

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 crítica dos critérios de proteção catódica apresentados pela norma ISO 15 589-1

Alysson H. Bueno¹, José A. C. Ponciano²

Abstract

Nowadays, the buried pipelines have cathodic protection systems. The specifications and criteria of the pipeline cathodic protection are monthly monitored in order to maintain the integrity against corrosion. Therefore, these criteria are presented by the following standards: ISO 15589-1 e NACE RP0169-2002 (ISO 15 589-1, 2003 e NACE RP0169, 2002). Then, this work used as support the standard ISO 15589-1. The main goal of this research was to make a critical evaluation of the criteria adopted by the standard. Based on some laboratory tests (Polarization curves, hydrogen permeation and slow strain rate testing) and in situ measurement, it was possible to observe that there are some aspects, described by the standard, that should be evaluate again. The right knowledge about the protection criteria and the alterations proposed by this work will be useful to maintain the efficiency of the performance.

Resumo

Atualmente, os dutos enterrados são protegidos catodicamente por sistemas de corrente impressa. As especificações dos critérios de proteção catódica aplicados em dutos devem ser monitoradas mensalmente para garantir a integridade contra a corrosão. Neste caso, estes critérios são descritos pelas normas ISO 15589-1 e NACE RP0169-2002 (ISO 15 589-1, 2003 e NACE RP0169, 2002). Sendo assim, neste trabalho foi utilizada como base de estudo a norma ISO 15589-1. O objetivo principal da pesquisa foi realizar uma avaliação crítica dos critérios adotados por esta norma. Com base em ensaios de laboratório (Curvas de polarização, ensaios de permeação pelo hidrogênio e tração com baixa taxa de deformação) e medidas “in situ”, foi possível constatar que existem vários aspectos, abordados pela norma, que devem ser reavaliados. O entendimento dos critérios de proteção da norma e as alterações propostas por este estudo serão os requisitos para que um Sistema de Proteção Catódica possa operar corretamente.

Palavras-chave: Proteção catódica, aços API, dutos, solo

Introdução

Os dutos são protegidos catodicamente por corrente impressa. As especificações de critérios do sistema de proteção catódica (SPC) aplicada em dutos são descritas pelas normas ISO 15589-1 e NACE RP0169-2002 (ISO 15 589-1, 2003 e NACE RP0169, 2002). Neste trabalho foi utilizada como base a norma ISO 15589-1. Sendo assim, foi realizada uma avaliação crítica dos critérios adotados por esta norma. Com base em ensaios de laboratório e medidas “in situ” foi possível constatar que existem vários aspectos, abordados pela norma, que devem ser reavaliados. O entendimento dos critérios de proteção da norma e as alterações propostas por este estudo serão apresentados a seguir.

Resultados / Discussão

1 PHD, Engenheiro Mecânico – Professor UFSJ

2 PHD, Engenheiro Metalúrgico – Professor COPPE/UFRJ

O item 5.3.2 da norma ISO 15589-1 apresenta os requisitos para que o SPC possa operar corretamente. Contudo, existem vários pontos que devem ser discutidos e aprimorados. No Item 5.3.2.1 a norma relata que o duto está protegido catodicamente quando o SPC está imprimindo um potencial mais negativo que -850 mV (Cu/CuSO₄). Contudo, a norma não relata se este potencial é *off* ou *on* e também não relaciona o potencial a ser aplicado com o pH do solo.

Antes de iniciarmos as discussões com relação aos critérios de proteção catódica, é importante salientar que este valor de -850 mV (Cu/CuSO₄) foi obtido com base no Diagrama original de Pourbaix (POURBAIX, 1974). Contudo, neste trabalho foi utilizado o diagrama apresentado na figura 1, onde o regime de imunidade só é alcançado a partir do potencial de -892 mV (Cu/CuSO₄).

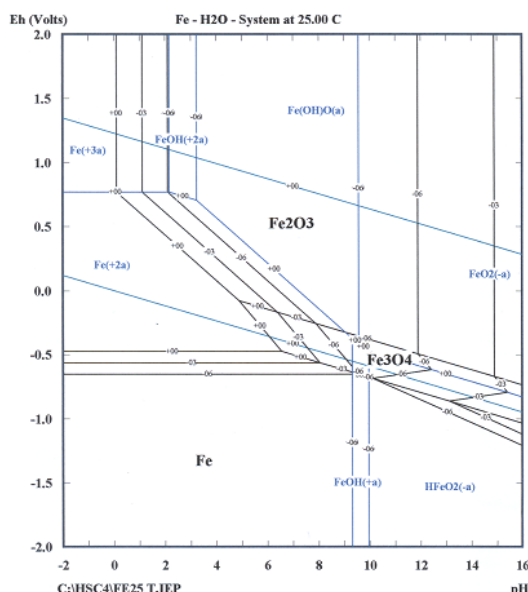


Figura 1: Diagrama E vs pH de equilíbrio eletroquímico para o sistema Fe/H₂O, a 25° C.

A importância em aplicar o potencial catódico em relação ao pH do solo é explicada pelo diagrama E vs pH da figura 1. De acordo com este diagrama o aço está protegido da corrosão para potenciais mais negativo que -892 mV (Cu/CuSO₄), sendo que este valor é válido somente para solos com pH até 9,32. Para solos com pH entre 9,32 e 14 é necessário utilizar as equações proposta por Pourbaix (POURBAIX, 1974) para se calcular o potencial adequado de proteção, de modo que o metal se encontre efetivamente dentro do regime de imunidade. Neste caso, se um duto estiver alocado em um solo com pH maior que 9,32, o critério apresentado pela norma não será válido porque o duto poderá estar fora do domínio de imunidade. Assim sendo, ao ocorrer falhas no revestimento em solos com pH acima de 9,32, o duto estaria suscetível à corrosão externa. Esta suscetibilidade será maior ou menor em função da corrosividade do solo.

Outro ponto essencial é o critério do potencial *on* e *off*. A norma somente menciona como método alternativo, a medida de potencial *on/off* (Anexo A.2.3-Norma ISO 15589-1). Contudo, a mesma não esclarece se o potencial catódico de -850 mV (Cu/CuSO₄) é *off* ou *on*. O potencial *off* indica o potencial efetivo da interface metal solo sem o efeito da queda ôhmica ocasionada pela resistividade do solo. É medido no momento imediatamente após o desligamento dos retificadores.

Com base neste conceito, se um duto atravessar regiões de solo muito resistivo, e se nesta região o potencial *on* de proteção catódica imposto estiver próximo da linha de imunidade, o duto poderá não estar protegido contra corrosão caso haja alguma falha no revestimento. Nesta região, parte da corrente catódica impressa pelo retificador se perde devido a queda ôhmica do solo. Neste caso, o potencial catódico efetivamente imposto não será o potencial medido no PT com os retificadores ligados, chamado de potencial *on*. Se o projeto do SPC do duto for baseado somente no critério do potencial *on* mais negativo que – 850 mV (Cu/CuSO₄) e desconsiderando as medidas de potencial *off*, não será possível detectar estas regiões ao longo do duto onde o potencial catódico imposto está acima da linha de imunidade.

Vários autores (ROBINSON, 1993, ROMANOFF, 1957, SERRA, 2006) relatam que os solos são um dos eletrólitos mais complexos de se trabalhar. As variações nas características físico-químicas ocorrem em pequenas distâncias. De fato, de acordo com os resultados apresentados na tabela 1, referente a análise de corrosividade dos solos estudados, os solos coletados ao longo do duto apresentam resistividades diferentes. Sendo assim, a corrente de proteção impressa pelo retificador terá que ser maior no solo de maior resistividade.

Tabela 1: Parâmetros físicos químicos e bacteriológicos das amostras de solos coletadas.

PARÂMETROS FÍSICOS QUÍMICOS	SOLOS COLETADOS				
	1	2	3	4	5
Resistividade (ohms*cm)	9 11	3 150	7 0000	534	227
E _{redox} (ENH)	1 6,0	1 8,0	4 00,6	205, 1	119,3
pH	6, 31	5, 25	7, 02	5,68	4,33
Umidade (%)	2 1	2 2	2 5	22	24
Cl ⁻ (mg/Kg)	9 7,8	2 24,7	A usente	100, 0	200,0
SO ₄ ²⁻ (mg/Kg)	2 9,3	2 0,0	2 5,0	90,0	120,0
S ²⁻ (mg/Kg)	2, 9	0, 3	8, 6	0,25	1,67
BRS (NMP/g)	1, 4*10 ⁴	1 5,8	A usente	8,7	8,6x10 ⁴
Cor do solo	Cinza – argiloso	Cinza argiloso	Marrom claro	Avermelhado	Acinzentado/brejo
E _{eletroquímico} mV (Cu/CuSO ₄)	- 560	- 588	- 511	-596	-580
Pot. <i>On</i> de Prot. Catódica V (Cu/CuSO ₄)	- 2,0	- 2,1	- 5,2	-3,6	-4,58

Os resultados apresentados por Ponciano e Bueno (PONCIANO e BUENO, 2003) mostram as análises de medidas de potencial *on/off* feitas em um mineroduto. Observou-se que quase todos os potenciais catódicos nos pontos de medição estavam dentro do regime de imunidade com os retificadores ligados, exceto no início do mineroduto. Contudo,

quando os retificadores foram desligados praticamente todos os pontos ao longo do sistema passaram para o domínio de corrosão.

Batista (BATISTA, 1994) também confirma, em trabalho com medidas de potencial *on/off*, que vários potenciais *off* se situaram dentro do domínio de corrosão. Oliveira (OLIVEIRA, 2007) apresenta resultados de ensaios de medidas de potencial *on/off* em laboratório para solos de alta resistividade com potenciais *on* abaixo da linha de imunidade, porém com potenciais *off* acima da linha de imunidade, ou seja, dentro do domínio de corrosão.

Com base nos conceitos apresentados acima, o critério correto para garantir que o SPC atue de forma eficiente e garanta que o duto estará imune da corrosão, é impor um potencial catódico *off* que se localize abaixo da linha de imunidade segundo o digrama E vs pH para o sistema Fe/H₂O proposto na figura 1. Sendo que este potencial imposto deve ser determinado com base no pH do solo, segundo as equações apresentadas no Atlas de equilíbrio eletroquímico (POURBAIX, 1974).

Entretanto, é importante considerar que o potencial catódico *off* imposto está quase sempre abaixo da linha de equilíbrio H/H⁺, o que provoca a reação de redução do hidrogênio ser espontânea e ocorrendo nos locais de falha e porosidade do revestimento. Sendo assim, caso este potencial catódico esteja muito negativo, o duto poderá estar suscetível aos modos de falha de descolamento catódico do revestimento e fragilização pelo hidrogênio no metal.

Com relação aos danos provocados pelo hidrogênio a norma relata apenas (item 5.3.2.1) que a imposição de potenciais mais negativos que -1200 mV (Cu/CuSO₄) podem causar danos ao revestimento. Relata também que certos de aços alta resistência, aços martensíticos e duplex podem sofrer efeitos causados pelo aumento do hidrogênio atômico na superfície do metal. Contudo, não é descrito nada sobre um potencial específico aplicado que poderia causar o efeito de fragilização pelo hidrogênio (FH). A norma também não relata se este potencial de -1200 mV (Cu/CuSO₄) é *on* ou *off*. A única referência a possíveis efeitos de fragilização pelo hidrogênio é feita na parte 2 da norma ISO 15589-1, que se refere a dutos *off shore*. Um erro porque se ocorre FH no mar porque não ocorrer no solo? Uma vez que Bueno e Ponciano (BUENO e PONCIANO, 2007) mostram os aços API foram suscetíveis à FH em extratos aquosos de solos. Assim sendo, este critério deve ser revisto e aprimorado.

O critério de -1200 mV (Cu/CuSO₄) também deve levar em consideração o pH do solo na determinação do potencial para proteção, com limites inferiores para prevenir a incidência da FH. O potencial *off* de proteção catódica não corresponde a um único valor, dependendo do pH do solo definível pelo diagrama E vs pH (figura 1). Nestas condições, verifica-se que dentro do regime de imunidade, a reação de redução de hidrogênio na superfície do metal será dependente do pH do solo e da sobre-tensão gerada entre o potencial catódico *off* aplicado e linha de equilíbrio H/H⁺. Sendo assim, estipular um valor fixo de potencial para ocorrência de descolamento catódico pode ser inadequado.

De acordo com os resultados apresentados na tabela 1, referentes às análises físico químicas dos solos. Os solos 3 e 5, apresentaram pH de 7,02 e 4,33, respectivamente. Se a avaliação for conduzida de acordo com a norma ISO 15589-1, o duto sofreria maior efeito de redução de hidrogênio no solo 5 que no solo 3, porque a sobre-tensão gerada entre o potencial imposto de -1200 mV (Cu/CuSO₄) e a linha de equilíbrio H/H⁺ é maior para o solo 5. Este fenômeno ocorre devido a variação no pH dos solos. Freitas e Newmam (FREITAS E NEWMAM, 2004) relatam que a forma correta de prevenção do efeito de descolamento

catódico, seria definir um potencial catódico *off* que não represente uma sobretensão em relação ao potencial de equilíbrio H/H^+ maior que um limite a ser determinado, para que não ocorra descolamento catódico.

Com relação aos efeitos de FH, a figura 2 apresenta os resultados obtidos através de ensaios de tração BTB para o aço API X60. Neste caso, a figura mostra que com a imposição de um potencial catódico de 300 mV abaixo do potencial de corrosão, o aço API X60 já apresentou grande perda de plasticidade. A tabela 2 mostra a diferença de potencial gerada entre o potencial imposto e a linha de equilíbrio H/H^+ na de extrato aquoso de solo testada.

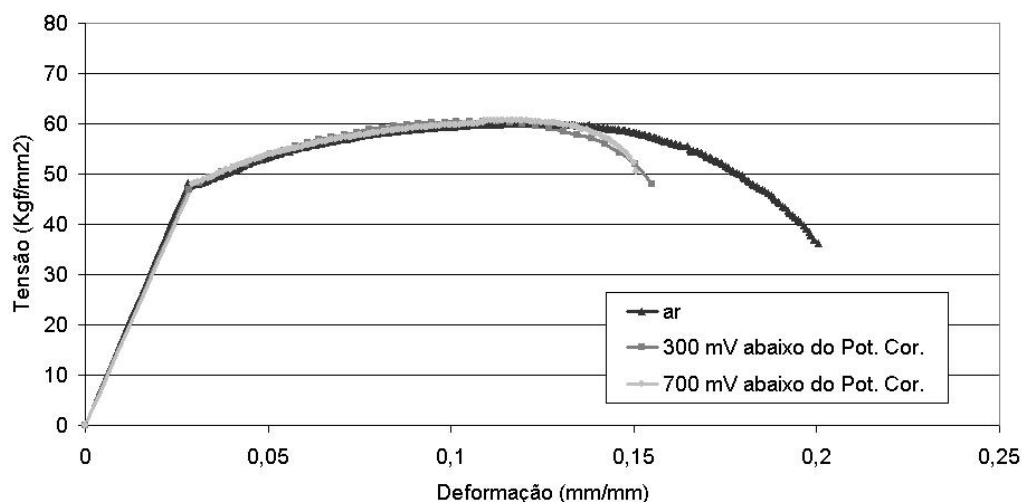


Figura 2: Ensaio de tração BTB do aço API X60, em extrato aquoso desaerado, realizados ao ar, nos potenciais de 300 e 700 mV abaixo do potencial de corrosão.

Tabela 2: Cálculo da sobre-tensão entre o potencial imposto e o potencial de equilíbrio H/H^+ para o ensaio com o aço API X60, nas soluções NS4 e extrato aquoso de solo com pH próximo do neutro, ambas desaeradas.

Aço API	Solução	pH	Pot. Imposto	Pot. H/H+ (ECS)	Equil. mV	E_H $E_{aplicado} - E_{H/H^+}$
API X60	Extrato aquoso desaerado (Solo 1)	6,31	300 mV abaixo do potencial de corrosão: -1058 mV (ECS)	-613		-445
			700 mV abaixo do potencial de corrosão: -1458 mV (ECS)			-845
	NS4	6,4	300 mV abaixo do potencial de corrosão: -1031 mV (ECS)	-619		-412
			700 mV abaixo do potencial de corrosão: -1431 mV (ECS)			-812

Através de ensaios com carga constante, ficou evidente que o aço API X60 foi suscetível ao mecanismo de fragilização pelo hidrogênio, uma vez que ocorreu relaxamento na carga aplicada (figura 2). Neste caso, após 160 horas de ensaio ocorreu o relaxamento da carga, provavelmente ocasionado pelo ingresso do hidrogênio que promoveu o início do

trincamento. Com base nestes resultados, foi constatado que com uma sobre-tensão de 406 mV abaixo da linha de equilíbrio H/H^+ (referente a 300 mV abaixo do potencial de corrosão) o aço da classe API 5L já sofreu suscetibilidade aos efeitos de FH.

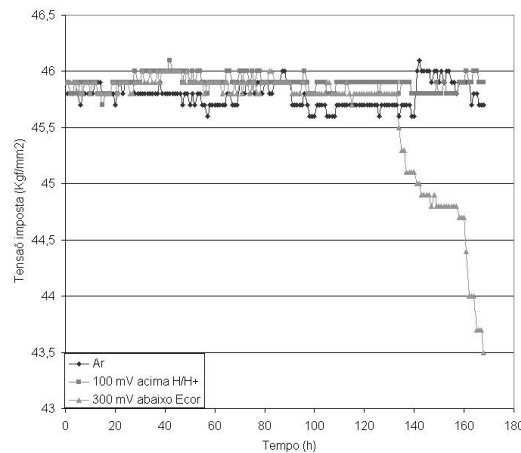


Figura 2: Curva tensão constante imposta vs tempo do ensaio de carga constante para o aço API X60 em solução NS4, realizado ao ar e nos potenciais de 100 mV acima da linha H/H^+ e de 300 mV abaixo do potencial de corrosão.

A norma ISO 15589-1 menciona que o efeito de fragilização pelo hidrogênio ocorre em aços de alta resistência. Contudo, no trabalho apresentado por Bueno (BUENO, 2004) foi constatado que o aço API X46 também apresentou suscetibilidade à fragilização pelo hidrogênio quando ensaiado em potenciais catódicos. Deve-se assim considerar que os aços da classe API 5L podem estar suscetíveis aos efeitos de fragilização pelo hidrogênio.

É importante considerar que todos os ensaios de laboratório foram realizados com extrato aquoso e soluções sintéticas de solos. Sendo assim, o potencial aplicado sobre o corpo-de-prova não foi afetado pelo efeito da resistividade do eletrólito, uma vez que a resistividade destas soluções ficou em torno de 117 ohm.cm. Portanto, todos os ensaios foram realizados em condições conservativas, ou seja, sob condições mais agressivas.

Netas condições, pode-se inferir que o SPC deve operar ao longo do duto com um potencial *off* abaixo da linha de imunidade e com uma sobre-tensão em relação a linha H/H^+ máxima de - 400 mV. Deste modo, o duto estará protegido contra corrosão e os efeitos de danos pelo hidrogênio (Descolamento catódico e FH) poderão ser considerados desprezíveis.

A norma relata no mesmo Item 5.3.2.1, que dutos que operam em locais com solos anaeróbicos contendo Bactérias Redutoras de Sulfato devem ter um potencial catódico impresso de -950 mV (Cu;CuSO₄). Contudo, novamente não é especificado se este potencial é *off* ou *on*. Este valor de -950 mV (Cu/CuSO₄) deve ser melhor estudado uma vez que, se por um lado potenciais mais negativos favorecem a garantia de imunidade, por outro, favorecem o processo de redução de hidrogênio, agravados em função da presença das bactérias redutoras de sulfato.

Neste mesmo item, a norma descreve que dutos que operam em solos de alta resistividade podem ser protegidos com potenciais mais positivos que -850 mV (Cu/CuSO₄). De acordo com a norma, o potencial pode ser de -750 mV para solos com resistividade de 100 a 1000 ohm.m e de -650 mV para solos com resistividade maior que 1000 ohm.m. Este conceito é discutível por vários motivos. Primeiro, de acordo com o

diagrama E vs pH da figura 1, no potencial de -750 mV e $-650\text{ mV}(\text{Cu}/\text{CuSO}_4)$ o duto estará dentro do regime de corrosão. Portanto, mesmo que o solo seja muito resistivo, o processo de dissolução anódica do metal será uma reação termodinamicamente espontânea nos locais de falha no revestimento. Vários autores (SERRA, 2006 E BRADFORD, 2002) relatam em seus trabalhos que os aços apresentaram perda de massa mesmo quando enterrados em solos extremamente resistivos.

Um segundo ponto a ser discutido está relacionado às condições climáticas. A norma ASTM G57 (ASTM G57, 1995), referente à medida de resistividade de solos, e o procedimento de medidas de resistividade descrito por Bueno (BUENO, 2003), relatam que as medidas de resistividade ao longo do duto devem ser todas efetuadas na mesma época do ano e nas mesmas condições climáticas. Estes critérios adotados pelos documentos são obrigatórios em função da resistividade do solo variar devido o volume de chuvas. Oliveira (OLIVEIRA, 2007) relata em seu trabalho que a resistividade dos solos variou consideravelmente em função da umidade do solo, obtendo valores que variaram de 9500 ohm cm para solos com 15% de umidade a 3000 ohm cm para solos com umidade de 50%.

Deste modo, se o SPC for projetado de acordo com estes potenciais de -650 e $-750\text{ mV}(\text{Cu}/\text{CuSO}_4)$, haverá épocas do ano em que o duto estará mais suscetível à corrosão. Isto ocorrerá devido a resistividade do solo adjacente ao duto diminuir devido as chuvas. Sendo assim, o duto estará dentro do domínio de corrosão e em solos com resistividade teoricamente alta, mas na verdade esta resistividade já é baixa devido as chuvas. Além das condições climáticas, é importante considerar que a resistividade do solo varia consideravelmente ao longo do duto. Nestas condições, este critério descrito pela norma se aplicaria somente para alguns trechos do duto e provavelmente para épocas específicas do ano. Nos resultados apresentados na tabela 1 mostra que a resistividade dos solos estudados variou consideravelmente.

Outro ponto a ser discutido está novamente relacionado ao potencial *on* ou *off*. Como a norma não define se estes potenciais (-650 e -750 mV) são *on* ou *off*, caso o sistema de proteção catódica esteja projetado com relação ao potencial *on*. Provavelmente, o potencial efetivamente imposto no duto será um potencial *off* anódico, uma vez que o potencial *on* já é anódico. Batista (BATISTA, 1994) também confirma em seu trabalho que o potencial *off* do SPC se localizou acima de $-850\text{ mV}(\text{Cu}/\text{CuSO}_4)$, ou seja, dentro do domínio de corrosão. Ponciano e Bueno (PONCIANO e BUENO, 2004) também confirmam esta variação no potencial *off*.

No item 5.3.2.3, a norma relata que o critério de imposição de potenciais entre -650 a $-750\text{ mV}(\text{Cu}/\text{CuSO}_4)$ deve ser utilizado com cautela em solos de pH alcalino, uma vez que Parkins (PARKINS, 1994) relata que esta faixa de potencial que ocorre o mecanismo de falha de CST em pH alcalino. Contudo, como já descrito, neste potencial imposto, o duto sempre estará dentro do regime de corrosão para qualquer pH do solo. Sendo assim, se o duto for projetado de acordo com este critério, é importante destacar que ele estará suscetível aos mecanismos de CST em pH neutro e alcalino. Esta suscetibilidade ocorrerá preferencialmente em locais onde o duto sofre a ação de tensões impostas superiores ao limite de escoamento do metal. Como por exemplo, instabilidade do solo.

Com base nos comentários anteriores este critério adotado pela norma é considerado inadequado dentro do modelo proposto neste trabalho, que considera que o duto estará protegido contra corrosão se o potencial *off* estiver dentro do regime de imunidade.

No Item 5.3.2.2 a norma ISO 15589-1 relata as condições onde a aplicação do critério de 100 mV abaixo do potencial de corrosão não seria recomendada. Contudo, com base nos resultados referente aos ensaios eletroquímicos, este critério não é considerado válido neste trabalho. De acordo com a tabela 3, mesmo com a imposição de 100 mV abaixo do potencial de corrosão, o aço API X60 se localizou dentro do domínio de corrosão, em ambas as condições aerada e desaerada.

Tabela 5.8: Potenciais de corrosão, equilíbrio H/H^+ e Fe/Fe^{2+} obtidos nas condições aeradas e desaeradas, para o aço API X60 nos solos em estudo.

Material	Condição de ensaio	Solos	pH	Pot. de corrosão mV (ECS)	Pot. equil. H/H^+ mV (ECS)	$E_{\Delta H}$	Pot. equil. Fe/Fe^{2+} mV (ECS)	$E_{\Delta Fe^{2+}}$
						$E_{cor} - E_{H/H^+}$		$E_{cor} - E_{Fe/Fe^{2+}}$
API X60	Naturalmente aerada	1	6,31	-647	-613	-34	-892	245
		2	5,25	-585	-551	-34		307
		3	7,02	-445	-656	211		447
		4	5,68	-446	-576	130		446
		5	4,33	-560	-496	-64		332
	Desaerada	1	6,31	-756	-613	-143		136
		2	5,25	-757	-551	-206		135
		3	7,02	-695	-656	-39		197
		4	5,68	-708	-576	-132		184
		5	4,33	-668	-496	-172		224

Outro ponto que a norma não considera é a relação da imposição deste potencial de 100 mV abaixo E_{cor} com a resistividade do solo. De acordo com os resultados apresentados na tabela 2, o solo 5 apresentou resistividade baixa. Neste solo mesmo com a imposição deste potencial catódico de 100 mV abaixo E_{cor} o aço ainda se localizou dentro do domínio de corrosão (tabela 3). Neste caso, se houver falhas no revestimento nesta região, o duto estará mais suscetível à ocorrência de corrosão externa devido a baixa resistividade.

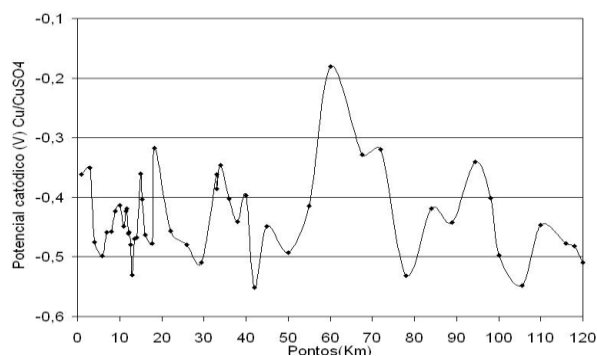


Figura 3: Medidas de potencial de corrosão do aço carbono ao longo da faixa de servidão de um mineroduto (PONCIANO e BUENO, 2003).

As medidas eletroquímicas permitem definir o potencial de corrosão do aço em contato com o solo no local e definir os potenciais teóricos ideais para proteção contra a corrosão. A figura 3 mostra as medidas de potencial de corrosão do aço carbono ao longo da faixa de servidão de um mineroduto. Neste caso, nota-se que o critério de 100 mV abaixo de E_{corr} não se aplica.

Com base nestes potenciais de corrosão do aço, a sobre-tensão catódica otimizada a ser imposta pelo sistema de proteção poderá ser melhor estimada, facilitando a análise de eficiência da proteção. Evidentemente, essa análise deverá ser baseada em valores de potencial *off*, medidos em campo logo após o desligamento dos retificadores, removendo a componente de queda ôhmica no solo, ou seja, a resistividade do solo.

No Item 5.4, a norma ISO 15589-1 relata a necessidade de se estudar as características físico-químicas e bacteriológica dos solos, caso estes apresentem variações sazonais. Contudo, a norma não relata quais análises devem ser feitas.

De acordo com os resultados apresentados na tabela 3, referente às análises físico-química dos solos, constata-se que existem outros parâmetros além da resistividade que podem afetar na corrosividade dos solos. Nos resultados referentes aos ensaios eletroquímicos, a tabela 4 mostra que o metal apresentou diferentes densidades de corrente anódica em cada extrato aquoso de solo. Nestes resultados o efeito da resistividade foi suprimido, uma vez que se estava trabalhando com extratos aquosos. Assim sendo, a variação nas densidades de corrente estão relacionadas à outras características físico-químicas do solo. De fato, os resultados mostraram que os solos com maior densidade de corrente anódica também apresentaram maiores teores de cloreto.

Tabela 4: Valores de densidade de correntes anódicas dos solos obtidas a 100 mV acima do potencial de corrosão.

Solos	Densidade de corrente (microA/cm ²) a 100 mV acima do potencial de corrosão – condição desaerada.
1	63,93
2	70,19
3	8,05
4	18,30
5	140,00

Uma alternativa na avaliação da corrosividade de solos é utilizar os índices de Steinrath e Steinrath modificado (TRABANELLI, 1972 e MAGALHÃES, 2002). Contudo, de acordo com a norma NACE RP 0502-2002 (NACE RP 0502-2002, 2002), além dos parâmetros descritos pelo índice de Steinrath e Steinrath modificado, outros parâmetros devem ser avaliados, tais como acidez total, níveis de CaCO₃ e textura do solo. Baseado nesta discussão, no presente trabalho é proposto que todo projeto de SPC para um duto sejam efetuadas estas análises físico-químicas e bacteriológica dos solos ao longo de todo o duto. Como descrito por Bueno (BUENO, 2003), referente a coletas de amostras de solo, estas análises devem ser efetuadas nos solos que estão adjacentes ao duto. Esta é uma

precaução devido à heterogeneidade dos solos (SERRA, 2006). Bueno também descreve o procedimento adotado neste trabalho para realização das medidas “*in situ*”.

Com base em toda esta discussão, a tabela 5 descreve sucintamente, os critérios adotados pela norma ISO 15589-1 e os critérios propostos por este trabalho.

Tabela 5: Confrontação dos critérios de proteção catódica adotados pela norma ISO 15-589-1 e os critérios propostos neste trabalho.

Critério de proteção catódica de estruturas enterradas		
Condição	Critério ISO 15589-1	Critério proposto
Proteção contra corrosão	Potencial aplicado abaixo de -850 mV (Cu/CuSO ₄)	Potencial catódico <i>off</i> localizado dentro do regime de imunidade. Este potencial deve ser calculado com base no pH do solo e segundo as equações de Pourbaix.
	Solos com presença de BRS devem ter um potencial aplicado de -950 mV (Cu/CuSO ₄).	
	Solos com resistividade entre 100 e 1000 e maior que 100 ohm*m, o duto pode ser protegido com potencial de -750 e -650 mV (Cu/CuSO ₄), sucessivamente.	Não é considerado válido este critério para dutos. Esta condição adotada pela norma pode ser aplicada somente a tanques. Onde é possível utilizar solos sintéticos com resistividade fixa.
	Critério de 100 mV abaixo do potencial de corrosão.	Este critério não é considerado válido.
	Dutos podem sofrer o efeito de CST em pH alcalino em potenciais entre -650 e -750 mV (Cu/CuSO ₄).	Nesta faixa de potencial, o duto pode sofrer efeitos de CST em pH neutro e alcalino, isto irá depender do pH do solo.
Critério de superproteção	Potenciais abaixo de -1200 mV (Cu/CuSO ₄) podem causar danos no revestimento e produção de hidrogênio na superfície do metal.	Potenciais catódicos <i>off</i> não devem apresentar uma sobre-tensão em relação à linha de equilíbrio H/H ⁺ maior que -400 mV. Abaixo desta sobre-tensão o duto estará suscetível aos efeitos de danos pelo hidrogênio - Descolamento catódico e fragilização pelo hidrogênio.
Avaliações das características físico-química dos solos	A norma relata a necessidade de se avaliar estas características. Contudo, ela não relata quais características devem ser avaliadas.	As características que devem ser avaliadas são os índices de Steinrath e Steinrath modificado, e análises de acidez total, teores de CaCO ₃ e textura do solo.

Conclusões

1. Observou-se que os aços API X60 e X80 podem apresentar suscetibilidade à permeação em condições específicas impostas pelo sistema de proteção catódica. O aço API X80 apresentou um fluxo maior de permeação e menor tempo para atingir a

saturação da densidade de corrente, ou seja, a permeabilidade do hidrogênio é maior no aço API X80. Estes resultados confirmam as precauções apresentadas pela norma ISO 15589-1 (ISO 15589-1, 2003) quanto a potenciais catódicos impostos em aços de alta resistência para condições de dutos *off-shore*.

2. Foi observado, dentro das condições dos ensaios, que os aços API podem sofrer efeitos de permeação pelo hidrogênio em solos, sendo necessário considerar um mecanismo similar para dutos *on-shore*. O processo de permeação se assemelha a um processo de permeação estacionário, com um progressivo aumento de corrente com o tempo. Os ensaios mostraram que um potencial de polarização catódico de 300mV abaixo do potencial do aço em contato com o solo é capaz de induzir adsorção e permeação de hidrogênio nos metais testados. No potencial de 700 mV abaixo do potencial de corrosão ocorreu a densidade de corrente máxima. Neste caso, é importante ressaltar que a condição de 300 mV abaixo do potencial de corrosão já é representativa das condições de serviço dos materiais no solo quando submetidos à polarização catódica pelo SPC.
3. O aço API X60 apresentou suscetibilidade ao mecanismo de FH quando mantido numa tensão abaixo da tensão limite de escoamento e sob polarização catódica, em uma condição mais próxima às condições de serviço de um duto, ou seja, sob carregamento estático no regime elástico e sob polarização catódica. O mesmo aço não foi suscetível ao mecanismo de CST por dissolução anódica nas mesmas condições. Estes resultados indicam que o mecanismo de CST ocorre quando o metal é tracionado plasticamente sob um regime de corrosão. A incidência de CST em dutos poderia ocorrer preferencialmente em locais de instabilidade de solo com deformação plástica no duto. Estes resultados indicam a necessidade de se monitorar os locais de instabilidade de solos com medidas de potenciais *off* impostos pelo SPC.
4. Os critérios de proteção catódica devem ser avaliados de forma cuidadosa de modo a garantir que o duto esteja imune da corrosão caso ocorra uma falha no revestimento.

Agradecimentos

Esta pesquisa foi financiada pela FAPEMIG.

Referências bibliográficas

BAPTISTA, W., OLIVIER, J. H., 1994, “Avaliação da Corrosividade do Solo e Sistema de Proteção Catódica na Região do Poliduto Olapa”. *Comunicação interna Petrobrás*.

BRADFORD, S. A., 2002, “Practical Handbook of Corrosion Control in Soil”, *CAST publications*, Canada.

BUENO, A. H. S., CASTRO, B. B., PONCIANO, J. A. C. G., 2007, “Assessment of stress corrosion cracking and hydrogen embrittlement susceptibility of buried pipeline steels”. In: *Book Environmentally-Induced Cracking of Materials*, Edited by Shipilov, S., Jones, R. and Olive, J. M., Elsevier Publications, v.2.

BUENO, A. H. S., 2003, “Avaliação da suscetibilidade à corrosão sob tensão em contato com o solo dos aços da classe API X46, X60 e X80”, tese de Msc, COPPE/UFRJ, Brasil, abril.

FREITAS, D. S., NEWMAM, R. C., 2004, “Estudo interfacial do descolamento catódico em revestimentos orgânicos através de medidas eletroquímicas”, in: *24° Conbrascorr 2004*, nº 076_04, Rio de Janeiro.

MAGALHÃES, F. C. M., BAPTISTA, W., PENNA, M. O., *et al.*, 2002, “Critérios para Avaliação da Corrosividade de Solos por Bactérias Redutoras de Sulfato”, In: *6° COTEQ*, Salvador BH.

NACE RP0169, 2002, “Control of External Corrosion on Underground or Submerged Metallic Piping Systems”, NACE – The National Association of Corrosion Engineers, Texas.

NACE RP0502-2002, 2002, “Pipeline external corrosion direct assessment methodology”, in: *NACE International*, Houston, TX.

NORMA ISO 15589-1, 2003, “Petroleum and natural gas industries – Cathodic protection of pipelines transportation system”, *Part: 1*, On-land pipelines, Published in Switzerland.

OLIVEIRA, J. R., 2007, “Aplicação de métodos eletroquímicos para determinação da corrosividade do solo”, tese de Msc, COPPE/UFRJ, Brasil.

PARKINS, R. N., BLANCHARD, W. K. AND DELANTY, B. S., 1994 “Transgranular Stress Corrosion Cracking of High-Pressure Pipelines in Contact With Solutions of Near Neutral pH”. *Corrosion*, v. 50, n. 5, pp. 394 – 408, Maio.

PONCIANO, J. A C. G., BUENO, A. H. S., 2003, “Avaliação preliminar de processo corrosivo externo e de suas medidas de controle em mineroduto enterrado”, *Projeto Coppetec*, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

PONCIANO, J. A C. G., BUENO, A. H. S., 2003, “Avaliação preliminar de processo corrosivo externo e de suas medidas de controle em mineroduto enterrado”, *Projeto Coppetec*, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

POURBAIX, M, 1974, *Atlas of electrochemical equilibria in aqueous solutions*, Nace international, 2 ed., Bélgica, Cebelcor.

ROBINSON, W. C., 1993, “Testing Soil for corrosiveness”, Materials Performance, Intermountain Corrosion Service Inc., National Association of Corrosion Engineers Publisher, vol. 32, nº4, pp. 56-58.

ROMANOFF, M., 1957 “Underground Corrosion”. *NBS Circular* = 579. National Bureau of Standards. Abril.

SERRA, E. T., 2006, “Corrosão e proteção anticorrosiva dos metais no solo”, *publicado pelo CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica*, Rio de Janeiro.

TRABANELLI, G., ZUCCHI, F., ARPAIA, M., 1972, “Methods of Determination of Soil Corrosiveness With Respect to Metallic Structures”, In: *Chinica Pura ed Applicata*, v. III, Sezione V, n. 4, pp. 43-59.