

**Estudo do processo corrosivo e prospecção da vida útil do aço API 5L X70 com e sem revestimento de nióbio em solo quimicamente tratado**

**Study of corrosive process and life prospect of API 5L X70 steel with and without niobium coating on chemically treated soil**

**Estudio del proceso corrosivo y prospección de la vida útil del acero API 5L X70 con y sin revestimiento de niobio en suelo químicamente tratado**

Recebido: 29/05/2019 | Revisado: 05/06/2019 | Aceito: 10/06/2019 | Publicado: 14/06/2019

**Fernanda Menezes França**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2864-3270>

Universidade do Estado de Minas Gerais, Brasil

E-mail: [fernandamenezesfranca@gmail.com](mailto:fernandamenezesfranca@gmail.com)

**Gustavo Victor Souza**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3646-5902>

Universidade do Estado de Minas Gerais, Brasil

E-mail: [souzaagv@gmail.com](mailto:souzaagv@gmail.com)

**Fabrcia Nunes de Jesus Guedes**

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6342-3946>

Universidade do Estado de Minas Gerais, Brasil

E-mail: [fabriciajesus@gmail.com](mailto:fabriciajesus@gmail.com)

**Resumo**

A diversidade do emprego do aço corrobora a sua grande importância para a sociedade. Devido à sua versatilidade e o seu amplo campo de atuação, o aço pode ser utilizado submerso no solo na construção de extensas tubulações, minerodutos e tanques para o transporte de combustíveis. O constante contato entre a tubulação de aço e o solo, com o passar do tempo, torna-o exposto à ação corrosiva. Em decorrência, são envolvidos custos diretos elevados com inspeção, manutenção e a substituição de peças, e custos indiretos devido a problemas de saúde oriundos de contaminação, exaurimento de recursos minerais, perfurações com perdas de materiais, além de danos ambientais. O estudo dos processos corrosivos tem crescido bastante e o conhecimento tanto dos princípios da corrosão quanto da proteção anticorrosiva é fundamental na busca de soluções para mitigar os efeitos advindos da corrosão, prevenir sua ocorrência e desenvolver materiais com maior

resistência. Os aços API 5L X70 são utilizados em malhas dutoviárias que transportam gases, petróleo e seus derivados onde se exige elevada resistência mecânica e à corrosão. Desta forma, estes aços são suscetíveis ao processo corrosivo, pois ficam em contato direto com diversos solos e ambientes brasileiros. No presente trabalho, avaliou-se o comportamento do aço API 5L X70 com e sem revestimento de nióbio em solo quimicamente tratado com soluções ácidas (simulando a chuva ácida) e básicas (simulando a calagem do solo). Foram empregadas técnicas como a aspersão térmica (para revestimento das amostras), ensaios experimentais de corrosão e microscopia eletrônica de varredura, com a finalidade de identificar os produtos de corrosão. Ao final, classificou-se as formas e tipos de corrosão obtidas nos corpos de prova, calculou-se a taxa de corrosão e foi avaliada a eficiência e a viabilidade técnica do revestimento com nióbio além de suas propriedades anticorrosivas. Como resultado, as amostras com revestimento em meio ácido apresentaram corrosão elevada, e as que estavam em meio básico, revelaram uma boa resistência ao processo corrosivo. Para as amostras sem revestimento, uma corrosão moderada foi evidenciada com a adição de ácido sulfúrico, enquanto que, com a adição de hidróxido de cálcio, a corrosividade foi alta.

**Palavras-Chave:** Corrosão, Revestimento, Aço API 5L X70, Nióbio, Solo.

### **Abstract**

The diversity of the employment of steel corroborates its great importance to society. Due to its versatility and wide field of operation, steel can be used submerged in the ground in the construction of extensive pipelines, pipelines and tanks to transport fuel. The constant contact between the steel pipe and the soil, over time, renders it exposed to corrosive action. As a result, high direct costs are involved with inspection, maintenance and replacement of parts, and indirect costs due to health problems resulting in contamination, depletion of mineral resources, perforations with loss of materials, besides environmental damages. The study of corrosive processes has grown greatly and the knowledge of both the principles of corrosion and corrosion protection is essential in the search for solutions to mitigate the effects of corrosion, to prevent their occurrence and develop materials with a better resistance. API 5L X70 steels are used in pipelines that transports gas, oil and its derivatives where high mechanical and corrosion resistance are required. In this way, these steels are susceptible to the corrosive process, since they are in direct contact with diverse Brazilian soils and environments. In the present work, the behavior of API 5L X70 steel with and without niobium coating was evaluated in soil chemically treated with acid

solutions (simulating acid rain) and basic (simulating soil liming). Techniques such as thermal spraying (for sample coating), experimental corrosion tests and scanning electron microscopy were used in order to identify the corrosion products. At the end, the forms and types of corrosion obtained in the test specimens were classified, the corrosion rate was calculated and the efficiency and the technical feasibility of the niobium coating were evaluated in addition to their anticorrosive properties.

**Keywords:** Corrosion, Coating, Steel API 5L X70, Niobium, Soil.

### **Resumen**

La diversidad del empleo del acero corrobora su gran importancia para la sociedad. Debido a su versatilidad y su amplio campo de actuación, el acero puede ser utilizado sumergido en el suelo en la construcción de extensas tuberías, mineroductos y tanques para el transporte de combustibles. El constante contacto entre la tubería de acero y el suelo, con el paso del tiempo, lo hace expuesto a la acción corrosiva. En consecuencia, están involucrados costos directos elevados con inspección, mantenimiento y sustitución de piezas, y costos indirectos debido a problemas de salud provenientes de contaminación, agotamiento de recursos minerales, perforaciones con pérdidas de materiales, además de daños ambientales. El estudio de los procesos corrosivos ha crecido bastante y el conocimiento tanto de los principios de la corrosión y de la protección anticorrosiva es fundamental en la búsqueda de soluciones para mitigar los efectos provenientes de la corrosión, prevenir su ocurrencia y desarrollar materiales con mayor resistencia. Los aceros API 5L X70 se utilizan en mallas conducentes que transportan gases, petróleo y sus derivados donde se requiere elevada resistencia mecánica y corrosión. De esta forma, estos aceros son susceptibles al proceso corrosivo, pues quedan en contacto directo con diversos suelos y ambientes brasileños. En el presente trabajo, se evaluó el comportamiento del acero API 5L X70 con y sin revestimiento de niobio en suelo químicamente tratado con soluciones ácidas (simulando la lluvia ácida) y básicas (simulando el calado del suelo). Se emplearon técnicas como la aspersión térmica (para revestimiento de las muestras), ensayos experimentales de corrosión y microscopía electrónica de barrido, con la finalidad de identificar los productos de corrosión. Al final, se clasificaron las formas y tipos de corrosión obtenidas en los cuerpos de prueba, se calculó la tasa de corrosión y se evaluó la eficiencia y la viabilidad técnica del revestimiento con niobio además de sus propiedades anticorrosivas.

**Palabras clave:** Corrosión, Revestimiento, Acero API 5L X70, Niobio, Suelo.

## 1. Introdução

A diversidade do emprego do aço corrobora a sua grande importância para a sociedade. Devido à sua versatilidade e o seu amplo campo de atuação, o aço pode ser utilizado submerso no solo na construção de extensas tubulações, minerodutos e tanques para o transporte de combustíveis. Contudo, essas estruturas com o passar do tempo sofrem processos de corrosão que envolvem diretamente custos elevados com inspeção, manutenção e ainda a substituição de peças, e indiretamente devido a problemas de saúde oriundos de contaminação, diminuição de recursos como reservas minerais, perfurações com perdas de materiais e danos ambientais.

De acordo com Martins (2012), o fenômeno da corrosão é visto como a destruição dos materiais metálicos e não metálicos em contato com o meio ou ambiente, devido a interações químicas e/ou mecânicas. Callister (2008) define a corrosão como ataque destrutivo, de natureza eletroquímica iniciando pela superfície.

As consequências da corrosão são inúmeras e seus efeitos sobre uma operação segura, confiável e eficiente de equipamentos ou estruturas são frequentemente mais graves do que a simples perda de massa do material. Deve-se salientar também que além dos gastos ocasionados pela corrosão, existem também questões de segurança, interrupção de comunicações, preservação de monumentos históricos e poluição ambiental, sendo estes os fatores de maior importância para que se evite a sua ocorrência (Gentil, 2007).

A corrosão ocorre em diferentes meios, sendo os mais frequentes a atmosfera, a água, o solo e os produtos químicos. Como o objetivo deste trabalho foi o estudo da corrosão de aço que pode ser empregado em dutos, o meio corrosivo em questão foi o solo, considerado bem complexo devido à grandes quantidades de variáveis. Além disso, as características físico-químicas como presença de água e de microrganismos, porosidade (aeração), umidade, sais solúveis e gases no solo, potencial hidrogeniônico (pH), a resistividade elétrica e o potencial redox devem ser consideradas, pois podem intervir diretamente.

Gentil (2007) afirma que o solo é um dos meios corrosivos mais complicados de se estudar, pois é difícil estabelecer antecipadamente sua ação agressiva para os materiais metálicos. Devido à dificuldade em compreender este ambiente corrosivo, ele ainda não é muito investigado se comparado a outros meios corrosivos, como por exemplo, soluções aquosas simulando águas marítimas. Desta forma, deve-se considerar o comportamento do solo como sendo um meio corrosivo de grande relevância.

Levando-se em consideração as enormes tubulações enterradas, uma gama de

pesquisas e trabalhos vem sendo desenvolvidas com intuito de buscar soluções objetivando mitigar as adversidades causadas pela corrosão. Callister (2008) afirma que conhecendo o tipo e os mecanismos que causam a corrosão, pode-se tomar medidas para prevenir sua ocorrência.

Dentre algumas das alternativas hoje utilizadas para proteger, e desta forma, aumentar a vida útil de um aço é fazer o seu revestimento com outros materiais metálicos ou não. O nióbio é um destes metais que pode ser empregado para esta finalidade. Ele vem sendo amplamente estudado como protetor contra a corrosão de diversos materiais metálicos, devido à elevada resistência e compatibilidade que apresenta. Esse elemento é resistente ao processo corrosivo por possuir grandes regiões de passivação e não apresentar corrosão à temperatura ambiente, conforme Mariano et al (2007).

O Brasil tem as maiores reservas de nióbio do mundo, cerca de 98,53% que totalizam 842,4 milhões de toneladas. Diante da descoberta de que este metal confere melhoria nas propriedades do aço e com grandes vantagens econômicas, ele passou a ser utilizado na fabricação de tubulações e como revestimento (Alves; Coutinho, 2015). Portanto, o revestimento de nióbio pode ser promissor para se evitar corrosão, visando diminuir gastos com reparos e avarias, proporcionando um tempo maior de vida dos equipamentos e instalações industriais.

O fato de o nióbio possuir características físico-químicas que o classificam como elemento resistente à oxidação torna-o uma peça chave de diversas pesquisas. Partindo deste pressuposto, o presente trabalho teve como hipótese que o aço API 5L X70 ao ser revestido apresentaria maior resistência à corrosão.

Diante dos argumentos supracitados, o propósito deste trabalho foi estudar o processo corrosivo por intermédio de levantamento bibliográfico e ensaios conduzidos em solo quimicamente tratado. Foram empregadas amostras do aço API 5L X70 com revestimento de óxido de nióbio visando averiguar sua eficiência contra corrosão e prospecção da sua vida útil.

## **2. Metodologia**

Esta pesquisa foi desenvolvida na Faculdade de Engenharia da Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG), Campus de João Monlevade. Este trabalho foi desenvolvido em um período de 4 meses.

Esta pesquisa caracteriza-se aplicada, quanto à natureza; exploratória e descritiva,

quanto aos objetivos traçados; qualitativa e quantitativa quanto à abordagem, e experimental, quanto aos procedimentos técnicos.

Para executar as atividades propostas, este trabalho foi sequenciado nas etapas descritas a seguir:

**Primeira Etapa:** Pesquisa e estudo do material bibliográfico.

A etapa inicial implicou na pesquisa, leitura, análise crítica e interpretação de diversos artigos e publicações de fontes variadas referentes à corrosão em tubos utilizados pela indústria de petróleo e gás e outros segmentos mínero-metalúrgicos.

**Segunda Etapa:** Preparação do tubo de aço API 5L X70

Esta etapa consistiu em retirar o revestimento polimérico que se encontra presente na superfície do tubo. Para isso, utilizou-se o maçarico para fornecer energia (na forma de calor) no interior do tubo. Em seguida, as extremidades do tubo, que se apresentavam oxidadas, foram removidas pelo processo oxicorte. Estes procedimentos foram de suma importância, pois tanto o revestimento polimérico, quanto as extremidades oxidadas poderiam comprometer a integridade dos dados a serem obtidos no decorrer do trabalho.

O polimento e a retirada das sobras foram realizados com auxílio de uma lixadeira para que a superfície ficasse isenta de quaisquer influências que pudessem prejudicar o posterior revestimento com o nióbio. O corte das amostras foi efetuado pelo processo policorte. Foi empregado um total de 38 amostras neste trabalho, sendo cada uma delas cortada nas dimensões de 5,3 por 2,1 cm.

A preparação do tubo de aço API 5L X70 e o corte das amostras foram realizados conforme os procedimentos operacionais de execução de serviço e normas internas da empresa IMA – Indústria Mineira Almenara, localizada na cidade de João Monlevade – MG, empresa com a qual previamente foi estabelecida uma parceria.

**Terceira Etapa:** Revestimento das amostras com Nióbio.

Para o desenvolvimento desta etapa foi primeiramente firmada uma parceria com as empresas Ogramac Metalização e OPT Brasil, localizadas na cidade de Santo Antônio de Posse - SP, onde foi realizado o revestimento empregando o óxido de nióbio em 19 amostras após a preparação preliminar das mesmas (limpeza, corte, definição da dimensão) e posterior jateamento com granalha de óxido de alumínio conforme padrões da norma ABNT NBR 7348:2017. Em seguida, todas as amostras foram pesadas com o auxílio de uma balança analítica de precisão no laboratório de Química e águas da UEMG – Unidade de João Monlevade. Para o revestimento das amostras, foi utilizado o processo de aspersão térmica de metais (Pulverização), sendo neste caso o flame spray (LVOF) oxiacetileno,

para obter uma camada de óxido de nióbio com aproximadamente 300 a 500 microns de espessura.

Este método empregado consiste na fundição do metal de revestimento, transformando-o em partículas, sendo estas bombeadas com o auxílio de uma pistola de metalização contra o material que vai ser revestido (Metallisation, 2017).

**Quarta Etapa:** Coleta e homogeneização do Solo.

Para esta etapa foi utilizado o método de ensaio - ME-1, da PCR, correspondente à norma NBR 6457 da ABNT. Foram coletadas amostras de latossolo vermelho amarelo no bairro Mangabeiras, João Monlevade, e medido o potencial hidrogeniônico (pH) das mesmas. Como foi encontrado um solo com pH muito próximo de 7, deu-se continuidade aos ensaios. A medida do pH foi através da utilização de papel indicador de pH, sendo também utilizado o pHmetro para certificação dos valores obtidos.

Foi realizada uma análise química do solo para conhecer suas características físico-químicas. Retirou-se uma amostra de 250 g do solo, que foi enviada ao laboratório de análise de solo da Universidade Federal de Viçosa.

**Quinta Etapa:** Confeção das caixas..

Nesta etapa foram montadas 38 caixas de madeira com tamanho aproximado de 7 cm de comprimento, 7 cm de altura e 7 cm de largura. A madeira utilizada para a confecção das caixas foi a pinus. Este material foi escolhido pela não interferência química no processo e por permitir a simulação da realidade que ocorre nos dutos empregados industrialmente. Estas caixas foram posteriormente empregadas para introdução das amostras dentro do solo à aproximadamente metade de sua altura.

**Sexta Etapa:** Preparo das soluções e ensaios corrosivos.

Todas as soluções empregadas neste trabalho foram preparadas no laboratório de Química e Águas da UEMG Unidade João Monlevade. As soluções ácidas ( $H_2SO_4$ ) e básicas ( $Ca(OH)_2$ ), foram preparadas nas concentrações de 1,5; 3 e 4,5%, (v/v) para as soluções ácidas e em (m/v) para as básicas, e trocadas de mês em mês por novas soluções.

No início do ensaio corrosivo, o solo foi colocado no fundo de cada caixa, e ao atingir aproximadamente o meio da mesma, a amostra foi introduzida a 3 cm da borda, e novamente, adicionou-se solo até a superfície da caixa, obtendo no total 460 gramas de solo.

O processo de adição das soluções e da água foi realizado da seguinte maneira: Foram adicionados cerca de 10 mL de água, logo após 20 mL de solução ácida e 20 mL de solução básica, e por fim, mais 10 mL de água. Já para as caixas que não receberam

soluções (amostras testemunhas), foram adicionados apenas 40 mL de água deionizada. Para a adição das soluções foram utilizados pequenos regadores, para que a mesma fosse feita de maneira uniforme. Utilizou-se um regador para a solução de ácido sulfúrico, um para solução de hidróxido de cálcio e um para adição de água deionizada.

As medidas de pH foram realizadas com auxílio do pHmetro da seguinte maneira: retirou-se uma pequena fração de solo e adicionou-se água para que se obtivesse uma solução homogênea. Em seguida, foi também medida a diferença de potencial (ddp) entre o solo e a amostra com o auxílio do multímetro.

#### **Sétima Etapa:** Análises instrumentais.

Esta etapa objetivou a análise estrutural e microestrutural das amostras após o término do ensaio corrosivo. Para isso, firmou-se parceria com a APERAM em Timóteo - MG, a fim de realizar a técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), visto que ela possibilita a identificação dos agentes e mecanismos de corrosão envolvidos, sendo possível, a partir desta análise instrumental inferir sobre parâmetros de recuperação e preservação de cada peça. Através da MEV, pretendeu-se observar a morfologia e a microestrutura dos produtos de corrosão, permitindo analisar o tipo de corrosão e/ou modificação da estrutura na superfície e ao longo da própria espessura, após o ensaio corrosivo. As imagens fornecidas pelo MEV foram úteis para investigação das possíveis falhas microestruturais e alterações metalúrgicas, alterações microestruturais e/ou mecânicas, tais como: conformação mecânica e soldagem.

#### **Oitava Etapa:** Tratamento dos dados obtidos e discussão.

Os resultados obtidos nas análises feitas durante o trabalho foram organizados em planilhas referentes às medições de pH e potencial, obtendo-se desta maneira, um banco de dados. A interpretação dos dados obtidos constitui uma etapa de grande relevância, já que conduz a considerações sobre a eficiência do revestimento.

As informações resultantes da interpretação dos dados vieram, mediante a realização do processo criterioso de avaliação, investigação e análise detalhada dos dados coletados e suas implicações. Diante disso, foi elaborada uma possível explicação de como o revestimento com nióbio influencia na proteção contra corrosão.

### **3. Resultados e Discussões**

Neste trabalho foi utilizado o aço API 5L X70 devido as suas características de alta resistência e baixa liga, propriedades como alta resistência à tração e boa tenacidade e pela

aplicabilidade principal em transporte de petróleo e gás. Nos ensaios realizados irrigou-se semanalmente as amostras com uma solução de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) e hidróxido de cálcio ( $Ca(OH)_2$ ) com concentração de 1,5; 3 e 4,5%. A solução de ácido sulfúrico foi escolhida a fim simular uma ocorrência natural, a chuva ácida, mais comum em cidades industrializadas. Já a solução de hidróxido de cálcio foi escolhida para simular o processo de calagem, que tem como principal objetivo controlar a acidez do solo, visto que a maioria dos solos brasileiros são ácidos. Também foi tomado para análise um grupo controle, sendo que uma amostra com revestimento e outra sem revestimento receberam apenas água semanalmente, a fim de comparar os resultados obtidos. As adições das soluções foram realizadas, de acordo com a Tabela 01 abaixo.

**Tabela 01** – Distribuição das amostras nas caixas

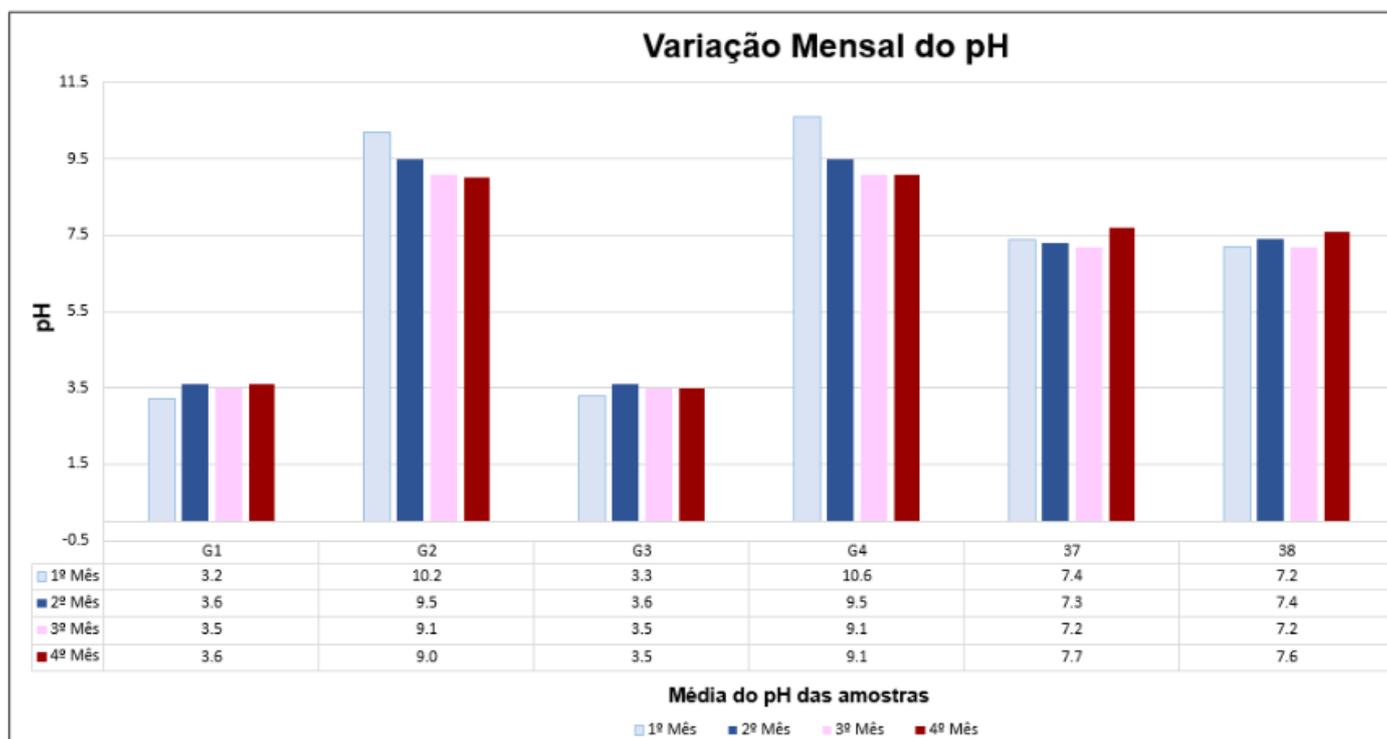
Reagente	Concentração (% m/v); (% v/v)	Caixa	Observação
$H_2SO_4$	1,5	1, 2 e 3	Com revestimento de óxido de nióbio
	3	4, 5 e 6	
	4,5	7, 8 e 9	
$Ca(OH)_2$	1,5	10, 11 e 12	Com revestimento de óxido de nióbio
	3	13, 14 e 15	
	4,5	16, 17 e 18	
$H_2SO_4$	1,5	19, 20 e 21	Sem revestimento
	3	22, 23 e 24	
	4,5	25, 26 e 27	
$Ca(OH)_2$	1,5	28, 29 e 30	Sem revestimento
	3	31, 32 e 33	
	4,5	34, 35 e 36	
Água		37	Com revestimento de óxido de nióbio
		38	Sem revestimento

**Fonte:** Autores

### 3.1 Medição do pH do solo e ddp

Notou-se que o pH dos solos que receberam apenas água, sofreu uma pequena variação, como era previsto, uma vez que o solo coletado apresentava o pH próximo de 7 (neutro) e a água deionizada utilizada não alterou significativamente o pH do solo. O Gráfico 01 ilustra essa variação de pH durante o ensaio corrosivo.

**Gráfico 01** – Variação mensal do pH

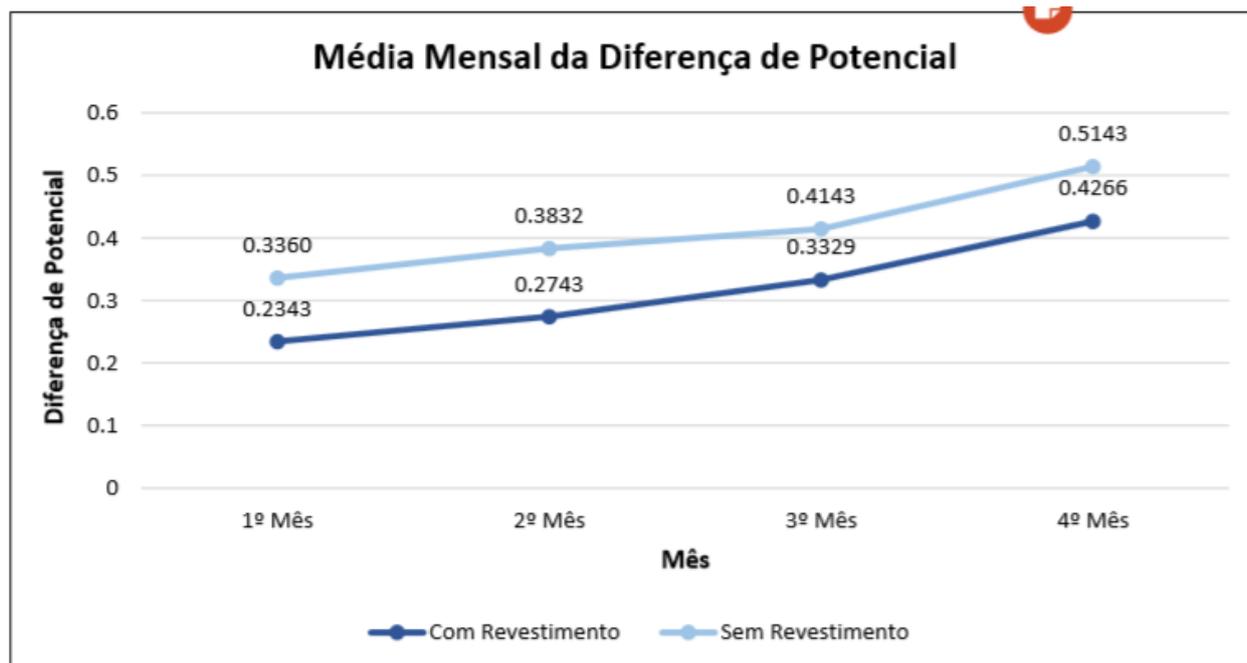


**Fonte:** Autores

O grupo G1 refere-se as caixas de 1 a 9, o G2 das caixas 10 a 18, o G3 das caixas 19 a 27 e o G4 das caixas 28 a 36. A caixa 37 e 38 são do grupo controle no qual só receberam adição de água.

Sabendo que a diferença de potenciais (ddp) gera uma corrente elétrica que pode ser conduzida por meio de pequenas falhas ou pela porosidade existentes na superfície das amostras revestidas, e que essas podem aumentar no decorrer do tempo, a ddp foi devidamente acompanhada e medida durante todo período do ensaio experimental. Quando o fluxo de energia é concentrado numa pequena área, o processo corrosivo pode ser acelerado, motivo pelo qual foi realizado esse procedimento. O Gráfico 02 ilustra essa variação nesse mesmo período.

Gráfico 02 – Variação mensal da ddp



Fonte: Autores

### 3.2 Taxa de Corrosão

Após 120 dias enterradas, as amostras foram retiradas das caixas, lavadas com água corrente e com solução de ácido clorídrico a 5%, em seguida foram secadas em estufa por um tempo de 15 minutos à uma temperatura de 100°C, segundo a norma da ASTM G1-90/ASTM G1-03, para remover o solo da superfície e observar os produtos de corrosão formados. Posteriormente a limpeza, foi efetuada a pesagem das amostras para calcular a taxa de corrosão.

A Tabela 02 apresenta o cálculo da perda de massa em porcentagem e a Tabela 03 apresenta os resultados dos cálculos das taxas de corrosão realizados.

**Tabela 02** – Porcentagem da perda de massa

PORCENTAGEM (%) DA PERDA DE MASSA	
CP's	%
1 - 3	0,08
4 - 6	0,13
7 - 9	0,16
10 - 12	0,09
13 - 15	0,09
16 - 18	0,06
19 - 21	0,30
22 - 24	0,14
25 - 27	0,20
28 - 30	0,67
31 - 33	0,80
34 - 36	0,75
37	0,06
38	0,22

Fonte: Autores

**Tabela 03** – Resultado das taxas de corrosão

TAXA DE CORROSÃO (TC)					
CP	$\Delta M$ (g)	A (cm <sup>2</sup> )	t (h)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	MEDIA TC (mm/ano)
1 - 3	0.0530	11.5	2880	7.85	0.0178
4 - 6	0.0844	11.5	2880	7.85	0.0278
7 - 9	0.1104	11.5	2880	7.85	0.0372
10 e 12	0.0590	11.5	2880	7.85	0.0122
13 - 15	0.0630	11.5	2880	7.85	0.0212
16 - 18	0.0409	11.5	2880	7.85	0.0138
19 - 21	0.2207	11.5	2880	7.85	0.0744
22 - 24	0.1049	11.5	2880	7.85	0.0354
25 - 27	0.1289	11.5	2880	7.85	0.0434
28 - 30	0.4610	11.5	2880	7.85	0.1553
31 - 33	0.5819	11.5	2880	7.85	0.1961
34 - 36	0.5279	11.5	2880	7.85	0.1779
CP - 37	0.0443	11.5	2880	7.85	0.0149
CP - 38	0.1327	11.5	2880	7.85	0.0447

Fonte: Autores

Para avaliação quantitativa da corrosão, foram usados os critérios da norma NACE-RP 07-75, citados por Gentil (2007), que determina a corrosividade de acordo com a taxa de corrosão em milímetros por ano (Tabela 04).

**Tabela 04** – Classificação da corrosividade

Taxa de corrosão Uniforme (mm/ano)	Corrosividade
<0.025	Baixa
0.025 a 0.12	Moderada
0.13 a 0.25	Alta
>0.25	Severa

**Fonte:** Gentil (2007).

Considerando-se a classificação supracitada e analisando os resultados obtidos na Tabela 03, verificou-se que as amostras, sem revestimento e com adição das soluções ácida e básica, sofreram uma corrosividade maior do que as amostras revestidas, sendo também possível perceber esse comportamento nas amostras do grupo controle.

As amostras, revestidas e com adição de solução ácida, em concentrações mais altas (3 e 4,5%), sofreram uma corrosividade moderada, já as amostras restantes, com revestimento e com adição das soluções ácida e básica, apresentaram uma baixa corrosividade. Entretanto, para se alcançar as altas concentrações (3 e 4,5%), em condições reais, demoraria mais tempo do que o empregado nestes ensaios, salvo em regiões que têm muita emissão de gases. Além disso, esse aumento da taxa de corrosão pode ter tido ação de microrganismo, o qual não foi o foco de estudo neste trabalho. Deste modo, o revestimento de óxido de nióbio para essas amostras, também se mostrou eficaz.

Ainda, foi possível constatar que as amostras sem revestimento e que receberam  $\text{Ca(OH)}_2$ , tiveram corrosividade maior do que as amostras sem revestimento e que receberam  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Pode-se inferir que isso ocorreu devido ao solo apresentar um aspecto mais poroso.

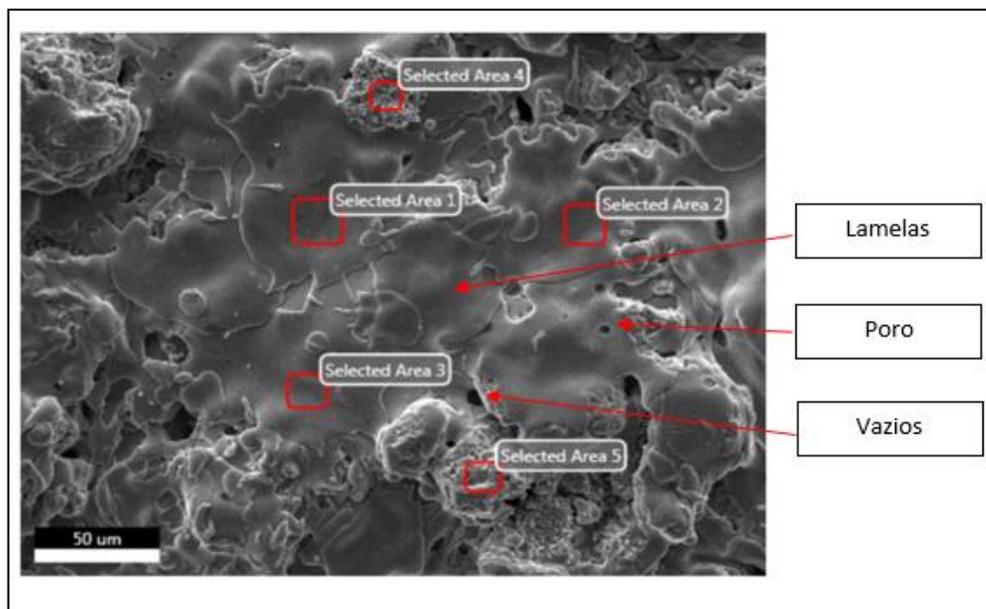
### 3.3 Análise Instrumental

Para avaliar o processo corrosivo e analisar a microestrutura, foi utilizada a técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV). As análises por MEV/EDS foram realizadas no laboratório do Centro de Pesquisas da APERAM, em Timóteo - MG.

A partir das imagens geradas, foi observada uma morfologia uniforme, sem a presença

de partículas esféricas, o que favoreceu a produção de lamelas. A superfície do corpo de prova 14 obtida após a aspersão térmica do revestimento de óxido de nióbio é apresentado na Figura 01.

Figura 01 – Superfície do corpo de prova 14

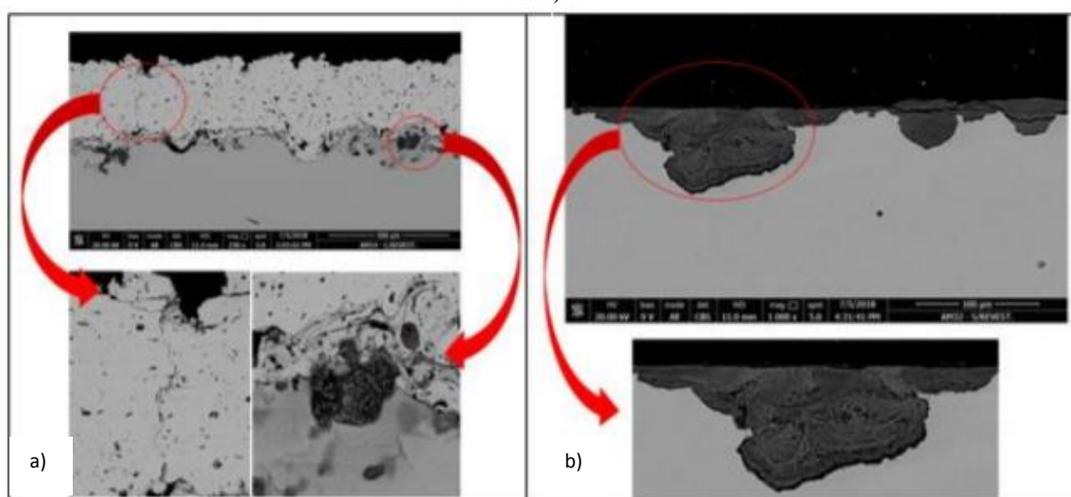


Fonte: Adaptada da APERAM (2018).

Observa-se a presença de camadas (lamelas), poros e alguns vazios, o que é típico em uma estrutura de revestimento aspergido termicamente. Os vazios são caracterizados como espaços entre as lamelas, e os poros são pequenas erupções que ocorrem elas.

A Figura 02 mostra a comparação entre os CP's 14 e 32, com e sem revestimento, submetidos à adição de hidróxido de cálcio a 3%.

Figura 02: Análise por MEV e detalhes micrográficos de corrosão por placa, alveolar e por trinca presente nas amostras submetidas ao solo com  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , ambas a 3%, sendo a) CP 14 (revestida) e b) CP 32 (não revestida).



Fonte: Adaptada da APERAM (2018)

Através da Figura 02, foi possível observar no CP 14 uma trinca vertical em uma parte do revestimento, possibilitando a passagem de umidade e de várias substâncias, principalmente da solução de hidróxido de cálcio e também da água deionizada. Além disso, constatou-se alguns tipos de corrosão como: por placas, alveolar e por trincas. Analisando o CP 32, foi perceptível a presença de corrosão (parte escura) alveolar e por trinca. Comparando-se as imagens “a” e “b”, comprovou-se que a corrosividade foi mais intensa na amostra sem revestimento, confirmando o resultado do cálculo da taxa de corrosão.

#### **4. Conclusão**

Neste trabalho foi possível avaliar o comportamento do aço API 5L X70, quando submetido a solos com valores de pH diferentes.

Foi observado que as amostras com revestimento de óxido de nióbio em meio levemente ácido (que receberam adição de  $H_2SO_4$  nas concentrações de 1,5 e 3%) não apresentaram uma alta taxa de corrosão, o que indica a eficiência do revestimento. Entretanto, as amostras revestidas submersas em solo mais ácido (com adição de  $H_2SO_4$  à 4,5%), apresentaram corrosão mais elevada, demonstrando uma menor proteção do revestimento sobre o aço. Já as amostras revestidas submersas em solo, tratado com o hidróxido de cálcio, apresentaram uma boa resistência ao processo corrosivo, indicado pela baixa taxa de corrosão calculada.

As amostras, sem revestimento onde foi adicionado ácido sulfúrico ao solo, evidenciaram uma corrosão moderada. No entanto, as amostras sem revestimento que receberam adição de  $Ca(OH)_2$ , apresentaram uma alta corrosividade.

Dessa maneira, pode-se afirmar que, de uma forma geral, o revestimento foi eficaz nas condições em que foi submetido, diminuindo a intensidade do processo corrosivo.

#### **Referências**

Alves, A. R.; Coutinho, A. R.(2015). The Evolution of the Niobium Production in Brazil. *Materials Research*, v. 18, n. 1, p. 106-112.

American Society For Testing And Materials - ASTM.(2017). *Standard Practice for*

*Preparing, Designation G1-90/ G1-03, Cleaning, and Evaluation Corrosion Test Specimens, Pennsylvania.*

Associação Brasileira de Normas Técnicas.(1986) ABNT NBR 6457: *Amostras de Solos – Preparação para ensaios de compactação e caracterização.* Rio de Janeiro/RJ.

Associação Brasileira de Normas Técnicas.(1986) ABNT NBR 7348:2017 *Pintura industrial – Preparação de superfície de aço com jateamento abrasivo ou hidrojateamento.* Rio de Janeiro/RJ.

Callister, Jr.(2008). *Ciência, W. D. engenharia dos materiais uma introdução, 7ª edição.* Rio de Janeiro: LTC.

Gentil, V. (2007). *Corrosão.* 3. ed. Rio de Janeiro: LTC.

Mariano, C.; Paredes, R.S.C; Frare JR, A. F.(2007). *Desenvolvimento de Revestimentos de Níobio Resistentes a Elevadas Temperaturas Depositados por Aspersão Térmica.* 4º PDPETRO, Campinas, SP, pp.2.4.0305-1 -2.

Martins, J. I. F. P. A corrosão: a outra perspectiva de abordagem. *Corrosão e Proteção de Materiais*, v. 31, n. 59, 2012.

Metallisation. (2017). An introduction to metal spray for corrosion protection | Applications | Metallisation Ltd. Retirado no dia 17 de novembro, de <https://metallisation.com/applications/an-introduction-to-metal-spray-for-corrosionprotection-application/>

National Association Of Corrosion Engineers – NACE.(1999). NORMA RP-0775. Standard recommended practice, preparation, installation, analysis and interpretation of corrosion coupons in oilfield operations.

**Porcentagem de contribuição de cada autor no manuscrito**

Fernanda Menezes França – 40%

Gustavo Victor Souza – 40%

Fabírcia Nunes de Jesus Guedes – 20%