

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).

## **Caracterização eletroquímica e superficial de revestimentos metálicos à base de pentóxido de nióbio aspergidos em aço carbono.**

José Maurílio Silva<sup>1</sup>, Oscar Regis Junior<sup>2</sup>, Ramon S.C. Paredes<sup>3</sup>, Alfredo José Zara<sup>4</sup>, Kleber F. Portella<sup>5</sup>, Princia Ap. M. Pereira<sup>6</sup>.

### **Abstract -ultima**

It has been documented in the electric power section, an intense problem, at national level, on corrosion for the soil about grid foundations. That corrosion begins in surface area, but with passing of the time, it extends for the total area. For protecting corrosion in grid foundations was used technique of thermal aspersion. The work consisted in application coating metallic, for the thermal aspersion flame process. The product was characterized in laboratory through electrochemistry technical and surface technique characterization. As electrochemistry technical were applied the galvanostatic with and without Ohmic Drop and potenciostatic with and without Ohmic Drop. For surface technique characterization for coating, it was used the optic microscopy, EDS and difraction X ray. For comparison, the technical electrochemistry were applied in different soils. As a result of this study the use of metallic deposition for nióbio pentóxido is recommended.

### **Resumo**

Atualmente, existe documentado no setor elétrico, um intenso problema, a nível nacional, sobre corrosão pelo solo em fundações de grelhas, principalmente na região de afloramento. Essa corrosão inicia-se na região de afloramento, mas com o passar do tempo, se estende para o restante da grelha. Com intuito de proteger a grelha contra corrosão pelo solo, mais especificamente na região de afloramento desenvolveu-se um revestimento metálico para o aço (material base de montantes de grelhas), através da técnica de aspersão térmica. O trabalho consistiu na aplicação do revestimento metálico, na forma de pó, pelo processo de aspersão térmica à chama. Este material foi caracterizado em laboratório através de técnicas eletroquímicas e caracterização microestrutural. Como técnicas eletroquímicas aplicou-se a galvanostática com e sem Queda Ôhmica. Para caracterização microestrutural do revestimento, utilizou-se a microscopia ótica, microdureza, EDS e difração de raio X. Por motivo de comparação, as técnicas eletroquímicas foram aplicadas para o aço e para os diversos revestimentos em diferentes solos. Além da caracterização dos revestimentos metálicos, os solos também foram ensaiados em laboratório. Como resultado deste estudo recomenda-se o uso de deposição metálica de pentóxido de nióbio através de aspersão térmica para recuperar pedaços de cantoneira de aço galvanizado a serem substituídas em montantes de grelhas pertencente á região de afloramento.

**Palavras-chave:** Corrosão pelo solo, revestimento metálico, pentóxido de nióbio.

<sup>1</sup> Dr, Pesquisador V- LACTEC, <sup>2</sup> Mestre, Professor – UTFPR/PG, <sup>3</sup> Dr, Professor – UFPR,

<sup>4</sup> Dr, Professor – UEPG, <sup>5</sup> Dr, Pesquisador V – LACTEC, <sup>6</sup> Eng., – LACTEC.

---

## 1 Introdução

---

Nos processos de AT, os materiais de deposição são fundidos ou aquecidos em uma fonte de calor gerada no bico de uma pistola apropriada por meio de combustão de gases, de arco elétrico ou por plasma. Imediatamente após a fusão, o material finamente atomizado é acelerado por gases sob pressão contra a superfície a ser revestida, atingindo-a no estado fundido ou semi-fundido. Ao se chocarem contra a superfície, as partículas achatam-se e aderem ao material base e na seqüência sobre as partículas já existentes, originando-se assim uma camada de estrutura típica e diferente de qualquer outra forma metalúrgica. Essas camadas são constituídas de pequenas partículas achatadas em direção paralela ao substrato, com estrutura típica lamelar contendo inclusões de óxidos, vazios e porosidade<sup>(01)</sup>.

Para caracterizar o material aspergido em laboratório através de técnicas eletroquímicas, levantaram-se curvas de polarização do aço carbono, com e sem os revestimentos, imerso em vários tipos de solos. Usando os parâmetros eletroquímicos das reações: oxidação do ferro, redução do hidrogênio e redução do oxigênio, construiu-se curvas de polarização. Para construção dessas curvas de polarização, foram usados resultados experimentais juntamente com dados eletroquímicos obtidos da literatura<sup>(02)</sup>.

Para a construção das curvas eletroquímicas através da técnicas galvanostática com e sem Queda Ôhmica, foram obtidos potenciais “Eoff” (potenciais<sup>(03)</sup> em condições de circuito aberto), após a estabilização do “Eon” (potenciais em condições de circuito fechado). Para obtenção dos potenciais “Eoff” fez-se interrupções da corrente injetada pelo galvanostato. Com a interrupção da corrente, o “Eon” cai abruptamente para um determinado valor e logo em seguida, essa queda de potencial é lenta, o segredo está em obter o início dessa queda lenta de potencial. Na prática, o valor lido é feito baseando-se na leitura do primeiro potencial que aparece no visor do multímetro imediatamente ao desligar a chave liga/desliga. Como é difícil obter esse valor a “olha nú”, usa-se como prática fazer esse procedimento de liga/desliga várias vezes e considera-se o valor médio. De posse dos valores obtidos, constroem-se curvas de potenciais em função das densidades de correntes.

Durante a construção da curva de polarização, procurou-se trabalhar muito próximo do potencial de corrosão. Para pequenos sobrepotenciais, pode-se usar o método de aproximação de baixo potencial para a medida da velocidade de corrosão. Para um potencial aplicado muito próximo do potencial de corrosão, a razão sobrepotencial/inclinação tipo Tafel é muito pequena e pode seguir uma série convergente. Como resultado dessa série convergente foi estabelecido o coeficiente de STERN & GEARY<sup>(04)</sup>, que correlaciona a corrente de corrosão e a resistência à polarização de forma linear. Neste sentido procurou-se manter os potenciais “off” a serem obtidos abaixo de 100 mV.

---

## 2 Desenvolvimentos experimentais

---

No processo de aspersão térmica utilizou a pistola SP-2 da Sulzer Metco nas condições da Tabela 1. Para obtenção do grau de limpeza e rugosidade necessária do substrato, foi empregado jateamento por pressão de 100 psi com óxido de alumínio branco (granulometria 36/Alundum 38 A).

A agressividade específica do solo está intimamente ligada às propriedades locais do solo, tais como: Parâmetros geotécnicos (granulometria simples, massa específica, umidade natural, índice de vazios no solo fofo, índice de vazios no solo compactado, permeabilidade e índice de intemperização), parâmetros físicos (resistividade vs quantidade de água e capacidade de retenção de água), parâmetros eletroquímicos relacionados com a redução do hidrogênio (potencial de corrosão do aço, pH, sobretensão do hidrogênio, potencial

reversível do hidrogênio e densidade de corrente de troca do hidrogênio), parâmetros eletroquímicos relacionados com a redução do oxigênio (corrente necessária para a torre ficar protegida, corrente limite do oxigênio e potencial onde começa a corrente limite do oxigênio), parâmetros eletroquímicos relacionados com o processo anódico (resistência de polarização linear), condutividade e resistividade mínima, parâmetros químicos (acidez total, cloretos, sulfatos, bicarbonato, alcalinidade em carbonatos, alcalinidade em bicarbonatos, dureza em bicarbonato e dureza total) e parâmetros biológicos (potencial redox). Estes fatores atuam de forma conjunta e por este motivo a corrosividade dos solos não deve ser avaliada com base em propriedades isoladas. Desta forma a análise baseou-se na obtenção da maioria dos parâmetros acima citado. Após esta análise classificou-se a agressividade do solo a partir de critérios existentes na literatura<sup>(05-10)</sup>. Após ter caracterizado a agressividade do solo aplicou-se a técnica eletroquímica galvanostática com e sem Queda Ôhmica para caracterizar a corrosão dos vários revestimentos a base de pentóxido de nióbio nos respectivos solos.

### **3 Resultados experimentais**

Este item foi subdividido em vários subitens a saber:

- Ensaio físico-químico dos solos, taxa de corrosão por perda de massa com relação a resistividade mínima.
- Parâmetros eletroquímicos da reação catódica de redução do hidrogênio e do oxigênio.
- Relação do potencial de corrosão com a reação catódica de redução do oxigênio.
- Potencial de corrosão dos revestimentos de pentóxido de nióbio para o solo agressivo, não agressivo e pouco agressivo.
- Classificação corrosiva da melhoria do aço revestido com pentóxido de nióbio em diferentes solos a partir da reação catódica de redução do hidrogênio e da redução do oxigênio.
- Caracterização microestrutural do revestimento (microscopia ótica, microdureza, EDS e difração de raio X).

#### **3.1 ENSAIOS FÍSICO-QUÍMICOS DOS SOLOS**

Após realização dos ensaios de laboratório foi possível fazer uma análise da agressividade dos solos baseado nos critérios existentes na literatura (vide Tabela 2). Os solos foram classificados em:

- Agressivo: São Mateus devido ao alto índice de acidez presente e Dona Francisca, devido a baixíssima resistividade nas condições de saturação.
- Pouco agressivo: Quarto Centenário, Curitiba e Castro.
- Não Agressivo: Cafezal do Sul.

#### **3.2 TAXA DE CORROSÃO POR PERDA DE MASSA COM RELAÇÃO A RESISTIVIDADE MÍNIMA**

Em um trabalho anterior<sup>(11)</sup> foi correlacionado a taxa de corrosão (através de perda de massa) com a resistividade mínima (solo saturado com água) para diferentes tipos de solos. Nessa correlação observou-se que a taxa de corrosão varia de forma exponencial decrescente de primeira ordem em relação à resistividade mínima. A partir dos valores de resistividade mínima, calcularam-se as taxas de corrosão dos solos em estudo (vide Tabela 3). As taxas de corrosão dos solos, também foram calculadas a partir dos valores encontrados nos ensaios

físico-químicos. Ao comparar a classificação qualitativa (através de parâmetros físico-químicos) com a classificação quantitativa (taxa de corrosão por perda de massa) dos solos, verificou-se que os resultados qualitativos corroboraram com os resultados quantitativos, pois o solo Cafezal do sul foi enquadrado como solo não agressivo e foi o de menor taxa de corrosão, enquanto que o solo Dona Francisca, classificado como solo agressivo, foi o de maior taxa de corrosão (próximo de  $150 \mu\text{m}/\text{ano}$ ). Finalmente, os solos classificados como pouco agressivos, apresentaram valores intermediários de taxas de corrosão. A taxa de corrosão do solo Castro foi um pouco menor que do solo Cafezal do sul, isto se deve pelo fato, da taxa de corrosão estar diretamente relacionada com a resistividade mínima (para o solo castro foi de  $430 \text{ Ohm.m}$ ). Este valor não exprimi o que realmente está ocorrendo, pois o solo Castro apresenta pH próximo de 6 e um pouco mais ácido que o pH do Cafezal do sul que apresenta um pH próximo de 7. Como o parâmetro pH é o mais importante no processo corrosivo, deve-se aceitar um pequeno erro no valor da taxa de corrosão do solo Castro, pois a taxa de corrosão deste solo, é no mínimo igual ou superior à taxa do solo Cafezal do sul. Ainda com relação à Tabela 3, pode ser observado que ao estimar a corrente de corrosão a partir da resistividade mínima, estamos sendo conservacionistas em relação à situação real, pois os valores das taxas de corrosão obtidos a partir da resistência de polarização linear juntamente com a constante de Stern & Geary foram menores. No caso do solo Dona Francisca, a taxa obtida pelos ensaios físico-químicos foi maior que a taxa de corrosão obtida pela resistividade mínima, porém a idéia conservacionista continua pois isto acontece quando a resistência de polarização é muito pequena, o que indica uma alta taxa de corrosão, demonstrando a preocupação com relação a situação real.

### 3.3 PARÂMETROS ELETROQUÍMICOS DA REAÇÃO CATÓDICA DE REDUÇÃO DO HIDROGÊNIO

Para análise das curvas de polarização, usou-se o método de aproximação de altos potenciais, onde faz-se considerações sobre o sobrepotencial ( $\eta$ ). Com objetivo de aplicar Tafel para altos valores de  $\eta$  ( $\eta \ll 0$  ou  $\eta \gg 0$ ), onde a influência da reação catódica sobre o ramo anódico e vice-versa torna-se desprezível para valores muito afastados do  $E_{\text{corr}}$ . Para estas condições, adotou-se como prática desprezar valores de correntes anódicas que contribuíram com menos de 1% das corrente catódicas e vice-versa<sup>(12)</sup>. Para estar certo de obter as constantes de Tafel em uma região de estabilização empregou-se um  $|\eta| > 118 \text{ mV}$  que corresponde ao sobrepotencial de segurança do  $\text{H}_2$  a partir do qual, construindo-se a curva de polarização catódica obter-se-á uma reta semelhante á reta de Tafel<sup>(12)</sup>. Também teve-se a preocupação de assegurar um trecho linear que contenha um intervalo de valores de corrente próximo de duas décadas<sup>(12)</sup>. Além disto, assegurou-se que o trecho linear tinha um  $\Delta i$  cujo valor da ordem de grandeza fosse de 5 vezes ao da corrente de corrosão ( $i_{\text{corr}}$ <sup>(12)</sup>). A partir da obtenção da sobretensão do hidrogênio (através do pH e do potencial de corrosão<sup>(9)</sup>), foi possível calcular o potencial reversível do hidrogênio. A partir da obtenção da inclinação de Tafel na região de potenciais estacionários e do potencial reversível do hidrogênio, recém calculado, foi possível obter a densidade de corrente de troca do hidrogênio (vide Tabela 4).

Para o solo não agressivo (Cafezal), o valor da densidade de corrente de troca do hidrogênio foi baixo ( $0,5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) e para o solo agressivo (São Mateus) o valor da densidade de corrente de troca do hidrogênio foi alto, isto é, foi o dobro em relação ao verificado para o solo Cafezal. Para os outros solos, é duvidoso analisar a agressividade sob a ótica deste parâmetro, de forma isolada. Este parâmetro deve ser usado para solos, onde a acidez é bem diferente entre eles ( $0,08 \text{ mEq}/100\text{g}$  solo para o Cafezal do sul e  $1,84 \text{ mEq}/100\text{g}$  solo para o

São Mateus). Isto mostra que o parâmetro “densidade de corrente de troca do hidrogênio” pode ser usado para quantificar a corrosão sob o ponto de vista da reação catódica de redução do hidrogênio.

### 3.4 PARÂMETROS ELETROQUÍMICOS DA REAÇÃO CATÓDICA DE REDUÇÃO DO OXIGÊNIO

Em conjunto com a densidade de corrente de troca do hidrogênio, deve ser feita a análise da reação catódica de redução do oxigênio.

#### 3.4.1 Obtenção da densidade de corrente limite da redução do oxigênio (iL)

A partir da inclinação de Tafel para a redução do hidrogênio e a partir da densidade de corrente de troca da reação catódica de redução do hidrogênio foi possível obter a reta da redução do hidrogênio (vide Fig. 1).

A partir de parâmetros de literatura<sup>(02)</sup> relacionados com a oxidação do ferro e sabendo que a equação de Nerst para a reação anódica é do tipo a seguir:

$$E_{Fe/Fe^{2+}} = E^0_{Fe/Fe^{2+}} + \frac{RT}{nF} \ln a_{Fe^{2+}}$$

onde:

$$E^0_{Fe/Fe^{2+}} \text{ é potencial padrão, } \frac{RT}{nF} \text{ são constes e } a_{Fe^{2+}} \text{ é atividade do Fe}$$

O potencial reversível ou potencial termodinâmico do ferro é:

$$E_{Fe/Fe^{2+}} = -865mV, ECS \text{ para } a_{Fe^{2+}} = 10^{-6} mol/L$$

e a densidade de corrente de troca da oxidação do ferro é:

$$i^0_{Fe/Fe^{2+}} = -3.10^{-6} A/cm^2 \text{ para } a_{Fe^{2+}} = 10^{-6} mol/L$$

Então, ficou fácil determinar a reta de oxidação do ferro (vide Fig.1). Na Fig.1, para o solo de Castro, pode ser observado o ponto de encontro (1,38) entre o processo anódico com a curva total dos processos de redução. Este ponto é onde está o valor da densidade de corrente de corrosão. Este ponto também é o ponto onde está a densidade de corrente limite da redução do oxigênio, já que nesta região de potenciais, a densidade de corrente limite da reação catódica de redução do oxigênio é igual a densidade de corrente de corrosão<sup>(03)</sup>. Também é interessante observar que este ponto (cruzamento do processo anódico com os valores totais dos processos de redução) está muito perto do cruzamento entre o processo de redução do hidrogênio com os valores totais dos processos de redução.

#### 3.4.2 Discussão da razão ip/iL

A partir do cruzamento do processo anódico com os valores totais dos processo de redução (vide Fig.1) obteve-se a densidade de corrente limite da reação catódica de redução do oxigênio (vide Tabela 5). A densidade de corrente necessária (ip) para que o aço esteja protegido, foi obtido quando o potencial aplicado estava 100 mV mais catódico que o

potencial de corrosão. A razão entre  $i_p$  e  $i_L$  foram obtidas para os solos estudados e estão apresentados na Tabela 5.

Para o solo não agressivo (Cafezal do sul) a razão  $i_p/i_L$  foi de 0,33 e para o solo agressivo Dona Francisca (pelo parâmetro de resistividade baixa) a razão  $i_p/i_L$  foi de 0,9. Para os outros solos (pouco agressivos) os valores de  $i_p/i_L$  foram intermediários (entre 0,33 a 0,9) com exceção do solo São Mateus, já que este solo tem uma grande interferência da redução do hidrogênio.

O fato do solo São Mateus (agressivo devido a acidez) não apresentar alto valor para a razão  $i_p/i_L$  mostra que neste solo a redução do hidrogênio é mais atuante que a redução do oxigênio para a corrosão do aço.

### 3.4.3 Discussão do potencial de início da densidade de corrente limite do oxigênio

Nos solos trabalhados as reações anódicas e catódicas do aço estão acontecendo entre  $-600$  a  $-1200$  mV. Na Figura 1 observa-se que o potencial de corrosão e portanto o início da curva de polarização, assim como o processo ativacional referente a redução do oxigênio, estão acontecendo perto do potencial de imunidade do aço ( $-850$  mV vs eletrodo de cobre/sulfato de cobre saturado). A densidade de corrente limite também está nesse intervalo de potenciais.

Os potenciais de corrosão dos solos estudados situam-se entre o potencial de equilíbrio do oxigênio e o potencial de equilíbrio do  $Fe(0)/Fe(II)$ . Neste caso o aço sofre efeito conjunto de dissolução ativa por estar dentro do domínio de corrosão e redução de oxigênio na superfície do mesmo devido estar abaixo da linha de equilíbrio do  $O_2/OH^-$ . Nestas condições a reação catódica de redução do oxigênio é termodinamicamente estável.

Para saber se o início do intervalo de potenciais onde acontece a corrente limite (início do processo de transferência de massa e final do processo de ativação) da redução do oxigênio está na região de imunidade do aço, trabalhou-se com a razão  $i_p/i_L$ . Juntamente com a razão  $i_p/i_L$  e com a resistência de polarização linear (pois estamos no processo ativacional da redução do oxigênio) e a partir do potencial de  $-850$  mV (potencial próximo do potencial reversível do ferro), obteve-se o valor do potencial de início ( $E_{apl}$ ) da densidade de corrente limite da redução do oxigênio.

Pelos valores da Tabela 5, observamos que o solo não agressivo (Cafezal do sul) apresentou um grande deslocamento catódico (processos de reduções bastante polarizados) para o início da corrente limite ( $E_{apl}$  de  $-950$  mV). Por outro lado, o solo Dona Francisca (agressivo devido a baixíssima resistividade mínima) apresentou um pequeno deslocamento catódico (processos de reduções despolarizados) para o início da corrente limite ( $E_{apl}$  de  $-850$  mV) e os outros solos (pouco agressivos) apresentaram valores intermediários para o início da corrente limite de redução do oxigênio. Isto mostra que o parâmetro ( $E_{apl}$ ) pode ser usado para ter uma idéia qualitativa sobre a agressividade do solo com base na redução do oxigênio sobre o aço.

## 3.5 RELAÇÃO DO POTENCIAL DE CORROSÃO COM RELAÇÃO A REAÇÃO CATÓDICA DE REDUÇÃO DO OXIGÊNIO

As medições de potenciais de corrosão com o tempo foram feitas logo após o processo de polimento do eletrodo através da imersão dos eletrodos de referencia e de trabalho no solo-análise dentro da célula eletroquímica, a temperatura ambiente. Com a ajuda de um multímetro coletamos dados do potencial de corrosão em relação ao eletrodo de referencia

(cobre/sulfato de cobre saturado) em função do tempo, e com estes dados sob a forma gráfica fizemos a análise dos resultados.

A Fig. 2 mostra que os potenciais de corrosão variam ao longo do tempo, mas que a partir de alguns minutos já podem ter uma certa estabilidade. No início, os potenciais de corrosão dos solos agressivos (São Mateus e Dona Francisca) apresentam valores próximos de  $-700\text{mV}$  em relação ao eletrodo de cobre/sulfato de cobre saturado, mas com o passar do tempo há uma evolução para valores mais negativos. Estes solos apresentaram uma menor variação de potenciais que os outros solos quando se analisa o potencial de corrosão ao longo do tempo. Para o solo não agressivo (Cafezal do sul), os potenciais de corrosão iniciais apresentam valores próximos de  $-500\text{mV}$  em relação ao eletrodo de cobre/sulfato de cobre saturado, mas com o passar do tempo houve uma grande evolução para valores mais negativos. Este solo apresentou valor de  $-700\text{mV}$  após a estabilização dos potenciais.

Com exceção do solo Castro, para os solos pouco agressivos, os potenciais de corrosão iniciais e após alguns minutos de imersão, apresentam valores intermediários aos potenciais acima citados.

Ensaio realizado em extratos aquosos em condições aeradas e desaeradas<sup>(11)</sup> mostram que há uma queda de potencial de 50 a 250mV no sentido catódico ou valores mais negativos, quando se trabalha com extrato aquoso desaerado. Isto mostra que em solução contendo menos oxigênio o potencial de corrosão é mais negativo.

Ensaio realizado em solos saturado com água<sup>(11)</sup>, mostram que há uma queda de potencial de 50 a 200mV no sentido catódico ou valores mais negativos, quando sai de um extrato aquoso e passa para o solo saturado. Isto mostra que em solo saturado com água, existe menos oxigênio do que no extrato aquoso.

Um solo menos intemperizado apresenta menos defeitos heterogêneos que um solo bastante intemperizado, portanto o solo bastante intemperizado pode estar bem aerado. Inicialmente o solo bastante intemperizado apresenta uma maior quantidade de oxigênio na interface aço/solo. Nos momentos iniciais a redução do oxigênio se realiza pela cinética da reação catódica sob controle ativacional, mas com o passar do tempo a redução do oxigênio passa por um momento transitório entre a cinética de controle ativacional para a cinética sob controle por transferência de massa, onde o fenômeno difusional é o mais importante e por isso a quantidade de oxigênio fica cada vez mais difícil de chegar na superfície reacional, devido a formação de um filme de óxido passivante e portanto o potencial de corrosão vai ficando cada vez mais negativo, com a diminuição do oxigênio. Em um solo mais intemperizado (mais resistivo) existe maior aeração devido a maior quantidade de índice de vazios e a chegada do oxigênio na interface aço/solo persiste por um maior tempo desde o início da reação de redução até a perfeita formação da passivação. Esta é a explicação para o grande aumento da evolução dos potenciais à valores mais catódicos no caso do solo não agressivo (Cafezal do Sul).

### **3.6 CLASSIFICAÇÃO CORROSIVA DE MELHORIA DO AÇO REVESTIDO COM PENTÓXIDO DE NIÓBIO PARA O SOLO AGRESSIVO (DONA FRANCISCA) A PARTIR DO POTENCIAL DE CORROSÃO**

O estudo da variação de potenciais de corrosão do aço e dos revestimentos de pentóxido de nióbio com o tempo feito para o solo agressivo, estão mostrados na Fig. 3. A Figura 3 mostra que os valores de potenciais de corrosão para o aço estão próximos de  $-740\text{mV}$  em relação ao eletrodo de cobre/sulfato de cobre saturado. No início o potencial de corrosão do aço é próximo de  $-650\text{mV}$  e após 10 minutos o potencial já está próximo de  $-740\text{mV}$ . Aqui existe uma pequena evolução de potencial ao longo de 10 minutos. No início, o potencial de

oxidação do revestimento de pentóxido de nióbio com níquel é próximo de  $-200\text{mV}$  e após 10 minutos o potencial já está próximo de  $-450\text{mV}$ . Aqui existe uma grande evolução de potencial ao longo de 10 minutos.

Com base no potencial de corrosão para o solo agressivo Dona Francisca, o revestimento de pentóxido de nióbio com cobre foi o que apresentou o melhor comportamento seguido do revestimento de pentóxido de nióbio com níquel e por último o revestimento de pentóxido de nióbio com o alumínio.

### **3.7 CLASSIFICAÇÃO CORROSIVA DE MELHORIA DO AÇO REVESTIDO COM PENTÓXIDO DE NIÓBIO PARA O SOLO NÃO AGRESSIVO ( CAFEZAL DO SUL) A PARTIR DO POTENCIAL DE CORROSÃO**

Os estudos da variação de potenciais de corrosão do aço e dos revestimentos de pentóxido de nióbio com o tempo feito para o solo não agressivo estão mostrados na Fig. 4. A Figura 4 demonstra que os valores da evolução do potencial do aço e dos revestimentos ( $\text{Nb}_2\text{O}_5 + \text{Cu}$  e  $\text{Nb}_2\text{O}_5 + \text{Ni}$ ) ficaram em torno de  $200\text{ mV}$ , após 10 minutos. Isso demonstra que eles tiveram um comportamento semelhante em relação à evolução dos potenciais. Com base no potencial de corrosão para o solo não agressivo Cafezal do Sul, o revestimento de pentóxido de nióbio com cobre foi o que apresentou o melhor comportamento seguido do revestimento de pentóxido de nióbio com níquel e por último o revestimento de pentóxido de nióbio com o alumínio.

### **3.8 CLASSIFICAÇÃO CORROSIVA DE MELHORIA DO AÇO REVESTIDO COM PENTÓXIDO DE NIÓBIO PARA O SOLO POUCO AGRESSIVO (QUARTO CENTENÁRIO) A PARTIR DO POTENCIAL DE CORROSÃO**

Os estudos da variação de potenciais de corrosão do aço e dos revestimentos de pentóxido de nióbio com o tempo feito para o solo pouco agressivo estão mostrados na Fig. 5. A Figura 5 mostra que os valores de potenciais de corrosão para o aço estão próximos de  $-650\text{mV}$  em relação ao eletrodo de cobre/sulfato de cobre saturado. No início o potencial de corrosão é próximo de  $-550\text{mV}$  e após 10 minutos o potencial já está próximo de  $-650\text{mV}$ . Aqui existe uma pequena evolução de potencial ao longo de 10 minutos. No início o potencial de oxidação do revestimento de nióbio com cobre é próximo de  $-100\text{mV}$  e após 10 minutos o potencial já está próximo de  $-250\text{mV}$ . Aqui existe uma variação intermediária da evolução de potencial ao longo de 10 minutos.

Com base no potencial de corrosão para o solo pouco agressivo Quarto Centenário, o revestimento de pentóxido de nióbio com cobre foi o que apresentou o melhor comportamento seguido do revestimento de pentóxido de nióbio com níquel e por último o revestimento de pentóxido de nióbio com o alumínio.

### **3.9 CLASSIFICAÇÃO CORROSIVA DE MELHORIA DO AÇO REVESTIDO COM PENTÓXIDO DE NIÓBIO EM DIFERENTES SOLOS A PARTIR DA REAÇÃO CATÓDICA DE REDUÇÃO DO HIDROGÊNIO**

Para a classificação da melhoria dos revestimentos sob a ótica da redução do hidrogênio foi feita a análise para os diferentes tipos de solos em separado. Primeiro analisou os diversos revestimentos para o solo não agressivo. Em seguida aplicou-se a análise dos revestimentos para o solo agressivo e finalmente repetiu-se a análise para os solos poucos agressivos (vide Tabelas 6, 8 e 10).

### **3.9.1 Solo não agressivo**

Para o solo não agressivo (Cafezal do sul) e sob a ótica da redução do hidrogênio, os resultados foram conforme segue.

#### **a) Uso da sobretensão do hidrogênio**

Com base na sobretensão do hidrogênio para o solo não agressivo Cafezal do Sul, o revestimento de pentóxido de nióbio com cobre foi o que apresentou o melhor comportamento seguido do revestimento de pentóxido de nióbio com níquel e por ultimo o revestimento de pentóxido de nióbio com o alumínio.

#### **b) Uso da densidade de corrente de troca do hidrogênio**

Com base na densidade de corrente de troca do hidrogênio para o solo não agressivo Cafezal do Sul, o revestimento de pentóxido de nióbio com cobre foi o que apresentou o melhor comportamento seguido do revestimento de pentóxido de nióbio com níquel e por ultimo o revestimento de pentóxido de nióbio com o alumínio.

### **3.9.2 Solo agressivo**

Para o solo agressivo (São Mateus) e sob a ótica da redução do hidrogênio, os resultados foram conforme segue.

#### **a) Uso da sobretensão do hidrogênio**

Com base na sobretensão do hidrogênio para o solo agressivo São Matheus, o revestimento de pentóxido de nióbio com cobre foi o que apresentou o melhor comportamento seguido do revestimento de pentóxido de nióbio com alumínio e por ultimo o revestimento de pentóxido de nióbio com o níquel.

#### **b) Uso da densidade de corrente de troca do hidrogênio**

Com base na densidade de corrente de troca do hidrogênio para o solo agressivo São Matheus, o revestimento de pentóxido de nióbio com cobre foi o que apresentou o melhor comportamento seguido do revestimento de pentóxido de nióbio com alumínio e por ultimo o revestimento de pentóxido de nióbio com o níquel.

### **3.9.3 Solo pouco agressivo**

Para o solo pouco agressivo (Castro) e sob a ótica da redução do hidrogênio, os resultados foram conforme segue.

#### **a) Uso da sobretensão do hidrogênio**

Com base na sobretensão do hidrogênio para o solo pouco agressivo Castro, o revestimento de pentóxido de nióbio com cobre foi o que apresentou o melhor comportamento seguido do revestimento de pentóxido de nióbio com níquel e por ultimo o revestimento de pentóxido de nióbio com o alumínio.

**b) Uso da densidade de corrente de troca do hidrogênio**

Com base na densidade de corrente de troca do hidrogênio para o solo pouco agressivo Castro, o revestimento de pentóxido de nióbio com níquel foi o que apresentou o melhor comportamento seguido do revestimento de pentóxido de nióbio com alumínio e por ultimo o revestimento de pentóxido de nióbio com o cobre.

**3.10 CLASSIFICAÇÃO CORROSIVA DE MELHORIA DO AÇO REVESTIDO COM PENTÓXIDO DE NIÓBIO EM DIFERENTES SOLOS A PARTIR DA REAÇÃO CATÓDICA DE REDUÇÃO DO OXIGÊNIO**

Para a classificação da melhoria dos revestimentos sob a ótica da redução do oxigênio foi feita a análise para os diferentes tipos de solos em separado. Primeiro analisou os diversos revestimentos para o solo não agressivo. Em seguida aplicou-se a análise dos revestimentos para o solo agressivo e finalmente repetiu-se a análise para os solos poucos agressivos (vide Tabelas 7, 9 e 11).

**3.10.1 Solo não agressivo**

Para o solo não agressivo (Cafezal do sul) e sob a ótica da redução do oxigênio, os resultados foram conforme segue.

**a) Razão  $i_p/i_L$** 

Com base na razão  $i_p/i_L$  referente a redução do oxigênio para o solo não agressivo Cafezal do Sul, o revestimento de pentóxido de nióbio com níquel foi o que apresentou o melhor comportamento seguido do revestimento de pentóxido de nióbio com cobre e por ultimo o revestimento de pentóxido de nióbio com o alumínio.

**b) Potencial de início da densidade de corrente limite da redução do oxigênio**

Com base no potencial de início da densidade de corrente limite da redução do oxigênio para o solo não agressivo Cafezal do Sul, o revestimento de pentóxido de nióbio com níquel foi o que apresentou o melhor comportamento seguido do revestimento de pentóxido de nióbio com cobre e por ultimo o revestimento de pentóxido de nióbio com o alumínio.

**3.10.2 Solo agressivo**

Para o solo agressivo (Dona Francisca) e sob a ótica da redução do oxigênio, os resultados foram conforme segue.

**a) Razão  $i_p/i_L$** 

Com base na razão  $i_p/i_L$  referente a redução do oxigênio para o solo agressivo Dona Francisca, o revestimento de pentóxido de nióbio com cobre foi o que apresentou o melhor comportamento seguido do revestimento de pentóxido de nióbio com alumínio e por ultimo o revestimento de pentóxido de nióbio com o níquel.

**b) Potencial de início da densidade de corrente limite da redução do oxigênio**

Com base no potencial de início da densidade de corrente limite da redução do oxigênio para o solo agressivo Dona Francisca, os revestimentos de pentóxido de nióbio com níquel, pentóxido de nióbio com cobre e pentóxido de nióbio com o alumínio tiveram valores similares. Todos se mostraram despolarizados com relação aos processos catódicos.

**3.10.3 Solo pouco agressivo**

Para o solo pouco agressivo (Quarto centenário) e sob a ótica da redução do oxigênio, os resultados foram conforme segue.

**a) Razão  $i_p/i_L$** 

Com base na razão  $i_p/i_L$  referente a redução do oxigênio para o solo pouco agressivo Quarto Centenário, o revestimento de pentóxido de nióbio com cobre foi o que apresentou o melhor comportamento seguido do revestimento de pentóxido de nióbio com alumínio e por ultimo o revestimento de pentóxido de nióbio com o níquel.

**b) Potencial de início da densidade de corrente limite da redução do oxigênio**

Com base no potencial de início da densidade de corrente limite da redução do oxigênio para o solo pouco agressivo Quarto Centenário, o revestimento de pentóxido de nióbio com níquel foi o que apresentou o melhor comportamento seguido do revestimento de pentóxido de nióbio com cobre e por ultimo o revestimento de pentóxido de nióbio com o alumínio.

**3.11 Caracterização microestrutural do revestimento ( microscopia ótica, microdureza, EDS e difração de raio X.)**

Para a caracterização macroestrutural do revestimento, os resultados foram conforme segue.

**a) Microscopia Ótica**

No corte transversal da microestrutura dos revestimentos depositados observamos a existência de poros / óxidos interlamelares e duas fases metálicas. Sendo que não houve a existência de poros passantes. Para se fazer a análise da fração de área de poros/óxidos e fases foi utilizado programa computacional Clemex Professional Edition 2000. A média dessas áreas observados no revestimento de: -  $Nb_2O_5$  + Cobre ( 5,1%, 43,1% e 51,8%) , -  $Nb_2O_5$  + Níquel ( 6,2%, 66,2% e 27,6%) , -  $Nb_2O_5$  + Alumínio ( 1,9%, 25,5% e 72,6%) respectivamente.

**b) Microdureza**

No corte transversal da microestrutura dos revestimentos depositados foram realizadas medições de microdureza Vickers com aplicação de carga de 300gf. Os valores obtidos foram : no revestimento  $Nb_2O_5$  + Cobre ( 152,62 HV 0.3), No revestimento  $Nb_2O_5$  + Níquel ( 169,6HV 0.3), no revestimento  $Nb_2O_5$  + Alumínio ( 39,26 HV 0.3) .Estes são valor médio após medição de 5 perfis de microdureza. Os ensaios foram realizados segundo norma ASTM E384, Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials.

**c) EDS**

Para o revestimento,  $Nb_2O_5$  + Cobre, obtivemos os seguintes elementos e suas porcentagens de peso : Oxigênio ( 20,548%), cobre ( 32,366%) e Nióbio ( 19,516%). Para o revestimento,  $Nb_2O_5$  + Níquel, obtivemos os seguintes elementos e suas porcentagens de peso : Oxigênio ( 16,594%), níquel ( 30,137%) e Nióbio ( 19,413%). Para o revestimento,  $Nb_2O_5$  + Alumínio, obtivemos os seguintes elementos e suas porcentagens de peso: Oxigênio ( 24,491%), Alumínio ( 27,07%) e Nióbio ( 17,379%).

**d) Difração de Raio X**

No espectro de difração de raios-X das misturas,  $Nb_2O_5$  + Cobre ,  $Nb_2O_5$  + Níquel e  $Nb_2O_5$  + Alumínio, antes de aspergir e após a aspersão constatou-se que não houve formação de ligas nas misturas aspergidos.

**4 Conclusões**

Este trabalho deixa claro que é necessário aplicar todos os parâmetros eletroquímicos e físico-químicos discutidos nos itens acima citados, para caracterizar um determinado tipo de solo. Não é possível generalizar, pois não há uma solução única, pois o solo, constitui-se numa mistura de compostos minerais e orgânicos, formados pela ação de agentes físicos, químicos e biológicos. Em uma primeira aproximação, pode-se afirmar (com um certo erro) que o melhor revestimento sobre o aço para os diferentes solos, recomenda-se a mistura de pentóxido de nióbio com cobre. No entanto, para solos não agressivo onde deseja diminuir a reação catódica de redução do oxigênio, recomenda-se o uso do revestimento do pentóxido de nióbio com níquel.

**5 Agradecimentos**

A equipe técnica agradece: à UTFPR/PG, UFPR, UEPG e ao Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC; ao CNPq, pelo apoio recebido, confiança depositada, liberação de recursos financeiros e disponibilização da infra-estrutura, para a realização deste estudo. Aos profissionais do LACTEC pelo apoio técnico disponibilizado durante os serviços de laboratório e a todos aqueles profissionais que, de forma direta e indireta, colaboraram para a conclusão deste trabalho.

**6 Referências bibliográficas**

- (01) MCHENRY, H. I., READ, D. T., SHIVES, T. R. Failure analysis of an amine absorber pressure vessel. *Materials performance*, aug. (1987).
- (02) FILHO, S.E.A.; PANOSSIAN, Z.; NAGAYASSU, V.Y.; ALMEIDA, N.L.; LAURINO, E.W.; PIMENTA, G.S. Estudo das variações de pH nos ensaios de corrosão. *INTERCORR 2008*. Recife. PE. Maio. (2008).
- (03) GLASS, G.K. The 100-mV Potential Decay Cathodic Protection Criterion. *Corrosion*. 55, 3 (1999) 286.
- (04) STERN, M.E.; GEARY, A.L. A theoretic Analysis of the Shape of Polarization Curves – *Journal of Electrochemical Society* – Volume 104, número 1 (1957).

(05) TRABANELLI, G.; ZUCCHI, F.; ARPAIA, M. Methods of Determination of Soil Corrosiveness with Respect to Metallic Structures. In: Annali Dell'Università Di Ferrara, 1975, Ferrara. Chimica Pura Ed Applicata, 1970, vol. III, n. 4, p. 43-60, 1972.

(06) STARKEY, R. L.; WIGHT, K. M. Anaerobic Corrosion of Iron in Soil. In: INVERSION, W. P. Tests in Soils, cap. 21. Handbook of Corrosion Testing and Evaluation. New York: ed. W. H. Ailor, John Wiley and Sons, 1971.

(07) BOOTH, G. H. Criteria of Soil Aggressiveness toward Buried Metals. British Corrosion Journal, may 1967.

(08) GIRARD, R. La Prevision de la Corrosivité de Soils. Corrosion Traitments Protection Finition, v. 18, n. 2, p. 75-81, 1970.

(09) SILVA, J.M; BRASIL S.L.D.C. Critério de avaliação da corrosividade de solos baseado na sobretensão de hidrogênio. Corrosão e Proteção de Materiais. Lisboa. Portugal (2009).

(10) SERRA, E.T. Corrosão e proteção anticorrosive dos metais no solo. CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. Rio de Janeiro (2006).

(11) SILVA, J.M; TADEU, V; BRASIL S.L.D.C. Redutores de resistência de aterramento de baixa corrosividade para linhas de transmissão. 10ª COTEQ – Conferência sobre tecnologia de equipamentos. Salvador. Bahia. Maio (2009).

(12) BARD, A.J.; FAULKNER, L.R. Eletrochemical Methods – Fundamentals and Applications – John Wiley & Sons Inc: (1980).

**Tabela 1 – Parâmetros utilizados no processo Flame Spray.**

Variáveis	Pré- aquecimento	Dist. de Projeção	Fluxo O <sub>2</sub>	Fluxo C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	Fluxo N <sub>2</sub>	Taxa de alimentação	Nº de passes	Pressão ar
Valores	120°C	150 mm	55[*1]	45[*2]	15[*3]	30 g/min	3	60 psi

[\*1] 55 = 106,82 pés<sup>3</sup>/h # [\*2] 45 = 87,41 pés<sup>3</sup>/h # [\*3] 15 = 29,14 pés<sup>3</sup>/h

Tabela 2 – Classificação dos solos pelos critérios existentes em literatura.

CLASSIFICAÇÃO CORROSIVA DOS SOLOS PELOS CRITÉRIOS DE LITERATURA							
PARAMETROS		São Matheus do Sul		Quarto Centenário		Curitiba	
		Valor obtido	Índice e classificação	Valor obtido	Índice e classificação	Valor obtido	Índice e classificação
Trabanelli e/ou Steirath	Resistividade	14,32 $\Omega$ .m	Índice = -1 solo pouco agressividade	91,60 $\Omega$ .m	Índice = -1 solo pouco agressividade	111,18 $\Omega$ .m	Índice = -1 solo pouco agressividade
	Cloreto	43,66 mg/Kg		67,45 mg/Kg		5,68 mg/Kg	
	Potencial redox	315 (mV/NHE)		271 (mV/NHE)		261 (mV/NHE)	
	Sulfato	17,28 mg/Kg		0,0 mg/Kg		13,4 mg/Kg	
	PH	6,2		6,0		5,4	
	Umidade	43,76 %		23,74 %		32,20 %	
Starkey & White	Potencial redox	315 (mV/NHE)	300 a 400 bactérias no solo média probabilidade	271 (mV/NHE)	< 300 bactérias no solo muito provável	261 (mV/NHE)	< 300 bactérias no solo muito provável
Booth	Resistividade	14,32 $\Omega$ .m	Agressivo	91,60 $\Omega$ .m	Agressivo	111,18 $\Omega$ .m	Agressivo
	Potencial redox no pH=7	315 mV/NHE)		271 (mV/NHE)		261 (mV/NHE)	
	Teor de água	43,76%		23,74 %		32,20 %	
Girard	Resistividade do extrato aquoso	14,32 $\Omega$ .m	C = 305 solo agressivo	91,60 $\Omega$ .m	C = 2,14 solo pouco agressivo	111,18 $\Omega$ .m	C = 6,90 solo pouco agressivo
	Umidade de saturação	38,72 %		42,74 %		39,86 %	
	Acidez total	1,84 (meq/litro)		0,08 (meq/litro)		0,32 (meq/litro)	
Sobretensão do H <sub>2</sub>	$\eta_{H_2}$	-53 mV	Pouco agressivo	-36 mV	Pouco agressivo	-30 mV	Pouco agressivo
Stratfull	Resistividade mínima	14,32 $\Omega$ .m	125 $\mu$ m/ ano	91,60 $\Omega$ .m	25 $\mu$ m/ ano	111,18 $\Omega$ .m	< 25 $\mu$ m/ ano
	pH	6,2		6,0		5,4	
Dpto. Transp. USA	Resistividade mínima	14,32 $\Omega$ .m	12 anos de vida	91,60 $\Omega$ .m	30 anos de vida	111,18 $\Omega$ .m	25 anos de vida
	pH	6,2		6,0		5,4	
<b>CLASSIFICAÇÃO FINAL</b>		<b>AGRESSIVO</b>		<b>POUCO AGRESSIVO</b>		<b>POUCO AGRESSIVO</b>	

CLASSIFICAÇÃO CORROSIVA DOS SOLOS PELOS CRITÉRIOS DE LITERATURA							
PARAMETROS		Dona Francisca		Castro		Cafezal	
		Valor obtido	Índice e classificação	Valor obtido	Índice e classificação	Valor obtido	Índice e classificação
Trabanelli e/ou Steirath	Resistividade	40,22 $\Omega$ .m	Índice = -1 solo pouco agressividade	429,66 $\Omega$ .m	Índice = -1 solo pouco agressividade	137,52 $\Omega$ .m	Índice = +2 solo sem agressividade
	Cloreto	2,91 mg/Kg)		9,58 mg/Kg)		4,61 mg/Kg	
	Potencial redox	285 (mV/NHE)		331 (mV/NHE)		454 (mV/NHE)	
	Sulfato	5,76 mg/Kg		9,6 mg/Kg		0,0 mg/Kg	
	PH	5,7		5,85		7,1	
	Umidade	29,78 %		30,79 %		16,8 %	
Starkey & White	Potencial redox	285 (mV/NHE)	< 300 bactérias no solo muito provável	331 (mV/NHE)	300 a 400 bactérias no solo média probabilidade	454 (mV/NHE)	> 400 bactérias no solo pouco provável
Booth	Resistividade	40,22 $\Omega$ .m	Agressivo	429,66 $\Omega$ .m	Agressivo	137,52 $\Omega$ .m	Não Agressivo
	Potencial redox no pH=7	285 (mV/NHE)		331 (mV/NHE)		454 (mV/NHE)	
	Teor de água	29,79 %		30,79 %		16,8 %	
Girard	Resistividade do extrato aquoso	40,22 $\Omega$ .m	C = 2,46 solo pouco agressivo	429,66 $\Omega$ .m	C = 0,45 solo pouco agressivo	137,52 $\Omega$ .m	C = 1,37 solo pouco agressivo
	Umidade de saturação	44,77 %		58,09 %		37,68 %	
	Acidez total	0,08 (meq/litro)		0,08 (meq/litro)		0,08 (meq/litro)	
Sobretensão do H <sub>2</sub>	$\eta_{H_2}$	- 48 mV	Pouco agressivo	- 79 mV	Pouco agressivo	30 mV	Não agressivo
Stratfull	Resistividade mínima	40,22 $\Omega$ .m	50 $\mu$ m/ ano	429,66 $\Omega$ .m	< 25 $\mu$ m/ ano	137,52 $\Omega$ .m	< 25 $\mu$ m/ ano
	pH	5,7		5,85		7,1	
Dpto. Transp. USA	Resistividade mínima	40,22 $\Omega$ .m	20 anos de vida	429,66 $\Omega$ .m	25 anos de vida	137,52 $\Omega$ .m	45 anos de vida
	pH	5,7		5,85		7,1	
<b>CLASSIFICAÇÃO FINAL</b>		<b>AGRESSIVO</b>		<b>POUCO AGRESSIVO</b>		<b>NÃO AGRESSIVO</b>	

Tabela 3 – Classificação da corrosividade do aço através de ensaios físico-químicos.

PARÂMETROS	São Matheus do Sul	Quarto Centenario	Dona Francisca
$\rho_{\text{mínima}} (\Omega \cdot \text{m})$	14	90	40
$T_x_{\rho_{\text{min}}} (\Omega \text{m} / \text{ano})$ $y = -0,6 + 80e^{- (\rho_{\text{min}} - 250) / 365}$	152	123	142
$i_{\text{corr}} (\mu\text{A}/\text{cm}^2)$	15	12	14
PARÂMETROS	São Matheus do Sul	Quarto Centenario	Dona Francisca
$K_{\text{SG}} (\text{mV})$	19	10	16
$\beta_{\text{off}} \text{ ou } r_p (\text{mV} \cdot \text{cm}^2 / \mu\text{A})$	-2	-5	-1
$i_{\text{corr} \cdot \text{Físicoqui.}} (\mu\text{A}/\text{cm}^2)$	9,5	2	16
$T_x = 10 \times i_{\text{corr} \cdot \text{Físicoqui.}} (\mu\text{A}/\text{cm}^2)$	100	20	160

PARÂMETROS	Curitiba	Castro	Cafezal
$\rho_{\text{mínima}} (\Omega \cdot \text{m})$	110	430	150
$T_x_{\rho_{\text{min}}} (\Omega \text{m} / \text{ano})$ $y = -0,6 + 80e^{- (\rho_{\text{min}} - 250) / 365}$	116	60	100
$i_{\text{corr}} (\mu\text{A}/\text{cm}^2)$	12	6	10

PARÂMETROS	Curitiba	Castro	Cafezal
$K_{\text{SG}} (\text{mV})$	12	9	7
$\beta_{\text{off}} \text{ ou } r_p (\text{mV} \cdot \text{cm}^2 / \mu\text{A})$	-3	-9	-200
$i_{\text{corr} \cdot \text{Físicoqui.}} (\mu\text{A}/\text{cm}^2)$	4	1	0,1
$T_x = 10 \times i_{\text{corr} \cdot \text{Físicoqui.}} (\mu\text{A}/\text{cm}^2)$	40	10	1

Tabela 4 – Classificação da corrosividade do aço através dos parâmetros da redução do hidrogênio.

PARÂMETROS	São Matheus do Sul	Quarto Centenario	Dona Francisca
PH	6,2	6,0	5,7
E <sub>corr</sub> (mV)	-714	-647	-712
$\eta_{H_2}$ (mV)	-22	+33	-46
E <sub>rev H<sub>2</sub></sub> (mV)	-692	-680	-662
$\beta_{\text{estacionário (H}_2)}$ (mV/dec)	92	100	30
$i_{H_2}^0$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	0,93	6,02	0,06
I total cruza com H <sub>2</sub>	$10^{0,9} = 7,34$	$10^{1,6} = 39,8$	$10^{2,3} = 199,5$

PARÂMETROS	Curitiba	Castro	Cafezal
PH	5,4	5,85	7,1
E <sub>corr</sub> (mV)	-674	-652	-727
$\eta_{H_2}$ (mV)	-30	+19	+19
E <sub>rev H<sub>2</sub></sub> (mV)	-644	-671	-746
$\beta_{\text{estacionário (H}_2)}$ (mV/dec)	36	77	317
$i_{H_2}^0$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	0,26	2,89	0,5
I total cruza com H <sub>2</sub>	$10^{1,9} = 79,43$	$10^{1,31} = 20,42$	<1

Tabela 5 – Classificação da corrosividade do aço através dos parâmetros da redução do oxigênio.

PARÂMETROS	São Matheus do Sul	Quarto Centenario	Dona Francisca
$\beta_{\text{off ou } r_p}$ ( $\text{mV}\cdot\text{cm}^2/\mu\text{A}$ )	-12,52	-5,2	-1,10
IL ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	$10^{1,2} = 15,8$	$10^{1,5} = 31,6$	$10^2 = 100$
I <sub>corr</sub> <sub>eletroquímico</sub> ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	15,8	31,6	100
i <sub>p</sub> ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	7,99	19,23	90,91
i <sub>p</sub> /i <sub>L</sub>	0,5	0,61	0,90
E <sub>apl</sub> (mV)	-854	-851	-850

PARÂMETROS	Curitiba	Castro	Cafezal
$\beta_{\text{off}}$ ou $r_p$ (mV.cm <sup>2</sup> / $\mu$ A)	- 2,43	- 8,88	- 212,93
IL ( $\mu$ A/cm <sup>2</sup> )	$10^{1,82} = 66,07$	$10^{1,38} = 24$	$10^{0,16} = 1,44$
$i_{\text{corr}}$ eletroquímico ( $\mu$ A/cm <sup>2</sup> )	66,07	24	1,44
$i_p$ ( $\mu$ A/cm <sup>2</sup> )	41,15	11,26	0,47
$i_p/i_L$	0,62	0,47	0,33
$E_{\text{apl}}$ (mV)	-851	-853	-953

Tabela 6 – Classificação da corrosividade do revestimento Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> + Cobre através dos parâmetros da redução do Hidrogênio.

Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> + Cobre - Redução do Hidrogênio			
PARÂMETROS	São Matheus do Sul	Quarto Centenário	Dona Francisca
$\eta_{\text{H}_2}$ (mV)	265	452	370
$i_{\text{H}_2}^0$ ( $\mu$ A/cm <sup>2</sup> )	47,64	2079	457,09

PARÂMETROS	Curitiba	Castro	Cafezal
$\eta_{\text{H}_2}$ (mV)	430	530	408
$i_{\text{H}_2}^0$ ( $\mu$ A/cm <sup>2</sup> )	210378	2328	2,65

Tabela 7 – Classificação da corrosividade do revestimento Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> + Cobre através dos parâmetros da redução do oxigênio.

Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> + Cobre - Redução do Oxigênio			
PARÂMETROS	São Matheus do Sul	Quarto Centenário	Dona Francisca
$i_p/i_L$	0,27	0,15	0,18
$E_{\text{apl}}$ (mV)	-863	-858	-855

PARÂMETROS	Curitiba	Castro	Cafezal
$i_p/i_L$	0,15	0,14	0,19
$E_{\text{apl}}$ (mV)	855,6	-868,6	-1145,8

Tabela 8 – Classificação da corrosividade do revestimento Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> + Níquel através dos parâmetros da redução do Hidrogênio.

Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> + Níquel - Redução do Hidrogênio			
PARÂMETROS	São Matheus do Sul	Quarto Centenário	Dona Francisca
$\eta_{H_2}$ (mV)	43	166	81
$i_{H_2}^0$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	1,24	17,38	10,14

PARÂMETROS	Curitiba	Castro	Cafezal
$\eta_{H_2}$ (mV)	185	252	366
$i_{H_2}^0$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	27,67	9,23	2,19

Tabela 9 – Classificação da corrosividade do revestimento Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> + Níquel através dos parâmetros da redução do oxigênio.

Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> + Níquel - Redução do Oxigênio			
PARÂMETROS	São Matheus do Sul	Quarto Centenário	Dona Francisca
$i_p/i_L$	1,01	0,34	0,36
$E_{apl}$ (mV)	-850	-860	-854

PARÂMETROS	Curitiba	Castro	Cafezal
$i_p/i_L$	0,27	0,19	0,14
$E_{apl}$ (mV)	-861	-888	-1204

Tabela 10 – Classificação da corrosividade do revestimento Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> + Alumínio através dos parâmetros da redução do Hidrogênio.

Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> + Alumínio - Redução do Hidrogênio			
PARÂMETROS	São Matheus do Sul	Quarto Centenário	Dona Francisca
$\eta_{H_2}$ (mV)	131	130	157
$i_{H_2}^0$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	3,84	25,7	79,62

PARÂMETROS	Curitiba	Castro	Cafezal
$\eta_{H_2}$ (mV)	223	161	210
$i_{H_2}^0$ ( $\mu A/cm^2$ )	18,66	30,4	1,08

Tabela 11 – Classificação da corrosividade do revestimento Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> + Alumínio através dos parâmetros da redução do oxigênio.

Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> + Alumínio - Redução do Oxigênio			
PARÂMETROS	São Matheus do Sul	Quarto Centenário	Dona Francisca
$i_p/i_L$	0,44	0,26	0,26
$E_{apl}$ (mV)	- 861	- 855	-853

PARÂMETROS	Curitiba	Castro	Cafezal
$i_p/i_L$	0,22	0,27	0,28
$E_{apl}$ (mV)	-861	-860	-1048

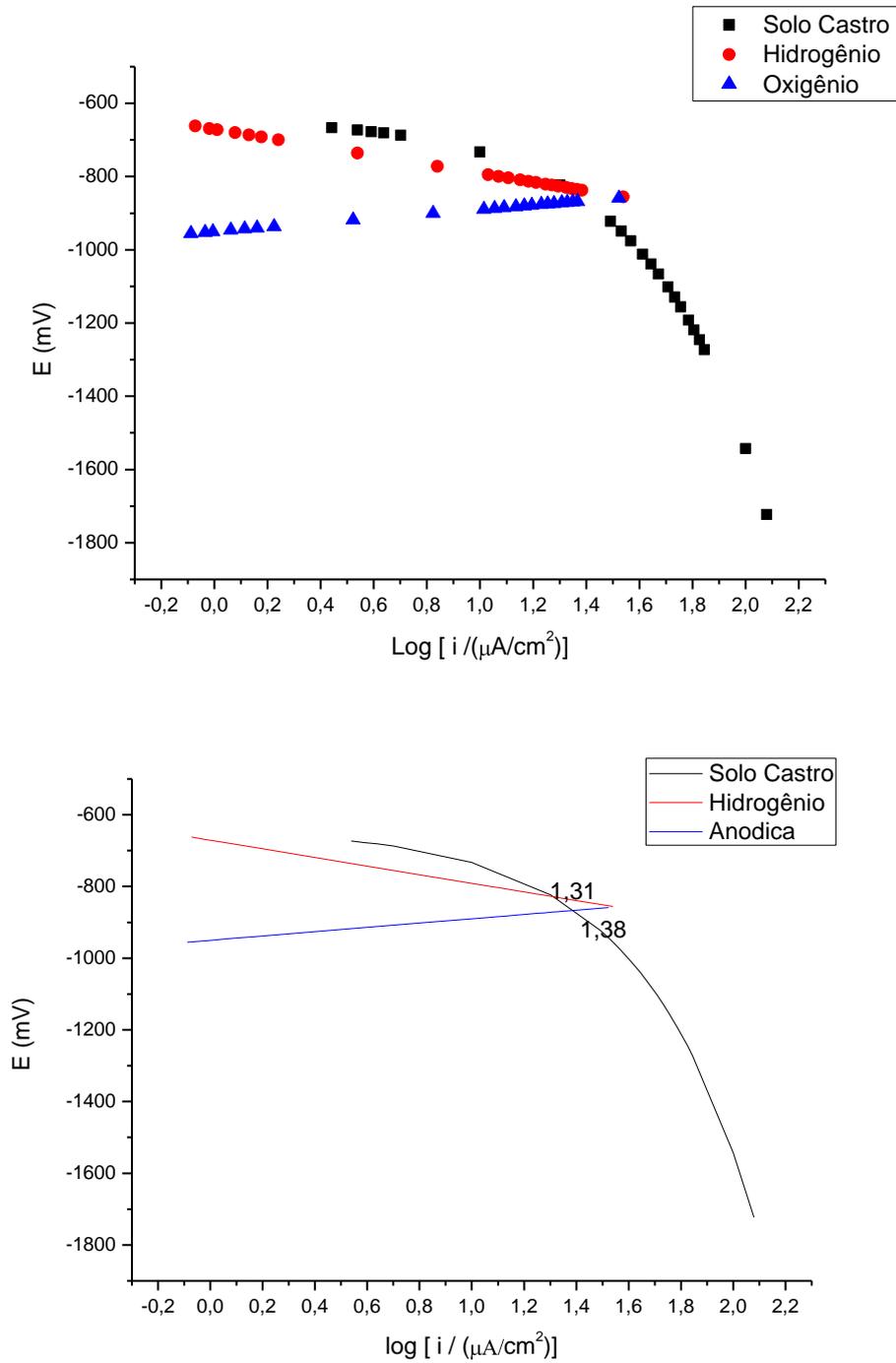


Figura 1: Curvas de polarização anódica do ferro e catódicas, ora do hidrogênio, ora do oxigênio para o aço em solo pouco agressivo (Castro).

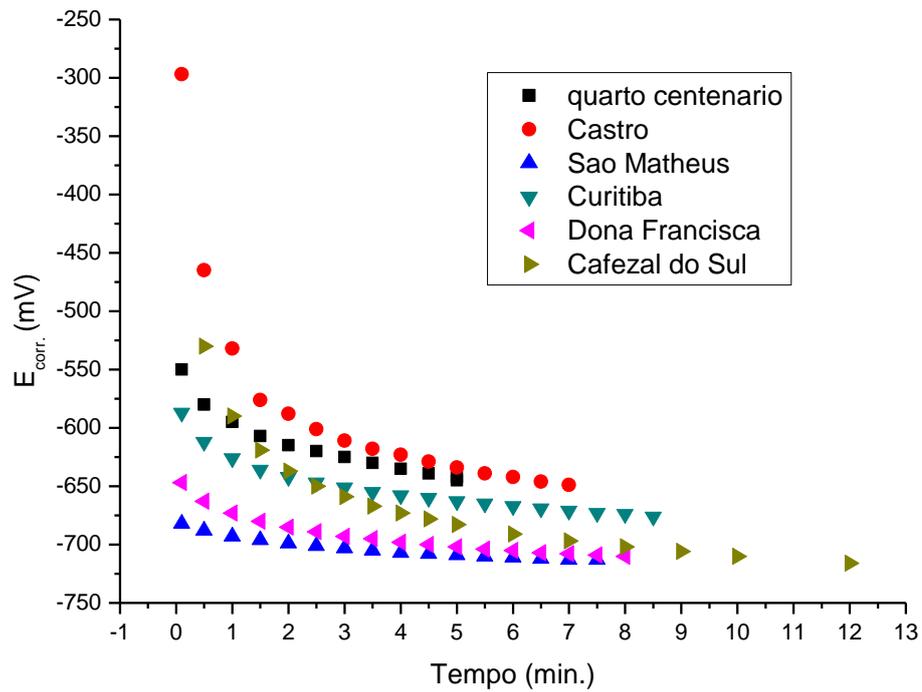


Figura 2: Potenciais de corrosão do aço para os diferentes solos estudados

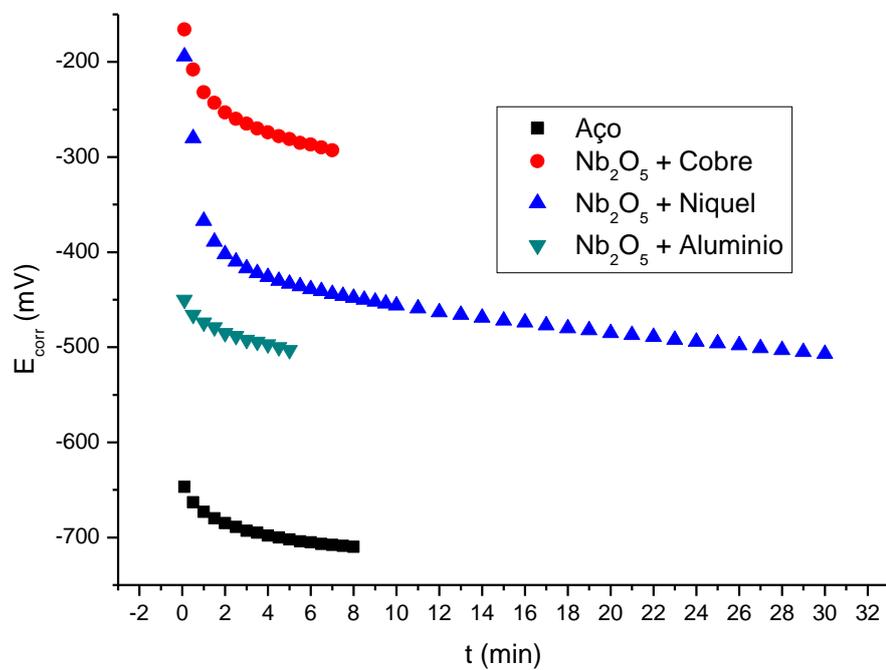


Figura 3: Potenciais de corrosão dos revestimentos a base de pentóxido de nióbio e do aço para o solo agressivo (Dona Francisca).

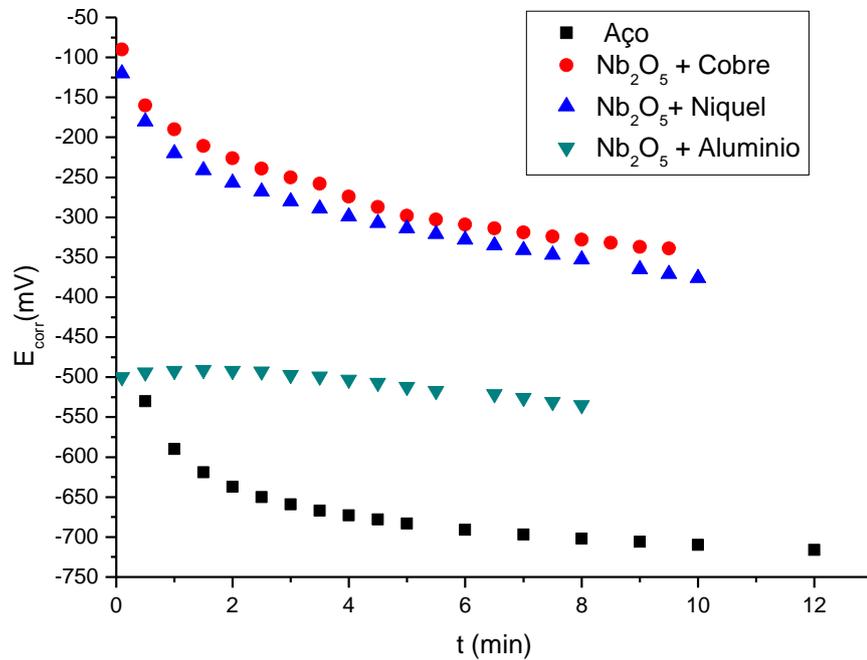


Figura 4: Potenciais de corrosão dos revestimentos a base de pentóxido de nióbio e do aço para o solo não agressivo (Cafezal do sul).

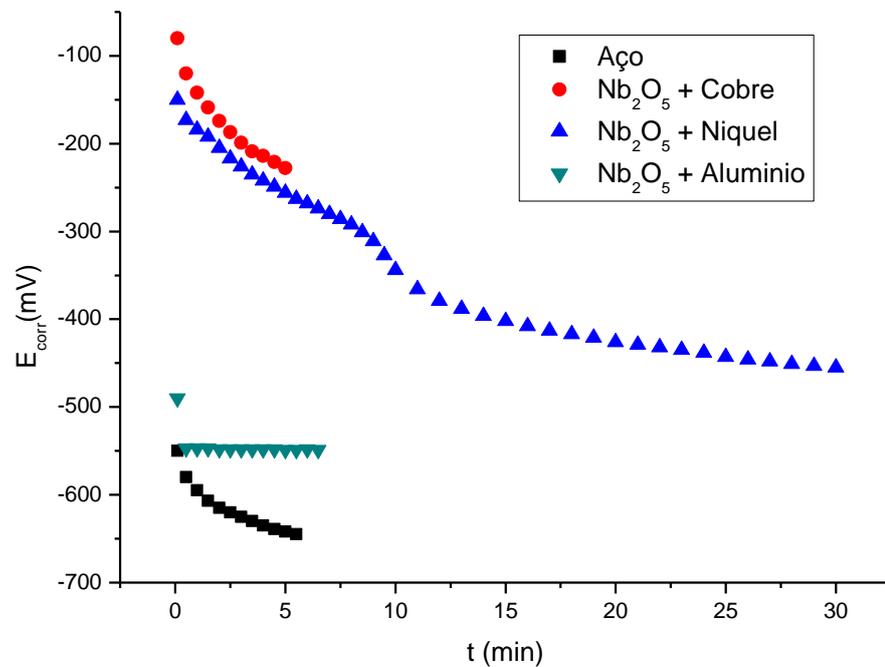


Figura 5: Potenciais de corrosão dos revestimentos a base de pentóxido de nióbio e do aço para o solo pouco agressivo (Quarto Centenário).