Copyright 2010, ABRACO
Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2010, em Fortaleza/CE no mês de maio de 2010.
As informações e opiniões contidas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade do(s) autor(es).

Avaliação da Proteção Catódica de Tubulações em Furos Direcionais

Simone L. D. C. Brasil[1], J.Fernando P. Coelho[2],
José Cláudio F. Telles[3], José Antonio F. Santiago[4]

Abstract

The construction of pipelines in horizontal directional drilling on rivers crossings, roads crossings or shore approaches is becoming more frequent. The protection against corrosion is achieved by using protective coatings and galvanic anodes in the external region of the directional bore. In some cases, the distance between the beginning of the pipeline and the first galvanic anode is more than one kilometer, which may result in the absence of cathodic protection in part of the pipeline, depending on the features of the project. Besides, in the installation process, the protective coating may be damaged, and compromises the effective protection of the pipeline. In practice, it is difficult to use potential measures to evaluate the cathodic protection levels of the pipelines in directional bore. Thus, the use of numerical simulations seems to be a great alternative to evaluate the influence of parameters such as: coating efficiency, physical-chemical characteristics of the soil and geometry of the system. In this work, two pipelines in directional bores have been numerical analyzed and the results are presented. In one of the simulations, the galvanic anodes were able to cathodically protect the pipeline while in the other, additional impressed current anodes were necessary in order to protect the whole pipeline. Some parameters that influence the cathodic protection of pipelines in horizontal directional drilling are also analyzed in this work.

Resumo

Tem sido cada vez mais freqüente a construção de tubulações em furos direcionais em travessias de rios, cruzamentos de estradas ou *shore approaches*. Tendo em vista não ser possível a instalação de anodos no interior do furo direcional, a proteção contra a corrosão se dá através do uso de revestimentos protetores e instalação de sistemas de proteção catódica na região externa ao furo direcional. Em algumas situações na região de *shore approach*, a distância entre o início da tubulação e o primeiro anodo galvânico é superior a um quilômetro, o que pode significar ausência de proteção catódica em parte da tubulação, dependendo das características do projeto. Além disso, no processo de instalação podem ocorrer danos ao revestimento protetor, comprometendo ainda mais a proteção efetiva de parte da tubulação. Na prática, observa-se uma grande dificuldade na realização de medições capazes de avaliar

[1] DSc., Escola de Química/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil
[2] Engenheiro, PETROBRAS, Brasil
[3] Ph.D, COPPE/UFRJ, Brasil
[4] D.Sc., COPPE/UFRJ, Brasil

os níveis de proteção catódica das tubulações em furo direcional. Desta forma, o uso de simulação numérica se apresenta como uma grande alternativa para a avaliação da influência exercida por parâmetros ligados à eficiência do revestimento, características do solo e geometria do sistema. Neste trabalho são apresentadas as análises numéricas de tubulações em furos direcionais, sendo observado o alcance total da proteção catódica em apenas uma das tubulações. São analisados os parâmetros que influenciam neste processo.

Palavras-chave: proteção catódica, tubulações, furo direcional

Introdução

O processo de perfuração horizontal dirigida (HDD em sua sigla em inglês) representa um aperfeiçoamento significativo sobre os métodos tradicionais de instalação de dutos sob acidentes geográficos e obstáculos, tais como, rios, praias e rodovias.

As ferramentas e técnicas utilizadas no processo de perfuração horizontal dirigida são resultado da indústria de perfuração de poços de petróleo. Os componentes do equipamento de perfuração horizontal utilizados na construção de dutos são similares àqueles de perfuração de poços de petróleo, sendo a única diferença que o equipamento de perfuração horizontal é equipado com uma rampa inclinada, ao invés do mastro vertical. As operações do furo-piloto não são nada diferentes daquelas envolvidas na perfuração de poços de petróleo.

O tubo de perfuração e as ferramentas de poço são geralmente intercambiáveis e o fluido de perfuração é usado ao longo da operação para transportar os resíduos da perfuração, reduzir o atrito e estabilizar o furo.

A instalação do duto através de perfuração horizontal dirigida é geralmente executada em três estágios como ilustrado na Figura 1. O primeiro estágio consiste na perfuração horizontal de um furo piloto de pequeno diâmetro ao longo do caminho projetado. O segundo estágio envolve o alargamento do furo piloto até o diâmetro que acomodará o duto. A terceira e última fase é completada pelo puxamento do duto pelo furo alargado.

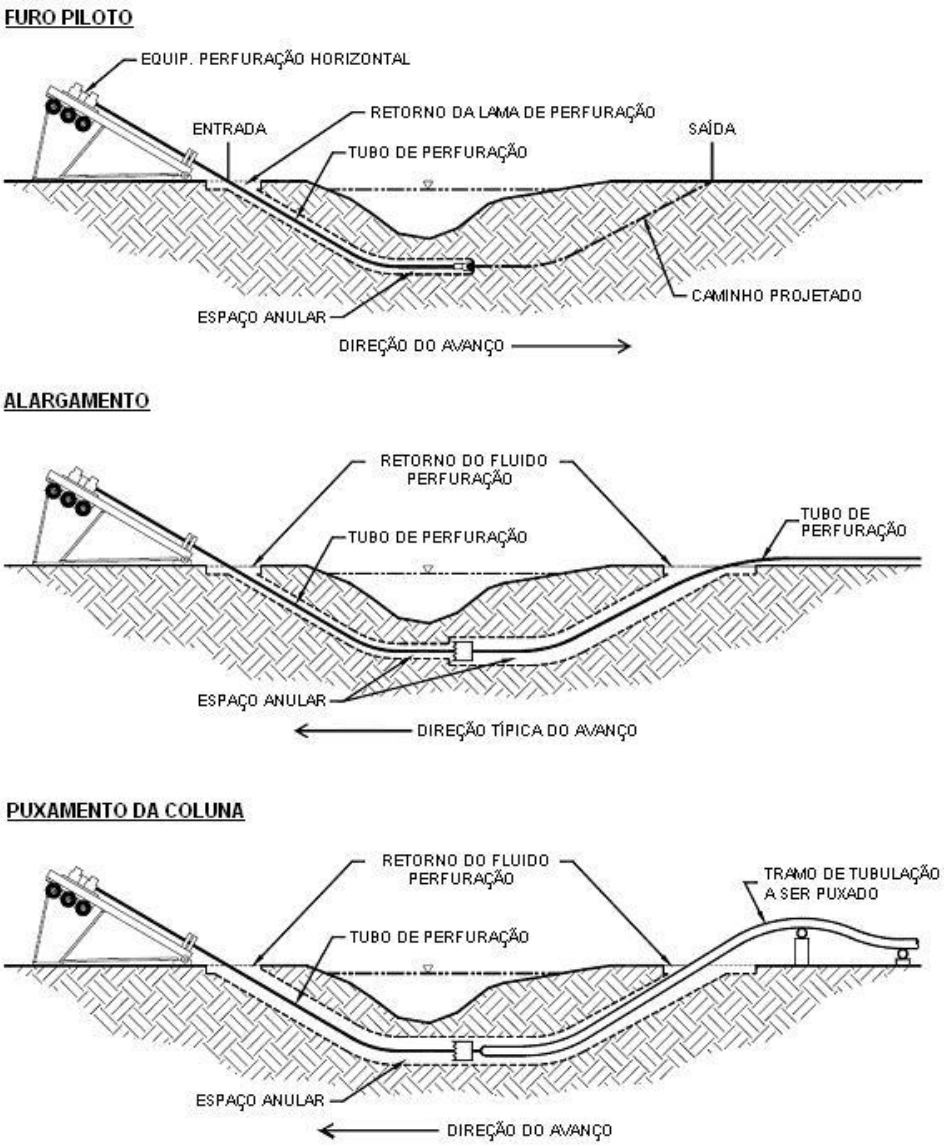


Figura 1 – Fases da Perfuração Horizontal Dirigida

A instalação de dutos em furos direcionais tem crescido significativamente nos últimos 20 anos. O furo direcional está sendo utilizado com maior freqüência em solo. A instalação em rocha dura pode ser extremamente prejudicial à integridade do revestimento e, nesse particular, existem poucas informações sobre os danos aos revestimentos resultantes da instalação em furos direcionais. Ou seja, a extensão dos danos, ou a falta deles, é desconhecida. Ainda existe uma carência de métodos ou procedimentos para a avaliação do estado do revestimento externo de dutos no interior de furos direcionais.

Praticamente todas as obras de dutos executadas no Brasil adotaram o processo de perfuração horizontal dirigida em travessias de acidentes geográficos, como rios e córregos, bem como em dutos de distribuição de gás natural nos cruzamentos de rodovias, ruas e estradas em áreas urbanas.

Recentes gasodutos construídos pela Petrobras dotaram o processo de perfuração horizontal dirigida para a travessia dos maiores corpos d'água existentes em seus traçados.

Para exemplificar a utilização da técnica, seguem abaixo algumas fotos ilustrativas dos serviços de campo.

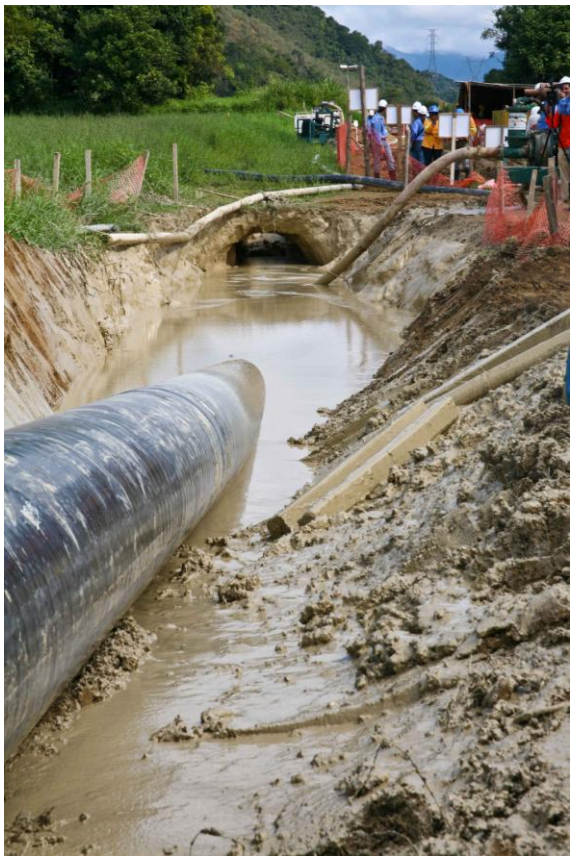


Foto 1 – Puxamento da tubulação

Foto 2 – Cabeça de puxamento das tubulações

Foto 3– Inspeção do revestimento durante o puxamento das tubulações

Foto 4 – Içamento da tubulação durante o puxamento

Foto 5 – Equipamentos utilizados para içamento da tubulação

Revisão bibliográfica

Como forma de garantir que os sistemas de proteção catódica estão de acordo com os critérios estabelecidos em normas, procede-se a constantes medições dos potenciais eletroquímicos. Contudo, no caso de tubulações em furos direcionais, essas medições práticas ao longo de toda a estrutura tornam-se inviáveis e, especialmente neste caso, o uso de simulação numérica passa a ser de grande aplicação.

Técnicas numéricas são aplicadas há mais de duas décadas em diversos campos da engenharia, sendo uma poderosa ferramenta de apoio a projetos e avaliação de sistemas de proteção catódica, sendo completamente dominada tanto no exterior, quanto no Brasil [1,2]. Em diversos sistemas analisados, foi possível comparar resultados numéricos com medidas experimentais, validando esta técnica de análise [3-8].

A boa correlação entre resultados experimentais e numéricos se deve ao fato das análises se basearem em dados obtidos experimentalmente. Desta forma, a determinação criteriosa de parâmetros físico-químicos e eletroquímicos, adotados como condições de contorno nas análises numéricas, definirá a exatidão dos resultados das simulações.

Um parâmetro de grande relevância na distribuição de potencial de proteção catódica é a resistividade do meio. Como este parâmetro varia intensamente com a umidade, é possível realizar análises numéricas conservativas, considerando o valor da resistividade mínima. Este valor pode ser obtido através de ensaios laboratoriais, em amostras de solo coletadas em campo. Este procedimento é o ideal, exceto em casos onde não há variação significativa do valor de resistividade (ex: em água do mar) ou quando o perfil de resistividade pode ser definido em campo, desde que este valor não possa sofrer alterações significativas já que a umidade passa a não ser um fator variável (ex: solo marinho).

Em tubulações que passam em furo direcional sob o solo marinho, tem-se este último caso identificado. Ou seja, os valores de resistividade obtidos em campo podem ser aplicados nas simulações sendo os resultados bastante precisos. De qualquer forma, a coleta de amostras do solo é o procedimento ideal, tendo em vista a necessidade de levantamento de curvas de polarização catódica. Quando esse procedimento não é possível, recorre-se a curvas levantadas previamente, em condições de resistividade mínima, em locais semelhantes.

Em tubulações dispostas em solo marinho, onde o meio é a própria água do mar, a análise é bastante simplificada tendo em vista o valor inalterado de resistividade (exceto em casos de grande profundidade ou variações de salinidade) e das curvas de polarização levantadas previamente em condições reais de campo.

Resultados e Discussão

A seguir são apresentadas simulações numéricas realizadas através do Método dos Elementos de Contorno em tubulações em furos direcionais. Como será visto nos resultados apresentados neste trabalho, variações nas características do solo podem definir o alcance do potencial de proteção catódica ao longo da tubulação.

Foi simulada uma tubulação de, aproximadamente, 3500m de extensão, composta de uma região em HDD e um trecho assentado em solo marinho, protegida catodicamente por anodos galvânicos tipo braçadeira. Visando à proteção do duto no furo direcional, há uma concentração de anodos galvânicos a 40m da saída do HDD (10 anodos tipo braçadeira com espaçamento de 0,5m). Essa maior concentração de anodos tem a finalidade de proteção de toda a tubulação em furo direcional, visto não ser possível a colocação de anodos nesta região. Após essa região, já sobre solo marinho, o duto é protegido galvanicamente com anodos tipo braçadeira, espaçados de 262m.

Nas simulações foram admitidas duas regiões que apresentam diferentes resistividades: água do mar e solo. Com o objetivo de avaliar a influência da resistividade na distribuição de potencial na tubulação, foram admitidos solos com 1200 ohm.cm e 125 ohm.cm.

Para simulação de duas regiões distintas, deve ser modelada a interface que, no caso em questão, se refere à região entre água do mar e solo (vide Figura 2). A tubulação inicia abaixo da interface modelada (solo) e passa à água do mar após 1250m, onde se observa um desnível na interface. Na figura 2 está representada, esquematicamente, a maior concentração de anodos na saída do furo direcional.

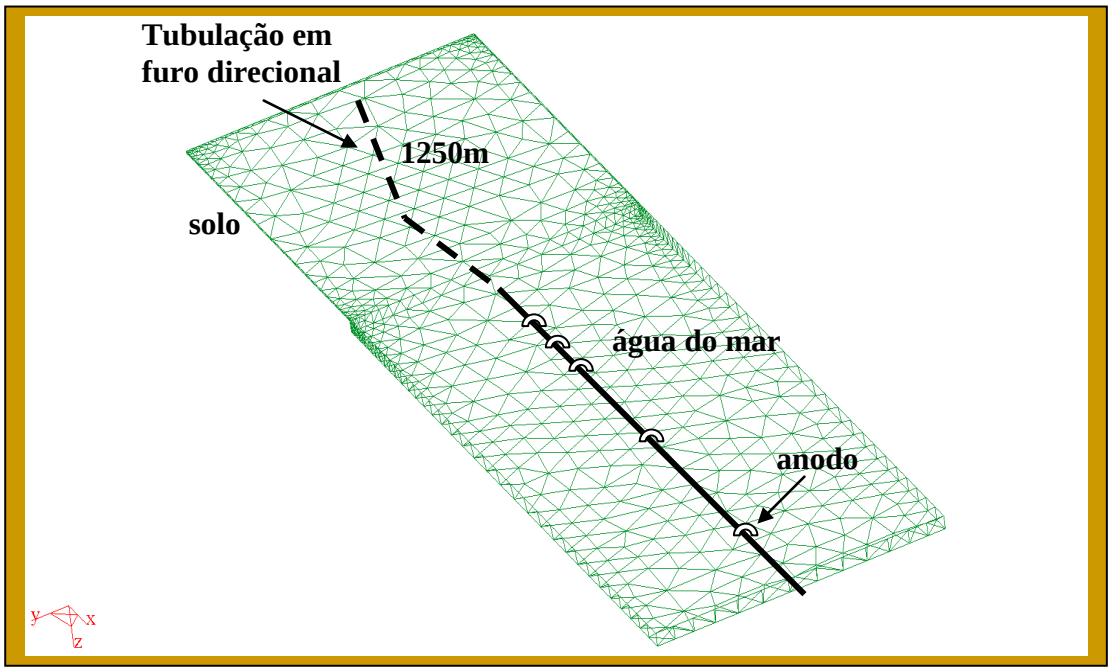


Figura 2 – Desenho esquemático da modelagem da interface solo/água do mar e tubulação.

O valor de resistividade de 1200 ohm.cm, foi obtido em um perfil de resistividade levantado em campo e corresponde ao encontrado na maior parte do trajeto onde passa uma tubulação real em furo direcional. Apesar de valores menores serem também encontrados no perfil obtido em campo, o valor mais elevado, de 1200 ohm.cm, foi considerado visando uma análise conservativa.

O solo com 125 ohm.cm teve seu valor de resistividade obtido em laboratório em amostra coletada em campo, também em região de passagem de uma tubulação em furo direcional.

A tubulação foi modelada por elementos de superfície cilíndrica com variação constante ao longo do ângulo e do comprimento. A eficiência de revestimento inicialmente adotada foi de 95%, em virtude de possíveis danos ao revestimento durante a passagem pelo furo direcional. Para avaliar a influência da eficiência do revestimento sobre a distribuição de potencial na tubulação foram também considerados valores de 97% e 98%.

Para solução do sistema de equações não-lineares gerado na análise numérica, as seguintes condições foram admitidas:

- anodos galvânicos (alumínio): potencial fixo de –1,05 $V_{Ag/AgCl}$;
- superfície da tubulação: curvas de polarização catódica do aço-carbono em meio de bentonita saturada com água do mar e água do mar no trecho marinho.

As distribuições de potencial eletroquímico ao longo do tubo são apresentadas nos gráficos a seguir. Os valores de potencial são referentes ao eletrodo de prata/cloreto de prata e estão indicados em relação ao comprimento longitudinal do tubo. É também indicado o valor adotado como critério de proteção catódica e, em alguns gráficos, o local de saída da tubulação do HDD, que fica em, aproximadamente, 1250 m do início da tubulação.

As simulações representam algumas situações, de forma a ser possível analisar a distribuição de potencial na tubulação em função dos seguintes parâmetros:

- presença de um único tipo de solo do início da tubulação ao final do furo direcional, sendo considerados os valores de resistividades de1200 ohm.cm e 125 ohm.cm;
- presença de solos com diferentes resistividades: menos resistivo na região de entrada da tubulação (125 ohm.cm) e mais resistivo no furo direcional (1200 ohm.cm);
- quantidade de anodos galvânicos na saída do furo direcional;
- distância entre a saída do HDD e os anodos galvânicos (40m e 20m);
- eficiência do revestimento protetor (95%, 98% e 99%).

Na Figura 3 estão representadas as distribuições de potencial ao longo da tubulação considerando os dois solos. Nestas simulações, do início da tubulação até o final do furo direcional (1250 m) a tubulação se encontra em solo com resistividade constante, sendo atribuídos valores de 1200 ohm.cm e 125 ohm.cm. Após essa extensão, a tubulação se encontra sobre solo marinho. Nestes casos apresentados nesta figura, a eficiência de revestimento adotada foi de 95%.

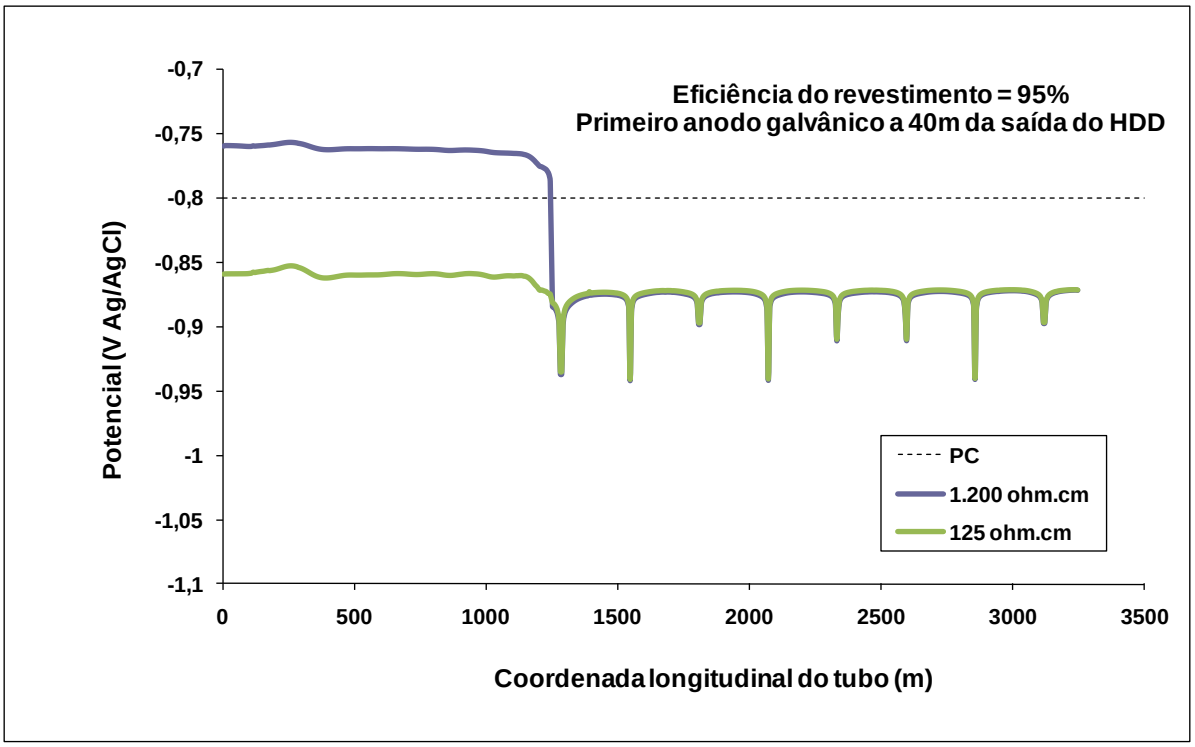


Figura 3 – Influência da resistividade do solo na distribuição de potencial na tubulação em HDD.

Os picos de potencial observados na região após a saída da tubulação do furo direcional ocorrem devido aos anodos galvânicos espaçados de 262 m. Pode-se verificar que os anodos galvânicos não são suficientes para proteção da tubulação quando o solo apresenta mais alta resistividade. Essa diferença significativa de potenciais é conseqüência direta da diferença entre as resistividades dos meios (água do mar e solo).

No solo de mais alta resistividade, observa-se um baixo alcance da proteção catódica na região interna ao HDD, praticamente desprezível. Esse alcance corresponde à extensão da tubulação, a partir da região onde se encontram os anodos galvânicos, cujo potencial se situa em valores mais catódicos do que -0,80$V_{Ag/AgCl}$, adotado como critério de proteção catódica.

Na Figura 3, pode-se ser visto que os valores de potencial no trecho em furo direcional (até 1250 m) apresentam-se bastante constantes e que uma medição realizada ao início da tubulação (entrada do furo direcional) indicaria, de forma prática, o valor médio do potencial ao longo de todo o trecho enterrado. Visando verificar se essas medições podem representar, com segurança, a condição de proteção da tubulação em toda sua extensão (excetuando, obviamente, a região em solo marinho onde há presença de anodos galvânicos), novas simulações foram procedidas.

Foi admitida a seguinte situação: a parte inicial da tubulação (antes de entrar no HDD) se encontra em ambiente de baixa resistividade como, por exemplo, um solo encharcado com água do mar ou, ainda, a própria água do mar. Após entrar no HDD, a tubulação passa a ser envolvida pelo solo de maior resistividade. A questão que se coloca nesse caso é se o potencial medido antes da entrada do HDD (na praia, por exemplo), poderia ser diferente do encontrado ao longo da tubulação.

A Figura 4 apresenta o resultado deste estudo, detalhando a distribuição de potencial para os primeiros 10 m da tubulação. Neste caso foi considerada a condição em que há variação da resistividade do solo na região de entrada e no meio do furo direcional (125 ohm.cm / 1200 ohm.cm).

O que pode ser identificado nessa simulação é que medições de potencial realizadas no trecho onde a tubulação se encontra em solo menos resistivo, poderiam indicar efetiva proteção catódica (valores iguais ou mais negativos que -0,80$V_{Ag/AgCl}$), embora observe-se que o potencial tende à condição de não proteção quando a tubulação atinge o solo mais resistivo. Esse fato seria agravado pela diferença entre as resistividades dos solos.

Verifica-se com isso que é possível ser medido um potencial de proteção catódica no trecho inicial da tubulação, em meio de baixa resistividade, enquanto partes da tubulação não estão protegidas, mesmo que mais próximas ao leito de anodos. Esse fato é facilmente justificado, tendo em vista que a corrente de proteção catódica flui através do eletrólito (água do mar) e poderá atingir regiões mais distantes da tubulação com mais facilidade do que penetrará em ambiente rochoso, de alta resistividade.

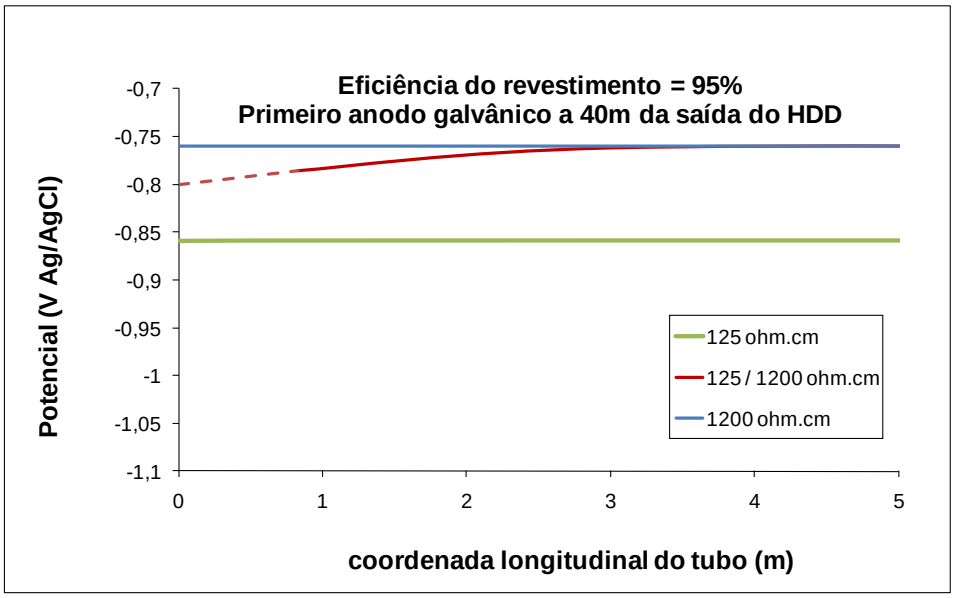
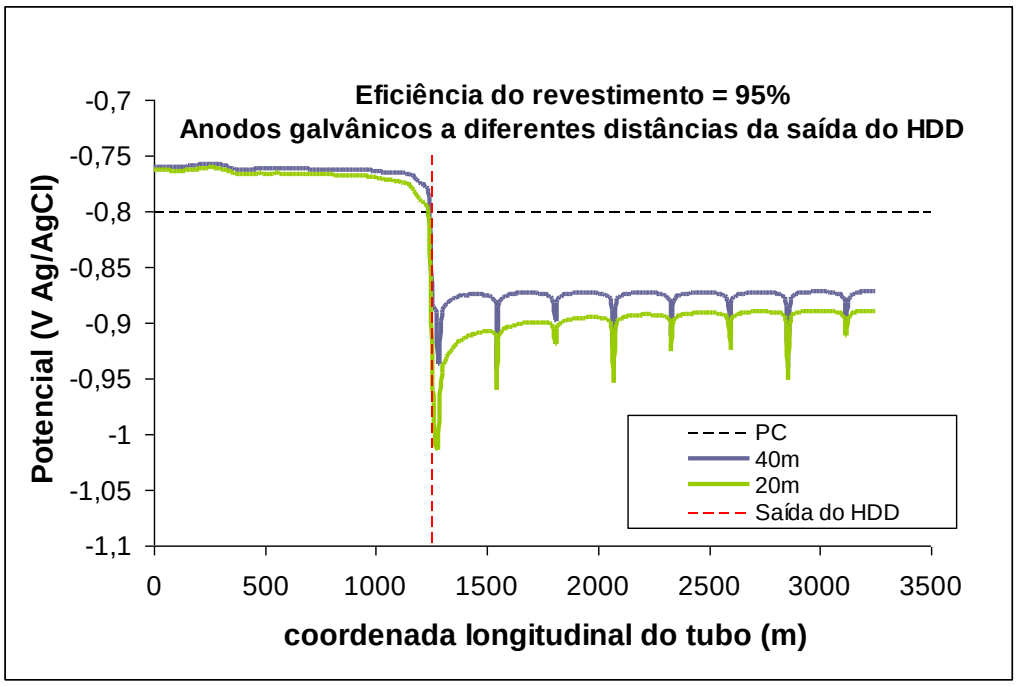


Figura 4 – Detalhe da distribuição de potencial para o caso de resistividades variadas.

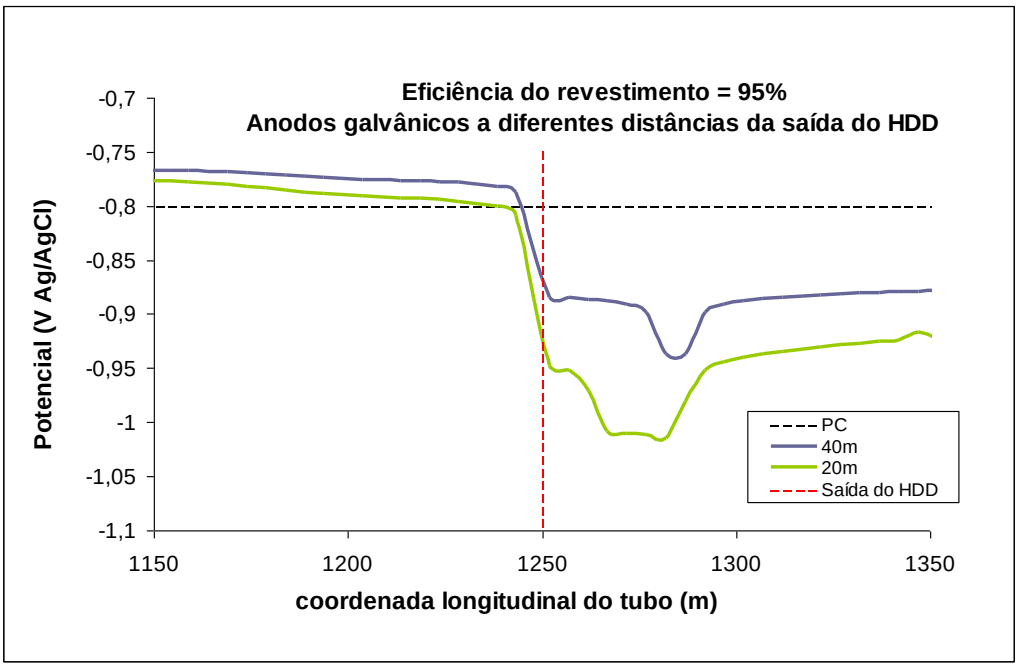
Objetivando analisar a influência da quantidade de anodos galvânicos no alcance da proteção catódica, foi incluído na simulação um maior número de anodos e em menor distância até o furo direcional (20m). Como pode ser visto na Figura 5*a* e, em maior detalhe, na Figura 5*b*, o alcance da proteção catódica continua sendo desprezível. O que é observado, neste caso, é que o potencial atinge valores mais catódicos, devido ao maior número de anodos presentes, não havendo qualquer ganho significativo em termos de alcance da proteção catódica.

A Figura 6*a* apresenta as distribuições de potencial quando se consideram diferentes eficiências de revestimento. Observa-se claramente, e em maior detalhe na Figura 6*b*, que este parâmetro pode influenciar, de forma significativa, o alcance da proteção catódica. De

95% de eficiência para 98%, observa-se que o alcance, antes desprezível em solo com 1200 ohm.cm (95%), passam a ser completo. Isso significa que a proteção pelos anodos galvânicos seria possível, mesmo em meio de mais alta resistividade, no caso do revestimento apresentar maior eficiência.

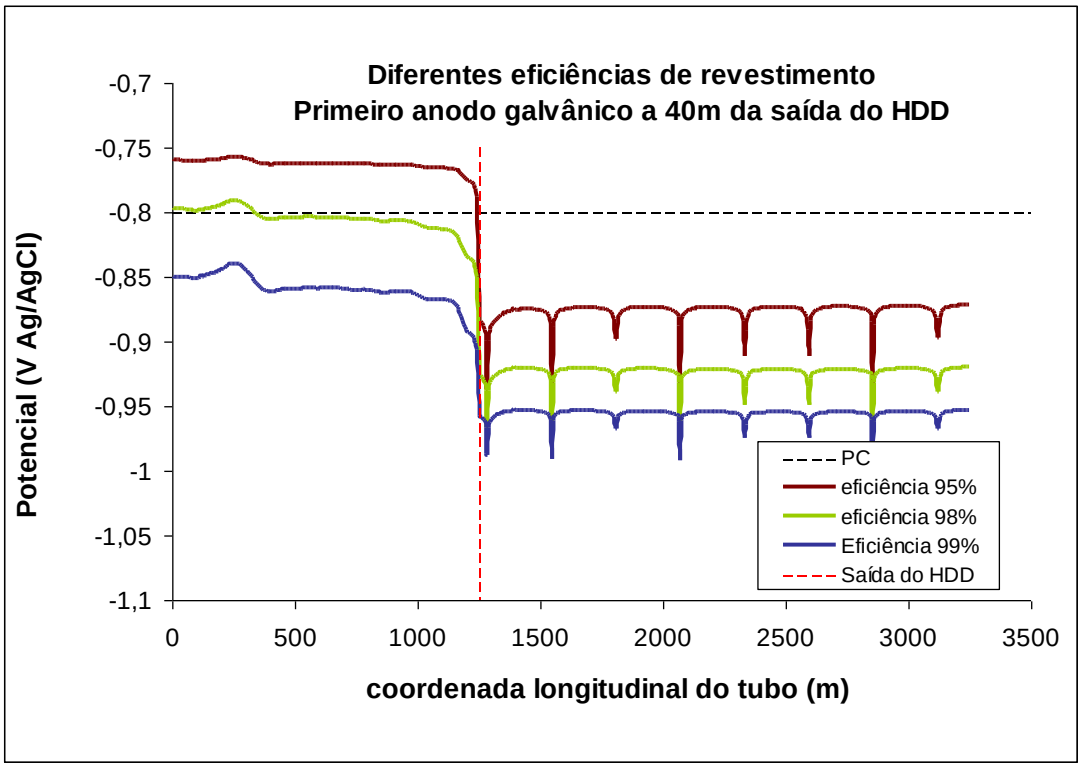


(*a*)

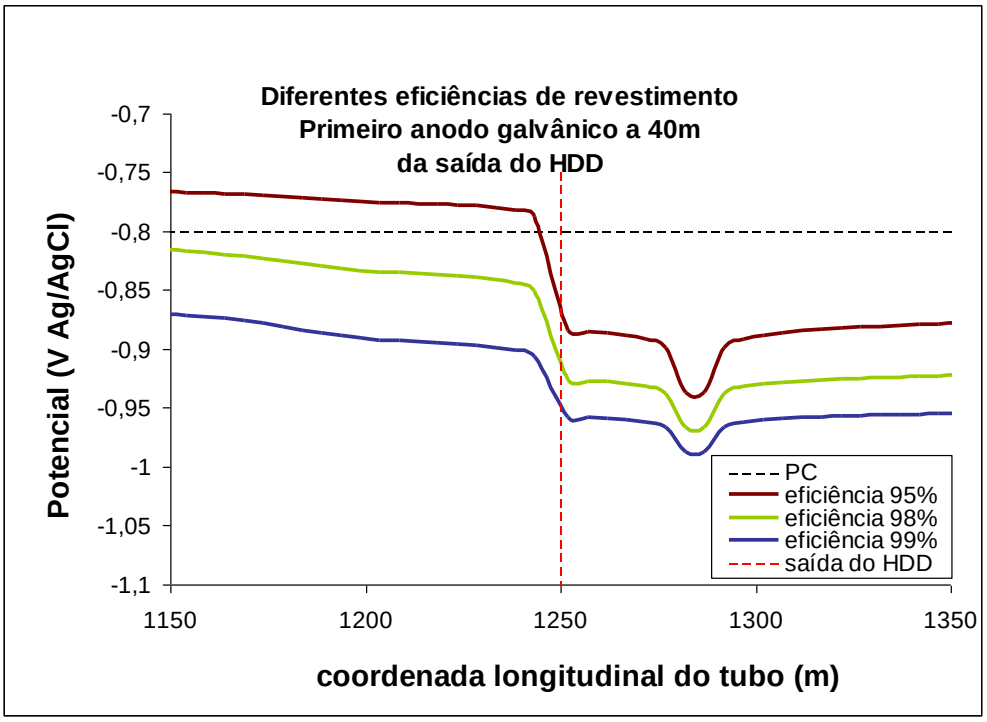


(*b*)

Figura 5 – Efeito da distância e quantidade de anodos galvânicos da saída do HDD



(*a*)



(*b*)

Figura 6 – Influência da eficiência do revestimento protetor no alcance da proteção catódica.

Conclusões

- O conjunto de anodos tipo braçadeira, localizados próximos à saída do HDD, não promove proteção adequada à tubulação situada no furo direcional para o caso de eficiência de 95% em solo com 1200 ohm.cm. Neste caso, o alcance da proteção catódica é desprezível.
- É observada proteção catódica ao longo de toda a extensão da tubulação, promovida pelos anodos galvânicos localizados próximos à saída do furo direcional, quando o solo apresenta baixa resistividade.
- A inclusão de mais anodos galvânicos, mesmo que mais próximos à saída do furo direcional, não promove proteção da tubulação para eficiência de 95% em solo com 1200 ohm.cm.
- A eficiência do revestimento protetor é um parâmetro de grande influência no alcance da proteção catódica de tubulações em furo direcional. Para solos com 1200 ohm.cm, foi observada proteção catódica em toda extensão da tubulação, considerando revestimento com 98% de eficiência.
- Caso o solo na região de início da tubulação apresente baixa resistividade, comparando com a região onde a tubulação passa em furo direcional, é possível a realização de medidas de potencial em níveis de proteção catódica na região de início da tubulação, mesmo que não seja verificada proteção na tubulação dentro do furo direcional. As medidas realizadas desta forma não indicariam, portanto, a condição real de proteção da tubulação em toda sua extensão.

Referências bibliográficas

[1] Mansur,W.J., Telles,J.C.F., Santiago,J.A.F., Boundary Element Technology VI,Ed. C.A.Brebbia, Computational Mechanics Publications, Betech, 1991.

[2] W.J.Mansur, L.C.Wrobel, J.C.F.Telles, J.P.S.Azevedo, "The PROCAT System for Cathodic Protection Design", Boundary Element Techniques, C.A.Brebbia and W.S.Venturini, CML Publications, Southampton, 1987

[3] "Numerical Simulation of a Wet Christmas Tree Cathodic Protection System" J.C.F.Telles, W.J.Mansur, J.A.F.Santiago, S.L.D.C.Brasil, W.Baptista - Symposium on Cathodic Protection Systems - 181st. Meeting of Electrochemical Society, St.Louis, Estados Unidos, vol. 92-1, p.97-98, maio 1992.

[4] "Assessment of Internal Cathodic Protection in Pipelines for Seawater Collection in Oil Platforms", Walmar Baptista, Simone L.D.C.Brasil, José Claudio F.Telles, Materials Perfomance, abril 2004.

[5] Cathodic Protection Simulation of Aboveground Storage Tank Bottom: Experimental and Numerical Results, Eurocorr (The European Corrosion Congress), 2004

[6] 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 Perfomance, abril 2004.

[7] S.L.D.C. Brasil, D.S. Freitas, W.Baptista, J.C.F.Telles, J.A.F.Santiago, J.H.L.Oliver, Corrosion 2006 – National Association of Corrosion Engineering (NACE), EUA 2006, "Potential Distribution on Cathodically Protected Buried Pipelines with Aged and High Performance Coatings"

[8] S.L.D.C. Brasil, D.S. Freitas,W.Baptista, J.C.F.Telles, J.A.F.Santiago, J.H.L.Oliver, Rio Oil & Gas 2006, "Cathodic Disbondment in High Performance Coatings: Experimental and Numerical Results"