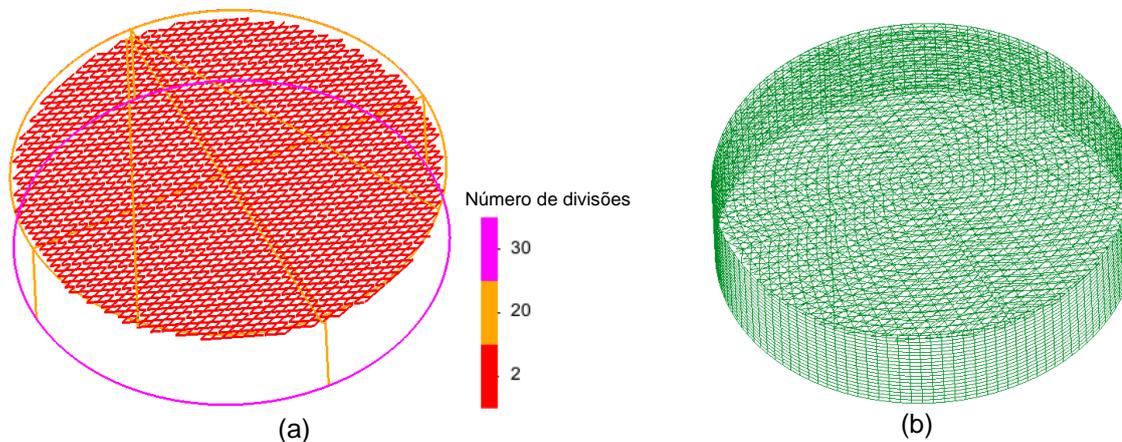
**Figura 2** – (a) Descrição geométrica do modelo computacional de fundo de tanque e (b) detalhe da grade de MMO com a barra condutora de Ti.

O anodo, baseado em uma peça comercial, formado por duas chapas expandidas de Ti recobertas por MMO, com área transversal de cada filamento de  $1 \text{ mm}^2$ . Essas chapas são unidas pela barra condutora central, soldada unindo as duas partes do anodo. A área da seção transversal das barras condutoras é de  $12,7 \text{ mm}^2$ .

A chapa de fundo de tanque é descrita por uma superfície de um círculo com raio de 1 m. Também foi considerado o emprego de uma geomembrana, representada pela superfície lateral de um cilindro de raio igual a 1 m. A instalação da geomembrana em fundo de tanque segue a recomendação da norma API 650 de 2012 (13).

A etapa seguinte à representação geométrica para a simulação do fundo de tanque é a definição da malha de cálculo do modelo, que está indicada na Figura 3. Quanto mais densa a malha de cálculo, maior a precisão do resultado e mais tempo é consumido na realização dos cálculos. Procurou-se gerar uma malha com duas divisões para cada linha que compõe o

anodo, uma vez que essa estrutura já possui um alto detalhamento geométrico. Para as estruturas com menos detalhes, como as barras de Ti, a chapa de fundo e a geomembrana, foram geradas malhas com número maior de divisões, conforme apresentado na Figura 3a. O resultado é a malha de cálculo apresentada na Figura 3b, composta por 134 593 elementos.



**Figura 3** – (a) Número de divisões da malha em cada estrutura do modelo e (b) representação da malha.

Criado o modelo, a próxima etapa consistiu em fornecer ao simulador as características dos materiais, conforme empregados no modelo físico. Curvas de polarização dos materiais utilizados na chapa de fundo de tanque (catodo), das barras de Ti e da grade de MMO (anodo) estão indicadas nas Figura 4 a Figura 6, nas condições aerada e desaerada.

### 1.3. Parâmetros de simulação

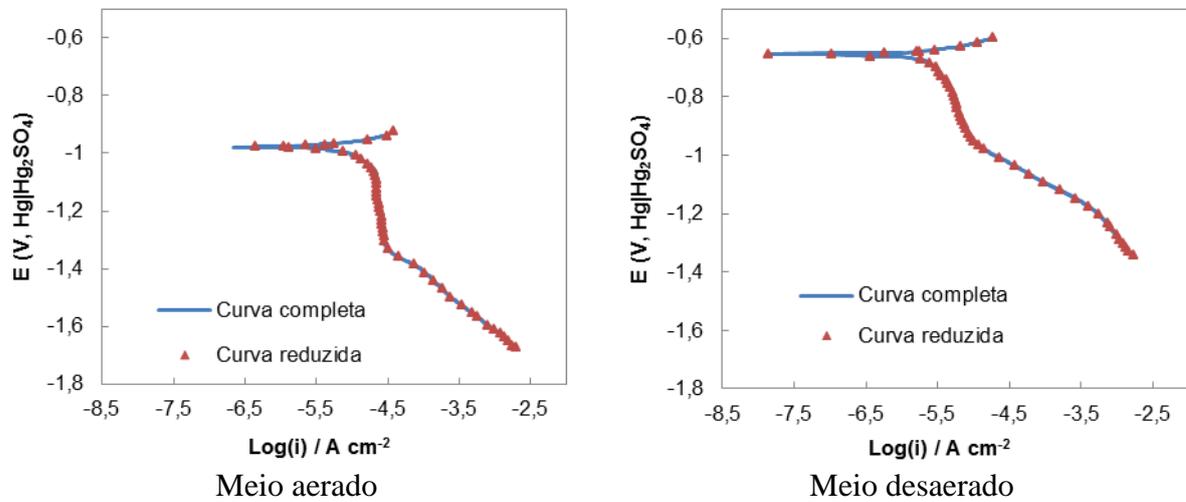
As curvas de polarização para as simulações foram obtidas com o potenciostato modelo 273A da *Princeton Applied Research*. Como eletrodo de referência, utilizou-se o  $\text{Hg}|\text{Hg}_2\text{SO}_4$  em solução saturada de  $\text{K}_2\text{SO}_4$  ( $E = 643 \text{ mV}$ , ENH), incluindo um capilar de *Luggin*. Como eletrodo auxiliar foi empregado uma tela de Pt, com área de aproximadamente  $45 \text{ cm}^2$ . As curvas foram levantadas com velocidade de varredura de  $0,166 \text{ mV s}^{-1}$ , conforme norma ASTM G59 (14), e a temperatura de  $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ .

Para que o simulador pudesse calcular os valores de potencial em relação ao eletrodo de referência de  $\text{Cu}|\text{CuSO}_4(\text{sat})$  ( $E = 300 \text{ mV}$ , ENH), os valores de potencial da curva de polarização foram previamente convertidos para o eletrodo de  $\text{Cu}|\text{CuSO}_4(\text{sat})$ .

O meio utilizado na obtenção da curva procurou mimetizar a resistividade do solo empregado na montagem de um modelo físico em escala reduzida (5) com condutividade de  $141 \mu\text{S cm}^{-1}$ . Para tanto, foi preparada uma solução com  $0,098 \text{ g L}^{-1}$  de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , em que se mediram pH 6,6 e condutividade de  $140,6 \mu\text{S cm}^{-1}$ . Na simulação que considera solo aerado, a solução foi agitada ao ar com barra magnética durante 1 h antes de se obterem as curvas de polarização. Para a simulação que considera solo desaerado, na solução foi borbulhado gás nitrogênio (pureza 99,999 %), considerando 1 h de desaeração por litro de solução.

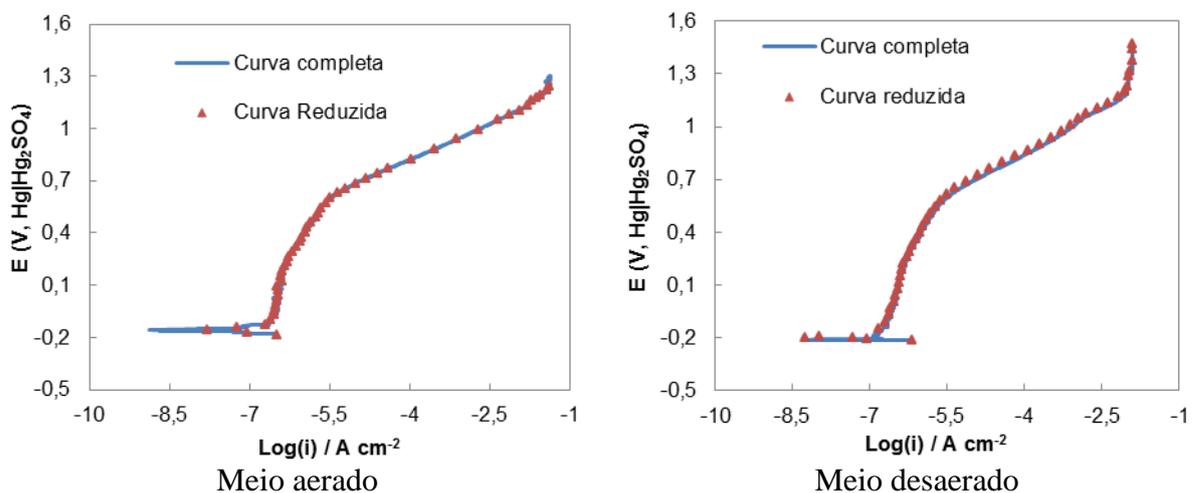
As curvas de polarização do material da chapa de fundo (ou catodo, mostradas na Figura 4) foram obtidas com eletrodo de trabalho construído com uma amostra da chapa de aço carbono

ASTM A 36, de área  $1 \text{ cm}^2$  e embutida em resina epóxi de cura fria. Previamente à obtenção da curva, o eletrodo teve a superfície polida com alumina e desengraxada em etanol.



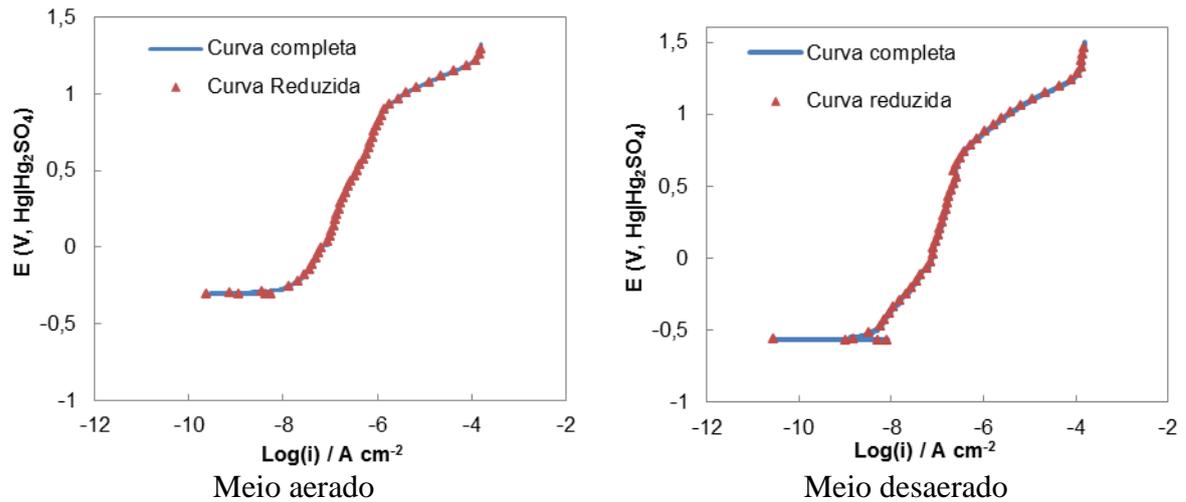
**Figura 4** – Curvas de polarização do catodo em aço A36 (chapa).

As curvas de polarização do anodo de MMO (mostradas na Figura 5) foram obtidas com eletrodo de trabalho construído com uma amostra do anodo em grade, de área de  $1 \text{ cm}^2$  e embutida em resina epóxi de cura fria. Previamente à obtenção da curva, o eletrodo teve a superfície desengraxada com etanol. A resistência ao longo do comprimento da grade de MMO é de  $0,080 \Omega \text{ m}^{-1}$  conforme catálogo do fabricante, porém essa informação não foi utilizada nas simulações devido ao agrupamento de estruturas do modelo de anodo utilizado.



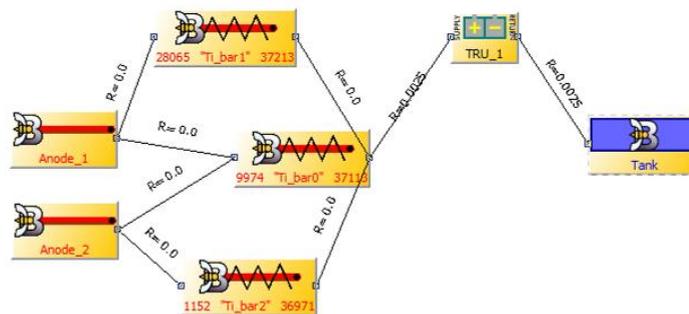
**Figura 5** – Curvas de polarização do anodo de MMO em grade.

As curvas de polarização das barras condutoras de Ti (apresentadas na Figura 6) foram obtidas com eletrodo de trabalho construído com uma amostra da barra de titânio do anodo em grade, de área de  $2,5 \text{ cm}^2$  e embutida em resina epóxi. Foi utilizado na simulação o valor da resistência ao longo do comprimento da barra de  $0,052 \Omega \text{ m}^{-1}$ , conforme catálogo do fabricante.



**Figura 6** – Curvas de polarização das barras de distribuição de Ti, que fazem parte do anodo.

Na Figura 7 é apresentado o circuito elétrico de simulação que corresponde ao modelo físico. As resistências entre os terminais da fonte de tensão correspondem aos fios de ligação entre esse, o anodo e a chapa. As ligações entre as barras de distribuição e os anodos foram consideradas com resistência nula por serem partes soldadas diretamente uma as outras.

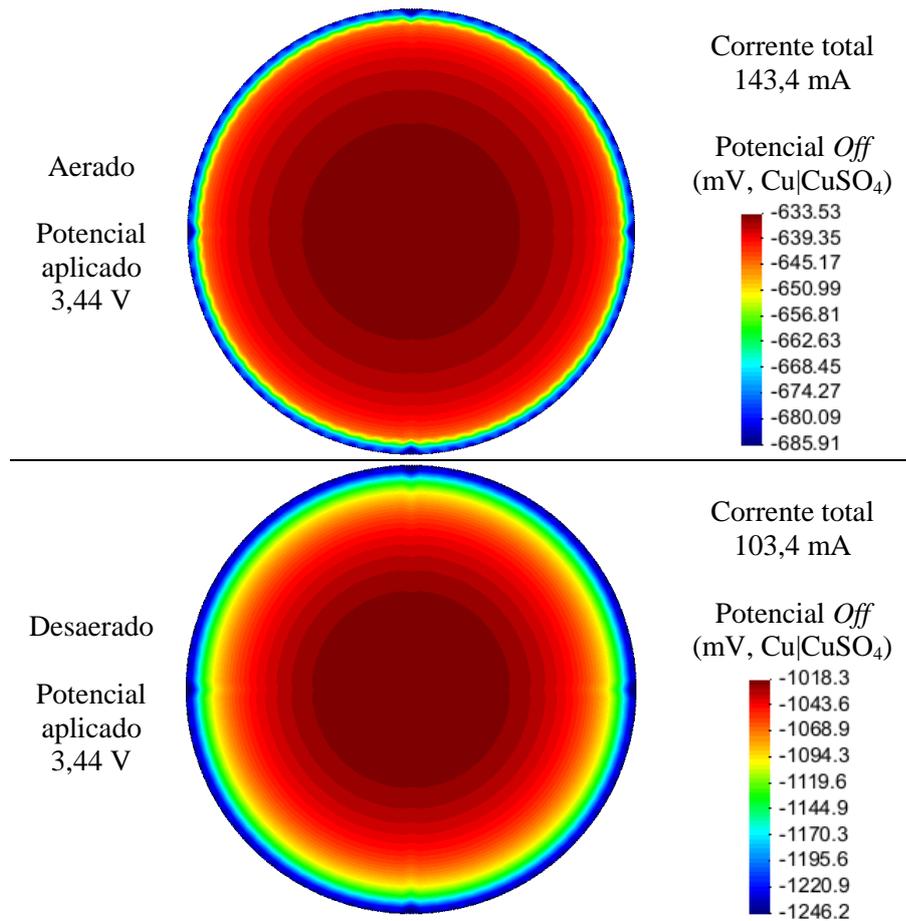


**Figura 7** – Circuito elétrico que corresponde à instalação do sistema de proteção catódica do modelo físico.

As simulações foram realizadas com tolerância de desvio de tensão dos valores das curvas de polarização de até 0,5 mV. A tolerância da porcentagem de erro de corrente é de até 1 % e o tipo de elemento utilizado na resolução foi constante. A posição de referência de tensão é a própria chapa de tanque.

## Resultados e discussão

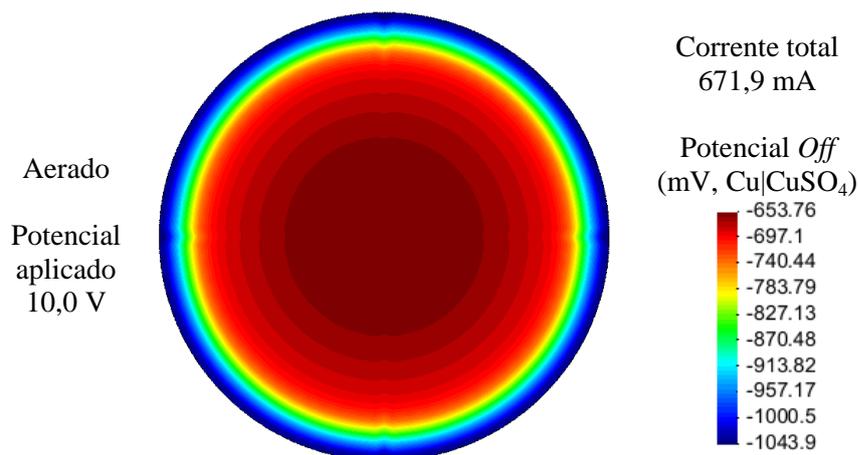
Na Figura 8 são apresentados os resultados das simulações do modelo de proteção catódica, utilizando anodos verticais distribuídos ao longo da periferia da chapa e com aplicação de potencial externo de 3,44 V. Nessas simulações foram utilizadas as curvas de polarização obtidas em meio com aeração natural (com a presença de oxigênio) e em meio desaerado (sem a presença de oxigênio).



**Figura 8** – Resultados das simulações do sistema de proteção catódica com anodos verticais ao longo da periferia e chapa de 2 m de diâmetro, com aplicação de 3,44 V.

Notam-se polarizações bastante distintas entre as simulações realizadas com o meio aerado e o meio desaerado. Potenciais menos negativos são verificados na condição de meio aerado ( $\bar{E} = -659,7$  mV, Cu|CuSO<sub>4</sub>) em relação ao meio desaerado ( $\bar{E} = -1132,2$  mV, Cu|CuSO<sub>4</sub>), uma vez que em meio aerado parte da corrente é consumida pela reação de redução do oxigênio, que pode ser também verificado pelo valor maior de corrente na condição areada. Em meio aerado, portanto, não foi possível atingir potenciais de proteção.

Na Figura 9 é apresentado o resultado da simulação do sistema de proteção catódica utilizando anodos verticais, em meio aerado e com aplicação de potencial externo de 10,0 V. Com isso, busca-se verificar se o aumento do potencial aplicado consegue impor potenciais de proteção na superfície da chapa na condição aerada.



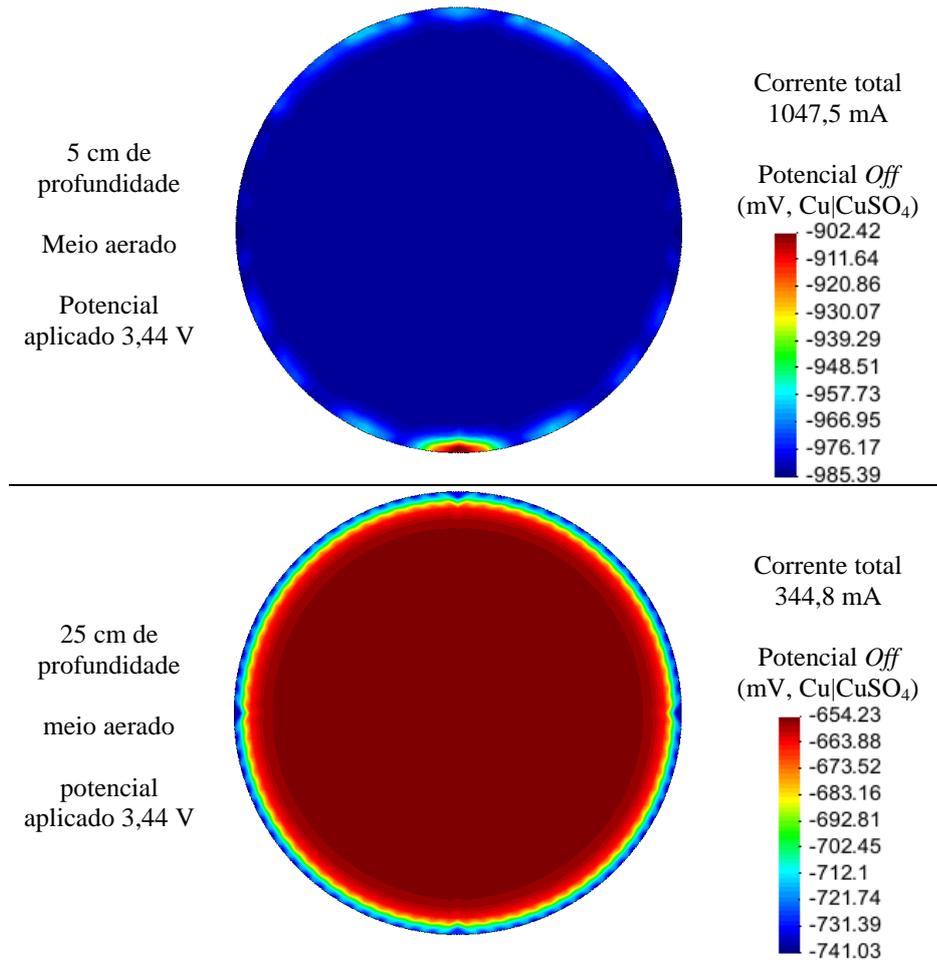
**Figura 9** – Resultado da simulação do sistema de proteção catódica com anodos verticais ao longo da periferia em meio aerado para chapa de 2 m de diâmetro, com aplicação de 10,0 V.

O resultado (Figura 9) indica que houve maior variação do potencial ao longo da chapa com a aplicação de 10 V. A periferia da chapa alcançou potencial de proteção, porém o centro da mesma está menos negativo que -850 mV (Cu|CuSO<sub>4</sub>). Nota-se que a demanda de corrente foi bastante elevada, porém não suficiente para garantir a polarização uniforme da superfície. Esse resultado mostra que em condição aerada, mesmo com o aumento do potencial aplicado, consegue-se proteção apenas na periferia da chapa.

Os valores de corrente apresentados, que foram calculados pelo simulador são interessantes para enriquecer a comparação entre os resultados de simulação, porém não devem ser diretamente relacionados com as estruturas reais. A simulação está limitada às curvas de polarização inseridas para calcular os resultados apresentados. Porém, as curvas de polarização obtidas em meio aquoso não refletem algumas condições de superfície da chapa verificada na instalação real sob um tanque.

O acabamento superficial da superfície da chapa instalada e a superfície do eletrodo utilizado na obtenção da curva de polarização são bastante diferentes. A superfície do eletrodo foi polida para que as curvas de polarização obtidas fossem reproduzíveis. Uma dispersão de dados muito grande seria verificada se fosse utilizado o material oxidado, devido a possível variação de condição de espessura e composição dos óxidos formados naturalmente na superfície do metal (16). A chapa que geralmente é instalada em um fundo de tanque é utilizada conforme recebida do fornecedor, com a superfície previamente oxidada. Outra consideração é a área efetiva de metal em contato com a base de assentamento. Como a chapa real pode não estar perfeitamente em contato com o solo logo abaixo, um valor de corrente menor seria necessário para a polarização devido a esse menor contato estabelecido. No simulador, porém, considera-se contato perfeito entre a chapa e a base de assentamento, exigindo uma quantidade de corrente maior para a polarização.

Na Figura 10 são apresentados os resultados das simulações feitas com potencial aplicado de 3,44 V (Cu|CuSO<sub>4</sub>(sat)), considerando anodo em grade posicionado a 5 cm e a 25 cm, paralelamente à chapa.

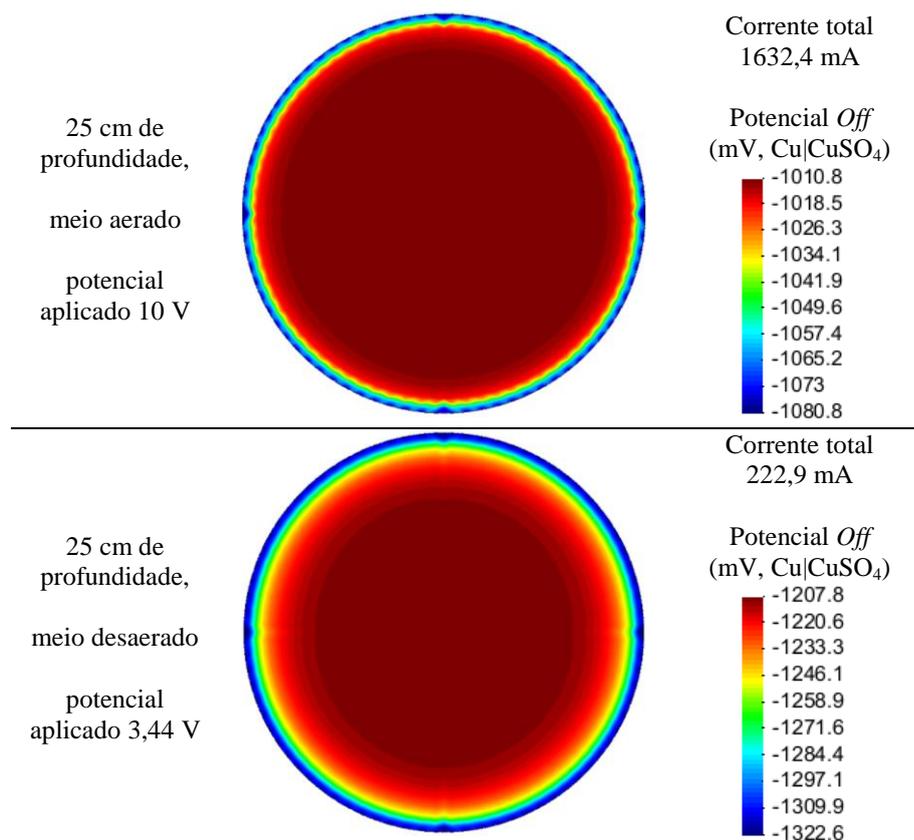


**Figura 10** – Resultado da simulação do protótipo de fundo de tanque de 2 m de diâmetro, com anodo em grade, com aplicação de 3,44 V, utilizando curvas de polarização obtidas em meio aerado.

Nota-se que na simulação com o anodo à distância de 5 cm da chapa, o resultado indica que houve pouca variação do potencial ao longo da chapa e atingiram-se potenciais de proteção ( $\bar{E} = -943,9$  mV, Cu|CuSO<sub>4</sub>(sat)). O potencial menos negativo foi verificado em uma única região da extremidade da chapa, em que a densidade da malha de anodos é menor. Na simulação com o anodo à distância de 25 cm da chapa, os potenciais resultantes não atingiram a condição de proteção. O valor médio de potencial *Off* apresentado pelo simulador foi de  $\bar{E} = -697,6$  mV (Cu|CuSO<sub>4</sub>(sat)). O resultado indica que houve pouca variação do potencial ao longo da chapa.

O valor de corrente indicado para o anodo posicionado a 5 cm da chapa é naturalmente maior que para o anodo a 25 cm devido a menor resistência do meio na distância menor.

Na Figura 11 são apresentados os resultados da simulação feita com anodo posicionado a 25 cm da chapa, buscando condições de polarizar a chapa com potencial de proteção. Para tanto, foram realizadas duas simulações: a primeira elevando o potencial aplicado para 10 V, em condição de meio aerado e a segunda mantendo o potencial de 3,44 V, porém em condição de meio desaerado.



**Figura 11** – Resultado da simulação do protótipo de fundo de tanque com anodo em grade, com aplicação de 10 V com curvas de polarização em meio aerado e 3,44 V com curvas de polarização em meio desaerado.

Ambas as condições simuladas resultaram em polarizações com potenciais mais negativos que a condição de proteção. Na simulação com o potencial aplicado de 10 V em meio aerado, o valor médio de potencial *Off* apresentado pelo simulador foi de  $\bar{E} = -1045,8$  mV (Cu|CuSO<sub>4</sub>). Na simulação com o potencial aplicado de 3,44 V em meio desaerado, o valor médio de potencial *Off* apresentado pelo simulador foi de  $\bar{E} = -1265,2$  mV (Cu|CuSO<sub>4</sub>) que já é considerado como superproteção, podendo causar evolução do gás hidrogênio (15).

É interessante notar que em meio aerado, a polarização com potencial de proteção necessita de valores de corrente de aproximadamente 1 A, enquanto que em meio desaerado correntes da ordem de 200 mA promovem superproteção da chapa de fundo.

## Conclusões

O conhecimento prático de sistemas de proteção catódica aponta que as áreas centrais de fundos de tanques de grandes diâmetros são críticas do ponto de vista do alcance da corrente de proteção. Compreender a influência dos parâmetros de entrada na simulação é determinante para que se consiga reproduzir com maior propriedade os valores de densidade de corrente, e potenciais *On* e *Off*. A simulação de sistemas de proteção catódica para fundos de tanques de armazenamento é uma ferramenta importante no estudo de tanques assentados em areia. Naturalmente, as condições existentes em campo dificilmente poderão ser representadas por meio de simulação.

Uma constatação de grande importância neste trabalho é procurar estabelecer o que deve ser considerado no levantamento da curva de polarização. Quanto mais representativa ela for do meio envolvido, melhor será a resposta da simulação. Por exemplo, o grau de aeração do meio é determinante para que se consiga polarizar uma estrutura. Portanto há que considerar nas simulações a presença ou ausência de oxigênio na interface metal/solo.

As simulações apresentadas demonstram a influência da presença do oxigênio nos resultados da polarização de um tanque hipotético. A condição desaerada é mais representativa para tanques com sistema de proteção catódica composto por anodos verticais instalados na periferia do tanque. Por outro lado, em sistemas de proteção catódica que utilizam anodos horizontais paralelos ao fundo, a profundidade do anodo é determinante para a definição do tipo de aeração mais adequado. De forma geral, a desaeração do meio facilita a polarização da chapa, corroborando resultados publicados por outros autores (7).

É importante ressaltar que, nessas simulações, se considerou aeração uniforme do solo abaixo da chapa. Porém, sabe-se que a concentração de oxigênio pode variar devido à movimentação cíclica do fundo em função do enchimento ou esvaziamento do tanque (7).

### Referências bibliográficas

- (1) ADEY, R.A.; BAYNHAM, J.M.W. Simulation Assisted Design of Storage Tank Base ICCP. Proceedings of NACE Corrosion, San Antonio, USA, 2010.
- (2) SCHULTZ, M. et al. Proteção catódica de fundo de tanques de armazenamento: resultados experimentais e numéricos. Proceedings of 24<sup>o</sup> CONBRASCORR, Rio de Janeiro, Brasil, 2004.
- (3) VITTONATO, J.; BAYNHAM, J. General Consideration about Current Distribution and Potential Attenuation Based on Storage Tank Bottom Modeling Study. Proceedings of NACE Corrosion, Salt Lake City, USA, 2012.
- (4) ADEY, R.; BAYNHAM, J.; PERRATA, C. Modeling of Impressed Current Cathodic Protection Anode Arrangements for Storage Tank Bottoms. Proceedings of IDETC, Washington DC, USA, 2011.
- (5) CARDOSO, J. L.; ALMEIDA, N. L.; PIMENTA, G. S.; SANTOS, F. R.; LAURINO, E. W. Simulação de sistemas de proteção catódica aplicada a área externa do fundo de tanques de armazenamento atmosférico. Proceedings of 35<sup>o</sup> CONBRASCORR, Cabo de Santo Agostinho, Brasil, 2015.
- (6) WOLYNEC, S. **Técnicas Eletroquímicas em Corrosão**. São Paulo: EdUSP, 2003.
- (7) RIEMER, D.P.; ORAZEM, M.E. A mathematical model for the cathodic protection of tank bottoms. **Corrosion Science**, v. 47, p. 849-868, 2005.
- (8) GARRITY, K. C.; URBAS, M. Cathodic protection of external tank bottoms. **Materials Performance**, April, p. 32, 1988.
- (9) HOGAN, E.A. et al. Validation plan for boundary element method modeling of impressed current cathodic protection system design and control response. **WIT Transactions on Engineering Sciences**, v. 54, p.113-122, 2007.
- (10) ADEY, R.A.; BAYNHAM, J.M.W. Simulation Assisted Design of Storage Tank Base ICCP. Proceedings of NACE Corrosion, San Antonio, USA, 2010.
- (11) CHATTERJEE, B. Prevention of External (Soil Side) Corrosion on Storage Tank Bottom Plates by Cathodic Protection System. Proceedings of NACE Corrosion, New Orleans, USA, 2008.

- (12) DE NORA, Lida tubular anodes. Disponível em: [http://www.mesaproducts.com/CMS\\_Files/ProductSpecs/LidaTubular.pdf](http://www.mesaproducts.com/CMS_Files/ProductSpecs/LidaTubular.pdf). Acesso em: 17 de março de 2016.
- (13) API standard 650, 2007 (2012), Welded Tanks for Oil Storage, American Petroleum Institute, API, Washington, DC, 2012, [www.api.org](http://www.api.org).
- (14) ASTM standard G59, 1997 (2014), Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements, ASTM International, ASTM, West Conshohocken, PA, 2014, [www.astm.org](http://www.astm.org).
- (15) DUTRA, A. C.; NUNES; L. P. **Proteção catódica: técnica de combate à corrosão**. 5ª edição. Rio de Janeiro: Interciência, 2011.
- (16) STRATMANN, M.; MÜLLER, J. The mechanism of the oxygen reduction on rust-covered metal substrates. **Corrosion Science**, v. 36, p. 327-359, 1994.